

电子束辐照对留胚米理化性质及食用品质的影响

徐鹏程^{1,2}, 王苒玮^{1,2}, 罗小虎^{1,2}, 戴智华³, 金刚强³, 王涛^{1,2},
冯伟^{1,2}, 张昊^{1,2}, 周星², 王韧^{*1,2}

(1. 江南大学 粮食发酵与食品生物制造国家工程研究中心, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122; 3. 衢州市库米赛诺粮食机械制造有限公司, 浙江 衢州 324002)

摘要: 为了减缓留胚米储藏期间的脂肪酸败, 延长留胚米的储藏期限, 作者利用电子束辐照处理留胚米, 并考察了储藏过程中留胚米的品质变化。结果表明, 经 0.5 kGy 电子束辐照处理后, 留胚米的留胚率、碎米率以及腰爆率变化不大, 脂肪酶活性下降了 28.17%, 当辐照剂量增至 1.0 kGy 后, 留胚米的腰爆率显著上升; 在储藏过程中, 电子束处理的留胚米样品, 其水分含量下降较快, 而脂肪酸值增幅速率变缓; 此外, 未处理样品的脂肪酶活性在储藏过程中呈现出先上升后下降的趋势, 而电子束处理样品的脂肪酶活性呈线性降低的趋势; 25 ℃和 37 ℃储藏条件下, 未处理样品的保质期均为 15 d, 电子束辐照处理能显著延长保质期(≥60 d); 在食用品质方面, 0.5 kGy 处理的样品在 25 ℃储藏 120 d 后, 其综合评分为 69.9, 接近相应的未处理样品(70.6), 但提高辐照剂量和储藏温度均会加速留胚米的食用品质劣化。综上, 电子束辐照处理是一种有效延长留胚米储藏期限的方法。

关键词: 留胚米; 电子束辐照; 食用品质; 直链淀粉含量; 储藏期限

中图分类号: TS 21 文章编号: 1673-1689(2023)04-0041-07 DOI: 10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.04.005

Effect of Electron Beam Irradiation on Physicochemical Properties and Edible Qualities of Rice with Remained Germ

XU Pengcheng^{1,2}, WANG Jinwei^{1,2}, LUO Xiaohu^{1,2}, DAI Zhihua³, JIN Gangqiang³, WANG Tao^{1,2},
FENG Wei^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}, ZHOU Xing², WANG Ren^{*1,2}

(1. National Engineering Research Center for Cereal Fermentation and Food Biomanufacturing, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 2. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Quzhou Kumisainuo Food Machinery Manufacturing Corporation, Quzhou 324002, China)

Abstract: To slow down the fatty acid abortion and prolong the storage period of rice with remained germ, electron beam irradiation was used to treat the rice with remained germ and its quality changes during storage were investigated. The results showed that after 0.5 kGy electron beam irradiation, the germ retention rate, broken rice rate and waist burst rate of rice with remained germ showed little change, and the lipase activity decreased by 28.17%. When the irradiation dose

收稿日期: 2022-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFE0122600)。

作者简介: 徐鹏程(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事粮食精深加工研究。E-mail: 7200112095@stu.jiangnan.edu.cn

* 通信作者: 王韧(1980—), 男, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要从事粮食精深加工工程与技术研究。

E-mail: nedved_wr@jiangnan.edu.cn

was increased to 1.0 kGy, the rate of waist burst of rice with remained germ increased significantly. During storage, the moisture content of rice with remained germ treated with electron beam decreased rapidly, while the increase rate of fatty acid value slowed down. In addition, the lipase of untreated samples rised first and then decreased during storage, while the lipase activity of samples treated with electron beams linearly decreased during the process. Under the storage conditions of 25 °C and 37°C, the shelf life of untreated samples was 15 d, while electron beam treatment could significantly prolong the shelf life (≥ 60 d). In terms of taste quality, after storage at 25 °C for 120 d, the comprehensive score of 0.5 kGy treated samples was 69.9, which was close to that of the corresponding untreated samples (70.6). Increasing the radiation dose and storage temperature accelerated the deterioration of the taste quality of rice with remained germ. In conclusion, electron beam irradiation treatment is an effective method to prolong the storage period of rice with remained germ.

Keywords: rice with remained germ, electron beam irradiation, edible quality, amylose content, shelf-life

稻谷在加工的过程中,米胚保留率达到 80%及以上的大米称为留胚米,也被称为胚芽米。虽然米胚的质量仅为整粒米的 3%左右,但却富含蛋白质、脂肪、可溶性糖和维生素等,营养价值极高^[1]。米胚蛋白质的营养价值堪比大豆蛋白,必需氨基酸质量分数高达 39%~58%,且组成与 FAO/WHO 推荐的氨基酸构成模式极为相似;此外,米胚中还含有抗氧化的谷胱甘肽^[2-3]。然而,米胚中较高的脂肪含量和生物酶活性也导致留胚米在储藏过程中易酸败变质。因此,对留胚米进行保鲜处理显得尤为重要。常见的稻米保鲜处理方法主要有微波处理^[4]、射频处理^[5]、辐照保鲜以及紫外光照射^[6]等。辐照作为一种冷处理技术,因其无污染、无残留的特性,近年来被广泛应用于食品储藏领域。已有研究表明 γ -射线辐照可提高糙米胚乳淀粉颗粒的破碎程度,进而提高食用品质,但对其加工品质和营养品质影响不大^[7]。目前,国内外对于电子束辐照延长粮食储藏期的研究还较少,但与 γ -射线相比,电子束辐照具有成本更低、无核废料、易产业化等优点。Luo 等研究发现,电子束处理对藜麦储藏前的脂肪酶活力没有明显影响,但经过 90 d 的储藏后,未处理的藜麦脂肪酶活力明显高于处理后(1~8 kGy)的藜麦^[8]。电子束灭酶的原理是通过破坏脂肪酶的空间结构,导致脂肪酶的三级结构改变、功能活性丧失。利用电子束辐照来探索更安全合理、长期有效的留胚米保鲜

技术是十分必要且具有现实意义的。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜加工的留胚米和精白米(南粳 9108),由泰州市和平米业有限公司提供,留胚米采用高性能节能砂带碾米机经 4 道碾磨加工制备而成。

尼龙复合材质的真空包装袋:市售;橄榄油:上海麦克林生化科技有限公司产品;无水乙醚、无水乙醇、酚酞等试剂:国药集团化学试剂有限公司产品;KMSN-MNMD65-B 节能砂带碾米机:衢州市库米赛诺粮食机械制造有限公司产品。

1.2 仪器与设备

Simplicity UV 型超纯水仪:美国 Millipore 公司产品;5 MeV 电子加速器:无锡爱邦辐射技术有限公司产品;BAS124S-CW 分析天平:赛多利斯科学仪器有限公司产品;MB25 快速水分测定仪:奥豪斯仪器有限公司产品;生化培养箱:上海博迅医疗生物仪器股份有限公司产品;米饭食味计、硬度黏度计:日本佐竹化学机械工业株式会社产品;SBDY-1 数显白度仪:上海悦丰仪器仪表有限公司产品。

1.3 研究方法

1.3.1 留胚米的电子束处理 称取 120 g 留胚米样品放入 PE 袋中,铺至约 1 cm 厚并真空封口,使用电子加速器分别以 0.5、1.0 kGy 辐照处理。将处理

后的留胚米拆袋,重新装入 PE 袋中,封口。

1.3.2 留胚米的储藏方式 电子束处理后的样品分别在 25 ℃和 37 ℃恒温培养箱中储藏 120 d,每 15 d 取出一组样品进行后续分析。

1.3.3 留胚米理化指标的测定 蛋白质含量的测定参照 GB 5009.5—2016;淀粉含量的测定参照 GB 5009.9—2016;脂肪含量的测定参照 GB 5009.6—2016;灰分含量的测定参照 GB 5009.4—2016。

1.3.4 留胚米的水分测定 使用快速水分测定仪进行测定。

1.3.5 脂肪酸值测定 参照 GB/T 15684—2015 进行测定。

1.3.6 脂肪酶活力的测定 参照 GB/T 5523—2008《粮油检验 粮食、油料的脂肪酶活动度的测定》进行测定。滴定终点的判断略作修改,采用 0.01 mol/L KOH 乙醇溶液滴定至 pH 为 8.0。

1.3.7 其他理化指标的测定 留胚率按照半胚法进行测定;碎米率按照 GB 5503—2009 进行测定;爆腰率参考 GB 1350—1999 的方法测定;白度使用数显白度仪测定。

1.3.8 食用品质的测定 大米的食用品质采用日

本佐竹化学机械工业株式会社的米饭食味计和硬度黏度计进行测定,具体参照徐鹏程等^[9]的方法。

1.3.9 直链淀粉含量的测定 参照 GB/T 15683—2008《大米 直链淀粉含量的测定》进行测定。

1.3.10 实验数据处理与统计分析 各组实验无特定说明均重复 3 次,所得数据使用 Origin 2021 进行绘图,使用 SPSS 20.0 进行统计和差异性分析,显著性界值为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照对留胚米品质的影响

电子束处理后留胚米的性质变化如表 1 所示。经过电子束辐照后留胚米的留胚率与未处理的相比变化不大,米胚均完好保留,但电子束处理后留胚米的白度有所降低,从未处理的 76.5 降低到 68.3 (1.0 kGy)。0.5 kGy 剂量下处理对爆腰率和碎米率的影响不大,但当辐照剂量升高至 1.0 kGy 时,爆腰率大幅度增加,从未处理时的 32.70%显著增加至 49.20%,碎米率也略有增加。进一步提高辐照剂量至 2.0 kGy 后会导致爆腰率和碎米率的激增,因此在本研究中仅研究了 0.5 kGy 和 1.0 kGy 两个辐照剂量。

表 1 电子束处理前后留胚米性质的变化

Table 1 Changes of the properties of rice with remained germ before and after electron beam treatment

处理方法	留胚率/%	爆腰率/%	碎米率/%	白度
未处理	82.5±1.0 ^a	32.70±0.23 ^b	4.50±0.11 ^c	76.5±0.2 ^a
0.5 kGy	82.5±1.0 ^a	33.60±1.18 ^b	5.29±0.15 ^b	68.3±0.0 ^b
1.0 kGy	82.0±0.0 ^a	49.20±0.61 ^a	6.60±0.09 ^a	68.3±0.2 ^b

注:同一列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

2.2 储藏期间留胚米水分质量分数变化

如图 1 和图 2 所示,未处理的留胚米及经过电子束辐照处理的留胚米在储藏过程中水分质量分数均呈下降趋势,未处理样品在 37、25 ℃下储藏 120 d 后水分质量分数分别下降 2.04%、1.17%,电子束 0.5 kGy 处理的样品在 37、25 ℃下储藏 120 d 水分质量分数分别下降 4.32%、1.58%,电子束 1.0 kGy 处理的样品水分质量分数分别下降 3.89%、1.54%。相同处理条件的样品在 37 ℃条件下储藏时留胚米水分的下降速率要高于 25 ℃下储藏;经过电子束辐照处理的留胚米水分的下降速率要高于未处理样品的下降速率。储藏过程中留胚米水分的变化的

线性关系良好符合零级动力学模型。这一结论与赵卿宇等^[10]的研究结果一致。电子束辐照样品的动力学参数均大于相同储藏温度下未处理样品的动力学参数,可能是由于电子束辐照处理对细胞结构破坏导致的。

2.3 储藏期间留胚米相对酶活力的变化

如图 3 和图 4 所示,未处理的留胚米脂肪酶活力在储藏过程中呈先上升后下降的趋势,但是经过电子束辐照处理的留胚米样品在储藏过程中脂肪酶活力仅呈现下降趋势。未处理样品在储藏 45 d 后,其脂肪酶活力达到峰值,可高达储藏前 2 倍以上,25 ℃和 37 ℃储藏条件下相对酶活力分别

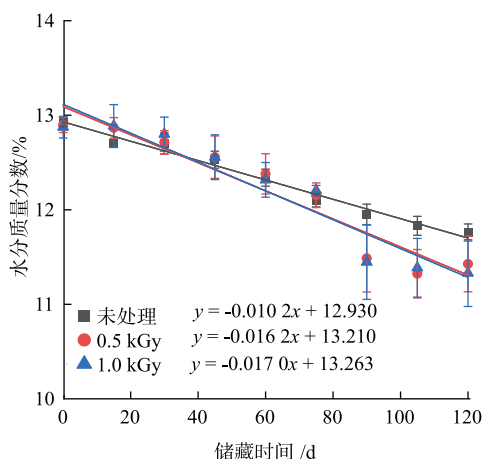


图 1 25 °C下储藏条件下留胚米水分质量分数变化

Fig. 1 Changes of moisture content of rice with remained germ stored at 25 °C

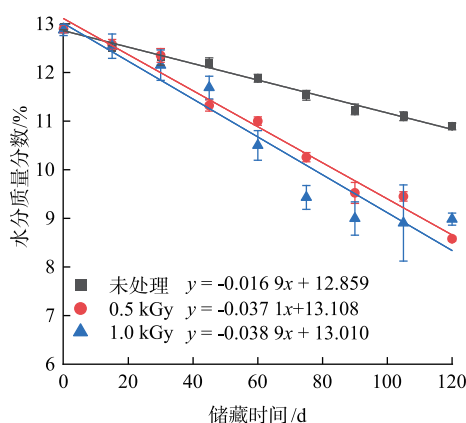


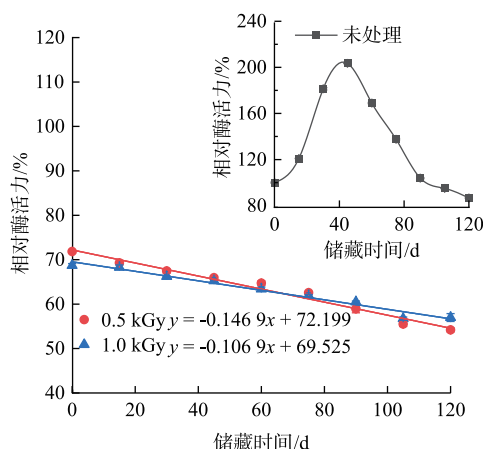
图 2 37 °C下储藏条件下留胚米水分质量分数变化

Fig. 2 Changes of moisture content of rice with remained germ stored at 37 °C

为 203.5%和229.8%，随着储藏时间延长至 120 d，二者的相对酶活力分别下降至 86.58%和 79.43%；电子束辐照处理可以显著降低留胚米样品的脂肪酶酶活力，0.5 kGy 和 1.0 kGy 处理后留胚米样品的脂肪酶酶活力分别降低了 28.2%和 31.3%；在随后的 25 °C和 37 °C储藏过程中，脂肪酶酶活力持续降低，0.5 kGy 处理的样品在两个温度储藏条件下分别降低至 54.2%和 49.7%，1.0 kGy 处理的样品则分别降低至 57.0%和 54.5%。37 °C条件下储藏的留胚米脂肪酶酶活力的下降速率高于 25 °C下储藏，经过电子束辐照处理的样品酶活力下降速率远高于未处理的样品；电子束辐照处理的灭酶原理是通过破坏脂肪酶的空间结构实现的^[8]。

运用零级反应动力学方程对电子束辐照处理

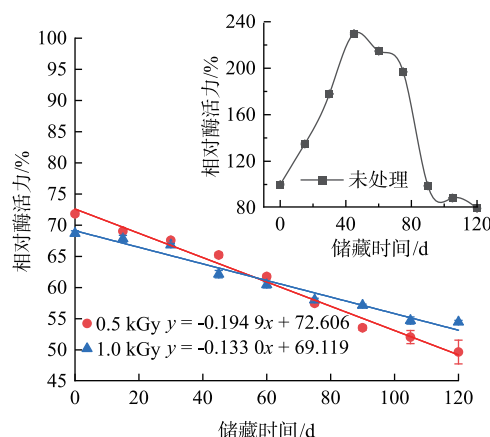
的留胚米储藏过程中的脂肪酶活性变化进行拟合，所得 R^2 均大于 0.95，拟合效果较好，这与前人研究结论一致^[11-12]。随着储藏温度的升高，脂肪酶酶活力的动力学常数均增大，这说明储藏温度越高，电子束辐照处理后的留胚米脂肪酶活力下降越快。



插图为 25 °C储藏条件下未经处理留胚米脂肪酶酶活力变化。

图 3 25 °C储藏条件下留胚米脂肪酶酶活力变化

Fig. 3 Changes of lipase activity of rice with remained germ under 25 °C storage



插图为 37 °C储藏条件下未经处理留胚米脂肪酶酶活力变化。

图 4 37 °C储藏过程中留胚米脂肪酶酶活力变化

Fig. 4 Changes of lipase activity of rice with remained germ under 37 °C storage

2.4 储藏期间留胚米脂肪酸值的变化

如图 5 和图 6 所示，留胚米的脂肪酸值在储藏过程中均呈现上升趋势。未处理样品的脂肪酸值上升最快，在 25、37 °C储藏 120 d 后分别达到 113.5、121.9 mg/hg(以 KOH 质量计，下同)。0.5、1.0 kGy 电子束辐照处理后，留胚米中的脂肪酸值保持不

变,这可能是由于采用的辐照剂量较小的原因,李湘等研究表明,当电子束辐照剂量高于 1.5 kGy 后,大米脂肪酸值会随着辐照剂量的增加而增大^[13];与未处理样品相比,电子束辐照处理样品在储藏过程中的脂肪酸值上升趋势明显变缓,0.5 kGy 处理的样品在 25、37 °C 储藏 120 d 后脂肪酸值分别上升至 54.8、67.2 mg/hg,1.0 kGy 处理的样品则分别为 44.6、61.6 mg/hg;可见,相同处理条件时,储藏温度越高,脂肪酸值越高,上升速度越快;高剂量辐照处理样品的脂肪酸值略小于低剂量处理样品,上升速度也略慢;造成这些现象的原因应该与辐照处理后脂肪酶的保留率以及脂肪酶的最适温度有关。

由于目前我国尚无留胚米的相关标准,参照 GB/T 20569—2006《稻谷储存品质判定规则》,以样品脂肪酸值 35 mg/hg 为界限,超过界限即认定其陈化变质^[9];由图 5 和图 6 可知,25 °C 和 37 °C 储藏温度下,未处理样品在 30 d 时脂肪酸值已超出 35 mg/hg,因此保质期为 15 d;同理可知,0.5 kGy 电子束辐照处理样品的保质期分别为 75 d 和 60 d,1.0 kGy 电子束辐照处理样品则分别为 90 d 和 60 d;可见,电子束辐照处理显著延长了留胚米的保质期。

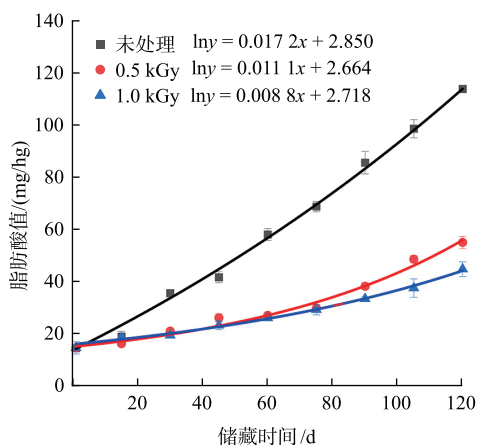


图 5 25 °C 储藏过程中留胚米脂肪酸值的变化

Fig. 5 Changes of fatty acid value of rice with remained germ during storage at 25 °C

由于脂肪酸值在储藏的后期增幅明显加快,因此本研究采用一级动力学方程对其进行拟合(见图 5 和图 6),所得 R^2 均大于 0.92,拟合效果较好,可见一级反应动力学可以较好地表征其变化趋势。未处理样品的动力学常数显著高于电子束辐照处理的样品;在较高的储藏温度下,动力学常数也较大,这

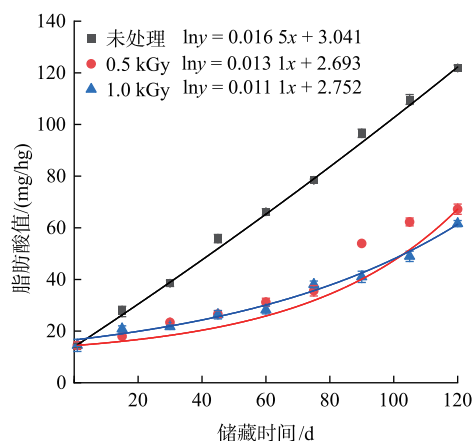


图 6 37 °C 储藏过程中留胚米脂肪酸值的变化

Fig. 6 Changes of fatty acid value of rice with remained germ during storage at 37 °C

说明储藏温度越高,留胚米脂肪酸值增加的速率越高,即劣化速度越快。

2.5 储藏期间留胚米食用品质的变化

留胚米样品在 25 °C 和 37 °C 储藏过程中的食用品质变化如表 2 和表 3 所示。精白米的外观、口感、综合评分分别为 7.5、7.6、81.0,硬度、黏度、平衡度、弹性分别为 3.89 ± 0.11 、 0.80 ± 0.15 、 0.21 ± 0.03 、 0.74 ± 0.02 ;与精白米相比,未处理的留胚米表现出较低的食用品质,其外观、口感、综合评分分别为 6.8、7.1、77.7,硬度也比精白米的稍高。留胚米与精白米的食用品质差距是由于保留了米胚所导致的,虽然精白米具有更高的食用品质,但留胚米中含有更多的微量营养素,这也是目前推荐适度加工的原因所在。电子束辐照处理显著降低了留胚米的食用品质,并且辐照剂量越大,食用品质降低越多,0.5 kGy 和 1.0 kGy 处理后留胚米的综合评分分别为 73.8 和 70.2,这与李湘等的研究结果相一致^[13];有趣的是电子束辐照处理后留胚米米饭的硬度也呈现出降低的趋势。众所周知,在一般情况下,米饭的硬度越大其食用品质越差。电子束辐照处理对留胚米胚乳中淀粉(尤其是直链淀粉)结构的破坏是导致其米饭硬度降低的主要原因,测定结果(见表 4)显示,经 1.0 kGy 电子束辐照处理后,留胚米中的直链淀粉质量分数从 15.12%降低到 13.47%,表明电子束辐照处理打断了直链淀粉的长链。

25 °C 和 37 °C 储藏过程中,留胚米样品的食用品质下降,硬度、黏度增加,平衡度和弹性变化并不明显。25 °C 储藏条件下,未处理、0.5、1.0 kGy 处理样

品的综合评分分别从 0 d 时的 77.7、73.8、70.2 下降到 120 d 的 70.6、69.9、68.0,37 ℃储藏条件下的下降幅度则更大,表明高温加速了留胚米食用品质的劣化;储藏过程中,留胚米米饭硬度的显著提高(尤其是 37 ℃下)应该是造成其食用品质下降的主要原因。

表 2 留胚米在 25 ℃储藏过程中的食用品质变化
Table 2 Changes in edible quality of rice with remained germ during storage at 25 ℃

处理方式	储藏时间/d	外观	口感	综合评分	硬度	黏度	平衡度	弹性
未处理	0	6.8	7.1	77.7	4.15±0.12 ^{abcd}	0.87±0.05 ^{ab}	0.21±0.02 ^a	0.71±0.01 ^a
	30	5.9	6.5	72.8	4.57±0.25 ^{abc}	0.74±0.03 ^b	0.21±0.01 ^a	0.73±0.02 ^a
	60	5.7	6.3	71.7	4.63±0.23 ^{abc}	0.96±0.09 ^{ab}	0.24±0.02 ^a	0.71±0.01 ^a
	90	5.9	6.1	71.2	5.09±0.34 ^a	0.81±0.14 ^{ab}	0.19±0.01 ^a	0.73±0.01 ^a
	120	5.8	6.0	70.6	4.97±0.14 ^{ab}	1.20±0.10 ^a	0.22±0.01 ^a	0.70±0.04 ^a
0.5 kGy	0	5.9	6.6	73.8	3.30±0.32 ^d	0.78±0.14 ^b	0.23±0.02 ^a	0.74±0.03 ^a
	30	5.4	6.0	70.4	4.02±0.11 ^{abcd}	0.78±0.02 ^b	0.20±0.01 ^a	0.72±0.01 ^a
	60	5.9	6.5	72.7	4.08±0.19 ^{abcd}	0.96±0.09 ^{ab}	0.24±0.02 ^a	0.71±0.01 ^a
	90	5.4	5.9	69.7	3.86±0.58 ^{bcd}	0.97±0.15 ^{ab}	0.25±0.01 ^a	0.72±0.03 ^a
	120	5.4	5.9	69.9	4.68±0.01 ^{abc}	1.12±0.08 ^{ab}	0.24±0.02 ^a	0.71±0.02 ^a
1.0 kGy	0	5.3	6.0	70.2	3.56±0.18 ^{cd}	0.74±0.15 ^b	0.20±0.03 ^a	0.68±0.05 ^a
	30	5.0	5.7	67.8	3.86±0.81 ^{bcd}	0.94±0.28 ^{ab}	0.24±0.05 ^a	0.69±0.03 ^a
	60	5.0	5.8	68.6	3.96±0.24 ^{bcd}	0.80±0.04 ^a	0.20±0.01 ^a	0.69±0.01 ^a
	90	5.0	5.7	67.8	3.77±0.04 ^{cd}	0.87±0.02 ^{ab}	0.23±0.00 ^a	0.69±0.01 ^a
	120	4.9	5.5	68.0	4.15±0.29 ^{abcd}	0.95±0.03 ^{ab}	0.23±0.01 ^a	0.69±0.03 ^a

注:同一列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

表 3 留胚米样品在 37 ℃储藏过程中的食用品质变化
Table 3 Changes in edible quality of rice with remained germ during storage at 37 ℃

处理方式	储藏时间/d	外观	口感	综合评分	硬度	黏度	平衡度	弹性
未处理	0	6.8	7.1	77.7	4.15±0.12 ^{bcd}	0.87±0.05 ^a	0.21±0.02 ^{abc}	0.71±0.01 ^a
	30	5.7	6.5	72.6	4.89±0.59 ^{abc}	0.82±0.24 ^a	0.22±0.03 ^{abc}	0.68±0.02 ^a
	60	5.9	6.1	73.2	4.51±0.35 ^{abcd}	0.97±0.03 ^a	0.26±0.01 ^a	0.73±0.03 ^a
	90	5.9	6.2	72.4	4.86±0.50 ^{abc}	0.96±0.06 ^a	0.24±0.03 ^{ab}	0.72±0.02 ^a
	120	5.8	5.9	70.4	4.71±0.25 ^{abc}	1.01±0.07 ^a	0.24±0.05 ^{ab}	0.70±0.01 ^a
0.5 kGy	0	5.9	6.6	73.8	3.30±0.32 ^d	0.78±0.14 ^a	0.23±0.02 ^{ab}	0.74±0.03 ^a
	30	4.9	5.5	65.9	4.57±0.29 ^{abcd}	0.74±0.03 ^a	0.16±0.01 ^{bc}	0.73±0.02 ^a
	60	4.8	5.5	65.7	5.17±0.48 ^{ab}	0.81±0.14 ^a	0.16±0.02 ^{bc}	0.72±0.02 ^a
	90	4.9	5.6	67.3	4.86±0.60 ^{abc}	0.81±0.14 ^a	0.17±0.01 ^{bc}	0.73±0.01 ^a
	120	4.3	5.0	62.0	5.62±0.55 ^a	1.03±0.08 ^a	0.14±0.02 ^c	0.73±0.04 ^a
1.0 kGy	0	5.3	6.0	70.2	3.56±0.18 ^{cd}	0.74±0.15 ^a	0.20±0.03 ^{abc}	0.68±0.05 ^a
	30	4.7	5.3	65.0	4.29±0.34 ^{abcd}	0.67±0.07 ^a	0.16±0.02 ^{bc}	0.71±0.03 ^a
	60	4.5	5.3	65.0	4.65±0.27 ^{abc}	0.83±0.11 ^a	0.18±0.02 ^{abc}	0.70±0.01 ^a
	90	4.5	5.1	63.7	4.97±0.34 ^{ab}	1.01±0.14 ^a	0.20±0.02 ^{abc}	0.70±0.01 ^a
	120	4.1	5.0	62.9	5.22±0.33 ^{ab}	0.95±0.09 ^a	0.18±0.02 ^{abc}	0.69±0.02 ^a

注:同一列不同字母表示存在显著性差异($P<0.05$)。

如表4所示,1.0 kGy 电子束辐照处理的样品在 37 ℃下储藏 120 d 后,直链淀粉的质量分数从 13.47%显著增加到 17.99%,这也解释了米饭硬度升高的原因。上述研究表明,储藏过程中留胚米直链淀粉含量的升高是导致其食用品质下降的原因之一^[14]。有趣的是,对所有样品来说,在储藏的前 30 d,其食用品质的劣化最快,30 d 后食用品质的劣化明显变缓,因此,在后续研究中如何解决储藏前 30 d 食用品质快速劣化的问题显得尤为重要。

表 4 留胚米在 37 ℃储藏过程中的直链淀粉质量分数变化
Table 4 Changes of amylose content of rice with remained germ during storage at 37 ℃

处理方式	储藏时间/d	直链淀粉质量分数(干基)/%
未处理	0	15.12±0.13
	120	16.19±0.10
1.0 kGy	0	13.47±0.32
	60	15.81±0.06
	120	17.99±0.13

参考文献:

- [1] 乔金玲,张景龙. 北方粳稻胚芽米研究进展[J]. 现代化农业,2019(8):32-34.
- [2] 孙向东. 发芽糙米研究最新进展[J]. 中国稻米,2005(3):5-8.
- [3] PANLASIGUI L N, THOMPSON L U. Blood glucose lowering effects of brown rice in normal and diabetic subjects[J]. *International Journal of Food Science Nutrition*, 2006, 57(3/4): 151-158.
- [4] 朱松,宋善武,李进伟,等. 胚芽米微波灭酶工艺[J]. 食品与生物技术学报,2018,37(6):603-609.
- [5] 伍潇洁,万云雷,韩红霞,等. 射频处理对稻谷贮藏品质的影响[J]. 食品科技,2016,41(6):187-190.
- [6] 姜蓓,吕庆云,周坚,等. 紫外照射对留胚米稳定性的影响[J]. 中国粮油学报,2020,35(11):9-14.
- [7] 陈银基,陈霞,蒋伟鑫,等. ⁶⁰Co-γ 辐照处理对低温储藏糙米品质及微结构的影响[J]. 中国农业科学,2014(11):2214-2223.
- [8] LUO X H, DU Z H, YANG K, et al. Effect of electron beam irradiation on phytochemical composition, lipase activity and fatty acid of quinoa[J]. *Journal of Cereal Science*, 2021, 98: 103161.
- [9] 徐鹏程,徐睿,戴智华,等. 不同包装方式对留胚米 - 理化及食味品质的影响[J]. 中国粮油学报,2022,37(9):1-7.
- [10] 赵卿宇,郭辉,陈博睿,等. 大米储藏过程品质变化及其动力学[J]. 食品科学,2020,41(21):204-212.
- [11] KIM S M, CHUNG H J, LIM S T. Effect of various heat treatments on rancidity and some bioactive compounds of rice bran[J]. *Journal of Cereal Science*, 2014, 60(1):243-248.
- [12] BRUMNSCHWILER C, HEINE D, KAPPELER S, et al. Direct measurement of rice bran lipase activity for inactivation kinetics and storage stability prediction[J]. *Journal of Cereal Science*, 2013, 58(2):272-277.
- [13] 李湘,郭东权,陈云堂,等. 电子束辐照对大米营养和蒸煮品质的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(15):251-257.
- [14] RAO B S S, MURTHY A, SUBRAHMANYA R S. The amylose and the amylopectin contents of rice and their influence on the cooking quality of the cereal[J]. *Proceedings of the Indian Academy of Sciences-Section B*, 1952, 36(2):70-80.

(责任编辑:许艳超)

3 结 语

研究了两个梯度(0.5 kGy 和 1.0 kGy)的电子束辐照处理对留胚米储藏过程中的理化和食用品质的影响,得到以下结论:电子束辐照处理能破坏脂肪酶的活性,降低储藏过程中脂肪酸值的升高速度,进而大幅延长留胚米的保质期;较低电子束辐照剂量和储藏温度对留胚米的理化指标和食用品质影响较小,提高电子束辐照剂量和储藏温度会加速大米食用品质的劣化,因此采用电子束辐照处理时采用 0.5 kGy 的辐照剂量。