

# 电子束辐照对稻米储藏特性及品质的影响

## Effect of electron beam irradiation on storage quality and physicochemical properties of rice

杨丹<sup>1,2,3</sup> 罗小虎<sup>1,2,3</sup> 齐丽君<sup>1,2,3</sup> 王韧<sup>1,2,3</sup> 王莉<sup>1,2,3</sup>

YANG Dan<sup>1,2,3</sup> LUO Xiao-hu<sup>1,2,3</sup> QI Li-jun<sup>1,2,3</sup> WANG Ren<sup>1,2,3</sup> WANG Li<sup>1,2,3</sup>

李亚男<sup>1,2,3</sup> 李克<sup>1,2,3</sup> 张宇蔚<sup>4</sup> 陈正行<sup>1,2,3</sup>

LI Ya-nan<sup>1,2,3</sup> LI Ke<sup>1,2,3</sup> ZHANG Yu-wei<sup>4</sup> CHEN Zheng-xing<sup>1,2,3</sup>

(1. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122; 2. 粮食发酵工艺与技术国家工程实验室, 江苏 无锡 214122; 3. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214122; 4. 无锡爱邦辐射技术有限公司, 江苏 无锡 214151)

(1. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

2. National Engineering Laboratory for Cereal Fermentation Technology, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

3. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China;

4. Wuxi EL PONT Radiation Technology Co., Ltd, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

**摘要:**为考察稻谷、糙米、精米经电子束辐照处理后的保鲜效果及品质变化,选取新收获的晚粳稻为原料,研究 0, 2, 4 kGy 剂量辐照对稻谷、糙米、精米的保鲜效果,并考察电子束辐照对稻米理化性质,包括水分含量、色泽、脂肪酸值、黏度值和食味值的影响。结果表明,经 2, 4 kGy 剂量辐照的稻谷、糙米、精米与未辐照的样品相比,水分含量、色泽无显著变化 ( $P>0.05$ ),黏度值显著下降 ( $P<0.05$ ),且储藏一段时间后,经电子束辐照过的样品较未辐照的样品脂肪酸值上升更缓慢,食味值变化更小,即储藏期间品质劣变程度更小。电子束辐照技术作为一种冷杀菌技术,可用于保持稻米的品质和营养、延长稻米储藏期。

**关键词:**电子束辐照; 稻谷; 品质; 储藏

**Abstract:** To study the freshness and quality changes after electron beam irradiation in three different forms, include paddy, brown rice, milled rice, during storage, taking the fresh late japonica rice was selected as raw material. The effect of electron beam irradiation on paddy, brown rice and milled rice based on the doses of 0, 2, 4 kGy was studied, including the effects on moisture content, color, fatty

**基金项目:**公益性行业(粮食)科研专项(编号:201313005, 201513006);公益性行业(农业)科研专项(编号:201203037);国家自然科学基金(编号:31371874, 31501579);国家国际科技合作专项(编号:2015DFA30540);江苏省博士后基金(编号:1501078B)

**作者简介:**杨丹,女,江南大学在读硕士研究生。

**通信作者:**陈正行(1960—),男,江南大学教授,博士,博士生导师。

E-mail:zxchen\_2008@126.com

**收稿日期:**2016—10—20

acid value, viscosity value and taste value. Results indicated that the paddy, brown rice, milled rice at 2, 4 kGy irradiated doses compared to the corresponding non-irradiated sample, moisture content, whiteness, redness and yellowness didn't change significantly ( $P>0.05$ ), while all the viscosities decreased significantly ( $P<0.05$ ). Fatty acid value of electron beam irradiated samples increased more slowly than the non-irradiated samples and taste value decreased more slowly during storage. Electron beam irradiation technology as a cold sterilization technology, can keep the quality and nutrition of rice, ensure food safety and extend the storage period.

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

稻谷是中国主要粮食作物,其在中国粮食生产和人民生活消费中发挥着重大的作用。然而,稻谷耐储性较差,在常温下储藏半年至 1 年,在高温下储藏 1~3 个月就会导致陈化,综合食味普遍下降,是最难保存的粮品之一,给粮食生产加工企业造成较大的经济损失<sup>[1]</sup>。如今随着人民生活水平的提高,人们对食用口感更好、品质更佳的大米需求更高。稻米储藏方法的研究,对于提升粮食食用品质、减少资源损失具有重大意义。目前,中国稻谷主要采用常规方法保藏,包括低温储藏(即自然或机械制冷储藏)、气调储藏(即自然缺氧、真空、充 CO<sub>2</sub> 或 N<sub>2</sub>)以及化学储藏等方法<sup>[2]</sup>。传统的低温或气调储藏,仅能抑制虫卵生长,防霉、防虫和保鲜的效果较差。化学保藏方法需要长期使用化学药剂,这易使害虫产生抗药性,增加防治难度,同时大量使用化学药剂也会污染环境,威胁人类健康。

食品辐照技术是指利用<sup>60</sup>Co或<sup>137</sup>Se等放射源产生的射线,电子加速器产生的10 MeV以下的高能电子束及5 MeV以下的X射线,已广泛应用于农产品和食品储藏保鲜,是一项安全、卫生、方便、经济有效的食品加工新技术<sup>[3-4]</sup>。国际原子能机构(IEAE)、联合国粮农组织(FAO)和世界卫生组织(WHO)协调各国科研机构对辐照食品的卫生安全性进行研究,于1980年10月宣布:“任何食品,其总体的平均吸收剂量不超过10 kGy时,不会有毒理学危险,且不影响食品的营养与质量安全”<sup>[5]</sup>。

国内外对于<sup>60</sup>Co-γ辐照粮食研究较多<sup>[6-7]</sup>,而电子束是近年来逐渐在食品领域应用的新型射线,与<sup>60</sup>Co-γ辐照相比较,电子束辐照技术,通过电子加速器的开关控制其产生和消失,无核废料、对环境无危害、处理成本更低,更有利于产业化,且杀虫灭菌效果要比用γ-辐照更具优越性<sup>[8]</sup>,近些年已逐步应用于水果<sup>[9]</sup>、蔬菜<sup>[10]</sup>、禽肉保鲜<sup>[11]</sup>以及其他食品保鲜。

电子束辐照技术作为一种冷杀菌技术,它可在保证食品安全前提下,更好地保持食品的品质和营养。前人<sup>[12-13]</sup>大部分研究集中于辐照前后对样品影响,对电子束辐照在粮食储藏保鲜方面的研究较少,且多限于对单一品种粮食研究。因此,本研究拟将电子束辐照技术应用于粮食储藏方面,以稻谷、糙米、精米为辐照对象,利用不同剂量的电子束辐照后,在恒温条件下储藏两个月,研究稻谷、糙米、精米在辐照前后和储藏过程中的理化性质的变化以及食用品质的差异,以期今后电子束辐照延缓粮食品质劣变提供实践参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

晚粳稻:购于江苏省无锡市农贸市场;

95%乙醇、无水乙醇:分析纯,上海国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 试验设备

电子加速器:AB 5.0型,无锡爱邦辐射技术有限公司;

电热恒温鼓风干燥箱:DHG-9075A型,上海一恒科技有限公司;

色差计:CR-400型,日本,柯尼卡公司;

大米食味计:RCTAIIA型,日本佐竹公司;

L生化培养箱:RH-150型,上海一恒科技有限公司;

分析天平:AL204型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

高速万能粉碎机:天津市泰斯特仪器有限公司;

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 将原材料稻谷的1/3 砻谷去壳后得到糙米,另1/3 砻谷去壳后得糙米再碾制成精米。稻谷、糙米、精米均采用透明聚氯乙烯材质薄膜袋(0.05 mm厚)进行普通包装。每袋500 g,各45袋。采用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。

将样品放置在滚轮式传送带上通过扫描电子束,全自动流水线上静态连续辐照,平均吸收剂量率为2.0 kGy/h。

参考前人<sup>[14-16]</sup>研究结果,大米设0,2,4 kGy 3个辐照剂量,辐照后试样在恒温(30±0.5)℃条件下储藏两个月,每隔15 d进行1次相关指标测定,测定时稻谷、糙米均制成精米。

#### 1.3.2 指标测定

(1)水分测定:按GB 50093—2010执行。

(2)样品色泽:考虑到大米籽粒颜色分布较不均,直接测定误差较大,因此将大米粉碎,混合均匀后测定,减少颜色误差。大米色泽用CR-400型色差计测定样品的 $L^*$ 值、 $a^*$ 值、 $b^*$ 值。选用 $L^* - a^* - b^*$ 色彩空间,以 $\Delta E$ 、 $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ 表示米的颜色变化,其中 $\Delta E$ 为总色差,定义 $\Delta E = (\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} + \Delta L^{*2})^{1/2}$ ,其中 $L^*$ 表示亮度,其中0代表黑色、100代表白色、 $a^*$ 大于零代表红色,小于零代表绿色、 $b^*$ 大于零代表黄色,小于零代表蓝色。测定 $\Delta L^*$ 、 $\Delta a^*$ 、 $\Delta b^*$ ,每个样品测定3次,求平均值。

(3)游离脂肪酸值:根据GB/T 5510—2011《粮油检验 粮食、油料脂肪酸值测定》修改如下:分别将稻谷去壳,碾成精米,精米粉碎,保证一次性90%的样品通过40目筛,将过筛与未过筛的大米粉混合。称取10.0 g大米粉置于250 mL具塞锥形瓶中,加入50 mL无水乙醇,振荡30 min,静置5 min后过滤。用移液管取滤液25 mL于150 mL锥形瓶中,加50 mL不含CO<sub>2</sub>的蒸馏水,放入复合电极和搅拌棒后打开磁力搅拌器,用标准KOH乙醇溶液滴定至pH等于8.0,以中和100 g大米粉试样中游离脂肪酸所需氢氧化钾毫克数表示。

(4)糊化特性参数:按GB/T 24853—2010执行。

(5)大米食味值:利用大米食味计检测。

### 1.4 数据分析

试验数据用SPSS 11.5分析软件进行统计分析,计算标准偏差(±SD)并运用Duncan检验进行显著性分析(P<0.05)。采用Origin 8.0对数据作图,各试验均至少重复进行3次。

## 2 结果与讨论

### 2.1 辐照对稻谷、糙米、精米水分含量的影响

大米的含水量对米饭的黏度、硬度、食味有很大的影响,当米粒含水量较低时,其被浸渍后,腹部与背部会产生水分差,瞬间使其产生裂纹,此现象称为开花,淀粉粒从裂纹处涌出,导致米饭弹性大大降低,成为发粘的低质米饭<sup>[17]</sup>。由表1可知,3种形式的样品辐照前后的水分含量差异均不明显(P>0.05),说明电子束辐照属于非热处理,并不会引起大米含水量的显著变化,这对保持米饭良好品质具有积极作用。

### 2.2 辐照对稻谷、糙米、精米色泽的影响

由表2可知,以稻谷、糙米和精米辐照后制成精米的米粒的总色差 $\Delta E$ 均随着辐照剂量的增加而呈现增加的趋势,说明大米经辐照后发生了一定程度非酶褐变反应,褐变程度随着辐照剂量的增加而增加。其中,以稻谷、糙米形式辐

表 1 电子束辐照对大米水分含量影响

Table 1 Electron beam irradiation on the moisture content of rice ( $n=3$ ) %

辐照剂量/kGy	稻谷	糙米	精米
0	15.81±0.01	15.86±0.01	15.71±0.15
2	15.71±0.07	15.94±0.02	15.86±0.04
4	15.87±0.16	16.04±0.06	15.85±0.09

表 2 电子束辐照对米粒色泽的影响<sup>†</sup>Table 2 Effect of electron beam irradiation on the color of rice ( $n=3$ )

类别	辐照剂量/kGy	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$\Delta E$
稻谷	0	69.77±0.27	0.13±0.02	12.02±0.03	
	2	69.65±0.09	0.42±0.01	12.78±0.04	0.78
	4	69.59±0.18	0.56±0.06	12.99±0.04	1.08
糙米	0	69.09±0.09	0.23±0.07	17.08±0.08	
	2	69.12±0.12	0.52±0.09	18.02±0.01	0.98
	4	68.87±0.23	0.77±0.03	18.63±0.12	1.66
精米	0	67.82±0.04	0.34±0.04	20.32±0.09	
	2	66.32±0.14	0.72±0.08	24.89±0.14	4.82
	4	64.09±0.08	0.86±0.02	27.62±0.17	8.04

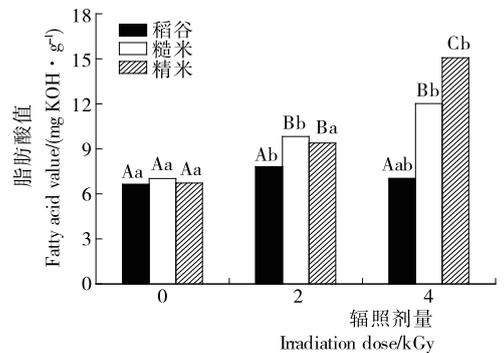
<sup>†</sup>  $\Delta E$  值越大说明其色泽变化越大,当 $\Delta E < 1.5$ 时,说明样品与对照组无差异;1.5 $<\Delta E < 3.0$ 时稍有差异;3.0 $<\Delta E < 6.0$ 时有差异; $\Delta E > 6.0$ 时有显著差异。

照后米粒在 2,4 kGy 辐照剂量下,总色差 $\Delta E$ 均小于 3.0,即辐照后的稻谷、糙米样品褐变程度较轻,对米粒色泽影响较小,在可接受范围内,并不影响食用品质。而以精米形式辐照的米粒色泽,在 2 kGy 辐照剂量下 3.0 $<\Delta E < 6.0$ ,有差异,在 4 kGy 辐照剂量下 $\Delta E > 6.0$ ,因此,考虑到消费者对米的色泽偏好,当以精米形式辐照时,电子束辐照剂量应在 4 kGy 以下。

### 2.3 辐照后稻谷、糙米、精米脂肪酸值的变化

脂肪酸值是评判稻米是否劣变的最灵敏指标之一,也是判定稻米宜存、不宜存或陈化的主要指标。稻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,例如光、热等作用下,大米自身和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<sup>[18]</sup>。用脂肪酸值来表示产生的游离脂肪酸的量,脂肪酸值越高,大米的品质劣变越严重。一般规定,脂肪酸值超过 25 mg KOH/100 g 时,大米已有变质现象,不能继续储藏<sup>[19]</sup>。因而本研究通过测定储藏过程中大米脂肪酸值的变化来评判电子束辐照对稻米品质劣变的影响。

由图 1 可知,糙米、精米辐照后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( $P < 0.5$ ),而稻谷经 2 kGy 辐照后脂肪酸值上升,而 4 kGy 辐照后反而有小幅下降,但下降趋势不显著( $P > 0.5$ ),分析原因可能是电子束穿透能力较弱加之稻谷有外壳的保护,使得稻谷与糙米、精米相比,在相同剂量下辐照所受到的影响更小,故脂类物质受



字母相同表示差异不明显( $P > 0.05$ )。其中,小写字母代表同种样品,不同辐照剂量下脂肪酸值的差异性;大写字母代表同一辐照剂量下,不同种样品脂肪酸值的差异性

图 1 辐照前后试样脂肪酸值的变化情况

Figure 1 The effect of electron beam irradiation on fatty acid value of rice ( $n=3$ )

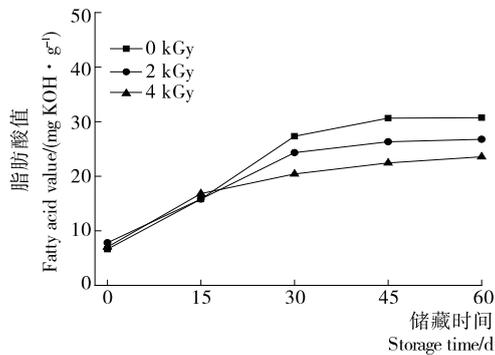
辐照影响较小,脂肪酸值变化趋势不明显。稻谷经 2,4 kGy 的辐照,脂肪酸值分别比未辐照组提高了 17.77%,5.87%;糙米经 2,4 kGy 的辐照,脂肪酸值分别比未辐照组提高了 39.89%,71.23%;精米经 2,4 kGy 的辐照,脂肪酸值分别比未辐照组提高了 39.73%,124.26%,差异均显著( $P < 0.05$ )。由此可见,随着辐照剂量的增加,电子束辐照对大米的电离作用显著增强,从而导致脂类物质降解产生的游离脂肪酸含量增加。

由图 2 可知,随着储藏时间的延长,3 种形式辐照下的大米的脂肪酸值均逐渐上升。在相同的储藏时间内,未辐照的大米脂肪酸值比辐照的上升快。随着储存期的延长,脂肪酶不断水解大米中的脂类物质生成脂肪酸,导致大米的脂肪酸值不断增加。电子束辐照后,大米中脂肪酶的活性被抑制,从而降低反应的速度,延缓大米品质劣变。储藏 30 d 时,未经辐照样品的脂肪酸值均超过了 GB 20569—2006 标准限值,而经 2,4 kGy 剂量辐照稻谷、糙米制得的大米中脂肪酸值均未超过该标准限值。而精米可能由于缺少外壳的保护,相较稻谷、糙米,在储藏过程中更易受外在因素影响,脂肪酸值上升速度更快。

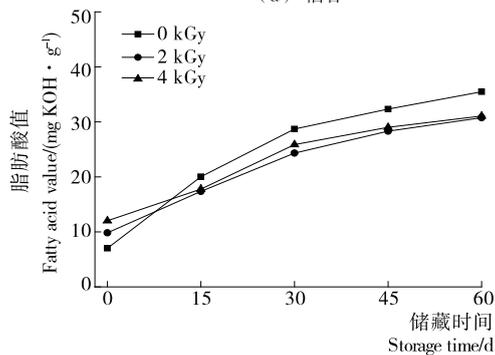
### 2.4 辐照对稻谷、糙米、精米糊化特性的影响

糊化特性变化与其淀粉性质有着主要关系,如溶胀性能、直支链淀粉比例、糊化度、吸水能力及淀粉颗粒破裂后的聚合度等。淀粉悬浮液在加热过程中黏度上升与淀粉颗粒的膨胀有关,加热一段时间后黏度的下降与膨胀淀粉的崩解有关<sup>[20]</sup>。

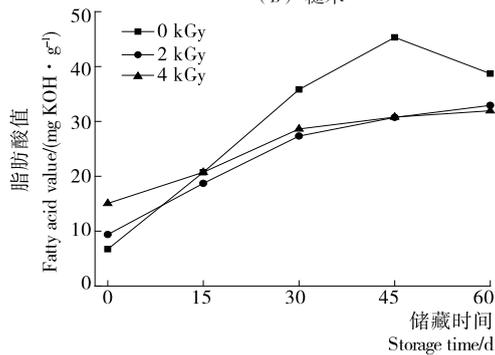
由图 3 可知,稻谷、糙米和精米经电子束辐照处理后其大米粉在蒸煮过程中的峰值黏度、最低黏度、最终黏度、回生值均随着辐照剂量的增加不断下降,这与前人<sup>[21-22]</sup>的一些研究结果类似。比较特殊的是,稻谷的各糊化特征值随着辐照剂量增大,其下降幅度较小。电子束辐照处理降低大米糊化峰值黏度可能是辐照使淀粉颗粒破裂,破损淀粉含量增加



(a) 稻谷



(b) 糙米



(c) 精米

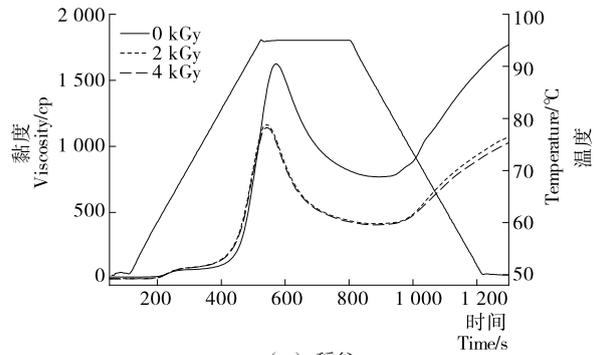
图2 储藏过程中大米脂肪酸值的变化情况

Figure 2 Changes in fatty acid value of rice during storage ( $n=3$ )

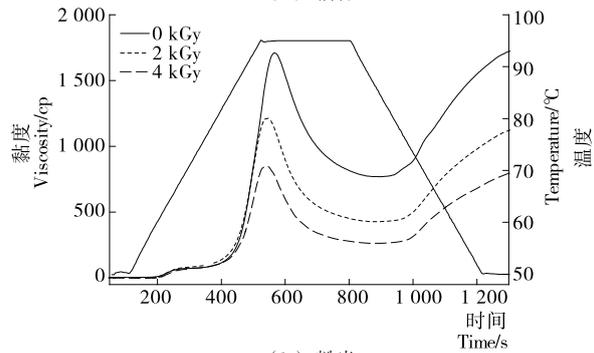
引起的<sup>[23]</sup>。研究<sup>[24-25]</sup>表明,糊化崩解值、最终黏度与食味值负相关,峰值黏度降低,使大米更耐蒸煮,说明电子束辐照可以改善大米的食味品质,提高蒸煮品质。最低黏度的下降可能是辐照使得淀粉分子量降低,分子间网络结构连接性变差。其中,相较于峰值黏度和最低黏度,最终黏度下降程度更大,可能是电子束辐照使得淀粉分子发生了降解反应,直链淀粉被破坏,使得包围水分子的能力减弱,且黏度下降的程度取决于不同辐照剂量下淀粉分子聚合度的变化情况<sup>[26]</sup>。回生值的降低可能是直链和支链淀粉大分子通过辐照裂解后变成不同链段的小分子,回生值越低,老化越不明显。回生值的降低说明电子束辐照减缓了大米粉的老化速率,这可能有助于延长大米的储藏期。

### 2.5 辐照后稻谷、糙米、精米在储藏过程中食味值的变化

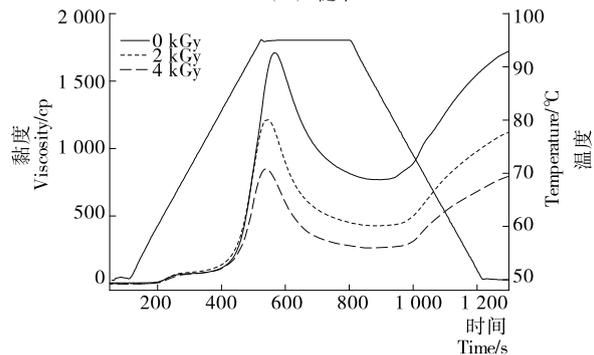
影响大米口感的主要成分包括直链淀粉、脂肪酸值、蛋白质和水分。直链淀粉的含量越高,则蒸煮出来的米饭黏性



(a) 稻谷



(b) 糙米



(c) 精米

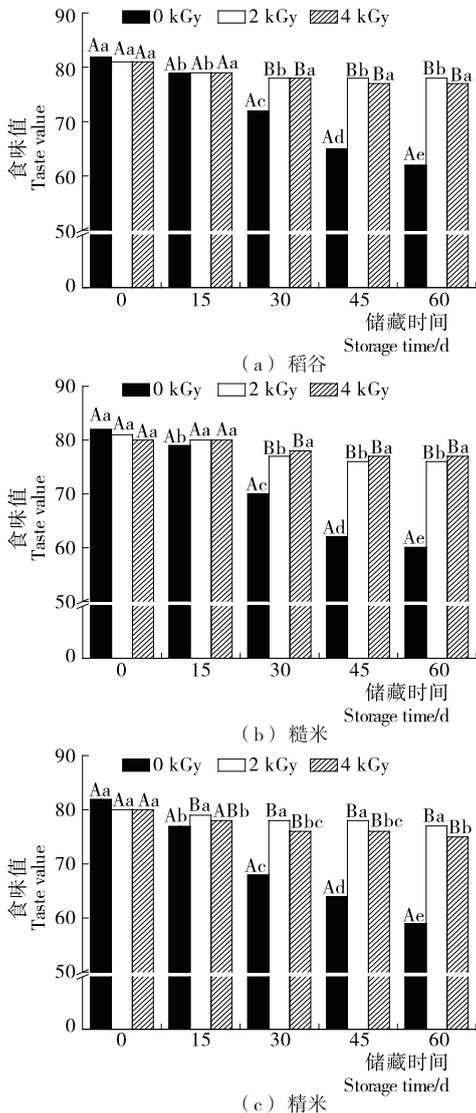
图3 电子束辐照对大米糊化特性的影响

Figure 3 Effect of electron beam irradiation on the pasting properties of rice ( $n=3$ )

越大;陈化后的大米脂肪酸值会增加,导致米饭食用品质下降。蛋白质的含量过多则米饭偏硬;米粒的含水量过低,浸泡时容易产生裂纹,在蒸煮大米的时候淀粉易从米粒的裂纹处流出,导致米饭的食味下降,影响食用口感。

食味计通过测定这些影响米饭食味的化学成分,来评价大米的食用品质,近红外大米食味计,通过测定大米中直链淀粉含量、蛋白质、脂肪酸和水分含量等综合评价大米的食味,给出食味值,食味值数值大小代表大米食味情况,其中100分为满分,数值越接近100说明其综合食味越好。相较于凭借人感官来鉴定,其样品用量更少、操作更简便、结果重现性更好<sup>[27]</sup>。

由图4可知,未经辐照的试样在储藏过程中,食味值呈现明显的下降趋势。经电子束辐照后的试样在储藏过程中食味值虽有下降,但相较未经辐照的试样,其下降速度要缓慢许多。分析原因,由于储藏过程中,蛋白质,直链淀粉和水



字母相同表示差异不明显( $P>0.05$ )。其中,小写字母代表同一辐照剂量下,不同储藏天数样品食味值的差异性;大写字母代表同一储藏天数下,不同辐照剂量下样品食味值的差异性

图 4 储藏过程中大米食味值的变化情况

Figure 4 Changes during storage of rice taste value ( $n=3$ )

分含量变化不大,导致其食味值下降的主要原因可能是脂肪酸值的上升。经电子束辐照的样品较未辐照的样品脂肪酸值上升缓慢。由此可见,电子束辐照加工处理可以在一定程度上延缓大米的品质劣变。

### 3 结论

电子束辐照是一种新型的物理加工处理方式,目前在,在食品领域已有广泛的应用,包括果蔬、禽肉的保鲜、食品的灭菌杀虫等,在粮食储藏保鲜方面同样有巨大的潜力。本研究采用 0, 2, 4 kGy 辐照剂量,与未辐照样品相比,可以有效延缓稻米储藏过程中品质劣变。而经过辐照处理后,稻米的食用品质也变化不大。同时本研究还发现,以稻谷形式辐照较糙米、精米,对食用品质影响更小,储藏效果更好。此次研究为改善稻米生产加工企业的储藏条件,保证稻谷的良好食用品质提供新的思路和理论依据,但是,对于电子束辐照延缓

稻米储藏品质劣变的机理研究尚待完善,今后将从分子层面来做进一步的研究。

### 参考文献

- [1] 吴伟,李彤,蔡勇建,等. 三种稻米在贮藏过程中蒸煮特性变化的比较[J]. 食品与机械, 2014, 30(3): 122-126.
- [2] 吴艳丽,潘丽爱. 大米保鲜及储藏技术的研究进展[J]. 农业机械, 2013, 29(3): 59-63.
- [3] 张振山,刘双燕,刘玉兰,等. 辐照在食品工业中的应用研究进展[J]. 中国调味品, 2013, 38(11): 113-116.
- [4] FARKAS J. Irradiation for better foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(4): 148-152.
- [5] 胡少新. 我国食品辐照技术研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2011 (8): 149-151.
- [6] 罗志平,孟兰贞,徐远芳,等.  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  辐照对茶花蜂花粉的杀菌效果及品质影响[J]. 食品与机械, 2015, 31(3): 150-153.
- [7] SHAO Ya-fang, TANG Fu-fu, XU Fei-fei, et al. Effects of  $\gamma$ -irradiation on phenolics content, antioxidant activity and physicochemical properties of whole grain rice [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2013, 85(7): 227-233.
- [8] 张莹,朱加进. 电子束辐照技术及其在食品工业中的应用研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 236-239, 258.
- [9] 王秋芳,陈召亮,乔勇进,等. 高能电子束辐照对巨峰葡萄保鲜效果的研究[J]. 核农学报, 2010, 24 (2): 319-324.
- [10] NEAL J A, BOOREN B, CISNEROS-ZEVALLOS L, et al. Shelf life and sensory characteristics of baby spinach subjected to electron beam irradiation [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(6): 319-326.
- [11] 尚颀斌,高美须,李淑荣,等. 电子束辐照对冷鲜猪肉品质的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(4): 437-442.
- [12] NEMŢANU M R, BRAŞOVEANU M, KARACA G, et al. Inactivation effect of electron beam irradiation on fungal load of naturally contaminated maize seeds[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(13): 2 668-2 673.
- [13] HU Bi-jun, HUANG Man, YIN Shou-wei, et al. Effects of electron-beam irradiation on physicochemical properties of starches separated from stored wheat[J]. Starch-Stärke, 2011, 63 (3): 121-127.
- [14] 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.
- [15] 李淑荣,王殿轩,高美须,等. 电子加速器辐照对稻谷品质影响的研究[J]. 河南工业大学学报, 2006, 27(5): 30-32.
- [16] 王锋,哈益明,周洪杰,等. 辐照对食品营养成分的影响[J]. 食品与机械, 2005, 21(5): 52-55.
- [17] 王春莲,王则金,林震山,等. 大米储藏过程品质变化研究[J]. 粮食与饲料工业, 2014, 5(2): 5-9, 14.
- [18] 周建新,张瑞,王璐,等. 储藏温度对稻谷微生物和脂肪酸值的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(1): 92-95.
- [19] ZHOU Z, ROBARDS K, HELLIWELL S, et al. Ageing of stored rice: changes in chemical and physical attributes [J]. Journal of Cereal Science, 2002, 35(1): 65-78.

(下转第 178 页)

表1 壁材比例对V<sub>E</sub>微胶囊包埋效果的影响

Table 1 The embedding effect of microcapsules prepared by a certain proportion of wall material

壁材比例 (质量比)	产率/%	效率/%		固态有效 载量/%
		研磨前	研磨后	
1:1	41.3	48.0	46.8	44.6
2:1	52.7	60.2	55.4	53.1
3:1	74.7	72.5	67.9	69.6
4:1	67.1	70.6	65.3	62.3
5:1	49.4	46.6	44.6	47.1

### 3 结论

本试验选用明胶和海藻酸钠作为壁材原料,采用复合凝聚法对天然V<sub>E</sub>进行微胶囊化,研究了壁材比例对包覆产物的微观形貌、粒径及其分布、微胶囊产率和效率、固体载药量等的影响,得出以下结论:

(1)以明胶和海藻酸钠为壁材,以氯化钙为固化剂,适用于复合凝聚法制备天然V<sub>E</sub>微胶囊;

(2)当明胶与海藻酸钠的质量比为3:1时,制得的微胶囊为规则球体;粒径适中且分布在30~60 μm,平均粒径35.17 μm;产率达到74.7%;研磨前后的效率最高,分别为72.5%和67.9%;固态载药量达到69.6%。

由于复合凝聚法制备天然V<sub>E</sub>微胶囊的质量还与壁材浓度、芯壁配比、体系pH和固化时间等因素有关,本研究还未涉及,将在后续研究中报道。

### 参考文献

- [1] 王晓敏,李昌蝶,王继鑫,等.保健食品天然维生素E胶囊质量考核研究[J].云南师范大学学报:自然科学版,2015,35(3):70-74.
- [2] MEHMOOD T. Optimization of the canola oil based vitamin E nanoemulsions stabilized by food grade mixed surfactants using response surface methodology[J]. Food Chemistry, 2015, 183(15): 1-7.
- [3] 张飞. 维生素E及其中间体绿色化学研究[J]. 化工管理, 2015

(3): 207-209.

- [4] HATEGEKIMANA J, BWENGYE M K, MASAMBA K G, et al. Formation and stability of vitamin e enriched nanoemulsions stabilized by octenyl succinic anhydride modified starch[J]. International Journal of Food Engineering, 2014, 10(4): 633-643.
- [5] 师景双,王成忠,赵乃峰.从小麦胚芽里提取天然维生素E的试验研究[J].粮食加工,2011,36(4):43-46.
- [6] 李永进,丁辉,徐世民.蒸馏技术在提取天然维生素E方面的应用[J].现代化工,2010,30(1):65-68.
- [7] 王义永,繆飞,许新德,等.硫酸对大豆油脱臭馏出物中天然V<sub>E</sub>和植物甾醇的影响[J].中国食品添加剂,2014(3):152-157.
- [8] 王延琴,杨伟华,周大云,等.棉籽油天然维生素E的提取工艺研究[J].中国农学通报,2014,30(27):288-292.
- [9] 罗超杰,刘爱琴,杨金成,等.喷雾干燥条件对合成维生素E酯酸酯干粉品质的影响[J].中国食品添加剂,2015(3):127-132.
- [10] 李玲,薛斌,高丽,等.天然维生素E及其制备工艺研究[J].广东化工,2011,38(8):103-105.
- [11] OZTURK B, ARGIN S, OZILGEN M, et al. Formation and stabilization of nanoemulsion-based vitamin e delivery systems using natural surfactants: Quillaja saponin and lecithin[J]. Journal of Food Engineering, 2015, 188: 256-263.
- [12] 王永义,章城亮,许新德.天然维生素E提纯技术进展[J].中国食品添加剂,2014(2):203-207.
- [13] 范方宇,蒋生旺,曹颖,等.复凝聚法制备茶油微胶囊[J].食品与机械,2016,32(7):181-185.
- [14] 李世伟,石睿杨,马春颖,等.复合凝聚β-胡萝卜素微胶囊制备工艺研究[J],食品与机械,2012,28(6):209-213.
- [15] 蔡茜彤,段小明,冯叙桥,等.微胶囊技术及其在食品添加剂中的应用与展望[J].食品与机械,2014,30(4):247-251.
- [16] 龚银华,葛亮,朱家璧.天然维生素E微乳制剂的流变性研究[J].广东化工,2014,41(5):23-24.
- [17] 王登武,王芳,赵晓鹏.复合凝聚法制备双核材料纳米胶囊[J].精细化工,2012(7):632-636.
- [18] 敖慧君,黄清松.维生素E微胶囊的制备工艺研究[J].赣南医学院学报,2015,35(1):33-35.
- [19] 孙昱,吴文忠,李延志,等.一种天然维生素E微囊的制备及其性能表征[J].大连工业大学学报,2011,30(6):399-403.

(上接第110页)

- [20] RANI M R S, 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.
- [21] 邹珍友,彭肖鹏,李杏,等.<sup>60</sup>Co-γ射线对粳米黏度的影响及机理分析[J].食品科学,2008,29(12):146-149.
- [22] WU Dian-xing, SHU Qing-yao, WANG Zhong-hua, et al. Effect of gamma irradiation on starch viscosity and physico-chemical properties of different rice [J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 65(1): 79-86.
- [23] REDDY C K, SURIYA M, VIDYA P V, et al. Effect of γ-irradiation on structure and physico-chemical properties of Amorphophallus paeoniifolius starch[J]. International Journal of Bio-

logical Macromolecules, 2015, 79: 309-315.

- [24] YUJI M, KOJI O, MICHIKAZU H. Differences in amylase content, mylographic characteristics and storage proteins of grain on primary and secondary rachis branches in rice [J]. Japanese Journal of Crop Science, 1995, 64(3): 601-606.
- [25] LIM S, LEE S, KIM D, et al. Varietal variation of amylogram properties and its relationship to other eating quality characteristics in rice [J]. Korean Journal of Breeding (Korea Republic), 1995, 27(3): 268-275.
- [26] VANDEPUTTE G E, VERMEYLEN R, GEEROMS J, et al. Rice starches(III): Structural aspects provide insight in amylopectin retrogradation properties and gel texture [J]. Journal of Cereal Science, 2003, 38(1): 61-68.
- [27] 三上隆司,河野元信.日本大米食味评价方法及相关仪器应用现状[J].北方水稻,2007,5(6):10-12.