

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240126009

电子束辐照对板栗发芽的抑制效果及对板栗品质的影响

刘雅慧^{1#}, 杨菁菁^{2#}, 左都文³, 张明鸣², 侯志强³, 方泽坤³, 高美须^{1*}

(1. 中国农业科学院农产品加工研究所, 北京 100193; 2. 广州粒上皇食品有限公司, 广州 510000;
3. 中广核辐照技术有限公司, 南通 226300)

摘 要: **目的** 探究电子束辐照抑制板栗发芽的效果以及对板栗品质的影响。**方法** 以贮藏于(4±2)℃条件下的燕山板栗作为材料, 利用 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.9、1.2 kGy 辐照剂量的电子束进行辐照处理, 测定处理样品的发芽率、呼吸强度、淀粉含量、可溶性糖含量、水分含量、色泽、微生物含量和内腐率。**结果** 0.3 kGy 的辐照剂量能够完全抑制板栗的发芽, 0.3 kGy 及以上辐照剂量能使板栗保持较低的呼吸强度, 延缓淀粉和可溶性糖的降解速度, 对水分含量影响不显著($P \geq 0.05$), 对色泽无不良影响。0.3 kGy 及以上辐照剂量能显著降低板栗外壳的菌落总数, 对板栗内腐有一定的抑制效果。0.6 kGy 及以上辐照剂量能显著降低板栗外壳的霉菌酵母数量。**结论** 0.3 kGy 辐照剂量的电子束辐照可以完全抑制板栗发芽, 延缓板栗降糖, 延长贮藏期, 同时保持板栗的加工品质。

关键词: 板栗; 电子束辐照; 抑芽; 冷藏; 保鲜

Effects of electron beam irradiation on chestnut sprout inhibition and its quality

LIU Ya-Hui^{1#}, YANG Jing-Jing^{2#}, ZUO Du-Wen³, ZHANG Ming-Ming²,
HOU Zhi-Qiang³, FANG Ze-Kun³, GAO Mei-Xu^{1*}

(1. Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China;
2. Guangzhou Mini King Food Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 3. CGN Irradiation Technology Co., Ltd., Nantong
226300, China)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of electron beam irradiation on chestnut sprout inhibition and its quality. **Methods** Yanshan chestnut stored at (4±2)℃ as samples, using electron beam of 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.9 and 1.2 kGy irradiation doses radiation samples to determine its germination rate, respiratory intensity, starch content, soluble sugar content, moisture content, color, microbial content and internal decay rate. **Results** 0.3 kGy irradiation doses can completely suppress the germination of chestnuts. The irradiation dose of 0.3 kGy and above

基金项目: 食品安全国家标准制定修订项目(spaq-2022-13)

Fund: Supported by the Formulation and Revision of the National Food Safety Standards (spaq-2022-13)

#刘雅慧、杨菁菁为共同第一作者

#LIU Ya-Hui and YANG Jing-Jing are Co-first Authors

*通信作者: 高美须, 副研究员, 主要研究方向为食品辐照和食品过敏蛋白。E-mail: meixugao@263.net

*Corresponding author: GAO Mei-Xu, Associate Professor, Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China. E-mail: meixugao@263.net

can keep respiration intensity low, delay the degradation rate of starch and soluble sugar, but have no significant effect on its moisture content($P \geq 0.05$), and have no bad effect on its color. The irradiation dose of 0.3 kGy and above can significantly reduce the total number of colonies of chestnut shell, which has a certain inhibitory effect on chestnut internal decay. The irradiation dose of 0.6 kGy and above can significantly reduce the number of mold and yeast of chestnut shell. **Conclusion** 0.3 kGy irradiation doses of electron beam irradiation can completely suppress the germination of chestnuts, delay the degradation rate of chestnut soluble sugar, prolong the storage period, and maintain the processing quality of chestnut.

KEY WORDS: chestnut; electron beam irradiation; sprout inhibition; refrigeration; preservation

0 引言

板栗广泛分布于东亚、南欧和北美^[1], 又称大栗、栗子等, 其富含淀粉、可溶性糖、酚类物质、氨基酸、蛋白质等多种营养成分和活性物质, 具有较高的营养价值^[2-4]。近 10 年来, 我国板栗产量连续处于稳定增长的状态, 据 2022 年联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)统计, 中国板栗年产量约为 235.3 万 t, 占全球总产量的 83.5%。板栗深受各国人民青睐, 在美国、欧洲和亚洲被广泛消费^[5], 具有重要的经济价值。

板栗每年在 9~10 月份集中收获, 采收后将板栗放入冷库, 可以根据需要灵活控制温度, 以延长保鲜期^[6]。随着我国冷库的普及, 当前我国板栗大规模贮藏在冷库中, 满足了板栗在冬季生产销售的需求。但冷藏只能一定程度延长板栗的休眠期, 并不能起到抑制发芽的效果。在每年的 2~3 月份开始, 冷库中的板栗休眠期解除, 进入萌发状态^[7]。当前阻碍板栗生产的最主要的问题就是休眠期结束后的时间段, 从冷库中取出板栗后进行常温生产, 1~2 d 内就会发生严重的发芽现象。板栗萌芽后其食用品质和商品品质均会下降或消失, 严重影响贮藏期和贮藏效果, 造成大量板栗资源的浪费, 成为我国当前板栗产业发展的瓶颈之一。

已有研究报道显示气调处理^[8]、次氯酸钠处理^[9]、辐照处理^[10-12]等方法对板栗发芽有抑制作用。气调处理如果进行大规模生产, 其设备一次性投资大、工艺复杂, 且相关技术配套和管理程度低^[13]。次氯酸钠处理如果大规模生产, 其处理效率较慢, 并且需要增加污水处理程序, 大大提高生产成本。辐照是一种非热加工技术, 能够在常温或冷藏冷冻条件下处理农产品和食品, 达到抑制发芽^[10-14]、杀虫灭菌^[15]、保持品质^[16-18]等目的。相比以上两种方法, 辐照的抑芽效果更好, 低剂量辐照就可以起到良好的抑制发芽的效果, 并且对农产品品质没有不良影响^[19]。

用于农产品加工的辐照技术主要有两种, 分别为⁶⁰Co- γ 射线辐照技术和电子束辐照技术, 全国用于农产品辐照的⁶⁰Co- γ 射线辐照装置和电子加速器装置超过 200 座^[20]。已有辐照抑制板栗发芽的研究^[10-13]都采用的是⁶⁰Co- γ 射线

辐照技术, 研究结果显示 0.2~0.3 kGy 的⁶⁰Co- γ 射线辐照剂量就能够完全抑制板栗发芽, 并对其品质无不良影响^[21]。近几年我国新建辐照站设备大部分为 10 MeV 电子加速器装置, 有代替⁶⁰Co- γ 射线辐照装置的趋势。电子束辐照便捷, 处理样品速度快, 尤其在实际生产中已经被大规模商业化应用于抑制大蒜发芽^[20], 取得良好效益, 证实电子束辐照技术大规模应用于抑制板栗发芽上是可行的。因此, 电子束辐照技术有望成为抑制板栗发芽并实现商业化应用的一种较好的方法。鉴于此, 本研究探究了电子束辐照抑制板栗发芽的效果及对板栗品质的影响, 确定适宜的辐照剂量, 以期对板栗的质量安全提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

板栗(广州粒上皇食品有限公司); 电子束辐照(中广核辐照技术有限公司苏州基地)。

碘化钾、碘、高氯酸、可溶性淀粉、蒽酮、乙酸乙酯、浓硫酸、蔗糖、胰蛋白胍、酵母浸膏、葡萄糖、琼脂、氯化钠、氯霉素(分析纯, 北京萃峰科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

Digieye 电子眼(英国 Verivide 公司); Spark 多功能微孔板读数仪(瑞士 Tecan 公司); DHG-9070A 电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司); YHB3003 电子天平(精度 0.1 mg, 瑞安市乐祺贸易有限公司); F-950 型便携式乙烯/ O_2 / CO_2 分析仪(美国 Felix 公司); HSX-360 恒温恒湿箱[中仪国科(北京)科技有限公司]; SPX-300 生化培养箱(江苏金坛区西城新瑞仪器厂); SW-CJ-1D 单人单面垂直送风净化工作台(苏州净化设备有限公司); LDZX-75KBS 立式高压蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂); 10 MeV&20 kW 电子加速器(中广核辐照技术有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

广州粒上皇食品有限公司 2022 年 9 月在河北迁西采收的燕山早丰板栗, 48 h 内常温运输至该公司冷库, 将板栗装于双层大麻袋(净重 25 kg/袋)入(4 ± 2)°C 冷库进行冷

藏,直至 2022 年 12 月。2022 年 12 月该公司在冷库将装于双层麻袋的无病虫害的冷藏板栗使用冷链将板栗运往中广核辐照技术有限公司的苏州基地,到达苏州基地 24 h 内进行电子束辐照处理,辐照前,样品暂存于 $(4 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 冷库。

电子束辐照处理:为了达到更好的剂量均匀性,将板栗倒在辐照装置传送带的托盘里,然后将板栗平铺在托盘上由传动装置送至电子扫描窗下进行辐照,实验设计辐照剂量为 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.9 和 1.2 kGy 9 个辐照剂量,并用重铬酸钾剂量计检测标定。

辐照后的样品分装于双层小麻袋(净重 5 kg/袋),在冷库暂存,达到 4°C 左右后,使用冷链将板栗分别运输至广州粒上皇食品有限公司和中国农业科学院农产品加工所,到达后立即 $(4 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 冷藏,直至 2023 年 8 月,贮藏期间期间规律性给麻包装袋打水,以表层麻包装袋湿润不滴水为宜,避免板栗失水。广州粒上皇食品有限公司测定发芽率和内腐率,中国农业科学院农产品加工所测定其余指标。

1.3.2 指标测定

0 kGy 辐照剂量的板栗作为对照组,0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 kGy 辐照剂量的板栗作为辐照组,测定发芽率、呼吸强度、淀粉含量、可溶性糖含量和水分含量。0 kGy 辐照剂量的板栗作为对照组,0.3、0.6、0.9、1.2 kGy 辐照剂量的板栗作为辐照组,测定色泽、微生物指标和内腐率。每组进行 3 次重复处理。

(1)发芽率测定

从 $(4 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 冷库取出 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 kGy 各辐照剂量的板栗 2 kg,装入单层麻袋,保持麻袋外面处于湿润不滴水状态,观察记录常温存放 72 h 后不同辐照剂量板栗的发芽率,2023 年 2、3、4、6 和 8 月各统计一次发芽率,每个处理重复测定 3 次。

(2)呼吸强度测定

2023 年 4 月从 $(4 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 冰箱随机取出 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 kGy 各辐照剂量的板栗 1000 g,装入单层麻袋,保持麻袋外面处于湿润不滴水状态,常温存放 24 h 后,随机取 300 g 板栗于 1.5 L 密闭塑料保鲜盒中,密封时间为 30 min,密封时间截止后使用 CO_2 分析仪测定板栗的呼吸强度,呼吸强度单位用 $\text{mg}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 表示^[22-23],每个处理重复测定 3 次。

将测定完呼吸强度的 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 和 0.6 kGy 辐照剂量的板栗去皮粉碎密封于密封袋后存放于 -20°C 冰箱冷冻,24 h 内进行 2023 年 4 月淀粉含量、可溶性糖含量、水分含量的测定,每个处理重复测定 3 次。

(3)淀粉含量测定

参照张永成等^[24]的碘比色法测定板栗中淀粉含量。

(4)可溶性糖含量

参照曹建康等^[25]的蒽酮比色法测定板栗中可溶性糖

含量。

(5)水分含量

参照 GB/T 5009.3—2016《食品中水分的测定》测定板栗中水分含量。

(6)色泽测定

使用英国 Verivide Digieye 电子眼测量板栗样品的颜色。2022 年 12 月,从 $(4 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 冰箱取大小形态均一的 0、0.3、0.6、0.9 和 1.2 kGy 辐照剂量的板栗样品,校正仪器后,在各辐照剂量的板栗取 5 个有代表性的区域进行色泽测定,每个处理重复测定 3 次。其中, L^* 为亮度值, a^* 为红绿值, b^* 为黄蓝值。

(7)微生物的测定

参照 GB 4789.2—2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》测定菌落总数;参照 GB 4789.15—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》测定霉菌和酵母菌。2022 年 12 月,从 $(4 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 冰箱随机取出 0、0.3、0.6、0.9 和 1.2 kGy 辐照剂量的板栗样品各 25 g,进行菌落总数测定和霉菌和酵母计数。每个处理重复测定 3 次。

(8)内腐率测定

从 $(4 \pm 2)^{\circ}\text{C}$ 冷库随机取出 0、0.3、0.6、0.9 和 1.2 kGy 各辐照剂量板栗 50 粒,装入单层麻袋,保持麻袋外面处于湿润不滴水状态,观察记录常温存放 72 h 后不同辐照剂量的板栗内部的腐烂率,2023 年 2、4、6 和 8 月各统计一次内腐率,每个处理重复测定 3 次。

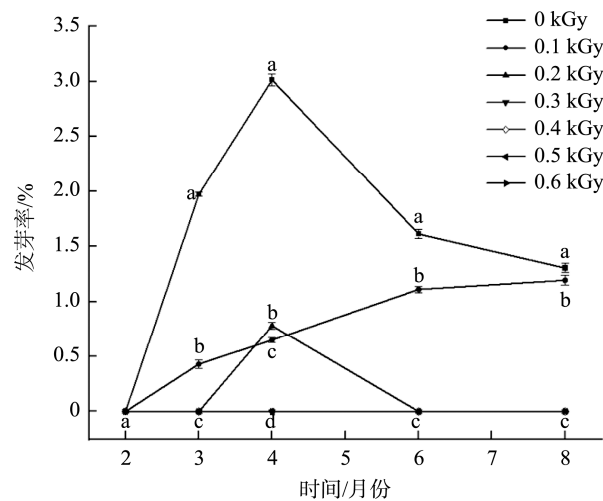
1.4 数据处理

所得数据均为 3 次重复的均值,数据结果表示为平均值 $\pm$ 标准偏差,采用 SPSS 26.0 软件对实验数据进行统计分析,并用 Duncan 多重比较法分析结果之间是否有显著差异, $P < 0.05$ 认为差异显著,并采用 Origin 2021 软件制图。

2 结果与分析

2.1 辐照对板栗发芽率的影响

辐照对板栗常温存放 72 h 发芽率的影响见图 1。由图 1 可知,辐照对板栗发芽具有显著的抑制效果。对照组和辐照组都是从 3 月份开始萌发。对照组从 3 月份开始,各月份都有不同程度的发芽,其中 4 月份发芽最为旺盛,发芽率为 3.01%。0.1 kGy 辐照组从 3 月份开始,各月份也都有不同程度的发芽,并且每个月发芽率都显著低于对照组。0.2 kGy 辐照组,只有 4 月有一定的发芽,3、6 和 8 月都没有发芽,表明 4 月是板栗发芽最为旺盛的阶段。0.3 kGy 及以上剂量的辐照组在各月份全部没有发芽。因此,抑制板栗发芽的最低有效剂量为 0.3 kGy,与已有报道的 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐照剂量一致^[12]。



注: 不同小写字母表示同一测定指标同一时间不同处理组差异显著($P<0.05$), 下同。

图1 辐照对冷藏板栗常温存放72 h发芽率的影响
Fig.1 Effects of irradiation on germination rate of refrigerated chestnuts stored at room temperature for 72 h

2.2 辐照对板栗呼吸强度的影响

辐照能够抑制板栗发芽的原因可能是辐照抑制了板栗的呼吸强度。呼吸强度的强弱标志着生理状态的旺盛和衰弱^[26], 在4月份, 由于气温的升高和自身营养物质充足, 板栗呼吸强度处于最旺盛的阶段。于是4月测定各辐照剂量板栗的呼吸强度, 能更好地将对照组与辐照组的呼吸强度进行对比。图2显示, 在0~0.3 kGy 辐照剂量范围内, 随着辐照剂量的增加, 板栗的呼吸强度显著降低($P<0.05$), 0.3~0.6 kGy 辐照组板栗的呼吸强度基本不变, 0.3 kGy 及以上辐照剂量能使板栗保持较低的呼吸强度。可见, 4月板栗呼吸强度的变化趋势与其发芽率的变化趋势一致。辐照对板栗的呼吸强度起着显著的抑制作用, 且适当剂量范围内, 辐照剂量越高, 抑制作用越强, 这与辐照对被抑制发

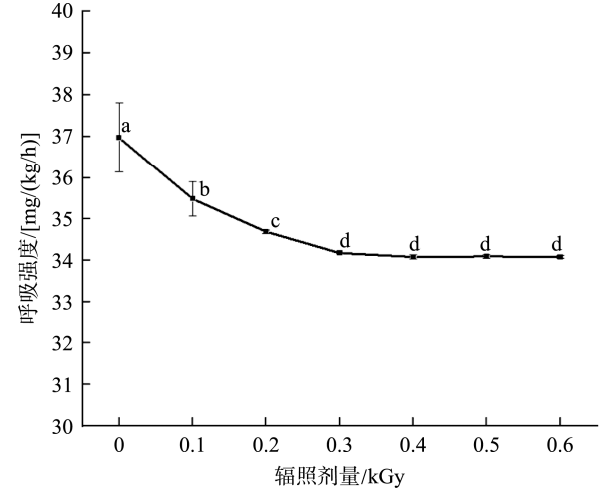


图2 辐照对冷藏板栗4月份常温存放24 h呼吸强度的影响

Fig.2 Effects of irradiation on respiratory intensity of refrigerated chestnuts stored at room temperature for 24 h in April

芽核桃的^[27-28]呼吸强度的影响相似。因此, 辐照由于降低板栗的呼吸强度, 导致 0.3~0.6 kGy 辐照组板栗不再发芽。

2.3 辐照对板栗淀粉含量的影响

淀粉是板栗的主要营养成分^[29], 其含量的高低直接影响板栗的品质。在贮藏过程中, 淀粉持续经过淀粉酶的水解转化为糖, 为板栗的正常生命活动提供能量, 其含量在贮藏期间不断下降。为了更好地保持板栗品质, 减缓淀粉含量的下降速度尤为重要。

由表1可知, 在4月份, 对照组淀粉含量为20.04%, 0.1~0.3 kGy 辐照组淀粉含量随着辐照剂量的增加而升高, 0.3~0.6 kGy 辐照组淀粉含量随着辐照剂量的增加不再发生显著变化。随着辐照剂量的增大, 淀粉含量的变化趋势与发芽率、呼吸强度的变化趋势呈负相关。0.1~0.3 kGy 辐照组, 随着剂量的增加, 发芽率随之降低, 呼吸强度随之降低, 淀粉含量随之升高。0.3~0.6 kGy 辐照组, 随着剂量的增加, 板栗不再发芽, 呼吸强度变化不显著, 淀粉含量也不再发生显著变化, 淀粉含量保持较高的状态。可见, 辐照处理抑制了发芽进程, 降低了呼吸强度, 从而减慢了淀粉的降解速度, 经辐照处理的板栗保存效果更好。钴源辐照板栗的研究中也显示贮藏后期辐照组板栗的淀粉保存率更高^[30]。

2.4 辐照对板栗可溶性糖含量的影响

糖是板栗重要的储能物质、甜味的主要来源和呼吸作用的主要底物。可溶性糖含量与板栗品质直接相关, 为了板栗产品的质量, 在生产中当可溶性糖含量达到标准才能出库进行生产销售, 可见可溶性糖是板栗的重要指标。

表1结果显示, 在4月份, 对照组可溶性糖含量为21.19%, 0.3~0.6 kGy 辐照组可溶性糖含量在25.54%~25.71%, 可溶性糖含量发生了明显的升高。这表明0.3~0.6 kGy 辐照组比对照组可溶性糖含量更高。因此, 辐照可以抑制板栗发芽, 降低呼吸强度, 导致减少了糖的消耗, 延缓了板栗的降糖速度, 使得板栗更甜, 从而延长板栗的货架期, 减少板栗可溶性糖含量的损失。

表 1 辐照对冷藏板栗 4 月份常温存放 24 h 营养品质的影响			
Table 1 Effects of irradiation on the nutritional quality of refrigerated chestnut stored at room temperature for 24 h in April			
辐照剂量 /kGy	淀粉含量 /%	可溶性糖含量 /%	水分含量 /%
0	20.04±0.07 ^d	21.19±0.17 ^d	44.35±0.23 ^a
0.1	20.77±0.17 ^c	23.55±0.33 ^c	44.32±0.36 ^a
0.2	21.13±0.27 ^b	24.91±0.20 ^b	44.48±0.02 ^a
0.3	21.60±0.05 ^a	25.54±0.30 ^a	44.75±0.16 ^a
0.4	21.59±0.07 ^a	25.71±0.19 ^a	44.57±0.37 ^a
0.5	21.62±0.10 ^a	25.59±0.21 ^a	44.41±0.35 ^a
0.6	21.62±0.10 ^a	25.60±0.21 ^a	44.70±0.36 ^a

注: 不同肩标小写字母表示同一指标不同辐照剂量之间的差异显著($P<0.05$), 下同。

2.5 辐照对板栗水分含量的影响

水分含量与贮藏过程中食品的生化反应密切相关^[31]。板栗适宜的含水量是保持新鲜度的主要因素,贮藏期间含水量过高易导致板栗霉烂变质,但若失水后则引起板栗外壳变浅变红,板栗仁皱缩,导致商品价值和食用价值降低,所以,水分含量是板栗保鲜的重要指标之一。

由表 1 知,对照组与辐照组的水分含量基本一致,与辐照对柑橘的水分含量无显著影响^[31]的结论一致,因此,辐照对板栗水分含量的影响不显著。

2.6 辐照对板栗外壳色泽的影响

辐照后发现,辐照剂量 ≥ 0.9 kGy 辐照组板栗外壳与对照组相比有变红的现象,考虑到色泽是板栗商品性的敏感指标,辐照后立即使用电子眼对样品进行测定,结果见表 2。

板栗外壳 L^* 随着辐照剂量的增加呈波浪式变化,与对照相比差异均不显著,辐照剂量 ≥ 0.9 kGy 辐照组 L^* 较对照组略微增大,即明度增加,样品有变浅变白的趋势; b^* 相对稳定,辐照剂量 ≥ 0.9 kGy 辐照组较对照组 b^* 略微增加,但并不显著; a^* 随着辐照剂量增加而增大,尤其是 0.9 kGy 和 1.2 kGy 辐照组板栗,与对照组相比显著增大, a^* 是红绿值, a^* 变大,代表颜色变红,表明随辐照剂量的增加,样品有明显变红的趋势,证实了观察到的变红现象。

板栗风干失水后外壳也会变浅变红,影响板栗的销售。与风干失水板栗对比,辐照板栗变浅变红的程度微乎其微,不会与风干板栗混淆,因此认为辐照后板栗变红对生产销售并没有产生不良的影响。

表 2 辐照对冷藏板栗色泽的影响

Table 2 Effects of irradiation on the color of refrigerated chestnuts

辐照剂量/kGy	L^*	a^*	b^*
0	30.36 $\pm$ 0.83 ^a	7.97 $\pm$ 1.10 ^b	10.73 $\pm$ 0.93 ^a
0.3	30.38 $\pm$ 0.16 ^a	7.55 $\pm$ 1.09 ^b	10.54 $\pm$ 1.89 ^a
0.6	29.83 $\pm$ 0.04 ^a	8.04 $\pm$ 1.28 ^b	10.98 $\pm$ 1.25 ^a
0.9	31.87 $\pm$ 2.53 ^a	10.68 $\pm$ 0.56 ^a	12.71 $\pm$ 2.74 ^a
1.2	32.30 $\pm$ 0.81 ^a	11.12 $\pm$ 1.23 ^a	13.34 $\pm$ 0.53 ^a

2.7 辐照对板栗微生物和内腐率的影响

辐照处理的杀菌效果明显^[19]。对板栗外壳的微生物含量的检测结果见图 3, 0.3 kGy 及以上辐照剂量显著降低了板栗外壳的菌落总数, 0.6 kGy 及以上辐照剂量显著降低了板栗外壳的霉菌酵母数量。表明, 低剂量辐照对板栗外壳也有显著的灭菌效果。

内腐是板栗免疫力下降和微生物侵染双向作用下产生的。图 4 中, 在 6 月和 8 月的实验结果都显示, 0.3 kGy 及以上辐照剂量对内腐率有一定抑制效果。

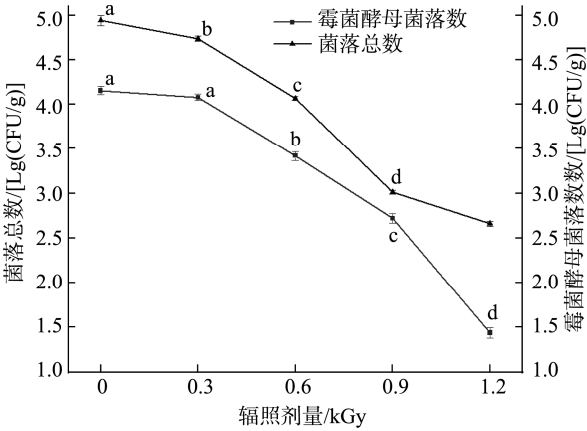


图3 辐照对冷藏板栗微生物含量的影响

Fig.3 Effects of irradiation on microbial content of refrigerated chestnut

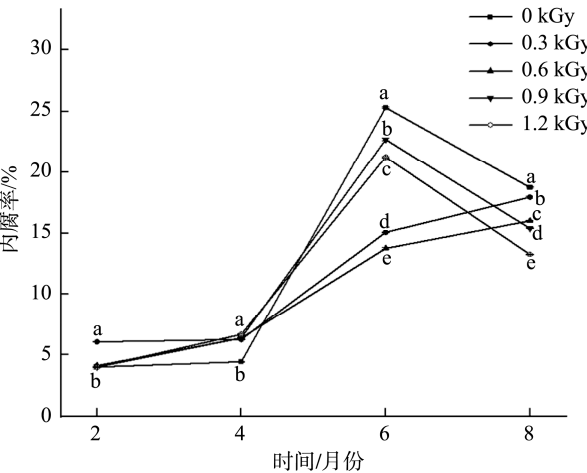


图4 辐照对冷藏板栗内腐率的影响

Fig.4 Effects of irradiation on internal decay rate of refrigerated chestnut

3 讨论与结论

辐照对板栗发芽有抑制效果早就有报道, 蒋玉琴等^[10]研究发现 0.2 kGy $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线辐照剂量能使板栗贮藏 3 个月内不发芽, 张建伟等^[11]研究发现 0.25 kGy $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线辐照剂量能有效抑制板栗发芽, 刘超等^[12]研究发现 0.3 kGy $^{60}\text{Co-}\gamma$ 射线辐照剂量能使包装于聚乙烯袋板栗在冷库贮藏 7 个月不发芽。本研究与上述研究的辐照剂量基本一致, 本研究数据显示 0.3 kGy 及以上辐照剂量能完全抑制板栗发芽, 直至第二年的 8 月, 从而可满足全年向市场供应板栗的需求。因此, 确定抑制板栗发芽的最低有效电子束辐照剂量为 0.3 kGy。

可溶性糖含量是判定板栗品质高低的重要指标。研究结果表明, 在贮藏期间, 辐照组的可溶性糖含量明显高于对照组, 在 0~0.3 kGy 辐照剂量范围内, 随着剂量的增加,

可溶性糖含量显著增加,辐照剂量 ≥ 0.3 kGy 的辐照组可溶性糖含量不再发生显著变化,可溶性糖含量稳定地处于较高的状态。各剂量之间的可溶性糖含量变化趋势与发芽率变化趋势正相反,在 0~0.3 kGy 辐照剂量范围内,随着辐照剂量的增加,发芽率显著降低,辐照剂量 ≥ 0.3 kGy 的辐照组的板栗发芽率为 0。张玥等^[32]研究发现,电子束辐照处理地冷藏板栗还原糖含量比对照组高,刘超等^[30]发现冷藏 8 个月后,0.5 kGy 辐照剂量的板栗发芽率为 0,其总糖含量高于对照组 5.8%,两个研究结果与本研究一致。因此,说明辐照可以延缓板栗降糖,且板栗可溶性糖延缓降解与辐照抑制板栗发芽有关。相比于发芽板栗,不发芽板栗能量消耗少,从而达到延缓降糖的效果。综上所述,辐照剂量 ≥ 0.3 kGy 的辐照剂量对板栗可以起到延缓降糖的作用,提高贮藏期板栗的品质。

除了发芽率和可溶性糖含量的研究,经过对呼吸强度、淀粉含量、水分含量、色泽、微生物含量和内腐率等指标的研究发现辐照抑制了板栗呼吸强度,延缓了淀粉降解,对水分含量和色泽无不良影响,显著降低板栗外壳的菌落总数和霉菌酵母数量,对板栗内腐也有一定的抑制效果。

本研究探究了电子束辐照对板栗发芽的抑制效果,确定 0.3 kGy 的辐照剂量可以完全抑制板栗发芽,延缓降糖,同时可以很好的保持板栗的品质。电子束辐照处理产品效率高,将电子束辐照应用于板栗产业,可满足板栗企业产品处理量需求,优化板栗加工工艺和贮藏工艺,促进板栗产业发展。为进一步优化板栗辐照加工工艺,今后应注重辐照板栗最佳时间和辐照抑制板栗发芽的机制探究,以促进电子束辐照在板栗产业以及食品工业中更好地发挥其优势作用和应用价值。

参考文献

- [1] MASSANTINI R, MOSCETTI R, FRANGIPANE MT. Evaluating progress of chestnut quality: A review of recent developments [J]. Trends Food Sci Technol, 2021, 113: 245–254.
- [2] LI R, SHARMA AK, ZHU J, *et al.* Nutritional biology of chestnuts: A perspective review [J]. Food Chem, 2022, 395: 133575.
- [3] LUCAS-GONZALEZ R, ROLDAN-VERDU A, SAYAS-BARBERA E, *et al.* Assessment of emulsion gels formulated with chestnut (*Castanea sativa* M.) flour and chia (*Salvia hispanica* L.) oil as partial fat replacers in pork burger formulation [J]. J Sci Food Agric, 2020, 100(3): 1265–1273.
- [4] LEE ES, SONG EJ, NAM YD, *et al.* Effects of enzymatically modified chestnut starch on the gut microbiome, microbial metabolome, and transcriptome of diet-induced obese mice [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 145: 235–243.
- [5] KAN L, LI Q, XIE S, *et al.* Effect of thermal processing on the physicochemical properties of chestnut starch and textural profile of chestnut kernel [J]. Carbohydr Polym, 2016, 151: 614–623.
- [6] 闫格. 板栗低温贮藏条件的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.
YAN G. Study on low temperature storage conditions of chestnut [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2018.
- [7] 王彦祥. γ 射线辐照对板栗贮藏及生理生化特性的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
WANG YX. Influence of γ -irradiation treatment on storage and the physiological and biochemical characteristics of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* blume) [D]. Nanning: Guangxi University, 2012.
- [8] 梁丽松, 王贵禧. 高 CO_2 和纯 N_2 冲击处理对板栗货架期萌芽及激素含量变化的影响[J]. 林业科学研究, 2006, (6): 734–739.
LANG LS, WANG GX. Effect of high CO_2 and N_2 shock treatment on the sprouting and hormone content of Chinese chestnut (*Castanea mollissima* blume) during shelf-life [J]. Fore Res, 2006, (6): 734–739.
- [9] 梁丽松, 王贵禧. 次氯酸钠处理对板栗货架期萌芽与激素含量变化的影响[J]. 林业科学, 2008, (6): 79–84.
LANG LS, WANG GX. Effects of sodium hypochlorite solution dipping of Chinese chestnut (*Castanea mollissima*) on its germination and hormone contents during shelf-life [J]. Sci Silvae Sinicae, 2008, (6): 79–84.
- [10] 蒋玉琴, 朱佳廷, 李荣林, 等. 辐照板栗保鲜技术研究[J]. 核农学报, 2000, (2): 85–87.
JIANG YQ, ZHU JT, LI RL, *et al.* Comprehensive preservation of Chinese chestnut [J]. J Nucl Agric Sci, 2000, (2): 85–87.
- [11] 张建伟, 陈云堂, 杨保安, 等. ^{60}Co 射线辐照对板栗果影响效应的研究[J]. 食品科学, 2002, (9): 108–112.
ZHANG JW, CHEN YT, YANG BAN, *et al.* Study on the effect of ^{60}Co radiation on chestnut fruit [J]. Food Sci, 2002, (9): 108–112.
- [12] 刘超, 王宏, 汪晓鸣. 板栗辐照冷藏保鲜技术研究[J]. 安徽农业科学, 2004, (6): 1213–1214.
LIU C, WANG H, WANG XM. Research on the irradiation and low temperature storage technique of Chinese chestnut [J]. J Anhui Agric Sci, 2004, (6): 1213–1214.
- [13] 许凌云, 杨倩, 高磊, 等. 板栗贮藏保鲜方法研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(7): 337–344.
XU LY, YANG Q, GAO L, *et al.* Research progress on preservation of chestnut during storage [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(7): 337–344.
- [14] LIU H, LI H, YANG G, *et al.* Mechanism of early germination inhibition of fresh walnuts (*Juglans regia*) with gamma radiation uncovered by transcriptomic profiling of embryos during storage [J]. Postharvest Biol Technol, 2021, 172: 111380.
- [15] MUNIR MT, FEDERIGHI M. Control of foodborne biological hazards by ionizing radiations [J]. Foods, 2020, 9(7): 878.
- [16] MANKAI M, BARKAOUI S, BEN MN, *et al.* Electron-beam irradiation effect on the microbiological, physicochemical, and sensory parameters of refrigerated raspberries [J]. J Food Process Preserv, 2021, 45(10): e15828.
- [17] 何凯锋, 陈秀金, 臧鹏, 等. 辐照杀菌技术对食品品质的影响及控制研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(10): 299–305.
HE KF, CHEN XJ, ZANG P, *et al.* Research progress on the effect of irradiation sterilization on food quality and its control [J]. Food Ferment Ind, 2023, 49(10): 299–305.
- [18] 赵志雅, 左都文, 李乐, 等. 电子束辐照对新疆干果品质的影响及其最高耐受剂量的确定[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(10): 270–277.
ZHAO ZY, ZUO DW, LI L, *et al.* Effects of electron beam irradiation on quality of Xinjiang dried fruit and determination of its maximum tolerated dose [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(10): 270–277.

- [19] YANG J, PAN M, HAN R, *et al.* Food irradiation: An emerging processing technology to improve the quality and safety of foods [J]. Food Rev Int, 2023, 101: 1–23.
- [20] 郭丽莉. 中国核技术应用产业年鉴[M]. 北京: 中国标准出版社, 2023. GUO LL. Yearbook of China's nuclear technology application industry [M]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [21] ANTONIO AL, CAROCHO M, BENTO A, *et al.* Effects of gamma radiation on the biological, physico-chemical, nutritional and antioxidant parameters of chestnuts: A review [J]. Food Chem Toxicol, 2012, 50(9): 3234–3242.
- [22] ZHAO Y, ZHU X, HOU Y, *et al.* Postharvest nitric oxide treatment delays the senescence of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during cold storage by regulating reactive oxygen species metabolism [J]. Sci Hortic, 2020, 261: 109009.
- [23] DU M, JIA X, LI J, *et al.* Regulation effects of 1-MCP combined with flow microcirculation of sterilizing medium on peach shelf quality [J]. Sci Hortic, 2020, 260: 108867.
- [24] 张永成, 田丰. 马铃薯试验研究方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007. ZHANG YC, TIAN F. Methods for potato experiments [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technol Press, 2007.
- [25] 曹建康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007. CAO JK, JIANG WB, ZHAO YM. Guidance for postharvest physiological and biochemical tests of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007.
- [26] LU Q, YANG D, XUE S. Effects of postharvest gamma irradiation on quality maintenance of Cara navel orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) during storage [J]. LWT-Food Sci Technol, 2023, 184: 115017.
- [27] 马艳萍, 王国梁, 刘兴华, 等. $^{60}\text{Co}\gamma$ 射线辐照对鲜食核桃萌芽及相关生理指标的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30(10): 2034–2039. MA YP, WANG GL, LIU XH, *et al.* Germination and sprouting physiology of fresh walnut irradiated by $^{60}\text{Co}\gamma$ ray [J]. Acta Bot Boreal Occidentalia Sin, 2010, 30(10): 2034–2039.
- [28] HU H, JING N, PENG Y, *et al.* $^{60}\text{Co}\gamma$ -ray irradiation inhibits germination of fresh walnuts by modulating respiratory metabolism and reducing energy status during storage [J]. Postharvest Biol Technol, 2021, 182: 111694.
- [29] HAO H, LI Q, BAO W, *et al.* Relationship between physicochemical characteristics and *in vitro* digestibility of chestnut (*Castanea mollissima*) starch [J]. Sci Hortic, 2018, 84: 193–199.
- [30] 刘超, 汪晓鸣, 张福生. 辐照对板栗冷藏后期生理的影响[J]. 核农学报, 2007, (3): 281–282. LIU C, WANG XM, ZHANG FS. Effects of irradiation on physiology of chestnut under cold storage [J]. J Nucl Agric Sci, 2007, (3): 281–282.
- [31] NAM HA, RAMAKRISHNAN SR, KWON JH. Effects of electron-beam irradiation on the quality characteristics of mandarin oranges [*Citrus unshiu* (Swingle) Marcov] during storage [J]. Food Chem, 2019, 286: 338–345.
- [32] 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 JQ, *et al.* Storage effects of different doses of electron beam irradiation on fresh Chinese chestnut [J]. Storage Process, 2016, 16(4): 56–60.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)

作者简介



刘雅慧, 硕士研究生, 主要研究方向为食品辐照。
E-mail: liuyahui989899@163.com



杨菁菁, 硕士, 初级工程师, 主要研究方向为食品保鲜与加工技术应用。
E-mail: yangjingjing@lishanghuang.com



高美须, 副研究员, 主要研究方向为食品辐照和食品过敏蛋白。
E-mail: meixugao@263.net