

电子束辐照对通芯白莲杀虫防霉效果及营养成分的影响

胡俊羽¹ 齐慧² 武小芬² 陈亮² 龙世平² 周毅吉²
莫默² 周慧平³ 王克勤² 刘素纯¹

¹(湖南农业大学食品科学技术学院 长沙 410128)

²(湖南省农业科学院/湖南省核农业与中药材研究所 长沙 410125)

³(长沙海关技术中心 长沙 410004)

摘要 为了探究电子束辐照对通芯白莲(以下简称“莲子”)微生物、虫害和营养成分的影响,本研究采用不同剂量的电子束(0 kGy、0.4 kGy、1 kGy、2 kGy、4 kGy、6 kGy)对莲子进行辐照处理。结果表明,0.4 kGy辐照处理能够有效抑制莲子中的虫卵孵化,且米象成虫在处理72 h内死亡率达到100%。莲子中菌落总数和霉菌数量随吸收剂量的升高显著降低,经0.4 kGy辐照处理后,0 d检测两者均降至20 CFU/g;2 kGy辐照处理后贮藏180 d,菌落总数与霉菌数量均低于100 CFU/g。0~6 kGy吸收剂量范围对莲子中水分、灰分、粗蛋白、粗纤维、直链淀粉含量均无显著影响,辐照处理后粗脂肪含量明显降低,支链淀粉则呈先升后降趋势。本研究为电子束辐照技术在莲子储藏中防治虫害与霉变的应用提供了科学依据。

关键词 电子束辐照,通芯白莲,杀虫,霉菌,营养成分

中图分类号 TS205, TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0101

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0101

引用该文:

胡俊羽,齐慧,武小芬,等.电子束辐照对通芯白莲杀虫防霉效果及营养成分的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报,2026,44(1):010401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0101.

HU Junyu, QI Hui, WU Xiaofen, *et al.* Effect of electron beam irradiation on pest control, mold prevention, and quality of lotus seeds[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2026, 44(1): 010401. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0101.



基金资助:湘潭县湘莲国家现代农业产业园项目和国家标准修订项目(20233477-T-326)

第一作者:胡俊羽,男,1996年9月出生,现为湖南农业大学食品加工与安全专业研究生

通信作者:刘素纯,教授, E-mail: liusuchun@163.com; 王克勤,研究员, E-mail: wkq6412@163.com

收稿日期:初稿 2025-10-17; 修回 2025-12-01

Supported by The National Modern Agricultural Industrial Park Project for Xianglian in Xiangtan County and the National Standard-Revision Project (20233477-T-326)

First author: HU Junyu (male) was born in September 1996. Now he is a graduate student at Hunan Agricultural University, majoring in food processing and safety

Corresponding author: LIU Suchun, professor, E-mail: liusuchun@163.com; WANG Keqin, professor, E-mail: wkq6412@163.com

Received 17 October 2025; accepted 01 December 2025

Effect of electron beam irradiation on pest control, mold prevention, and quality of lotus seeds

HU Junyu¹ QI Hui² WU Xiaofen² CHEN Liang² LONG Shiping² ZHOU Yiji² MO Mo²
ZHOU Huiping³ WANG Keqin² LIU Suchun¹

¹(College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China)

²(Hunan Academy of Agricultural Sciences / Hunan Institute of Nuclear Agriculture and Chinese Medicinal Materials, Changsha 410125, China)

³(Changsha Customs Technology Center, Changsha 410004, China)

ABSTRACT To investigate the effects of electron beam irradiation on microorganisms, insect pests, and nutritional components in lotus seeds (also known as lotus kernels), samples were irradiated at doses of 0 kGy, 0.4 kGy, 1 kGy, 2 kGy, 4 kGy, and 6 kGy. The results demonstrated that irradiation at 0.4 kGy effectively inhibited insect egg hatching in lotus seeds, resulting in 100% mortality of adult rice weevils within 72 h post-treatment. Total bacterial and mold counts significantly decreased with increasing absorbed doses. Immediately after irradiation at 0.4 kGy, both counts dropped to 20 CFU/g. Following 180-day of storage after a 2 kGy irradiation, these values remained below 100 CFU/g. Absorbed doses ranging from 0 kGy to 6 kGy had no significant impact on moisture, ash, crude protein, crude fiber, or amylose content in lotus seeds. However, crude fat content decreased significantly after irradiation, while amylopectin content showed an initial increase followed by a decline. This study provides scientific support for the application of electron beam irradiation technology in controlling insect infestation and mold growth during lotus seed storage.

KEYWORDS Electron beam irradiation, White lotus, Pest control, Mold, Nutritional ingredient

CLC TS205, TL99

莲子(Lotus seed)为莲科莲属植物莲的成熟种子^[1], 主要分布于湖北、福建、浙江、湖南等地区, 2023年全国莲子年产量达 2×10^8 kg。莲子作为我国传统出口产品, 富含蛋白质、碳水化合物、维生素、莲子碱等营养成分, 具有补脾止泻、益肾涩精、养心安神的功效, 深受国内外消费者的喜爱^[2]。鲜莲子因水分含量高不宜长期贮藏, 除鲜食外, 大部分通过干燥加工为干莲子。然而, 干燥后的莲子在贮藏过程中, 易因吸湿受潮而出现虫蛀及霉变问题^[3], 给其品质和安全带来挑战。目前, 常见的是通过磷化铝^[4]、甲基嘧啶磷^[5]、硫酰氟^[6]等化学杀虫剂进行熏蒸, 破坏害虫的正常生理机能和结构, 从而达到杀虫目的。然而, 化学杀虫剂存在安全隐患, 长期使用还会使害虫产生抗药性, 降低防治效果^[7]。

近年来, 辐照技术在农产品虫害防治方面取得了显著进展^[8]。黄曼等^[9]研究表明, 0.3 kGy和0.6 kGy的电子束辐照能够有效防治储粮害虫, 其中0.3 kGy剂量辐照处理后米象、谷蠹、赤拟谷盗等3种害虫在4~5周内致死率达100%。李淑荣

等^[10-11]的研究显示, 吸收剂量0.09 kGy可以阻止幼虫和卵羽化后的成虫繁殖, 0.18 kGy可以阻止玉米象成虫繁殖后代, 0.518 kGy剂量下赤拟谷盗成虫4周死亡率达到100%。研究还发现, 辐照可以有效杀灭板栗中的害虫和微生物^[12], 且与真空包装、低温冷藏等联用时效果更好^[13]。因此, 本研究以莲子为研究对象, 探究电子束辐照处理(0~6 kGy)对莲子虫害防治、菌落总数和大肠菌群的杀灭效果及其理化指标的影响, 以期为莲子辐照杀虫防霉提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 通芯白莲

通芯白莲(简称“莲子”), 由湘潭远航莲业有限公司提供, 选择当年生产未经熏蒸处理的样品。

1.1.2 试剂

碘化钾、碘: 上海麦克林生化科技股份有限公司; 氢氧化钠、石油醚、无水乙醇、氯化钠、

硫酸钾、氢氧化钾：国药集团化学试剂有限公司；孟加拉红(虎红)培养基、营养琼脂、结晶紫中性红胆盐琼脂培养基：广东环凯微生物科技有限公司；冰乙酸：天津市化学试剂研究所；马铃薯直链淀粉标准溶液、马铃薯支链淀粉标准溶液：河南标准物质研发中心；无水硫酸铜：广州市金华大化学试剂有限公司；硫酸：成都市科隆化学品有限公司；乙醚：公私合营延安油脂化工厂。

1.2 仪器与设备

10 MeV 电子加速器：中广核达胜加速器技术有限公司；电热恒温水浴锅、高速万能粉碎机：北京市永光明医疗仪器有限公司；电热鼓风干燥箱：上海博讯实业有限公司医疗设备厂；紫外可见分光光度计：北京莱伯泰科仪器股份有限公司；压力蒸汽灭菌锅：上海博讯医疗生物仪器股份有限公司；HWS-250 恒温恒湿培养箱：上海森信实验仪器有限公司；XH-C 旋涡混合器：江苏金怡仪器科技有限公司；电子天平：赛多利斯科学仪器(北京)有限公司。

1.3 方法

1.3.1 辐照杀虫与样品处理

莲子辐照处理：将包装好的莲子均匀平铺于传送带上，采用 10 MeV 电子加速器对其进行辐照处理。设定吸收剂量为 0.4 kGy、1 kGy、2 kGy、4 kGy、6 kGy，每个样品做 3 个重复，0 kGy 为未经辐照处理组，设为对照组，每组重复 3 次。辐照处理后 0 d 和 180 d 进行微生物指标测定，1 个月内完成理化指标检测。经重铬酸银和重铬酸钾剂量计测定样品的实际吸收剂量分别为 0.443 kGy、1.1 kGy、1.9 kGy、3.8 kGy、6.1 kGy，下文均以设定剂量表示。

米象辐照处理：收集莲子中的虫卵，在长沙海关技术中心进行繁殖和培养，获得一批虫龄一致的成虫，装入养虫管，每管 40~50 只，并加入经 6 kGy 辐照处理的莲子颗粒作为饵料，设定和实测辐照吸收剂量同莲子。辐照处理后 1 h、24 h、48 h 和 72 h 观察存活的虫子数量，计算致死率。

虫卵辐照处理：收集莲子中的虫卵装入养虫管中，每管 5.0 g，加入 6 kGy 辐照处理的莲子颗粒作为饵料，设定和实测辐照吸收剂量同米象。观察辐照处理后不同时期虫卵孵化数。

1.3.2 理化指标的测定

水分含量测定参照 GB 5009.3—2016^[14]；灰分含量测定参照 GB/T 5009.4—2016^[15]；蛋白质含量测定参照 GB/T 5009.5—2016^[16]；粗脂肪含量测定参照 GB/T 5009.6—2016^[17]；淀粉含量测定参照 GB/T 5009.9—2023^[18]；直链淀粉含量测定参照 GB/T 15683—2025^[19]；支链淀粉测定参考 DB32/T 2265—2012^[20]；粗纤维测定参照 GB/T 5009.10—2003^[21]。

1.3.3 微生物指标的测定

菌落总数测定参照 GB 4789.2—2022^[22]；霉菌总数测定参照 GB 4789.15—2016^[23]。

1.4 数据处理

采用 Origin 2018 软件作图，采用 Excel 软件进行数据处理，采用 SPSS Statistics 19 软件进行单因素方差分析、显著性分析， $p < 0.05$ 表示差异显著。

2 结果与讨论

2.1 电子束辐照处理对莲子的杀虫效果

不同吸收剂量(0~6 kGy)电子束辐照处理对对象的杀灭效果见图 1。从图 1 分析可知，随着吸收剂量的增加，处理后 1 h 米象致死率呈逐渐上升趋势，其中，0.4 kGy 处理后致死率为 77.19%，2 kGy 处理后达到 100%。0.4~1 kGy 辐照处理后米象随培养时间延长，致死率持续升高，均在 72 h 内死亡率达到 100%。Cleghorn 等^[24]研究发现，0.8 kGy 电子束辐照处理硬质小麦，其中米象在 3 周内全部死亡。黄曼等^[9]的研究结果显示，0.6 kGy 电子束辐照处理后小麦中的米象 5 d 内死亡率达到 100%。这些研究结果均表明电子束辐照是一种高效、可靠的仓储害虫防治手段。

在储粮害虫防治中，控制虫卵孵化率是关键环节。图 2 显示，未处理组(0 kGy)莲子中的虫卵主要孵化为米象和印度谷螟，赤拟谷盗极少，电子束辐照处理(0.4~6 kGy)对莲子中虫卵孵化具有显著抑制效果，由表 1 可知，0.4 kGy 辐照处理后无虫卵孵化为成虫。李淑荣等^[11]和黄曼等^[9]的研究表明，0.21 kGy 剂量即可完全抑制赤拟谷盗虫卵的孵化，当 0.3 kGy 剂量电子束辐照时，第 2 天赤拟谷盗成虫数量由 15 只显著降低至 3 只，而米象成虫数量维持不变，由此可见，赤拟谷盗对电子束辐照的敏感性高于米象。范家霖等^[25]研究证实，0.4 kGy 剂量可使印度谷螟虫卵失去孵化能力。

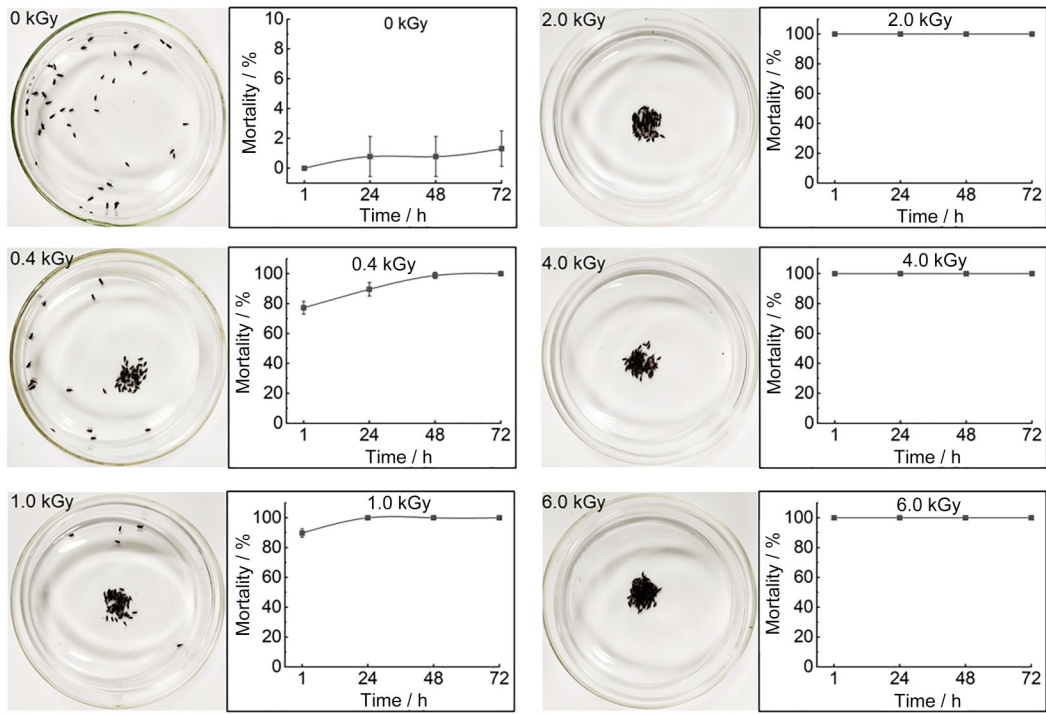


图1 不同吸收剂量电子束辐照对米象的杀灭效果
 Fig.1 The mortality of different absorbed dose electron beam irradiation on rice weevils

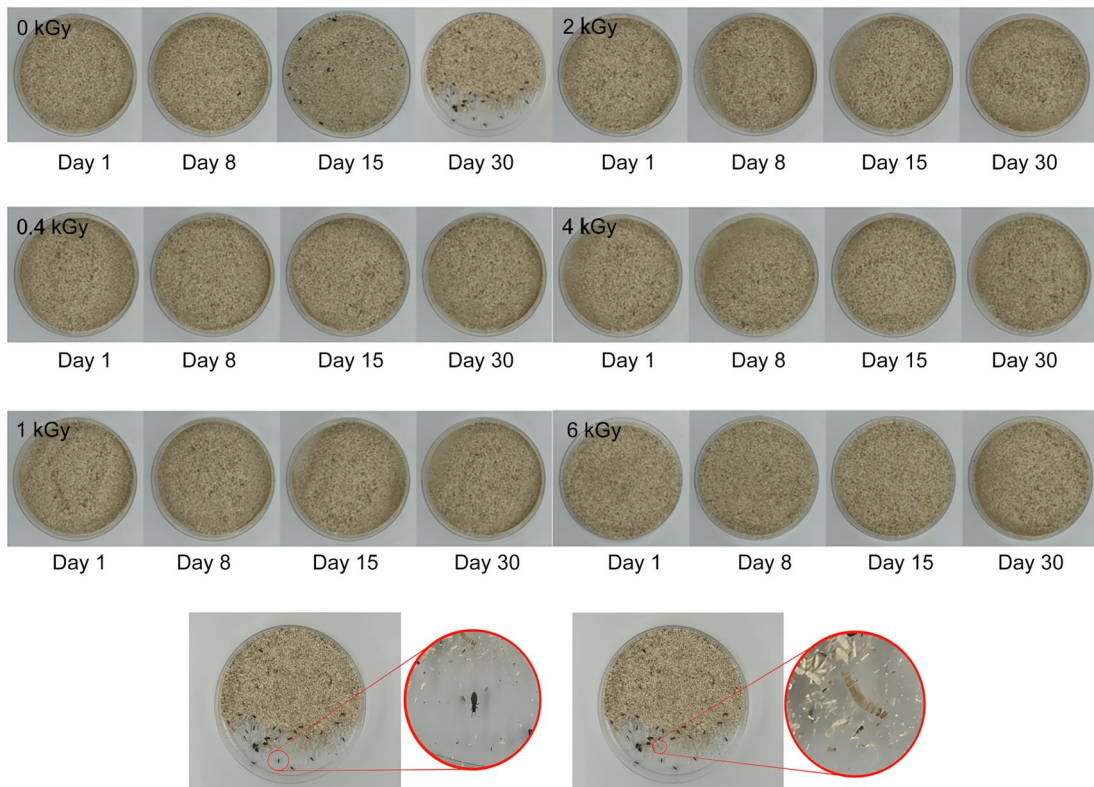


图2 电子束辐照莲子虫卵孵化情况
 Fig.2 The hatching situation of lotus seed insect eggs at different absorbed dose electron beam irradiation

表1 不同吸收剂量电子束辐照处理莲子粉贮藏期间虫数的变化

Table 1 Changes in the number of insects during storage of lotus seed powder treated with different absorbed doses of electron beam irradiation

贮藏时间 / d Storage period	虫数 Number of insects					
	0 kGy	0.4 kGy	1 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy
0	0	0	0	0	0	0
8	2±1.15	0	0	0	0	0
15	13±2.52	0	0	0	0	0
30	24±1.73	0	0	0	0	0

2.2 电子束辐照处理对莲子中菌落总数和霉菌的影响

不同吸收剂量电子束辐照处理莲子菌落总数和霉菌的变化结果见表2，由表2数据可知，未经辐照处理的莲子储藏0 d时菌落总数为100 CFU/g，霉菌为20 CFU/g，说明新鲜干莲子的原始带菌数相对较低，随着吸收剂量的增加，莲子中菌落总数开始逐渐降低，当达到1 kGy吸收剂量时，莲子

中的菌落总数和霉菌数均小于10 CFU/g，表明该剂量下辐照处理即可达到良好的杀菌效果。室温贮藏180 d后，未经辐照处理组中莲子菌落总数和霉菌数均有所增加，达到 10^4 CFU/g，吸收剂量为4 kGy辐照处理的莲子储藏180 d后菌落总数和霉菌数均小于10 CFU/g。总体而言，电子束辐照处理能有效抑制莲子中微生物生长，延缓莲子霉变。

表2 不同吸收剂量电子束辐照处理莲子菌落总数和霉菌的影响

Table 2 Effects of different electron beam absorbed dose on the total colony count and mold of lotus seeds

吸收剂量 / kGy Absorbed dose	0 d		180 d	
	菌落总数 / (CFU·g ⁻¹) Total number of bacterial colonies	霉菌 / (CFU·g ⁻¹) Molds	菌落总数 / (CFU·g ⁻¹) Total number of bacterial colonies	霉菌 / (CFU·g ⁻¹) Molds
	0	100	20	6.1×10^3
0.4	20	20	8.0×10^2	1.5×10^3
1.0	<10	<10	30	1.3×10^2
2.0	<10	<10	<10	70
4.0	<10	<10	<10	<10
6.0	<10	<10	<10	<10

2.3 电子束辐照处理对莲子营养成分的影响

不同剂量电子束辐照处理后莲子营养成分变化如表3所示。由表3数据分析可知，不同剂量电子束辐照处理对莲子水分含量、灰分含量、粗蛋白和粗纤维无显著影响，其中不同剂量处理莲子水分含量在10.26%~10.7%，粗蛋白含量范围为18.44%~19.41%，符合《莲子NY/T 1504—2007》标准^[26]中水分含量≤12%和蛋白质含量≥18%的要求。电子束辐照处理对莲子中的粗脂肪含量具有一定影响，未经处理的莲子粗脂肪含量为1.78%，在0~0.4 kGy的吸收剂量下，粗脂肪含量明显下降，而0.4~6 kGy范围内，粗脂肪含量无显著变化。电子束辐照导致粗脂肪下降的原因可能在于低剂量辐照(≤0.4 kGy)主要通过促进脂质过氧化反应及脂肪

酸 β -氧化途径^[27]。

淀粉是莲子中含量最高的营养成分，也是衡量其品质的关键指标^[28]。其中，直链淀粉影响莲子加工过程中的热糊化行为^[29]，支链淀粉对莲子淀粉的糊化行为、凝胶强度、冻融稳定性以及老化速率等有显著影响^[30-31]。由表3可以看出，不同剂量辐照后莲子的直链淀粉含量在13.68%~14.37%范围波动，但无显著差异。未处理莲子支链淀粉含量为50.00%，随吸收剂量增加，支链淀粉含量呈先升高后下降趋势，1 kGy辐照处理后达到最大值54.89%。这种变化可能是由于在低剂量辐照条件下，支链淀粉分子链发生断裂和分解，从而暴露更多的支链结构，使其检测的含量升高；而随吸收剂量的升高会造成淀粉分子进一步解聚，导致支链淀粉含量下降。

表3 不同吸收剂量电子束辐照处理莲子营养成分的影响

Table 3 Effects of electron beam irradiation at different absorbed doses on the nutritional components of lotus seeds

营养成分指标 / % Nutritional content indicators	吸收剂量 / kGy Absorbed dose					
	0	0.4	1	2	4	6
水分含量 Moisture content	10.44±0.11 ^a	10.41±0.12 ^a	10.45±0.14 ^a	10.63±0.21 ^a	10.70±0.25 ^a	10.26±0.19 ^a
总灰分含量 Ash content	3.57±0.09 ^a	3.57±0.04 ^a	3.73±0.25 ^a	4.13±0.11 ^a	3.91±0.09 ^a	3.80±0.08 ^a
粗蛋白含量 Crude protein content	18.44±0.10 ^a	18.78±0.09 ^a	19.36±0.01 ^a	18.57±0.04 ^a	19.06±0.07 ^a	18.56±0.15 ^a
粗纤维含量 Crude fiber content	4.97±0.14 ^a	4.82±0.35 ^a	5.46±0.14 ^a	5.08±0.37 ^a	5.45±0.30 ^a	4.75±0.40 ^a
粗脂肪含量 Crude fat content	1.78±0.03 ^a	1.20±0.08 ^b	1.32±0.15 ^b	1.24±0.14 ^b	1.35±0.02 ^b	1.41±0.09 ^{ab}
支链淀粉含量 Amylopectin content	50.00±1.10 ^b	53.94±2.02 ^{ab}	54.89±3.82 ^a	52.92±0.48 ^{ab}	50.23±0.04 ^b	51.09±1.69 ^{ab}
直链淀粉含量 Amylose content	14.37±0.71 ^a	13.75±0.64 ^a	14.22±0.38 ^a	13.83±0.45 ^a	13.96±0.17 ^a	13.68±0.65 ^a

注:同一列中不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences ($p<0.05$).

3 结论

本研究探究了电子束辐照处理对莲子营养成分及杀虫杀菌效果的影响。结果显示,辐照对莲子中的害虫具有很好的杀灭效果,0.4 kGy吸收剂量处理后48 h米象成虫致死率达到100%,且能抑制莲子中虫卵孵化。同时辐照处理可以有效降低莲子中的微生物数量,4 kGy辐照处理后莲子储藏180 d后霉菌和菌落总数 ≤ 10 CFU/g。0~6 kGy范围内电子束辐照处理后莲子粗蛋白、粗纤维和直链淀粉等理化指标无显著变化,粗脂肪含量下降,支链淀粉含量呈现先升后降的趋势。总体而言,0~6 kGy范围内电子束辐照处理对莲子品质影响较小,0.4 kGy即可达到理想的杀虫效果,4 kGy能有效延缓微生物生长,为莲子常温贮藏期间加工应用提供了理论参考与技术支持。

作者贡献声明 胡俊羽负责数据采集、数据分析及论文撰写;齐慧负责米象的辐照杀虫处理操作;武小芬负责试验设计及论文修改;龙世平提供核心实验思路与研究经费支持;周毅吉负责电子束辐照处理操作;莫默负责电子束辐照处理操作;周慧平负责米象的培养与准备工作;陈亮提供核心实验设计思路;刘素纯提供总体实验思路,指导研究并进行论文修改;王克勤负责试验设计并提供研究思路。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

- 1 陈丹丹,季群,柯卫东.莲的起源、分布及分类研究[J]. 2017, (18): 36-40. DOI: 10.3865/j.issn.1001-3547.2017.18.015.

CHEN Dandan, JI Qun, KE Weidong. Study on the origin, distribution and classification of lotus[J]. Journal of Changjiang Vegetables, 2017, (18): 36-40. DOI: 10.3865/j.issn.1001-3547.2017.18.015.

- 2 Liu X T, Dong W Y, Yi Y, *et al.* Comparison of nutritional quality and functional active substances in different parts of eight lotus seed cultivars[J]. Foods, 2024, 13(15): 2335. DOI: 10.3390/foods13152335.

- 3 康桂森,王良才,胡云霞,等.高能电子束辐照灭菌对甘草饮片质量的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报, 2025, 43(3): 030405. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0108.

KANG Guisen, WANG Liangcai, HU Yunxia, *et al.* Effect of high-energy electron beam irradiation sterilization on the quality of Glycyrrhizae Radix et Rhizoma[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2025, 43(3): 030405. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2024-0108.

- 4 王争艳,王文芳,苗世远,等.储粮防护剂的应用现状及展望[J].应用昆虫学报, 2021, 58(3): 497-507. DOI: 10.7679/j.issn.2095-1353.2021.052.

WANG Zhengyan, WANG Wenfang, MIAO Shiyuan, *et al.* Application status and prospects of grain protectants [J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2021, 58(3): 497-507. DOI:10.7679/j.issn.2095-1353.2021.052.

- 5 吴晓宇,皮天斌,刘士柱,等.磷化氢熏蒸后采用两种防护剂进行虫害控制实仓应用效果研究[J].粮油仓储科技通讯, 2022, 38(4): 35-37. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1943.2022.04.011.

WU Xiaoyu, PI Tianbin, LIU Shizhu, *et al.* Field application effect of two protectants for pest control after phosphine fumigation[J]. Grain Storage Technology Communication, 2022, 38(4): 35-37. DOI: 10.3969/j.issn.

- 1674-1943.2022.04.011.
- 6 董朋. 硫酰氟局部熏蒸处理储粮害虫应用[J]. 粮食加工, 2021, **46**(1): 84-86.
DONG Peng. Application of sulfuryl fluoride partial fumigation for stored grain pests control[J]. Grain Processing, 2021, **46**(1): 84-86.
 - 7 王明. 防护剂为主、熏蒸剂为辅的化学防治方法探讨[J]. 粮油仓储科技通讯, 2002, (2): 34-35.
WANG Ming. Discussion on chemical control method with protectants as main and fumigants as auxiliary[J]. Grain Storage Technology Communication, 2002, (2): 34-35.
 - 8 王昆, 张琦, 徐丰卓, 等. 电子束辐照对仓储烟叶菌虫害的防治效果及烟叶品质影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(3): 030402. DOI: 10.11889/j.1000-2023-0087.
WANG Kun, ZHANG Qi, XU Fengzhuo, *et al.* Effects of electron-beam irradiation on the control of bacterium and insect pests in warehoused tobacco and on tobacco quality [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(3): 030402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0087.
 - 9 黄曼, 胡碧君, 罗柏流, 等. 电子束辐照防治储粮害虫及对小麦品质影响的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2009, **30**(4): 17-20. DOI: 10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2009.04.013.
HUANG Man, HU Bijun, LUO Boliu, *et al.* Study on electron beam irradiation for stored grain pests control and its effect on wheat quality[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2009, **30**(4): 17-20. DOI: 10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2009.04.013.
 - 10 李淑荣, 王殿轩, 高美须, 等. 电子束处理对玉米象繁殖力的影响[J]. 核农学报, 2005, (1): 46-48. DOI:10.3969/j.issn.1000-8551.2005.01.012.
LI Shurong, WANG Dianxuan, GAO Meixu, *et al.* Effect of electron beam treatment on reproductive capacity of *Sitophilus zeamais*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2005, (1): 46-48. DOI: 10.3969/j.issn.1000-8551.2005.01.012.
 - 11 李淑荣, 王殿轩, 温贤芳, 等. 电子束对赤拟谷盗辐照效应的试验研究[J]. 郑州工程学院学报, 2004, (2): 26-28. DOI: 10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2004.02.006.
LI Shurong, WANG Dianxuan, WEN Xianfang, *et al.* Experimental study on irradiation effects of electron beam on *Tribolium castaneum*[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Technology, 2004, (2): 26-28. DOI: 10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2004.02.006.
 - 12 高美须, 王传耀, 李淑荣, 等. 辐照柑桔和板栗害虫的研究[J]. 植物检疫, 1999, (4): 6-8.
GAO Meixu, WANG Chuanyao, LI Shurong, *et al.* Study on irradiation of citrus and chestnut pests[J]. Plant Quarantine, 1999, (4): 6-8.
 - 13 马丽珍, 南庆贤, 戴瑞彤. 不同气调包装方式对冷却猪肉在冷藏过程中的理化及感官特性的影响[J]. 农业工程学报, 2003, **19**(3): 156 - 160. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2003.03.037.
MA Lizhen, NAN Qingxian, DAI Ruitong. Physicochemical and sensory changes of chilled pork packaged in different modified atmosphere packaging (MAP) [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, **19**(3): 156 - 160. DOI: 10.3321/j.issn:1002-6819.2003.03.037.
 - 14 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of PRC. National food safety standard - Determination of moisture in foods: GB 5009.3—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
 - 15 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中灰分的测定: GB 5009.4—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of PRC. National food safety standard - Determination of ash in foods: GB 5009.4—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
 - 16 国家食品药品监督管理总局. 食品中蛋白质的检测: GB/T 5009.5—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
State Food and Drug Administration. Determination of protein in food: GB/T 5009.5—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
 - 17 国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定: GB 5009.6—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
National Health and Family Planning Commission & CFDA. National food safety standard - Determination of fat in foods: GB 5009.6—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
 - 18 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中淀粉的测定: GB 5009.9—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

- National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National food safety standard - Determination of starch in foods: GB 5009.9—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- 19 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 粮油检验 大米直链淀粉含量的测定: GB/T 15683—2025 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of China. Grain and oil inspection - Determination of amylose content in rice: GB/T 15683—2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.
- 20 江苏省质量技术监督局. 鲜食玉米中直链淀粉和支链淀粉含量的测定双波长分光光度法: DB32/T 2265—2012[S/OL]. [2025-10-17]. <https://www.renrendoc.com/paper/89078827.html>.
- Jiangsu Provincial Bureau of Quality and Technical Supervision. Determination of amylose and amylopectin content in fresh corn - Dual-wavelength spectrophotometric method: DB32/T 2265—2012[S/OL]. [2025-10-17]. <https://www.renrendoc.com/paper/89078827.html>.
- 21 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. 植物类食品中粗纤维的测定: GB/T 5009.10—2003[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
- Ministry of Health of PRC & Standardization Administration. Determination of crude fiber in plant foods: GB/T 5009.10—2003[S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- 22 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定: GB 4789.2—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- National Health Commission & State Administration for Market Regulation. National food safety standard - Food microbiological examination: Aerobic plate count: GB 4789.2—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- 23 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数: GB 4789.15—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- National Health and Family Planning Commission. National food safety standard - Food microbiological examination: Enumeration of molds and yeasts: GB 4789.15—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- 24 Cleghorn D A, Nablo S V, Ferro D N, *et al.* Electron beam treatment parameters for control of stored product insects[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, **63**(3/4/5/6): 575-579. DOI: 10.1016/S0969-806X(01)00596-5.
- 25 范家霖, 陈云堂, 李旭照, 等. 电子束辐照对印度谷螟发育的影响[J]. 核农学报, 2011, **25**(6): 1206-1210.
- FAN Jialing, CHEN Yuntang, LI Xuzhao, *et al.* Effects of electron beam irradiation on development of *Plodia interpunctella*[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2011, **25**(6): 1206-1210.
- 26 中华人民共和国农业部. 莲子: NY/T 1504—2007[S]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- Ministry of Agriculture of PRC. Lotus seed: NY/T 1504—2007[S]. Beijing: China Agricultural Press, 2007.
- 27 许零, 吴沥豪, 陈功, 等. 电子束辐照灭菌对南美白对虾性能的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2023, **41**(6): 060404. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0064.
- XU Ling, WU Lihao, CHEN Gong, *et al.* Effects of electron beam irradiation on the properties of frozen *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2023, **41**(6): 060404. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0064.
- 28 曾绍校. 莲子淀粉品质特性的研究与应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2007. DOI: 10.7666/d.y1175385.
- ZENG Shaoxiao. Study on quality characteristics and applications of lotus seed starch[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007. DOI: 10.7666/d.y1175385.
- 29 Dhull S B, Chandak A, Collins M N, *et al.* Lotus seed starch: a novel functional ingredient with promising properties and applications in food: a review[J]. Starch - Stärke, 2022, **74**(9/10): 2200064. DOI: 10.1002/star.202200064.
- 30 林鸾缘. 莲子淀粉糊特性的研究与应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2011. DOI: 10.7666/d.y1878835.
- LIN Yuanyuan. Study on paste properties and applications of lotus seed starch[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2011. DOI: 10.7666/d.y1878835.
- 31 Chung K H, Othman Z, Lee J S. Gamma irradiation of corn starches with different amylose-to-amylopectin ratio [J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, **52** (10): 6218-6229. DOI: 10.1007/s13197-014-1700-4.