

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80706

电子束辐照对广西香米理化性质 及食用品质的影响

陈秀霞¹ 张 斌²

(1. 广西工商职业技术学院, 广西 南宁 530500; 2. 广西质量工程职业技术学院, 广西 南宁 530105)

摘要: [目的] 探究电子束辐照 (EBI) 对高水分的广西香米贮藏品质的影响。[方法] 用不同辐照剂量 (1~5 kGy) 的电子束辐照高水分香米, 分析其在贮藏期间的理化性质和食用品质变化。[结果] 低剂量 EBI 处理后, 香米含水量无显著变化; 贮藏过程中, 辐照香米的脂肪酶活性以及脂肪酸值的增长速率降低, 微生物繁殖受到抑制; 与未辐照香米相比, 辐照香米的加热吸水率、体积膨胀率和直链淀粉含量随着贮藏时间的延长呈缓慢上升趋势; 且低剂量 EBI 处理可以延缓香米贮藏期品质劣变, 同时对其感官特性影响较小。[结论] 较低剂量的 EBI 处理可在一定程度上延长高水分广西香米的贮藏期, 且对其贮藏品质影响较小。

关键词: 电子束辐照; 香米; 贮藏; 品质

Effects of electron beam irradiation on physicochemical properties and edible quality of Guangxi fragrant rice

CHEN Xiuxia¹ ZHANG Bin²

(1. Guangxi Technology and Business Vocational College, Nanning, Guangxi 530500, China;

2. Guangxi Vocational and Technical College of Quality and Engineering, Nanning, Guangxi 530105, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effect of electron beam irradiation (EBI) on the storage quality of high-moisture Guangxi fragrant rice. [Methods] High-moisture fragrant rice is subjected to electron beam irradiation in varying doses (1 to 5 kGy). Then, changes in its physicochemical properties and edible quality are studied during storage. [Results] After low-dose EBI treatment, no significant change is observed in the moisture content of the fragrant rice. During storage, the growth rates of lipase activity and fatty acid value decrease in the irradiated fragrant rice, with inhibited microbial proliferation. Compared with non-irradiated fragrant rice, the irradiated fragrant rice exhibits slowly increased cooking water absorption rate, volume expansion rate, and amylose content as storage time is prolonged. Meanwhile, low-dose EBI treatment can delay the quality deterioration of the fragrant rice while having minimal impact on its sensory properties. [Conclusion] Low-dose EBI treatment can extend the storage period of high-moisture Guangxi fragrant rice to a certain extent, while exerting minimal influence on its storage quality.

Keywords: electron beam irradiation; fragrant rice; storage; quality

作为全球主要的粮食作物, 水稻不仅承载着数十亿人的基本膳食需求, 其产量与品质的稳定直接关系到全球粮食安全与农业经济的可持续发展。在中国有近 2/3 的人口以水稻为主食, 广西是中国重要的水稻产区之一,

稻米产量约占全国的 5.7%, 其中广西香米以其优异的品质、独特的口感, 广受消费者好评^[1]。稻米的水分含量是影响其品质的重要因素^[2-3], 高水分稻米 (水分含量 ≥ 15%) 蒸煮出的米饭有浓郁的风味和良好的食用品质, 但

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (编号: 2024KY1422)

通信作者: 张斌 (1980—), 男, 广西质量工程职业技术学院高级工程师, 硕士。E-mail: 393148204@qq.com

收稿日期: 2025-07-30 改回日期: 2026-01-11

引用格式: 陈秀霞, 张斌. 电子束辐照对广西香米理化性质及食用品质的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 133-138.

Citation: CHEN Xiuxia, ZHANG Bin. Effects of electron beam irradiation on physicochemical properties and edible quality of Guangxi fragrant rice[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 133-138.

不易贮藏^[4-6]。

常见的稻谷贮藏方式有干燥贮藏^[7]、低温贮藏^[8]、气调贮藏^[9]和化学贮藏^[10]等,传统的干燥贮藏工作量较大,不适合大规模粮库贮藏;低温或气调贮藏可以通过在贮藏期间降低温度或改变空气成分来抑制微生物或虫卵的生长,但这些方法成本较高且不能杀死谷物中的微生物和成虫^[11]。此外,化学贮藏需要长时间使用化学试剂对谷物进行熏蒸,在贮藏过程中会产生有毒有害物质,影响食品质量与安全。

近年来,食品辐照技术已被广泛应用于果蔬、肉制品及其他食品的贮藏中^[12],其中电子束辐照(EBI)是一种新兴的绿色辐照技术,它借助电子加速器产生低能或高能电子束射线,穿透作用在物质上,使其发生物理、化学或生物变化,从而达到抑菌除虫^[13]、抑制劣变^[14]、延迟果蔬成熟^[15]以及降解毒素^[16]等目的。此外,这种非热处理过程对处理产品的温度影响较低,适用于稻米等热敏食品。Zhai 等^[17-20]研究发现,低剂量 EBI 处理可以在谷物贮藏期间抑制微生物生长,延长货架期,保持较高品质。然而,上述研究中谷物的水分条件选择较低(<15%),有关 EBI 对高水分稻米长期贮藏品质的研究较少。试验拟采用不同剂量的 EBI 对高水分广西香米进行辐照处理,分析贮藏期间其理化性质、总活菌数、加工品质和蒸煮特性等变化,以期为 EBI 应用于高水分谷物长期高质量贮藏提供依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

香米:广粮香 2 号,水分含量 17.19%,产地广西南宁;

无水乙醇:分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司;

直链淀粉试剂盒:上海索宝生物科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

电子加速器:10 MeV/20 kW 型,中广核戈瑞(深圳)科技有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:BPG-9240A 型,上海一恒科技有限公司;

色差计:CR-400 型,日本柯尼卡公司;

电子天平:ME104 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

恒温恒湿培养箱:LHS-800HC 型,无锡玛瑞特科技有限公司;

质构分析仪:TA.XT Plus 型,英国 Stable Micro System 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 电子束辐照处理

根据 Zhai 等^[17]的方法并稍加修

改。分别取 500 g 香米样品装入透明聚乙烯袋中,铺至厚约 1 cm。使用电子加速器以 2 kGy/s 的剂量率分批照射样品,辐照剂量分别为 0,1,2,3,5 kGy,置于恒温恒湿培养箱中(25 ℃,湿度 60%)贮藏 6 个月,每 60 d 采集 1 次样本分析各指标。

1.2.2 水分含量测定 按 GB 5009.3—2016 执行。

1.2.3 菌落总数测定 按 GB 4789.2—2022 执行。

1.2.4 脂肪酸值(FAV)测定 按 GB/T 20569—2006 执行。

1.2.5 脂肪酶活(LA)测定 按 GB/T 5523—2008 执行。

1.2.6 直链淀粉含量测定 按 GB/T 15683—2025 执行。

1.2.7 蒸煮品质测定 根据李佳等^[3]的方法,分别按式(1)、式(2)计算加热吸水率和体积膨胀率。

$$A=(M_2-M_1)\div M_1\times 100\%, \quad (1)$$

$$B=(V_2-V_1)\div V_1\times 100\%, \quad (2)$$

式中:

A——加热吸水率,%;

B——体积膨胀率,%;

M_1 ——香米质量,g;

M_2 ——米饭质量,g;

V_1 ——香米的体积,mL;

V_2 ——米饭的体积,mL。

1.2.8 感官品质测定 根据潘丽红^[19]的方法并稍作修改。称取 10 g 香米,用蒸馏水冲洗 2 次。按料液比 1:1.3 (g/mL)加水浸泡 30 min。将香米放入蒸锅中煮 40 min,保温 20 min,趁热对米饭的颜色、气味、口感和总体可接受性等进行评分,每个属性 10 分(0 分表示非常不喜欢,10 分表示非常喜欢)。

1.2.9 数据处理与统计分析 各试验至少重复 3 次,结果以均值±标准差表示,采用 OriginPro 2018C 软件绘图;采用 SPSS 16.0 软件进行统计分析,并用 Dunn's 检验进行显著性分析($P<0.05$)。

2 结果与讨论

2.1 对水分含量的影响

在香米贮藏过程中,水分含量不仅会影响香米中微生物的繁殖,同时也会影响煮熟香米的质构,进而影响其食用品质^[20]。由表 1 可知,未辐照香米的含水量为(17.19±0.09)%,不同剂量 EBI 辐照的香米含水量分别为(17.11±0.05)%,(17.01±0.01)%,(16.89±0.03)%,(16.81±0.02)%,表明较低剂量的 EBI 处理对香米含水量影响较小。此外,贮藏 180 d 后,辐照和未辐照香米的含水量均呈下降趋势。这可能是由于作为活的有机体,稻米在贮藏过程中会不断进行呼吸作用,因此在贮藏过程中水分含量下降^[17]。综上,EBI 是一种冷处理工艺,低剂量的辐照对香米的含水量影响不显著。

表1 不同剂量EBI对香米贮藏期含水量的影响[†]

Table 1 Effects of EBI in different doses on moisture content of fragrant rice during storage

贮藏时间/d	水分含量/%				
	0 kGy	1 kGy	2 kGy	3 kGy	5 kGy
0	17.19±0.09 ^{Aa}	17.11±0.05 ^{Aa}	17.01±0.01 ^{Ab}	16.89±0.03 ^{Ac}	16.81±0.02 ^{Ad}
60	16.95±0.05 ^{Ba}	16.90±0.01 ^{Bab}	16.83±0.07 ^{Bb}	16.72±0.03 ^{Bc}	16.67±0.03 ^{Bc}
120	16.77±0.03 ^{Ca}	16.70±0.03 ^{Ca}	16.66±0.01 ^{Cb}	16.57±0.03 ^{Cc}	16.50±0.01 ^{Cd}
180	16.52±0.02 ^{Da}	16.48±0.01 ^{Db}	16.43±0.05 ^{Db}	16.36±0.01 ^{Dc}	16.29±0.03 ^{Dd}

[†] 大写字母不同代表不同贮藏时间之间的样品差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示不同辐照剂量之间的样品差异显著($P<0.05$)。

2.2 对菌落总数的影响

粮食贮藏过程中,微生物含量是影响贮藏质量的重要因素之一,微生物代谢产生的毒素会影响食品安全和加工质量^[20]。由表2可知,与未辐照香米相比,1,3,5 kGy 剂量下辐照的香米菌落总数分别降至 8.8×10^2 , 7.4×10^2 , 5.7×10^2 , 1.9×10^2 CFU/g,表明EBI处理可以有效杀灭谷

物中的微生物。此外,贮藏180 d后,未辐照水稻的菌落总数增加了约29倍,而辐照水稻的菌落总数分别增加了17,11,9,6倍。这与Pan等^[18]的研究相似,低剂量EBI处理可以明显抑制偏高水分水稻中微生物的生长。综上,EBI可通过有效抑制微生物的生长,延长高水分香米的贮藏期。

表2 不同剂量EBI对香米贮藏期菌落总数的影响[†]

Table 2 Effects of EBI in different doses on total bacterial count of fragrant rice during storage

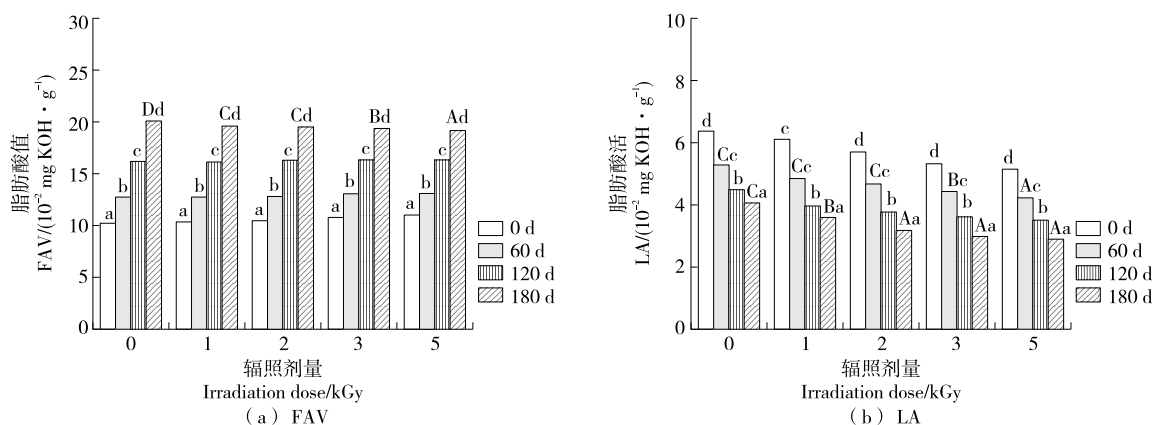
贮藏时间/d	菌落总数/(CFU·g ⁻¹)				
	0 kGy	1 kGy	2 kGy	3 kGy	5 kGy
0	$3.2\times 10^4\pm 134.1$ ^{Ae}	$8.8\times 10^2\pm 35.2$ ^{Ad}	$7.4\times 10^2\pm 32.5$ ^{Ae}	$5.7\times 10^2\pm 30.7$ ^{Ab}	$1.9\times 10^2\pm 3.1$ ^{Aa}
60	$4.8\times 10^4\pm 112.7$ ^{Bc}	$4.7\times 10^3\pm 42.7$ ^{Bd}	$3.8\times 10^3\pm 22.7$ ^{Bc}	$2.9\times 10^3\pm 15.1$ ^{Bb}	$4.2\times 10^2\pm 16.7$ ^{Ba}
120	$5.4\times 10^5\pm 233.4$ ^{Cc}	$7.6\times 10^3\pm 34.1$ ^{Cd}	$6.1\times 10^3\pm 62.5$ ^{Cc}	$3.3\times 10^3\pm 26.1$ ^{Cb}	$7.3\times 10^2\pm 25.3$ ^{Ca}
180	$9.4\times 10^5\pm 441.5$ ^{Dc}	$1.5\times 10^4\pm 101.3$ ^{Dd}	$8.2\times 10^3\pm 17.4$ ^{Dc}	$5.2\times 10^3\pm 24.1$ ^{Db}	$1.2\times 10^3\pm 21.2$ ^{Da}

[†] 大写字母不同代表不同贮藏时间之间的样品差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示不同辐照剂量之间的样品差异显著($P<0.05$)。

2.3 对脂肪酸值(FAV)和脂肪酶活(LA)的影响

FAV是谷物中脂肪水解和积累的产物,通常用于反映谷物贮藏过程中的脂肪酸败程度,是评估香米贮藏质量的重要指标。由图1(a)可知,EBI处理后香米的FAV略

有增加,可能是香米在EBI作用下电离产生了自由基,加速了脂质分解。此外,EBI处理后贮藏180 d的香米中FAV含量仍符合国家标准(<25.0 mg KOH/100 g)。贮藏期间,未辐照香米中FAV含量从 10.19 mg KOH/100 g增



大写字母不同代表不同贮藏时间之间的样品差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示不同辐照剂量之间的样品差异显著($P<0.05$)

图1 EBI处理对香米贮藏期间FAV和LA的影响

Figure 1 Effects of EBI on FAV and LA in fragrant rice during storage

至 20.07 mg KOH/100 g,增加了 96.95%。当辐照剂量为 5 kGy 时,FAV 含量增加到 19.12 mg KOH/100 g,增加了 74.29%。这可能是未辐照稻谷因微生物数量多,贮藏中微生物繁殖会消耗其营养并产生代谢产物,加速 FAV 升高,而经 EBI 处理的稻谷,微生物被大量杀灭,品质更稳定,因此 FAV 上升速率较慢。

脂肪酶是香米中第一个参与脂肪分解代谢的酶,其会不断水解脂质产生游离脂肪酸,增加游离脂肪酸含量,从而影响香米的贮藏稳定性。由图 1(b)可知,辐照处理后,香米的 LA 略有降低,可能是 EBI 处理抑制了香米中的 LA。贮藏期间,辐照和非辐照香米的 LA 均呈下降趋势。一方面,香米可以被视为一种活的有机体,其活力随着贮藏时间的延长逐渐降低^[17]。另一方面,EBI 处理可能会破坏香米中脂肪酶的结构,从而降低其功能活性。这种现象进一步验证了 FAV 的增长速率在贮藏过程中会降低。综上,EBI 处理可在一定程度上延缓香米的品质劣变。

2.4 对直链淀粉含量的影响

直链淀粉含量是评价稻米感官品质的关键指标,稻米中直链淀粉含量与熟米饭的黏度成反比,而与硬度成正比^[4]。由表 3 可知,EBI 处理可显著降低香米直链淀粉

含量($P<0.05$)。这可能是 EBI 处理后香米中的淀粉结构可能会被破坏,从而降低淀粉结合碘的能力^[21]。贮藏期间,不同剂量电子束辐照的香米直链淀粉含量均显著增加($P<0.05$),可能是香米中的支链淀粉在贮藏过程中被其自身的脱支链酶分解^[22]。试验采用碘比色法测试表观直链淀粉含量,该含量包括直链淀粉和支链淀粉分离产生的 B 型长链。因此,香米中的直链淀粉含量在贮藏过程中上升。与未经辐照的香米相比,经 EBI 处理的香米中直链淀粉含量增加不显著,表明 EBI 处理可以延缓香米的品质下降,并在一定程度上延长其贮藏期。

2.5 对米饭蒸煮品质的影响

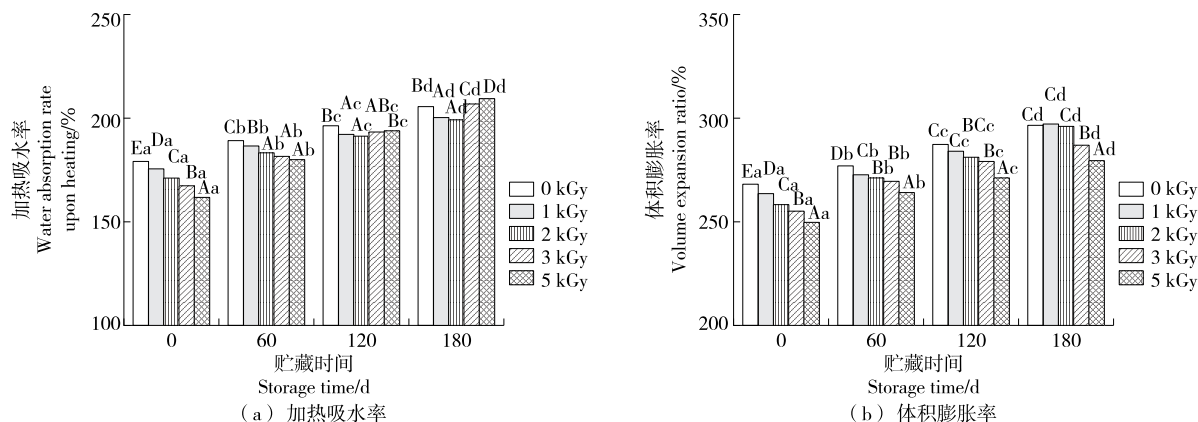
由图 2 可知,与未辐照香米相比,经 EBI 处理后香米的加热吸水率和体积膨胀率均显著下降($P<0.05$),可能是电子束辐照破坏了香米中支链淀粉分子的长链结构,降低了其晶体的有序性^[23]。随着贮藏时间的延长,所有样品的加热吸水率和体积膨胀率均呈上升趋势。这是由于经过长时间的贮藏,稻谷的细胞壁发生失水,导致细胞内各组分吸水能力增强,同时加热后米饭吸水导致体积膨胀^[3]。综上,经较低剂量电子束辐照的香米品质更好,陈化劣变速率较慢。

表 3 不同剂量 EBI 对香米贮藏期直链淀粉含量的影响[†]

Table 3 Effects of EBI in different doses on amylose content of fragrant rice during storage

贮藏时间/d	直链淀粉含量/%				
	0 kGy	1 kGy	2 kGy	3 kGy	5 kGy
0	12.33±0.03 ^{Ae}	12.13±0.04 ^{Ad}	11.89±0.02 ^{Ac}	11.71±0.05 ^{Ab}	11.49±0.04 ^{Aa}
60	12.62±0.01 ^{Bc}	12.35±0.01 ^{Bd}	12.08±0.03 ^{Bc}	11.93±0.02 ^{Bb}	11.66±0.05 ^{Ba}
120	13.06±0.01 ^{Cc}	12.67±0.09 ^{Cd}	12.33±0.04 ^{Cc}	12.19±0.05 ^{Cb}	11.92±0.03 ^{Ca}
180	13.52±0.05 ^{Dc}	13.05±0.07 ^{Dd}	12.71±0.03 ^{Dc}	12.51±0.03 ^{Db}	12.34±0.05 ^{Da}

† 大写字母不同代表不同贮藏时间之间的样品差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示不同辐照剂量之间的样品差异显著($P<0.05$)。



大写字母不同代表不同贮藏时间之间的样品差异显著($P<0.05$);小写字母不同表示不同辐照剂量之间的样品差异显著($P<0.05$)

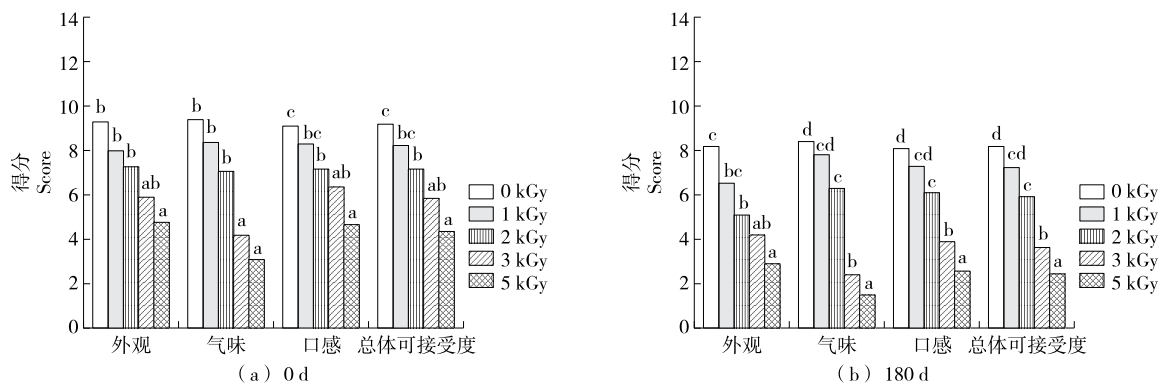
图 2 EBI 对香米贮藏期间加热吸水率和体积膨胀率的影响

Figure 2 Effects of EBI on cooking water absorption rate and volume expansion rate of fragrant rice during storage

2.6 对米饭感官评分的影响

由图3可知,辐照后香米的所有参数的得分均低于未辐照水稻,尤其是在5 kGy的辐照剂量下,香米的外观、气味和口感得分分别从9.3, 9.4, 9.1降至4.8, 3.1, 4.7。辐照后的香米出现难闻气味和味道,可能是EBI处理产生的自由基促进了脂肪酸氧化,破坏了蛋白质内的

二硫键,并产生了大量的游离巯基^[24]。贮藏180 d后,所有样品的感官评分均下降。与未辐照的香米相比,1 kGy剂量辐照香米的各项感官指标变化不显著($P > 0.05$),表明在一定程度上低剂量EBI处理对香米的感官品质影响最小,低剂量EBI可以用来延缓香米在贮藏过程中的品质劣变。



小写字母不同表示不同辐照剂量之间的样品差异显著($P < 0.05$)

图3 贮藏前后不同辐照剂量EBI处理的香米感官评分图

Figure 3 Sensory scoring of fragrant rice treated by EBI in various doses before and after storage

3 结论

研究探究了电子束辐照对高水分香米贮藏稳定性及食用品质的影响。结果表明,电子束辐照处理未对香米的水分含量产生显著影响($P < 0.05$)。贮藏过程中,相较于未辐照组,经电子束辐照处理后香米中的脂肪酸值的增长速率和脂肪酶活性均降低,微生物繁殖被抑制,直链淀粉含量增加不明显。此外,低剂量电子束辐照处理可以在一定程度上延缓高水分香米的质构特性和感官品质的劣变。后续可以研究辐照后香米在贮藏期间各组分(淀粉、蛋白)理化性质的变化,深入探究EBI改善香米贮藏品质的机理。

参考文献

- [1] 李天雄. 宾阳县水稻产业链综合评价及发展路径研究[D]. 南宁: 广西大学, 2024: 21-25.
LI T X. Comprehensive evaluation of rice industry competitiveness and development path in Binyang county[D]. Nanning: Guangxi University, 2024: 21-25.
- [2] 袁道骥. 水分含量对优质稻储藏品质的影响[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019: 50-51.
YUAN D J. Effect of moisture content on storage quality of high quality rice[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019: 50-51.
- [3] 李佳, 曹毅, 赵旭, 等. 2种储粮水分粳稻储藏周期内品质变化及效益分析[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 110-115.
LI J, CAO Y, ZHAO X, et al. Quality change and benefit
- analysis of two grain storage moisture japonica rice during storage period[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(3): 110-115.
- [4] LI D M, WAN Y, ZHANG J Y, et al. Effect of electron beam irradiation on edible quality maintenance of high moisture rice grains[J]. Journal of Cereal Science, 2025, 121: 104104.
- [5] QU L Y, ZHAO Y, XU X D, et al. Untargeted lipidomics reveal quality changes in high-moisture Japonica brown rice at different storage temperatures[J]. Foods, 2023, 12(23): 4 218.
- [6] 吴琼, 倪浩然, 王海荣, 等. 偏高水分粮储藏研究现状与展望[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 133-140.
WU Q, NI H R, WANG H R, et al. Research status and prospect of grain storage with high moisture[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44 (5): 133-140.
- [7] 张林威. 三种干燥方式对蒸谷米品质及储藏性能的影响研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2024: 65-66.
ZHANG L W. Study on the effects of three drying methods on the quality and storage performance of parboiled rice[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2024: 65-66.
- [8] 张志航, 张玉荣. 偏高水分粳稻谷的低温储藏试验研究[J]. 食品科技, 2023, 48(8): 135-138.
ZHANG Z H, ZHANG Y R. Study on the storage of high-moisture Japonica rice grains at low-temperature condition[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(8): 135-138.
- [9] DONG X, YANG M, TANG P A. Evaluating modified atmosphere with variable CO₂-O₂ concentrations for Tribolium

- castaneum management and quality preservation in Rice storage [J]. *Food Chemistry*: X, 2025, 26: 102252.
- [10] LIU Y Q, STRAPPE P, ZHOU Z K, et al. Impact on the nutritional attributes of rice bran following various stabilization procedures[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2019, 59(15): 2 458-2 466.
- [11] NAVEED A, ZUBAIR M, BAIG A, et al. Effect of storage on the nutritional and antioxidant properties of brown Basmati rice [J]. *Food Science & Nutrition*, 2023, 11(5): 2 086-2 098.
- [12] 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.
- [13] FERREIRA C D, LANG G H, DA SILVA LINDEMANN I, et al. Postharvest UV-C irradiation for fungal control and reduction of mycotoxins in brown, black, and red rice during long-term storage[J]. *Food Chemistry*, 2021, 339: 127810.
- [14] 刘雅慧, 杨菁菁, 左都文, 等. 电子束辐照对板栗发芽的抑制效果及对板栗品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(7): 276-282.
- LIU Y H, YANG J J, ZUO D W, et al. Effects of electron beam irradiation on chestnut sprout inhibition and its quality[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(7): 276-282.
- [15] WANG K H, SUN S M, NIU W, et al. Insight into the potential mechanisms of electron beam irradiation maintains energy supply in fava beans (*Vicia faba* L.) by regulating mitochondrial condition during postharvest cold storage[J]. *Food Chemistry*, 2025, 489: 145000.
- [16] KOIKE A, BARREIRA J C M, BARROS L, et al. Edible flowers of *Viola tricolor* L. as a new functional food: antioxidant activity, individual phenolics and effects of gamma and electron-beam irradiation[J]. *Food Chemistry*, 2015, 179: 6-14.
- [17] ZHAI Y H, PAN L H, LUO X H, et al. Effect of electron beam irradiation on storage, moisture and eating properties of high-moisture rice during storage[J]. *Journal of Cereal Science*, 2022, 103: 103407.
- [18] PAN L H, XING J L, LUO X H, et al. Influence of electron beam irradiation on the moisture and properties of freshly harvested and Sun-dried rice[J]. *Foods*, 2020, 9(9): 1 139.
- [19] 潘丽红. 电子束辐照对偏高水分稻谷储藏品质及淀粉性质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 19-31.
- PAN L H. Effect of electron beam irradiation on storage quality and starch properties of rice with high moisture content [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 19-31.
- [20] REN B, ZHAI Y H, WAN Y, et al. Influence of electron beam irradiation on storage stability and sensory properties of brown rice[J]. *Journal of Cereal Science*, 2025, 121: 104102.
- [21] LIU X Y, XI C Y, LIANG W, et al. Influence of pre- or post-electron beam irradiation on heat-moisture treated maize starch for multiscale structure, physicochemical properties and digestibility[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 313: 120891.
- [22] WANG H W, WANG Y, WANG R, et al. Impact of long-term storage on multi-scale structures and physicochemical properties of starch isolated from rice grains[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107255.
- [23] 陈雪从, 杨希娟, 张文刚, 等. 电子束辐照对青稞米理化性质及食用品质的影响[J]. *粮油食品科技*, 2024, 32(6): 143-150.
- CHEN X C, YANG X J, ZHANG W G, et al. Effects of electron beam irradiation on physicochemical properties and edible quality of highland barley rice[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 2024, 32(6): 143-150.
- [24] LI T, WANG L, CHEN Z X, et al. Electron beam irradiation induced aggregation behaviour, structural and functional properties changes of rice proteins and hydrolysates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 97: 105192.