

电子束辐照对大米营养和蒸煮品质的影响

李 湘, 郭东权^{*}, 陈云堂, 范家霖, 吕晓华, 王娟娟, 张建伟, 杨保安

(河南省科学院同位素研究所有限责任公司, 河南省科学院核农学重点实验室, 郑州 450015)

摘 要: 为进一步发展、完善辐照杀虫灭菌技术应用于储粮方面的理论研究, 该研究采用 0、0.83、1.56、2.30、4.93 kGy 不同剂量的电子束辐照大米样品, 考察其对大米品质的影响。结果表明: 不同剂量的电子束辐照对大米的蛋白质含量、氨基酸的含量与组成无明显影响 ($p>0.05$); 随着辐照剂量的增加, 大米的脂肪酸值、胶稠度升高 ($p<0.05$), 吸水率、膨胀率下降 ($p<0.05$); 电子束辐照对大米糊化温度的影响不明显 ($p>0.05$), 但显著降低大米的峰值黏度、衰减值、回生值 ($p<0.05$), 明显影响米饭的蒸煮品质 ($p<0.05$), 剂量为 4.93 kGy 时蒸煮米饭出现明显的褐变。电子束辐照大米的剂量不宜超过 2.30 kGy, 以 0.83 kGy 的辐照剂量较佳, 该研究结果将为储藏和进出口检疫中对大米进行辐照杀虫、灭菌时的剂量选择提供参考。

关键词: 辐照, 营养, 品质控制, 大米, 糊化特性, 蒸煮

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.15.040

中图分类号: TS 210.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-15-0251-07

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.
Li Xiang, Guo Dongquan, Chen Yuntang, et al. Effect of electron beam irradiation on nutritive and cooking qualities of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(15): 251-257. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

稻谷是世界上最主要的粮食品种之一, 中国是世界上大米的主要生产和消费国, 年产稻谷 2 亿 t 左右, 居世界首位^[1]。在膳食结构多样化的今天, 大米仍然是人类的主食之一, 全世界有 39 个国家以大米为主要食物, 尤其是亚洲国家对稻米的依赖性更强。但由于构成大米的细胞是一种储藏细胞, 其内部积累了淀粉、蛋白质、脂肪等多种成分, 极易受虫、霉菌侵害; 加之大米脱壳去皮后, 米粒表面不同程度地受到外界环境中的温、湿、光、氧等的影响而发生吸湿、陈化、爆腰等现象, 由此给粮食加工企业造成较大的经济损失, 消费者也常常因储藏不当而使优质大米丧失其特性, 因此大米的贮藏保鲜一直是众多研究者关注的热点。传统的仓储害虫防治多以化学方法为主^[2], 化学药剂的长期使用不仅污染环境, 而且易使害虫产生抗药性、增加防治难度, 同时粮食中的残留药物也直接危害到人类健康, 因此亟待研究开发出绿色的储粮、杀虫、灭霉技术。

食品辐照技术作为一种“冷处理”的物理方法, 耗能少, 杀虫灭菌效果明显, 且不添加任何化学物质, 无营养学、微生物学方面的安全问题^[3], 已逐渐成为化学药物方法的有效替代与补充^[4]和害虫综合防治体系中的一项重要手段^[5]。食品辐照手段包括 ⁶⁰Co、¹³⁷Cs 放射性元素产生的 γ 射线辐照和电子加速器产生的电子束、X 射线辐照。10 kGy 的辐照吸收剂量能有效实现对储藏害虫的防治和霉菌污染, 在防止食品中食源性致病微生物污染和进出口检疫方面应用潜力巨大^[6-7], 近些年已广泛应用于食品、粮食、水果、蔬菜、禽肉保鲜等方面^[8-12]。经国际社会的长期研究, 充分证明食品辐照是一项非常安全的加工处理方法, 1980 年联合国粮农组织 (food and agriculture organization, FAO)、国际原子能机构 (international atomic energy agency, IAEA) 和世界卫生组织 (world health organization, WHO) 认定经 10 kGy 以下剂量辐照的食品是安全可靠的, 不需要进行任何毒理学试验, 不会产生特别的营养和微生物学问题^[13]; 中国卫生部也把允许使用的食品辐照剂量由过去的 1 kGy 放宽到了 10 kGy^[14]。目前食品辐照加工技术已经在国内外得到了广泛的推广应用, 产生了巨大的经济与社会效益。

大量研究表明, 粮食辐照技术是一项值得推广的绿色食品保鲜加工技术。⁶⁰Co γ 射线辐照防治杂拟谷盗的最低有效剂量为 200 Gy^[15], 电子束辐照防治玉米象^[16]、锯谷盗^[17]、赤拟谷盗^[18]的有效剂量分别为 300、300、518 Gy; 微生物防控方面, 60~225 keV 的电子束辐照能使糙米、稻谷、小麦、荞麦的细菌总数降至 100 CFU/g 以下, 对粮食品质无明显影响, 且电子束辐照对淀粉分子的降解

收稿日期: 2012-02-17 修订日期: 2012-07-04

基金项目: 农业部公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (201103007); 河南省创新型科技人才队伍建设工程项目 (豫科人事 (2009) 2 号); 郑州市创新型科技人才队伍建设工程项目 (096SYJH28087); 河南省重点攻关计划项目 (112102110043)

作者简介: 李 湘 (1981—), 女, 湖南湘潭人, 助研, 博士, 主要从事核技术应用研究。郑州 河南省科学院同位素研究所有限责任公司, 河南省科学院核农学重点实验室, 450015。Email: lixiang7783@126.com

*通信作者: 郭东权 (1980—), 男, 河南新野人, 助研, 硕士, 主要从事核技术应用研究。郑州 河南省科学院同位素研究所有限责任公司, 河南省科学院核农学重点实验室, 450015。Email: dongquanguo@yahoo.com.cn

作用比 γ 射线辐照的影响小^[19]。包装好的大米经 0.4~0.8 kGy 吸收剂量的 γ 射线辐照后,在常温下储藏不会发生虫蛀现象,且营养成分、感观指标变化不明显^[20-21]。

与 γ 射线辐照装置相比,电子加速器具有不受能源限制、操作方便、安全、节能、环保、易于质量控制、无核废料等优点,随着全球辐射加工业的日新月异,特别是辐射检疫工作的需求,电子辐照技术会有更大的发展^[22]。Joseph Borsa 博士 1994 年曾对加速器与 ⁶⁰Co 辐照装置辐照谷物杀虫的经济效益进行了分析,结果表明电子加速器辐照谷物每吨的成本为 0.55 美元,而 ⁶⁰Co 辐照装置的成本为 1.23 美元/t,在大量辐照散装粮食的情况下利用加速器进行辐照杀虫成本较低^[23],而粮食单次电子杀虫的费用为 0.25 美元/t (约合人民币 2 元/t),其处理成本低于化学熏蒸^[24]。这些表明,较之传统灭菌、杀虫技术和 γ 射线辐照装置,电子束辐照设施更适合于粮食专用接卸港和大型粮食集散地等需要集中处理(或检疫目的)的场合。

近年来,电子加速器设备的技术水平得到了迅速发展,这将进一步为电子辐照技术的推广、应用提供有力设备支持和保障。然而,以往关于辐照饲料的研究多集中于 ⁶⁰Co γ 射线辐照方面,有关电子束辐照的研究很少,因而缺乏相应的电子束辐照工艺规范来指导辐照企业的实际生产。因此,在前期利用辐照技术进行杀虫灭菌的基础上,本文首次系统地研究了低能电子束辐照对大米营养品质、加工品质、食用品质的影响,以期为更好地确定电子束辐照法处理粮食中辐照剂量这一核心参数提供参考,为电子束辐照在大米储藏保鲜方面得到更好的推广与应用提供理论依据和数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

大米样品为购自于郑州市黑庄粮油市场的东北珍珠米(兴盛米业有限责任公司,生产日期 2011 年 8 月 15 日)。

1.2 试验设备

电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);YN-ZD-2 型电热蒸馏水器(上海博迅实业有限公司医疗设备厂);高速万能粉碎机(天津市泰斯特仪器有限公司);AL204 分析天平(梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司);RVA 快速黏度分析仪(澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 辐照处理

2011 年 9 月 21 日采用无锡爱邦电子加速器公司的 5 MeV 电子加速器进行静态辐照加工,能量为 4.9 MeV、束流为 2 mA,传送速率为 6 m/min;样品采用半吸收剂量、翻转 180°的辐照方式,以保证样品吸收剂量均匀。参考前人研究结果^[11-15],大米设 0、0.83、1.56、2.30、4.93 kGy 5 个不同吸收剂量水平,每个剂量含 3 个重复,每个重复 500 g;样品均采用塑料薄膜样品袋(郑州塑料袋印刷厂,聚氯乙烯材质,0.05 mm 厚)进行普通包装。

1.3.2 营养成分分析

辐照后第 2 天,测定辐照前后样品粗蛋白质、粗脂肪、氨基酸含量的变化,由农业部农产品质量监督检验测试中心(郑州)检测。含水率按 GB/T 5009.3-2010 测定,蛋白质含量按 GB/T 5009.5-2010 测定,氨基酸含量按 GB/T 5009.124-2003 测定,其中色氨酸的含量测定按 NY/T 57-1987 进行。

1.3.3 主要理化指标测定

游离脂肪酸值的测定参照 GB/T 15684-1995,糊化特性参数按 GB/T 24853-2010 测定。

1.3.4 蒸煮品质分析

1) 吸水率、膨胀度测定:称取约 8 g 待测米样放入直径 4 cm、高 10 cm 的铜丝网篮中,将网篮放入沸水中煮沸至大米完全糊化、米粒无硬芯;取出网篮,将糊化后的样品倒在 16 目的检验筛上平铺,离散并自然晾干 30 min,测定米饭的质量和体积,计算吸水率和体积膨胀率。

$$\text{吸水率} = m_2 / m_1 \quad (1)$$

$$\text{体积膨胀率} = V_2 / V_1 \quad (2)$$

式中, m_1 为大米的质量, g; m_2 为米饭的质量, g; V_1 为大米的体积, mL; V_2 为米饭的体积, mL。

2) 胶稠度测定:按 GB/T 22294-2008 进行。

3) 米饭的感官评价:根据 GB/T 15682-2008 方法进行。事先将 5 个样品进行随机编号。每份称取试样大米 500 g,快速加入 1 500 mL 水,顺时针、逆时针分别搅拌 10 圈后,快速换水重复洗涤 2 次,沥尽余水后倒入相应电饭锅内,加 500 mL 蒸馏水后开始蒸煮,待电饭锅开关跳开后再焖制 20 min;将制成的不同试样的蒸饭分装于一次性餐盘上,每盘 3 份试样,趁热品尝。评价小组由 7 名专家组成,对蒸煮米饭的进行感观评价,结果取平均值。

1.4 数据处理与分析

采用 SAS 6.12 软件 GLM 程序对试验数据进行处理和分析,以 $p < 0.05$ 作为差异显著性判断标准;差异显著者进行 Duncan's 多重比较和相关回归分析。

2 结果与分析

2.1 电子束辐照对大米营养品质的影响

大米是摄取蛋白质的一个重要来源,蛋白质含量高、氨基酸组成平衡性好就表明其营养品质佳,而氨基酸平衡性多采用必需氨基酸指数(essential amino acid index, EAAI)来衡量。

本研究中,电子束辐照对大米中蛋白质含量、氨基酸组成的影响见表 1。由表 1 可知,各处理组大米的蛋白质、氨基酸质量分数的差异不明显($p > 0.05$),这与 Wu 等(2004)^[25]、Matloubi 等(2004)^[26]的报道一致;电子束辐照对氨基酸组成平衡性(EAAI)有一定的影响,但影响趋势不明显。总必需氨基酸含量方面,0.83、1.56 kGy 辐照剂量组大米的总必需氨基酸(total essential amino acid, TEAA)质量分数分别比未辐照组下降了 1.7%、3.8%,2.30 kGy 辐照剂量组 TEAA 质量分数比未

辐照组增加了 5.5%，而 4.930 kGy 辐照剂量组与对照组相当；必需氨基酸平衡性方面，当以牛奶蛋白为参考蛋白时，0.83、1.56 kGy 辐照剂量有降低大米氨基酸平衡性的趋势，而 2.30 kGy 辐照剂量有改善大米氨基酸平衡性的趋势，这主要是由于 2.30 kGy 辐照剂量使大米中苯丙氨酸+酪氨酸、组氨酸、异亮氨酸、蛋氨酸、缬氨酸的含量相对于其他剂量组均有不同程度的提高。

试验剂量范围内的电子束辐照对大米的营养品质无不良影响，这与小麦辐照的研究结果相似^[8]。

表 1 不同辐照剂量下大米的蛋白质质量分数与氨基酸组成
Table 1 Protein content and amino acid composition of rice samples irradiated with different dose levels

项目	辐照剂量/kGy				
	0	0.83	1.56	2.30	4.93
含水率/%	7.66±0.22	7.56±0.11	7.80±0.15	7.75±0.08	7.62±0.02
粗蛋白/%	13.56±0.04	13.50±0.02	13.32±0.03	13.37±0.05	13.18±0.02
天冬氨酸/%	0.65±0.02	0.64±0.03	0.64±0.02	0.68±0.02	0.65±0.03
苏氨酸/%	0.27±0.01	0.26±0.02	0.26±0.01	0.26±0.01	0.26±0.02
丝氨酸/%	0.39±0.02	0.38±0.02	0.38±0.04	0.36±0.02	0.38±0.01
谷氨酸/%	1.54±0.04	1.44±0.01	1.45±0.03	1.50±0.02	1.47±0.02
甘氨酸/%	0.33±0.02	0.32±0.02	0.32±0.01	0.32±0.00	0.32±0.02
丙氨酸/%	0.40±0.02	0.39±0.02	0.38±0.02	0.40±0.02	0.40±0.02
胱氨酸/%	0.11±0.00	0.11±0.01	0.10±0.02	0.11±0.01	0.11±0.01
缬氨酸/%	0.42±0.02	0.41±0.03	0.42±0.02	0.46±0.01	0.42±0.02
蛋氨酸/%	0.14±0.01	0.14±0.02	0.14±0.02	0.16±0.03	0.15±0.02
异亮氨酸/%	0.28±0.03	0.27±0.02	0.27±0.01	0.30±0.02	0.27±0.00
亮氨酸/%	0.62±0.02	0.60±0.04	0.60±0.02	0.63±0.03	0.61±0.01
酪氨酸/%	0.14±0.00	0.14±0.01	0.14±0.02	0.20±0.01	0.14±0.02
苯丙氨酸/%	0.46±0.02	0.45±0.03	0.46±0.01	0.50±0.02	0.46±0.00
赖氨酸/%	0.27±0.01	0.26±0.01	0.26±0.00	0.28±0.02	0.27±0.01
组氨酸/%	0.19±0.02	0.18±0.01	0.19±0.02	0.20±0.02	0.19±0.00
精氨酸/%	0.56±0.03	0.54±0.02	0.56±0.03	0.60±0.04	0.57±0.02
脯氨酸/%	0.30±0.01	0.30±0.02	0.28±0.02	0.28±0.01	0.28±0.02
色氨酸/%	0.08±0.02	0.07±0.01	0.08±0.02	0.08±0.01	0.08±0.02
TEAA/(mg·g ⁻¹)	389.0	382.3	374.4	410.3	388.5
EAAI ₁ *	0.74	0.72	0.71	0.77	0.74
EAAI ₂	0.78	0.76	0.75	0.81	0.82

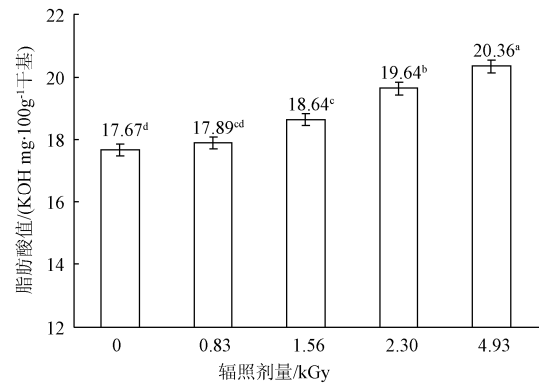
注: * EAAI₁、EAAI₂ 分别以 FAO/WHO/UNU(1985) 中鸡蛋、牛奶为标准蛋白来进行计算的。TEAA 为总必需氨基酸。

2.2 电子束辐照对大米脂肪酸值的影响

脂肪酸值是衡量大米新鲜程度的一个重要指标。大米中含有一定量的以不饱和脂肪酸组成为主的脂肪，在外界因素（光、热、水等）作用下，大米自身及微生物的代谢作用加剧使大米中不饱和脂肪酸发生氧化、分解反应，产生的游离脂肪酸增加，引起大米酸败。所产生游离脂肪酸的多少可用脂肪酸值来表示；脂肪酸值越高，大米的品质劣变越严重。因此，本研究通过测定大米中脂肪酸值的变化来衡量电子束辐照对大米品质劣变程度的影响。

本研究中电子束辐照对大米脂肪酸值的影响如图 1 所示。由图 1 可知，试验大米的脂肪酸值随着辐照剂量的增加而表现出明显的增加趋势 ($p < 0.05$)，线性相关系数为 0.9180。4.93、2.30、1.56 kGy 的辐照剂量使大米脂

肪酸值分别比未经辐照组提高了 15.2%、11.1%、5.5%，差异显著 ($p < 0.05$)，而 0.83 kGy 剂量组与未经辐照组间的脂肪酸值相差不明显 ($p > 0.05$)。由此可见，随着辐照剂量的增加，电子束辐照对大米脂肪的电离作用越强，从而导致脂类物质降解产生的游离脂肪酸含量增加，这与其他学者的研究结果一致^[27]。



注: 上标字母相异者表示两者差异显著 ($p < 0.05$)，字母相同者表示两者差异不明显 ($p > 0.05$)。下同。

图 1 不同剂量电子束辐照下大米脂肪酸值的变化
Fig.1 Changes of fatty acid value for rice with different irradiation dosage levels

2.3 电子束辐照对大米糊化特性的影响

通常，测定淀粉的糊化曲线时，加热淀粉悬浮液使淀粉颗粒发生膨胀是引起淀粉黏度增加的主要原因，淀粉黏度的下降则是因膨胀的淀粉颗粒发生崩解所致，而淀粉颗粒的膨胀程度与大米谷物中淀粉颗粒的平均分子大小呈正比。Sandhya Rani 等^[28]的研究也证实最终黏度、回生值、峰值时间与淀粉分子的聚合度具有明显相关性。因此，本文通过研究大米淀粉的糊化特性来考察电子束辐照对大米中淀粉分子的影响。

表 2 不同辐照剂量下大米的糊化参数
Table 2 Pasting parameters of rice samples with different irradiation dosage levels

项目	辐照剂量/kGy				
	0	0.83	1.56	2.30	4.93
糊化温度/°C	84.42±0.35	84.80±0.56	84.05±0.43	83.48±0.50	85.62±0.61
	197.08±0.46 ^a	167.17±0.70 ^a	139.67±0.62 ^b	115.75±0.72 ^{bc}	71.33±0.60 ^c
峰值黏度/(Pa·s)	102.58±0.60 ^a	83.00±0.72 ^b	59.92±0.24 ^{bc}	45.08±0.60 ^{bc}	22.83±0.36 ^c
	212.58±0.72 ^a	183.17±0.84 ^{ab}	142.67±0.72 ^b	110.58±0.60 ^{bc}	58.92±0.72 ^c
最低黏度/(Pa·s)	94.50±1.20 ^a	84.17±1.56 ^{ab}	79.75±1.32 ^{ab}	70.67±1.30 ^b	48.50±1.32 ^c
	110.00±1.08 ^a	100.17±1.32 ^{ab}	82.75±0.84 ^b	65.50±1.32 ^b	36.08±0.96 ^c
回生值/(Pa·s)	110.00±1.08 ^a	100.17±1.32 ^{ab}	82.75±0.84 ^b	65.50±1.32 ^b	36.08±0.96 ^c
	110.00±1.08 ^a	100.17±1.32 ^{ab}	82.75±0.84 ^b	65.50±1.32 ^b	36.08±0.96 ^c

电子束辐照对大米糊化特性的影响见表 2。由表 2 可知，电子束辐照能显著影响大米淀粉的糊化黏度，其影响趋势与 ⁶⁰Co- γ 射线辐照的影响趋势相一致^[29]；但本研究中电子束对起始糊化温度的影响不明显。峰值黏度、最低黏度、最终黏度、衰减值、回生值均随辐照剂量的

增加而表现出明显的下降趋势 ($p < 0.05$), 线性相关系数分别为 0.9884、0.9967、0.9909、0.9225、0.9662; 其中最终黏度下降幅度最大, 这主要是由淀粉分子发生的降解反应所引起的^[30], 且黏度的下降程度取决于不同辐照剂量下淀粉分子聚合度的变化情况^[29,31]。这证实了试验剂量范围内的电子束辐照能使淀粉颗粒表面的淀粉分子长链发生断裂, 分子聚合度下降, 从而使大米中的淀粉颗粒受到破损而降解^[29]。这些意味着经电子束辐照后, 被包埋于淀粉颗粒内部的支链淀粉可能被暴露或释放出来^[32], 并且有少量支链淀粉的部分较长支链可能被降解为直链淀粉^[29], 两者都将影响大米中表观直链淀粉的含量, 进而使淀粉的糊化黏度表现有差异^[32-33]。此外, 电子束辐照对大米中与淀粉分子相结合的蛋白质、脂类分子的降解作用也是不容忽视的, 但目前尚未见相关文献报道, 有待进一步研究。

衰减值、回生值主要取决于具有不同分子聚合度(6-12、6-24)的支链淀粉分子的相对含量比 (amylopectin content, APC), 且随着 APC 的增加而下降^[34]。本研究中, 衰减值、回生值均随着辐照剂量增加而下降, 这表明电子束辐照能将淀粉大分子中的 C-C、C-O、C-H 键打断^[34-35], 使大米中支链淀粉分子的部分长链发生断裂, 分子聚合度下降。

峰值黏度、回生值都可在一定程度上反映大米的食用品质^[36-37]。峰值黏度越大, 回生现象越显著 (回生值越高), 大米的食用品质就越差; 反之, 则大米的食用品质较佳, 米饭即使在冷却后也不容易变硬, 仍可保持较柔软的口感。本研究中, 电子束辐照能显著降低大米淀粉的峰值黏度、回生值, 这说明较低剂量的电离辐射有使米饭质地软化而改善大米食用品质的效果, 这与 Sung 等^[37]、Wu 等^[29]等的研究结果相一致。

2.4 电子束辐照对米饭蒸煮性质和感官品质的影响

2.4.1 大米的吸水率、膨胀率变化

研究表明, 淀粉颗粒的膨胀特性主要是支链淀粉的特性, 膨胀特性的强弱与支链淀粉分子的大小、结构相关, 而直链淀粉对淀粉颗粒的膨胀特性起着消减、抑制的作用。在加热糊化过程中, 随着颗粒内部淀粉分子与水分子间氢键的增加, 淀粉分子晶体的有序结构被破坏, 从而引起淀粉颗粒的膨胀; 膨胀颗粒的淀粉组成主要是支链淀粉, 直链淀粉则从膨胀的淀粉颗粒中渗透出来^[37]。

本研究中, 电子束辐照对大米吸水率和膨胀率的影响如图 2 所示。由图 2 可知, 随着辐照剂量的增加, 大米的吸水率、膨胀率减小, 这就暗示了随着辐照剂量的增加, 大米淀粉中支链淀粉分子的长链结构受到破坏, 晶体的有序结构受损, 淀粉颗粒发生崩解而变小。相对于辐照组, 未辐照组淀粉颗粒内支链淀粉的长链结构没被打断, 支链淀粉长链形成的双螺旋体结晶结构无破损, 结晶体内的直链淀粉也无流出现象, 这些都有利于维持对被吸收水分的保持性, 有利于维持糊化过程中形成的胶稠化的淀粉颗粒结构, 从而使淀粉颗粒表现出较好的吸水性能和膨胀性能。

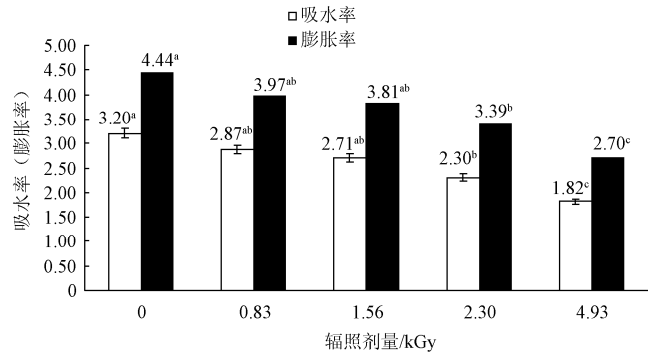


图 2 不同剂量电子束辐照下大米吸水率和膨胀率的变化
Fig.2 Changes of water absorption and swelling rate for rice with different irradiation dosage levels

4.1.2 大米的胶稠度变化

淀粉凝胶的长度 (胶稠度) 可反映淀粉形成凝胶的能力和胶的流动性; 糊化淀粉在低温时形成的凝胶长度越长, 淀粉的成胶能力越弱、流动性越强。研究证实, 辐照能降低表观直链淀粉的含量^[29,38], 而表观直链淀粉的减少是淀粉胶稠度增加的直接原因^[39], 表观直链淀粉含量越高的淀粉所对应的胶稠度越小、凝胶性能越好^[40], 米饭的食用品质越佳^[28]。本研究中, 大米淀粉的胶稠度随着辐照剂量的增加而表现出明显的线性增加趋势 ($R^2=0.99$) (图 3), 这与 Yu 等^[41-42]的研究结果相一致, 这预示着适宜剂量的电子束辐照有利于大米食用品质的改善。

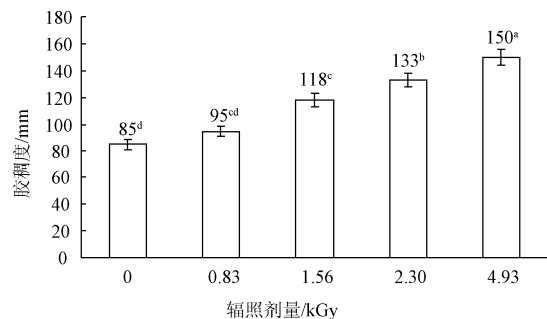


图 3 不同剂量电子束辐照下大米胶稠度的变化
Fig.3 Changes of gel consistency for rice with different irradiation dosage levels

2.4.3 米饭的感官评价

米饭的品尝评分是评价大米品质的最基础、最重要的项目。本研究采用感官评分法对试验大米的食用品质进行了评价, 结果列于表 3。

由表 3 可知, 大米经电子束辐照处理后, 米饭的外观结构随着辐照剂量的增加呈明显的下降趋势, 其中以米饭的颜色变化最为显著, 4.93 kGy 辐照组蒸煮米饭发生了明显褐变、并且出现有少量轻微爆裂的饭粒, 2.30 kGy 辐照后米饭的褐变程度稍轻、发现了数颗轻微爆裂的饭粒, 0.83、1.56 kGy 辐照组米饭有轻微的褐变、没有发现破损的饭粒。所有试验大米在蒸煮过程中均散发出浓郁的香味、无异味, 米饭均口感清香、略带甜味, 有嚼劲、软硬适中, 但 2.30 kGy 辐照大米的米饭开始出现

有轻微的粘牙感觉, 4.93 kGy 剂量组米饭的粘牙感觉较 2.30 kGy 剂量组有加重、但不明显; 各处理组冷饭的饭粒均较松散、结团现象不明显, 米饭冷却后均表现有不同程度的稍变硬现象, 但各组差异不明显。总之, 随着辐照剂量的增加, 蒸煮米饭的综合感官品质表现出下降趋势。

表 3 电子束辐照对米饭感官评价的影响

Table 3 Sensory evaluation for cooked rice after irradiation with different dosage levels

项目	辐照剂量/kGy				
	0	0.83	1.56	2.30	4.93
气味	18.17±0.58	18.17±0.58	18.00±0.58	17.57±0.17	17.67±0.29
外观结构	17.17±0.53 ^a	15.83±1.68 ^{ab}	15.67±1.29 ^{ab}	14.00±1.53 ^{bc}	12.33±1.27 ^c
颜色	6.00±0.69 ^a	5.33±0.64 ^{ab}	5.00±0.50 ^b	4.33±0.58 ^b	3.00±0.00 ^c
光泽	7.00±1.00	6.33±1.15	7.00±1.00	6.67±0.58	6.33±0.64
饭粒完整性	4.17±1.00 ^a	4.17±1.00 ^a	3.67±1.00 ^b	3.00±1.15 ^c	3.00±1.00 ^c
适口性	22.67±2.00	22.33±1.15	21.60±1.86	20.93±0.50	20.17±0.75
黏性	7.00±1.00 ^a	7.00±1.00 ^a	6.33±1.53 ^b	5.67±0.58 ^c	5.33±0.58 ^c
弹性	8.33±1.15 ^a	7.67±1.15 ^b	7.60±1.04 ^b	7.60±1.04 ^b	6.83±1.44 ^c
软硬度	7.33±0.58	7.67±0.58	7.67±1.10	7.67±0.64	8.00±0.64
滋味	20.00±1.73	19.67±1.53	19.33±1.15	18.50±0.50	18.50±0.50
冷饭质地	2.83±1.00	2.83±0.58	3.00±0.58	3.33±0.58	3.83±0.29
综合评分	80.83±5.02 ^a	78.83±4.29 ^{ab}	77.60±3.74 ^b	74.33±1.80 ^c	72.50±0.52 ^c

根据《稻谷储存品质判定规则》的规定, 米饭品尝评分值在 70 分以上的大米, 其品质正常、良好, 适宜储存。本研究中, 各组米饭的品尝评分值均在 70 分以上, 这表明本研究剂量范围内的电子束辐照对大米的品质无不良影响, 不影响其储存性, 但 4.93 kGy 辐照剂量组大米因蒸煮米饭出现了较明显褐变而可能不被大多数消费所接受。

3 结 论

电子束辐照后, 大米的蛋白质含量和氨基酸组成没有明显变化, 脂肪酸值随辐照剂量的增加而升高。电子束辐照对大米的糊化温度没有明显影响, 对大米的糊化黏度参数影响显著, 峰值黏度、最终黏度、最低黏度、衰减值、回生值均随辐照剂量的增加而降低。电子束辐照能显著影响大米的蒸煮品质, 使大米的吸水率、膨胀率降低, 胶稠度升高; 电子束辐照对米饭的气味、滋味、冷饭质地无明显影响, 但 4.93 kGy 辐照剂量使米饭出现明显褐变、少数饭粒爆裂、稍感粘牙的现象, 外观品质显著下降。综合本试验结果可确定, 电子束辐照大米的剂量不宜超过 2.30 kGy, 且以 0.83 kGy 辐照大米的品质较佳。

[参 考 文 献]

- [1] 孙忻. 2011 年我国稻米市场分析及 2012 年展望[J]. 粮食与油脂, 2012(3): 43—46.
Sun Xin. Market analysis for 2011 and prospect for 2012 of rice in China[J]. Journal of Cereals and Oils, 2012(3): 43—46 (in Chinese with English abstract)
- [2] 李月, 方茜, 汪海鹏. 全球粮食储藏面临的新挑战[C]//第二届粮食储藏技术与管理论坛, 2008, 30—39.

- Li Yue, Fang Qian, Wang Haipeng. New challenge for the global food storage[C]//2nd Forum for Grain Storage Technology and Management, 2008, 30—39. (in Chinese with English abstract)
- [3] 哈益明, 王锋, 李淑荣, 等. 辐照处理对冷却肉脂肪氧化影响的研究[J]. 食品科学, 2004, 25(11): 303—306.
Ha Yiming, Wang Feng, Li Shurong, et al. Effects of irradiation on lipid oxidation of chilled meat[J]. Food Science, 2004, 25(11): 303—306. (in Chinese with English abstract)
- [4] Bakri A, Heather N, Hendrichs J, et al. Fifty years of radiation biology in entomology: lessons learned from IDIDAS[J]. Annals of the Entomological, 2005, 98(1): 1—12.
- [5] Bakri A, Mehta K, Lance D. Sterilizing insects with ionizing radiation[J]. Sterile Insect Technique, 2005, Part III, 233-268, DOI: 10.1007/1-4020-4051-2_9
- [6] Kikuchi O K, Todoriki S, Saito M, et al. Efficacy of soft-electron (low-energy electron beam) for soybean decontamination in comparison with gammarays[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(2): 649—652.
- [7] 哈益明, 施惠栋, 王锋, 等. 电子束食品辐照的研究现状与应用特点[J]. 核农学报, 2007, 21(1): 61—64.
Ha Yiming, Shi Huideng, Wang Feng, et al. Application and characteristics of food irradiation by electron beam[J]. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2007, 21(1): 61—64. (in Chinese with English abstract)
- [8] 黄曼, 胡碧君, 吴新莲, 等. 电子束辐照对小麦储藏抑菌及加工品质的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 342—346.
Huang Man, Hu Bijun, Wu Xinlian, et al. Effects of electron beam irradiation on the fungi inhibition during storage and processing quality of bulk wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 342—346. (in Chinese with English abstract)
- [9] 杨性民, 刘青梅, 杨祚胜, 等. 辐照技术在微波烤虾保藏中的应用[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 220—222.
Yang Xingmin, Liu Qingmei, Yang Zuosheng, et al. Effective preservation of *Penaeus orientalis* using microwave and nuclear radiation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(4): 220—222. (in Chinese with English abstract)
- [10] 傅俊杰. 脱水蔬菜辐照杀菌及贮藏保鲜效果的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(5): 102—105.
Fu Junjie. Study on radialization preservation techniques of dehydrated vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2000, 16(5): 102—105. (in Chinese with English abstract)
- [11] 马丽珍, 南庆贤, 戴瑞彤. 真空包装冷却猪肉低剂量辐照后的理化和感官特性变化[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 184—187.
Ma Lizhen, Nan Qingxian, Dai Ruitong. Changes in physico-chemical and sensory characteristics of vacuum-packaged chilled pork irradiated at low-dose gamma ray[J]. Transactions

- of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(4): 184—187. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈冬梅, 岳田利, 袁亚宏, 等. ^{60}Co - γ 辐照对苹果汁中有机磷农药降解及品质影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 270—274.
Chen Dongmei, Yue Tianli, Yuan Yahong, et al. Effects of ^{60}Co - γ ray radiation on the degradation of organophosphorous pesticides in apple juice and its quality[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 270—274. (in Chinese with English abstract)
- [13] CAC (codex alimentarius commission). Revised codex general standard for irradiation foods codex stan[S]. Codex STAN 106—1983, REV.1—2003.
- [14] 中华人民共和国卫生部. 辐照食品卫生管理办法[S]. 1996.
- [15] 郭东权, 陈云堂, 张建伟, 等. ^{60}Co 射线对杂拟谷盗成虫的辐照效应研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(15): 183—186.
Guo Dongquan, Chen Yutang, Zhang Jianwei, et al. Irradiation effect of ^{60}Co γ -rays on adults of *Tribolium confusum* Jacquelin du Val[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(15): 183—186. (in Chinese with English abstract)
- [16] 王殿轩, 李淑荣, 温贤芳, 等. 电子束辐照谷物中玉米象不同虫态的生物效应[J]. 核农学报, 2004, 18(2): 131—133.
Wang Dianxuan, Li Shurong, Wen Xianfang, et al. Effect of electronic beam from accelerator on different development stages of maize weevil[J]. Journal of Nuclear Agricultural Science, 2004, 18(2): 131—133. (in Chinese with English abstract)
- [17] 范家霖, 陈云堂, 郭东权, 等. 电子束对锯谷盗幼虫和成虫的辐照效应研究[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(24): 13246—13248, 13311.
Fan Jialin, Chen Yuntang, Guo Dongquan, et al. Effect of electronic beam irradiation on larvae and adult of *Oryzaephilus surinamensis*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(24): 13246—13248, 13311. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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, 25(2): 26—28.
Li Shurong, Wang Dianxuan, Wen Xianfang, et al. Irradiation effect of electronic beam on red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst)[J]. Journal of Zhenzhou Institute of Technology, 2004, 25(2): 26—28. (in Chinese with English abstract)
- [19] Hayashi T, Takahashi Y, Todoriki S. Sterilization of foods with low-energy electrons (“soft-electrons”) [J]. Radiation Physics and Chemistry, 1998, 52(1/6): 73—76.
- [20] 孟丽芬, 许德春, 付立新, 等. 绿色大米辐照保鲜技术及加工工艺的研究[J]. 黑龙江农业科学, 2006(2): 48—50.
Meng Lifen, Xu Dechun, Fu Lixin, et al. Irradiation preservation technique and processing technics for rice[J]. Heilongjiang Agricultural Science, 2006(2): 48—50. (in Chinese with English abstract)
- [21] 付立新, 孟丽芬, 许德春, 等. 绿色食品辐照保鲜技术研究[J]. 吉林农业大学学报, 2010, 32(6): 697—700.
Fu Lixin, Meng Lifen, Xu Dechun, et al. Study on irradiation preservation technology of green food[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2010, 32(6): 697—700. (in Chinese with English abstract)
- [22] Imamura T, Miyanoshita A, Todoriki S, et al. Usability of a soft-electron (low-energy electron) machine for disinfestation of grains contaminated with insect pests[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2004, 71(1/2): 213—216.
- [23] 施陪新. 食品辐照加工原理与技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2004.
- [24] 杨景田, 李建萍, 黄庆林. 乌克兰敖德萨港粮食辐射检疫处理装置[J]. 粮食储藏, 2002, 31(1): 45—47.
Yang Jingtian, Li Jianping, Huang Qinglin. The quarantine equipment with irradiation method used in foodstuff in Ukraine Odessa[J]. Grain Storage, 2002, 31(1): 45—47. (in Chinese with English abstract)
- [25] Dianxing W, Qingfu Y, Zhonghua W, et al. Effect of gamma irradiation on nutritional components and CryI Ab protein in the transgenic rice with a synthetic CryI Ab gene from *Bacillus thuringiensis*[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2004, 69(1): 79—83.
- [26] Matloubi H, Aflaki F, Hadjiezadegan M. Effect of γ -irradiation on amino acids content of baby food proteins[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2004, 17(2): 133—139.
- [27] 王若兰, 杨延远, 杨志慧. γ 射线、电子束处理对玉米品质的影响[J]. 粮食与饲料工业, 2010(3): 11—13.
Wang Ruolan, Yang Yanyuan, Yang Zhihui. Effect of γ -ray and electron beam from accelerator on corn quality[J]. Cereal and Feed Industry, 2010(3): 11—13. (in Chinese with English abstract)
- [28] Sandhya Rani M R, Bhattacharya K R. Rheology of rice flour pastes: relationship of paste breakdown to rice quality, and a simplified brabender viscograph test[J]. Journal of Texture Studies, 1995, 26(5): 587—598.
- [29] Wu D, Shu Q, Wang Z, et al. Effect of gamma irradiation on starch viscosity and physicochemical properties of different rice[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 65(1): 79—86.
- [30] Hayashi T, Todoroki S, Kohyama K. Applicability of viscosity measuring method to the detection of irradiated spices[J]. Nippon Shokuhin Kogyo Gakkai-Shi, 1993, 40(6): 456—460.
- [31] Sung W C. Effect of gamma irradiation on rice and its food products[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2005, 73(4): 224—228.
- [32] Yu Y, Wang J. Effect of γ -ray irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of rice[J]. Food Research International, 2007, 40(2): 297—303.
- [33] Srichuwong S, Sunarti T C, Mishima T, et al. Starches from different botanical sources II: Contribution of starch structure

- to swelling and pasting properties[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2005, 62(1): 25–34.
- [34] 王树生, 田植群, 苏玉春, 等. 辐射对淀粉作用的研究概况[J]. *中国粮油学报*, 2004, 19(5): 27–28.
Wang Shusheng, Tian Zhiqun, Sun Yuchun, et al. Effect of gamma irradiation on starch: A Review[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2004, 19(5): 27–28. (in Chinese with English abstract)
- [35] 陈惠元, 彭志刚, 丁钟敏, 等. 辐射技术在淀粉改性中的应用[J]. *核化学与放射化学*, 2009, 29(1): 53–56.
Chen Huiyuan, Peng Zhigang, Ding Zhongmin, et al. Application of radiation technology in starch modification[J]. *Journal of Nuclear and Radiochemistry*, 2009, 29(1): 53–56. (in Chinese with English abstract)
- [36] 蔡一霞, 王维, 朱智伟, 等. 不同类型水稻支链淀粉理化特性及其与米粉糊化特征间的关系[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6): 1122–1129.
Cai Yixia, Wang Wei, Zhu Zhiwei, et al. The physiochemical characteristics of amylopectin and their relationships to pasting properties of rice flour in different varieties[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6): 1122–1129. (in Chinese with English abstract)
- [37] 杨晓蓉, 李歆, 凌家煜. 不同类别大米糊化特性和直链淀粉含量的差异研究[J]. *中国粮油学报*, 2001, 16(6): 37–42.
Yang Xiaorong, Li Xin, Ling Jiayu. Differences among rice categories in pasting characteristics and amylose content[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2001, 16(6): 37–42. (in Chinese with English abstract)
- [38] Yu Y, Wang J. Effect of γ irradiation pre-treatment on drying characteristics and qualities of rice[J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2005, 74(5): 378–383.
- [39] Vandeputte G E, Delcour J A, From sucrose to starch granule to starch physical behaviors: a focus on rice starch[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2004, 58(3): 245–266.
- [40] 韩文凤. 陈放对大米淀粉特性及米粉凝胶品质影响的研究[J]. *粮食加工*, 2008, 33(2): 28–29.
Han Wenfeng. Effect of storage period on the properties of rice starch and gel quality of rice flour[J]. *Grain processing*, 2008, 33(2): 28–29. (in Chinese with English abstract)
- [41] Yu Y, Wang J. Effect of γ -ray irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of rice[J]. *Food Research International*, 2007, 40(2): 297–303.
- [42] Yu Y, Wang J. Effect of γ -irradiation treatment before drying on qualities of dried rice[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 78(2): 529–536.

Effect of electron beam irradiation on nutritive and cooking qualities of rice

Li Xiang, Guo Dongquan^{*}, Chen Yuntang, Fan Jialin,
Lü Xiaohua, Wang Juanjuan, Zhang Jianwei, Yang Baoan

(Isotope Institute Company, Limited, Henan Academy of Science/Key Laboratory of Nuclear Agriculture,
Henan Academy of Science, Zhengzhou 450015, China)

Abstract: To further consummate and improve the theory about application of ionizing irradiation disinfection and sterilization to stored-grain, rice samples were exposed to electron beam with dosage levels of 0, 0.83, 1.56, 2.30, 4.93 kGy to evaluate the effect of electron beam irradiation on nutritive quality, pasting property, cooking and eating qualities of rice. The results showed that the protein content and amino acid composition of rice were not significantly influenced by irradiation ($p>0.05$), fatty acid value and gel consistency raised while water absorption and swelling degree reduced with the increasing irradiation dosage ($p<0.05$). No significant change in pasting temperature was observed between irradiated and non-irradiated samples ($p<0.05$), but peak viscosity, breakdown, setback of rapid visco analyzer were significantly decreased with dosage increasing ($p<0.05$). The cooking quality was significantly lowered by irradiation with the increasing dosage ($p<0.05$), and the cooked rice browned at 4.93 kGy dosage level. Thus, the adequate electron beam irradiation dose for rice should be less than 2.30 kGy, and the best qualities of rice will be kept when irradiated with 0.83 kGy. The experimental results can provide a theoretical evidence for the choice of irradiation dosage for the application of low-energy electron beam irradiation in sterilization as well as insect disinfection of rice.

Key words: irradiation, nutrition, quality control, rice; pasting property, cooking and eating