

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.06.017

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.

# 电子束辐照对青稞米理化性质及食用品质的影响

陈雪从<sup>1</sup>, 杨希娟<sup>1</sup>, 张文刚<sup>1</sup>, 马萍<sup>2</sup>, 周文菊<sup>2</sup>, 党斌<sup>1</sup>✉

1. 青海大学 青海省青藏高原农产品加工重点实验室, 青海 西宁 810000;
2. 青海天佑德科技投资管理集团有限公司, 青海 西宁 810000)

**摘要:** 为评价电子束辐照对青稞米的理化性质及食用品质的影响, 筛选出适宜青稞米加工的辐照剂量, 采用 0、0.5、1.0、1.5 kGy 4 种剂量的电子束辐照, 测定了青稞米的基本营养成分、菌落总数和霉菌数、储藏指标、糊化特性、流变学特性和食用品质。结果表明: 0~1.5 kGy 剂量的电子束辐照对青稞米的基本营养成分和氨基酸的组成和含量影响不显著; 菌落总数和霉菌数显著降低 ( $P < 0.05$ ), 1.5 kGy 时灭活率分别达 83.75% 和 54.09%。电子束辐照后青稞米的脂肪酸值上升至 20.21 mg KOH/100 g, 丙二醛值上升至 0.53 mg/kg, 过氧化值无显著变化, 且经 0.5 kGy 处理后脂肪酶活性显著降低了 7.54%; 青稞米的峰值粘度、最低粘度、衰减值、最终粘度和回生值显著降低 ( $P < 0.05$ ); 青稞米的弹性模量和储能模量升高, 质构特性及感官品质无显著影响, 加热吸水率和体积膨胀率整体呈下降趋势且在 0.5 kGy 时无显著影响。因此, 青稞米的辐照加工剂量不宜超过 1 kGy, 以 0.5 kGy 的辐照剂量较适宜。

**关键词:** 电子束辐照; 青稞米; 理化性质; 食用品质

中图分类号: TS210.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)06-0143-08

网络首发时间: 2024-08-29 10:45:04

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20240828.1504.011>

## Effects of Electron Beam Irradiation on Physicochemical Properties and Edible Quality of Highland Barley Rice

CHEN Xue-cong<sup>1</sup>, YANG Xi-juan<sup>1</sup>, ZHANG Wen-gang<sup>1</sup>, MA Ping<sup>2</sup>, ZHOU Wen-ju<sup>2</sup>, DANG Bin<sup>1</sup>✉

1. Key Laboratory of Agricultural Product Processing on Qinghai-Tibetan Plateau, Qinghai University, Xining, Qinghai 810000, China; 2. Qinghai Tianyoude Science and Technology Investment Management Group Co, Xining, Qinghai 810000, China)

**Abstract:** In order to assess the impact of electron beam irradiation on the physicochemical properties and edible quality of highland barley rice, an investigation was conducted to identify the optimal irradiation dose

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (2024ZY027); 国家重点研发项目 (2022YFD2301305)

Supported by: Central Guidance Fund for Local Science and Technology Development Projects (No. 2024ZY027); National Key Research and Development Program (No. 2022YFD2301305)

第一作者: 陈雪从, 男, 1997 年出生, 在读硕士生, 研究方向为农产品精深加工理论与技术, E-mail: 1563959250@qq.com

通信作者: 党斌, 男, 1980 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为特色农产品品质评价与调控、精深加工技术及副产物综合利用, E-mail: 156044168@qq.com

for barley and rice processing. In this study, a series of analyses were conducted on barley rice samples subjected to electron beam irradiation at four doses (0, 0.5, 1.0 and 1.5 kGy). These analyses included the determination of basic nutrients, colony and mold counts, storage indexes, pasting characteristics, rheological properties and edible quality. The results demonstrated that electron beam irradiation at a dose of 0~1.5 kGy had no significant impact on the composition and content of basic nutrients and amino acids in barley and rice. Furthermore, the total number of colonies and molds were significantly reduced ( $P<0.05$ ), and the inactivation rate at 1.5 kGy reached 83.75% and 54.09%, respectively. After electron beam irradiation, the acid value of highland barley increased to 20.21 mg KOH/100 g, and the propanal value increased to 0.53 mg/kg, while the peroxide value showed no significant change. Additionally, after treatment with 0.5 kGy, the lipase activity of highland barley was significantly reduced by 7.54%. The peak viscosity, valley viscosity, disintegration value, final viscosity, and regrowth value of barley rice were significantly reduced ( $P<0.05$ ). The elastic modulus and storage modulus of highland barley increased, but there was no significant impact on its texture and sensory quality. The water absorption rate and volume expansion rate during heating generally showed a decreasing trend, with no significant impact at 0.5 kGy. Therefore, the irradiation dose for highland barley processing should not exceed 1 kGy, and an irradiation dose of 0.5 kGy was more suitable.

**Key words:** electron beam irradiation; highland barley rice; physicochemical properties; edible quality

青稞为禾本科一年生草本植物，主要生长在中国的西藏、青海、四川和云南等地，它能够承受贫瘠和寒冷的环境，是唯一能够在海拔 4 500 m 以上的高海拔寒冷地区正常成熟的农作物，具备高蛋白、高纤维、高维生素以及低脂肪、低糖的特性<sup>[1]</sup>。青稞米是由青稞经过一系列如清洗、去皮、分级和色选等步骤加工而成的食品。青稞米作为一种杂粮米，是青稞最主要的初加工产品，已经形成规模化加工，因具有独特的口感和营养价值，在市场上逐渐受到关注。但青稞脂肪中多不饱和脂肪酸比例较高，这些不饱和脂肪酸中存在较多双键结构，极易被氧化<sup>[2]</sup>。由于青稞米在贮藏期间极易发生氧化哈败，导致不耐贮藏，货架期短<sup>[3]</sup>。目前，多采用热处理的方式来降低青稞的脂肪酶活和脂肪酸值，提高青稞的贮藏稳定性，但这对青稞的营养成分、加工品质特性等有一定的影响<sup>[4]</sup>。因此，研究确保青稞米结构不受损害的同时增强其储存稳定性并优化其蒸煮特性的加工方式，对于推动青稞加工行业和整个青稞产业链的健康发展具有至关重要的作用。

电子束辐照可有效杀灭食品中的病原菌、霉菌、酵母菌等微生物，提高食品的卫生安全性；

同时可抑制食品中的酶活性，延缓食品的氧化变质和腐败过程，从而延长食品的货架期<sup>[5]</sup>。适度的电子束辐照可改善食品的理化性质，如提高淀粉的糊化温度，增强蛋白质的凝胶化能力等，从而改善食品的加工性能和质构特性。目前的研究揭示了电子束辐照在小麦粉<sup>[6]</sup>、玉米<sup>[7]</sup>、高粱籽粒<sup>[8]</sup>、水稻<sup>[9]</sup>等谷类作物中的实际应用，研究发现，适当的辐照剂量可以有效地消灭谷物中的害虫和微生物。但是不同类型的谷物在延长自身贮藏期方面对电子束剂量的要求不同，且现有研究较多关注于电子束辐照对谷物贮藏期间卫生指标的影响，对于谷物营养及食用品质研究较少。当前该技术在青稞米方面的相关应用更是鲜见报道。因此，本研究以青稞米为对象，研究不同剂量电子束辐照对青稞米理化性质、储藏特性和食用品质的影响，筛选出适宜的辐照剂量，为电子束辐照在青稞米储藏加工方面提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

青稞品种为贵南昆仑 14 号：青海省农林科学院。

无水乙醇、无水乙醚、氢氧化钾、乙酸乙酯等试剂,分析纯:天津市凯通化学试剂有限公司;盐酸、冰乙酸,优级纯:上海国药集团公司;甲醇,色谱纯:福晨(天津)化学试剂有限公司。总淀粉试剂盒:爱尔兰 Megazyme 公司。

## 1.2 仪器与设备

凯特检验用小型精米机:日本 KETT 公司;高速万能粉碎机:河北本辰科技有限公司;快速黏度分析仪:上海保圣公司;紫外可见分光光度计:北京北分瑞利分析仪器有限公司;质构仪:美国 Food Technology Corporation 公司;DZ-10 MeV/20kW 高能电子直线加速器:杨凌核盛辐照技术有限公司;S433D 型氨基酸分析仪:德国赛卡姆有限公司。

## 1.3 实验方法

### 1.3.1 青稞米的制备

采用凯特检验用小型精米机,得到碾减率为 15%的青稞米。

### 1.3.2 辐照处理

采用 10 MeV 电子加速器进行静态辐照加工。将青稞米放置在传送带上,均匀铺展,厚度为 1 cm,使用 10 MeV 电子加速器以 0.5、1.0、1.5 kGy 进行照射,束流 0.2 mA,传送带速度分别为 6.00、3.00 和 2.00 m/min。

### 1.3.3 营养成分的测定

水分含量的测定参照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》;灰分含量的测定参照 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》;脂肪含量的测定参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》;粗纤维含量的测定参照 GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》;粗蛋白质含量的测定参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》第一法;总淀粉含量的测定采用爱尔兰 Megazyme 公司试剂盒。氨基酸含量的测定参照 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》。

### 1.3.4 微生物指标的测定

菌落总数的测定参照 GB 4789.2—2022《食品

安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》;霉菌总数的测定参照 GB 4789.15—2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 霉菌和酵母计数》。

### 1.3.5 储藏指标测定

脂肪酸值的测定参照 GB/T 15684—2015《谷物碾磨制品 脂肪酸值的测定》;脂肪酶活的测定参照 GB/T 5523—2008《粮油检验 粮食、油料的脂肪酶活动度的测定》;丙二醛值的测定参照 GB/T 5009.181—2016《食品安全国家标准 食品中丙二醛的测定》;过氧化值的测定参照赵波<sup>[10]</sup>的方法。

### 1.3.6 糊化特性

参照 GB/T 24853—2010《小麦、黑麦及其粉类和淀粉糊化特性测定 快速粘度法》。准确称取 3 g 青稞米粉(干基)于专用铝盒内,加入蒸馏水使样品和蒸馏水总重量达到 28 g,再将铝盒放入快速黏度分析仪(Rapid visco analyser, RVA)中进行测定。

### 1.3.7 流变学特性

青稞米粉的制备:将青稞米利用高速万能粉碎机粉碎后于 18 °C 冰箱备用。将青稞米粉分散在蒸馏水(8%, w/w)中 10 min,然后在水浴中以 95 °C 加热 30 min,然后冷却到 25 °C。频率扫描参数:应变 0.1%,温度 25 °C,频率 0.1~100 Hz 下测定储能模量(G')和损耗模量(G'')的变化。

### 1.3.8 质构特性

青稞米的熟制:将约 8 g 的青稞米置于沸水中,煮至青稞米无白芯为标准。质构特性参照谢容等<sup>[11]</sup>报道的方法。测定时取煮熟的 3 粒完整青稞米粒平行置于质构仪置物台中心,选用 P75 物性测试探头,设置测试前速度 1 mm/s,测试速度 0.5 mm/s,测试后速度 10 mm/s,压缩比例 70%,相邻压缩时间 5 s,质构测试每个样品重复 5 次。

### 1.3.9 蒸煮特性

加热吸水率和体积膨胀率:将约 8 g 的青稞米放入网袋中,于沸水中煮至没有硬瓢。取出网袋,将煮好的样品自然晾干,测量米饭的质量和体积。

$$\text{加热吸水率}\% = (M2 - M1)/M1 \times 100 \quad \text{式(1)}$$

$$\text{体积膨胀率}\% = (V2 - V1)/V1 \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中, M1 为青稞米的质量, g; M2 为米饭的质量, g; V1 为青稞米的体积, mL; V2 为米饭的体积, mL。

### 1.3.10 感官品质

参照樊真宏等<sup>[12]</sup>的方法。

## 1.4 数据处理

采用 Origin 2018 及 SPSS 23.0 数据分析软件对数据进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 电子束辐照对青稞米营养品质的影响

由表 1 可知。与未辐照青稞米样品相比, 辐照后的青稞米的水分含量、粗蛋白、脂肪含量、

总淀粉含量、粗纤维含量和总灰分无显著差异 ( $P>0.05$ ), 这与 Kumar 等<sup>[13]</sup>的研究一致。说明 0~1.5 kGy 范围剂量的电子束辐照不会改变青稞米的营养成分含量。

氨基酸是蛋白质的基本构成物质, 其平衡性决定蛋白质品质。由表 2 可知, 未处理和电子束辐照后青稞米中均含有 17 种氨基酸 (7 种必需氨基酸, 10 种非必需氨基酸)。从表 1 和表 2 可以看出, 电子束处理对青稞米的蛋白质和氨基酸组成及含量影响不明显。研究结果表明, 在 0~1.5 kGy 剂量范围内, 电子束辐照不会改变青稞米中氨基酸的组成和含量, 蛋白质的营养价值不受损害。这与 Xue 等<sup>[14]</sup>对玉米的研究一致。

表 1 青稞米营养品质的变化  
 Table 1 Changes in the nutritional quality of highland barley rice

| 辐照剂量/kGy | 水分含量                   | 粗蛋白                     | 脂肪含量                   | 总淀粉含量                   | 粗纤维含量                   | 总灰分                    |
|----------|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 0        | 9.84±0.19 <sup>a</sup> | 10.76±0.16 <sup>a</sup> | 1.95±0.02 <sup>a</sup> | 54.24±0.12 <sup>a</sup> | 22.51±0.09 <sup>a</sup> | 1.10±0.08 <sup>a</sup> |
| 0.5      | 9.86±0.06 <sup>a</sup> | 10.76±0.18 <sup>a</sup> | 1.93±0.04 <sup>a</sup> | 54.17±0.29 <sup>a</sup> | 22.55±0.03 <sup>a</sup> | 1.11±0.09 <sup>a</sup> |
| 1        | 9.89±0.22 <sup>a</sup> | 10.78±0.42 <sup>a</sup> | 1.92±0.06 <sup>a</sup> | 54.14±0.32 <sup>a</sup> | 22.48±0.07 <sup>a</sup> | 1.26±0.08 <sup>a</sup> |
| 1.5      | 9.87±0.10 <sup>a</sup> | 10.75±0.58 <sup>a</sup> | 1.89±0.02 <sup>a</sup> | 54.16±0.27 <sup>a</sup> | 22.43±0.01 <sup>a</sup> | 1.26±0.13 <sup>a</sup> |

注: 同一列中不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。下表同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant differences ( $P<0.05$ ). The same as below.

### 2.2 电子束辐照对青稞米菌落总数和霉菌数的影响

由表 3 可知, 随着辐照剂量的增加, 青稞米中的菌落总数和霉菌数均显著降低。在 1.5 kGy 剂量时, 菌落总数和霉菌数分别从  $8.0\times 10^4$  CFU/g、159 CFU/g 降到了  $1.3\times 10^4$  CFU/g 和 73 CFU/g, 灭活率分别达到了 83.75% 和 54.09%。这表明电子束辐照对青稞米具有很好的杀菌效果, 选取合适的辐照剂量, 可有效降低青稞米中的微生物含量。

### 2.3 电子束辐照对储藏指标的影响

脂肪酶是参与脂溶代谢的主要酶之一, 通过裂解酰基酯键释放游离脂肪酸<sup>[15]</sup>。一般认为脂肪酶在调节脂肪转化速率中起作用, 是大米储存中游离脂肪酸酸败的主要原因<sup>[16]</sup>。由表 4 可知, 与对照相比, 经 0.5、1.0、1.5 kGy 电子束辐照后青稞米的脂肪酶活性分别降低了 7.54%、9.29% 和 10.27%, 且经 0.5 kGy 处理就可显著降低。这可能是高能电子束破坏了酶分子的空间结构, 导致

脂肪酶活性的下降。

脂肪酸值能够用来检测谷物中游离脂肪酸的含量, 反映了谷物质量劣变的程度。由表 4 可知, 随着辐照剂量的增加, 青稞米的脂肪酸值整体呈上升趋势。这可能是电子束辐照会产生自由基, 这些自由基使脂质降解和氧化, 导致脂肪酸链的断裂、氧化和重排等, 导致脂肪酸值的升高<sup>[17]</sup>。但在 0.5 kGy 时脂肪酸值变化不显著 ( $P>0.05$ ), 故以 0.5 kGy 较适宜进行青稞米的加工。Chen 等<sup>[18]</sup>在研究辐照大米的脂质氧化后发现, 0.5 kGy 的电子束辐照更适合大米的加工, 两者结果一致。

丙二醛作为脂质氧化的中间产物, 是评价青稞米的品质劣变程度的指标之一。由表 4 可知, 随着辐照剂量的增加, 青稞米的丙二醛值显著上升 ( $P<0.05$ ), 由 0.29 mg/kg 上升到 0.53 mg/kg。其主要原因是辐照过程中产生的自由基等活性物质, 可与青稞米中的蛋白质、脂肪等分子发生反应, 引发氧化降解过程, 可能导致丙二醛产量增加<sup>[19]</sup>。

表 2 青稞米游离氨基酸的组成及含量的变化

Table 2 Changes in the composition and content of free amino acids in highland barley rice

| 氨基酸种类        | 辐照剂量/kGy               |                        |                        |                        |
|--------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|              | 0                      | 0.5                    | 1                      | 1.5                    |
| *苏氨酸 Thr     | 0.36±0.02 <sup>a</sup> | 0.36±0.02 <sup>a</sup> | 0.36±0.01 <sup>a</sup> | 0.36±0.02 <sup>a</sup> |
| *蛋氨酸 Met     | 0.16±0.03 <sup>a</sup> | 0.16±0.04 <sup>a</sup> | 0.16±0.04 <sup>a</sup> | 0.16±0.02 <sup>a</sup> |
| *缬氨酸 Val     | 0.50±0.04 <sup>a</sup> | 0.51±0.03 <sup>a</sup> | 0.50±0.03 <sup>a</sup> | 0.51±0.03 <sup>a</sup> |
| *异亮氨酸 Ile    | 0.35±0.02 <sup>a</sup> | 0.34±0.02 <sup>a</sup> | 0.34±0.03 <sup>a</sup> | 0.35±0.02 <sup>a</sup> |
| *亮氨酸 Leu     | 0.82±0.04 <sup>a</sup> | 0.81±0.03 <sup>a</sup> | 0.82±0.04 <sup>a</sup> | 0.81±0.02 <sup>a</sup> |
| *苯丙氨酸 Phe    | 0.64±0.02 <sup>a</sup> | 0.65±0.01 <sup>a</sup> | 0.64±0.03 <sup>a</sup> | 0.65±0.03 <sup>a</sup> |
| *赖氨酸 Lys     | 0.35±0.02 <sup>a</sup> | 0.35±0.02 <sup>a</sup> | 0.35±0.03 <sup>a</sup> | 0.35±0.01 <sup>a</sup> |
| 丝氨酸 Ser      | 0.24±0.01 <sup>a</sup> | 0.24±0.01 <sup>a</sup> | 0.25±0.02 <sup>a</sup> | 0.25±0.02 <sup>a</sup> |
| 谷氨酸 Glu      | 4.09±0.05 <sup>a</sup> | 4.09±0.04 <sup>a</sup> | 4.09±0.06 <sup>a</sup> | 4.09±0.03 <sup>a</sup> |
| 甘氨酸 Gly      | 0.49±0.02 <sup>a</sup> | 0.49±0.01 <sup>a</sup> | 0.49±0.02 <sup>a</sup> | 0.49±0.02 <sup>a</sup> |
| 丙氨酸 Ala      | 0.28±0.01 <sup>a</sup> | 0.27±0.01 <sup>a</sup> | 0.27±0.02 <sup>a</sup> | 0.28±0.03 <sup>a</sup> |
| 半胱氨酸 Cys     | 0.24±0.03 <sup>a</sup> | 0.24±0.04 <sup>a</sup> | 0.24±0.02 <sup>a</sup> | 0.25±0.02 <sup>a</sup> |
| 天冬氨酸 Asp     | 0.96±0.05 <sup>a</sup> | 0.95±0.03 <sup>a</sup> | 0.95±0.03 <sup>a</sup> | 0.96±0.04 <sup>a</sup> |
| 酪氨酸 Tyr      | 0.19±0.01 <sup>a</sup> | 0.19±0.02 <sup>a</sup> | 0.18±0.03 <sup>a</sup> | 0.19±0.02 <sup>a</sup> |
| 组氨酸 His      | 0.33±0.02 <sup>a</sup> | 0.34±0.01 <sup>a</sup> | 0.34±0.03 <sup>a</sup> | 0.33±0.02 <sup>a</sup> |
| 精氨酸 Arg      | 0.52±0.04 <sup>a</sup> | 0.51±0.03 <sup>a</sup> | 0.52±0.02 <sup>a</sup> | 0.52±0.02 <sup>a</sup> |
| 脯氨酸 Pro      | 1.23±0.06 <sup>a</sup> | 1.23±0.05 <sup>a</sup> | 1.22±0.03 <sup>a</sup> | 1.22±0.05 <sup>a</sup> |
| (TAA)/%      | 11.75                  | 11.73                  | 11.72                  | 11.77                  |
| (EAA)/%      | 3.18                   | 3.18                   | 3.17                   | 3.19                   |
| (NEAA)/%     | 8.57                   | 8.55                   | 8.55                   | 8.58                   |
| (EAA/TAA)/%  | 27.06                  | 27.11                  | 27.05                  | 27.10                  |
| (EAA/NEAA)/% | 37.11                  | 37.19                  | 37.08                  | 37.18                  |

注：表中氨基酸含量均为干基含量，百分含量%；\*表示必需氨基酸，TAA 表示总氨基酸含量，EAA 表示必需氨基酸含量，NEAA 表示非必需氨基酸含量。同一行中不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

Note: Amino acid contents in the table were on a dry basis, %; \* denotes essential amino acids, TAA denotes total amino acid content, EAA denotes essential amino acid content, and NEAA denotes non-essential amino acid content. Different lowercase letters in the same row indicated significant differences ( $P < 0.05$ ).

表 3 青稞米中菌落总数和霉菌数的变化

Table 3 Changes in total colony count and mold count in highland barley rice

| 微生物指标        | 辐照剂量/kGy          |                   |                   |                   |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|              | 0                 | 0.5               | 1                 | 1.5               |
| 菌落总数/(CFU/g) | $8.0 \times 10^4$ | $7.8 \times 10^3$ | $8.5 \times 10^2$ | $6.7 \times 10^2$ |
| 霉菌数/(CFU/g)  | 159               | 73                | 23                | < 10              |

表 5 青稞米糊化特性的变化

Table 5 Changes in the pasting characteristics of highland barley rice

| 辐照剂量/kGy | 峰值粘度/cP                      | 最低粘度/cP                       | 衰减值/cP                     | 最终粘度/cP                      | 回生值/cP                     | 糊化温度/°C                  |
|----------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 0        | 2 458.50±140.94 <sup>a</sup> | 1 907.50±183.77 <sup>a</sup>  | 551.00±142.84 <sup>a</sup> | 2 610.00±168.10 <sup>a</sup> | 702.50±55.67 <sup>a</sup>  | 86.00±2.05 <sup>b</sup>  |
| 0.5      | 2 012.00±59.40 <sup>b</sup>  | 1 594.00±9.90 <sup>ab</sup>   | 418.00±69.30 <sup>ab</sup> | 2 004.00±36.77 <sup>b</sup>  | 435.00±62.23 <sup>b</sup>  | 87.35±3.04 <sup>ab</sup> |
| 1        | 1 637.00±48.08 <sup>bc</sup> | 1 256.00±49.50 <sup>bc</sup>  | 381.00±1.41 <sup>ab</sup>  | 1 687.00±35.36 <sup>bc</sup> | 431.00±14.14 <sup>b</sup>  | 88.05±0.07 <sup>ab</sup> |
| 1.5      | 1 456.50±16.26 <sup>cd</sup> | 1 191.00±35.36 <sup>bcd</sup> | 265.50±51.62 <sup>bc</sup> | 1 612.50±48.80 <sup>c</sup>  | 271.50±13.44 <sup>bc</sup> | 87.38±0.04 <sup>ab</sup> |

表 4 青稞米脂肪氧化指标的变化

Table 4 Changes in fat oxidation indices of highland barley rice

| 辐照剂量/kGy | 脂肪酶活性/(mg/g)           | 脂肪值/(mg KOH/100 g)       | 丙二醛值/(mg/Kg)           | 过氧化值/(meq/Kg)          |
|----------|------------------------|--------------------------|------------------------|------------------------|
| 0        | 9.15±0.05 <sup>a</sup> | 13.99±1.20 <sup>c</sup>  | 0.29±0.06 <sup>b</sup> | 0.20±0.01 <sup>a</sup> |
| 0.5      | 8.46±0.15 <sup>b</sup> | 15.61±1.10 <sup>bc</sup> | 0.48±0.07 <sup>a</sup> | 0.19±0.02 <sup>a</sup> |
| 1        | 8.30±0.19 <sup>b</sup> | 18.62±1.09 <sup>ab</sup> | 0.53±0.06 <sup>a</sup> | 0.21±0.01 <sup>a</sup> |
| 1.5      | 8.21±0.13 <sup>b</sup> | 20.21±1.10 <sup>a</sup>  | 0.53±0.07 <sup>a</sup> | 0.19±0.02 <sup>a</sup> |

青稞在储藏过程中其游离脂肪酸会氧化分解成氢过氧化物，导致过氧化值的升高<sup>[20]</sup>。因此，青稞米的过氧化值可以作为判断其氧化变质程度的一个重要标志。由表 4 可知，随着辐照剂量的增加，青稞米的过氧化值变化不显著 ( $P < 0.05$ )。表明 0~1.5 kGy 辐照剂量范围的电子束辐照不会促进过氧化值的增加。

## 2.4 电子束辐照对青稞米糊化特性的影响

糊化特性在一定程度上可以反映青稞米在加热过程中的吸水溶胀程度以及短期回生等性质，这些性质最终影响青稞米的食用品质<sup>[21]</sup>。由表 5 可知，经电子束辐照后青稞米淀粉的糊化粘度显著下降，起始糊化温度的变化不明显。

其中峰值粘度下降幅度最大。与对照相比，经 0.5、1、1.5 kGy 辐照后，峰值粘度分别下降了 18.16%、33.41%、40.76%；故与 0.5 kGy 相比，在 1 kGy 时下降幅度最大。这主要是电子束辐照会造成淀粉分子链的断裂，导致分子量降低，从而降低粘度，且不同剂量粘度的下降程度与淀粉分子聚合度的变化有关<sup>[22]</sup>。

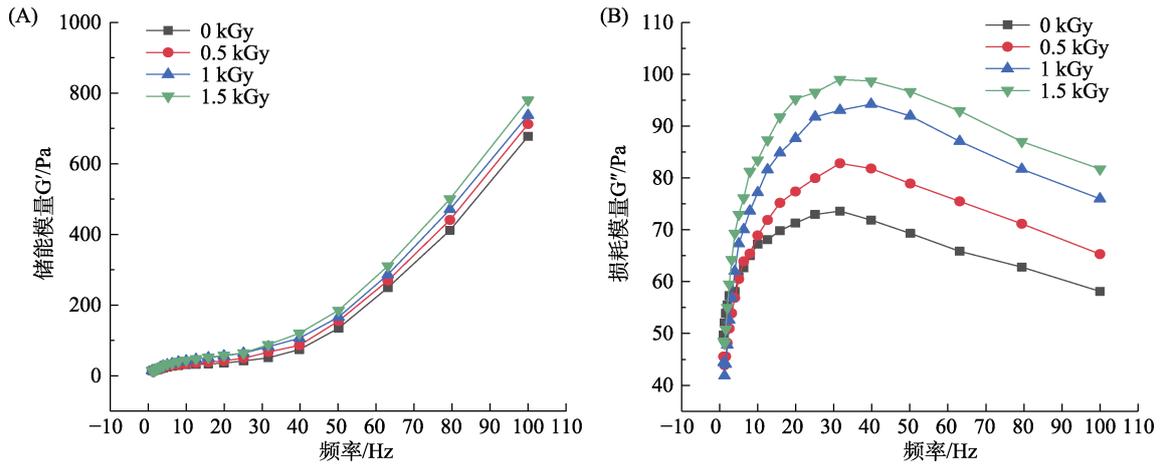
衰减值、回生值均随着辐照剂量增加而下降。与对照相比，经 0.5、1、1.5 kGy 辐照后，分别下降了 24.14%、30.85%、51.81% 和 38.03%、38.60%、61.35%。淀粉颗粒衰减值和回生值主要取决于不同聚合度的支链淀粉分子的相对含量比例。这表明电子束辐照可以导致淀粉大分子中长链的部分

断裂，从而降低聚合度。

峰值粘度和回生值越高，青稞米越难煮熟且冷却后更易硬化，导致食用品质较差。本研究发  
现，电子束处理能显著降低这些指标，使米饭质地更柔软，从而改善青稞米的食用品质。

### 2.5 电子束辐照对青稞米流变学特性的影响

储能模量  $G'$  和损耗模量  $G''$  分别反映了样品



注：(A)：储能模量  $G'$ ；(B)：损耗模量  $G''$ 。

Note: (A): Energy storage modulus  $G'$ ; (B): Loss modulus  $G''$ .

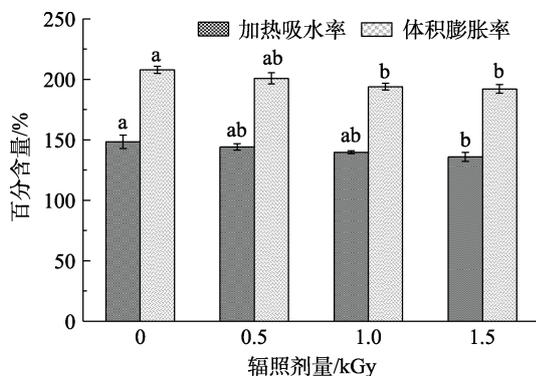
图 1 电子束辐照对青稞米的流变学特性的影响

Fig. 1 Effect of electron beam irradiation on rheological properties of highland barley rice

### 2.6 电子束辐照对青稞米食用品质的影响

#### 2.6.1 电子束辐照对青稞米蒸煮品质的影响

由图 2 可知，与对照组相比，经 1 kGy 辐照后青稞米的加热吸水率和体积膨胀率分别下降了 5.81% 和 6.68%。表明青稞米淀粉中支链淀粉分子的长链结构遭到破坏，导致其晶体的有序性受损，



注：不同小写字母代表数据存在显著性差异。

Note: Different lowercase letters represented significant differences in the data.

图 2 电子束辐照对青稞米加热吸水率和体积膨胀率的影响

Fig. 2 Effect of electron beam irradiation on water absorption and volume expansion of heated highland barley rice

的弹性和黏性特性。故青稞米的频率扫描可用来表征其结构和黏弹性随频率的变化情况。如图 1 所示， $G'$  随着频率的增加逐渐增加，且辐照剂量越大，在相应频率下的  $G'$  越大； $G''$  随着频率的增加先升高后逐渐下降，在相应的频率下，辐照剂量越大对应的  $G''$  越大。表明电子束辐照后会增加青稞米的黏弹性。

同时淀粉颗粒在接受辐照剂量的提升下会逐渐减小<sup>[23]</sup>。青稞米的加热吸水率和体积膨胀率都是评价米饭质构特性和感官品质的重要指标。因此，电子束辐照剂量不宜超过 1 kGy。

#### 2.6.2 电子束辐照对青稞米质构特性的影响

由表 6 可知，经 0~1.5 kGy 剂量处理后，青稞米的硬度、弹性、粘附性和咀嚼性差异均不显著。陈晓平等<sup>[24]</sup>发现辐照剂量超过 2 kGy 会使大米的米饭硬度和咀嚼性等显著下降，故建议电子束辐照剂量不宜超过 2 kGy。表明在 1.5 kGy 范围剂量下的电子束辐照并不会改变青稞米的质构而影响口感。

表 6 青稞米质构特性的变化

Table 6 Changes in textural and structural properties of highland barley rice

| 辐照剂量/kGy | 硬度/N                    | 弹性/mm                  | 粘附性/mj                 | 咀嚼性/mj                  |
|----------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| 0        | 52.34±1.73 <sup>a</sup> | 1.24±0.11 <sup>a</sup> | 0.20±0.03 <sup>a</sup> | 17.79±1.70 <sup>a</sup> |
| 0.5      | 52.43±0.71 <sup>a</sup> | 1.27±0.08 <sup>a</sup> | 0.19±0.03 <sup>a</sup> | 18.98±1.47 <sup>a</sup> |
| 1        | 52.67±1.16 <sup>a</sup> | 1.27±0.12 <sup>a</sup> | 0.20±0.04 <sup>a</sup> | 17.53±2.16 <sup>a</sup> |
| 1.5      | 52.78±1.46 <sup>a</sup> | 1.25±0.14 <sup>a</sup> | 0.19±0.03 <sup>a</sup> | 18.16±1.18 <sup>a</sup> |

### 2.6.3 电子束辐照对青稞米感官品质的影响

本研究对青稞米的气味、光泽、完整性、滋味等方面进行感官评价。由图 3 可知, 电子束辐照对青稞米的气味、光泽和完整性无显著影响 ( $P>0.05$ ), 感官评分在 78.10~79.20 之间。其中 0.5 kGy 剂量的青稞米在气味、黏性和弹性方面得分最高, 完整性、软硬度和滋味无显著变化。表明低剂量电子束辐照不会显著改变青稞米的感官品质。

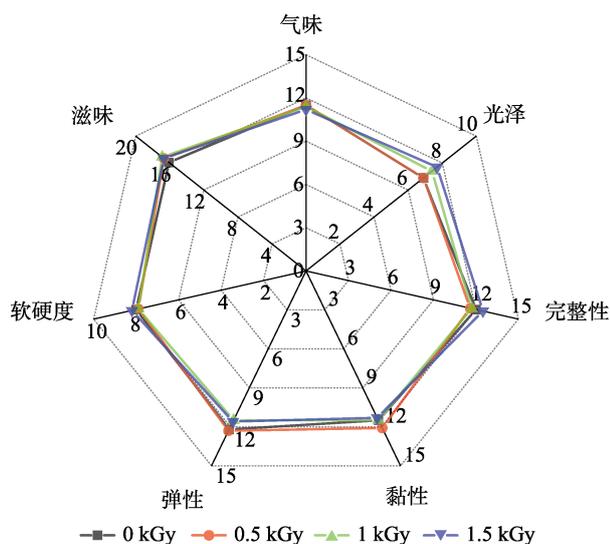


图 3 青稞米的感官评分

Fig. 3 Sensory scores of highland barley rice

## 3 结论

本研究采用 0~1.5 kGy 剂量的电子束辐照处理青稞米, 结果发现, 其基本营养成分和游离氨基酸含量无显著变化, 且能有效降低微生物含量。脂肪酸值和丙二醛值随剂量增加而升高; 0.5 kGy 即可显著降低脂肪酶活性; 过氧化值无显著变化。1 kGy 剂量显著降低加热吸水率和体积膨胀率; 气味、滋味、冷饭质地等感官品质无明显影响。1.5 kGy 剂量能显著降低青稞米的糊化粘度; 流变学特性显示辐照后黏弹性增加, 且质构特性无显著变化。故建议电子束辐照青稞米的剂量不宜超过 1 kGy, 以 0.5 kGy 为宜。

### 参考文献:

[1] 杜艳, 李娟, 陈正行, 等. 不同品种青稞籽粒不同部位粉营养价值综合评价[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(10): 50-56.

DU Y, LI J, CHEN Z X, et al. Comprehensive evaluation of nutritional value of various parts of flour of different highland barley varieties[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2021, 36(10): 50.

[2] 孔杭如, 梅玉, 赵晓燕, 等. 不同生长周期青稞苗粉氨基酸、脂肪酸组成分析及抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(3): 73-78.

KONG H R, MEI Y, ZHAO X Y, et al. Amino acid and fatty acid composition and total antioxidant capacity of highland barley seedling powder obtained from seedlings grown for different periods[J]. Food Research and Development, 2022, 43(3): 73-78.

[3] 扎桑, 旺姆. 不同品种青稞籽粒储藏前后的脂质代谢组比较[J/OL]. 中国粮油学报, 2023, 38(8): 110-116.

ZHA S, WANG M. Lipid metabolomics of different highland barley cultivars during storage[J/OL]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(8): 110-116.

[4] 党斌, 景孝男, 张杰, 等. 不同稳定化处理对青稞籽粒储藏稳定性的影响[J/OL]. 食品科技, 2024, 49(3): 173-182.

DANG B, JING X N, ZHANG J, et al. Effect of different stabilization treatments on storage stability of highland barley grain[J/OL]. Food Science and Technology, 2024, 49(3): 173-182.

[5] 王媛, 刘雪婷, 陈金定, 等. 电子束辐照技术在食品工业中的应用现状及研究进展[J]. 食品工业, 2021, 42(7): 257-261.

WANG Y, LIU X T, CHEN J D, et al. Research progress of electron beam irradiation technology and its application in food industry[J]. The Food Industry, 2021, 42(7): 257-261.

[6] 魏会惠, 罗小虎, 王莉, 等. 电子束辐照小麦粉的杀菌效果及对低菌小麦粉品质的影响[J/OL]. 现代食品科技, 2017, 33(2): 142-147.

WEI H H, LUO X H, WANG L, et al. Effect of electron beam irradiation on the sterilization, quality, and bacterial count of wheat flour[J/OL]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(2): 142-147.

[7] 李克, 潘丽红, 罗小虎, 等. 电子束辐照降解玉米中玉米赤霉烯酮和呕吐毒素[J/OL]. 食品与发酵工业, 2019, 45(21): 73-78.

LI K, PAN L H, LUO X H, et al. Degradation of zearalenone and deoxynivalenol in corn by electron beam irradiation[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(21): 73-78.

[8] OCLOO F C K, ODAI B T, DARFOUR B, et al. Microbial quality and Aflatoxin levels of sorghum grains (*Sorghum bicolor*) irradiated with gamma rays, low energy electron beam (LEEB) and high energy electron beam (HEEB)[J/OL]. Radiation Physics and Chemistry, 2024, 216: 111474.

[9] 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/OL]. 无锡: 江南大学, 2022: 18-21.

PAN L H. Effect of electron beam irradiation on storage quality and starch properties of rice with high moisture content[D/OL]. Wuxi: Jiangnan University, 2022: 18-21.

- [10] 赵波. 青稞适度加工稳定化关键技术及制品品质改良机制研究[D/OL]. 中国农业科学院, 2021: 49-50.  
ZHAO B. Research on the key technology of hull-less barley moderate process and stabilization and mechanism for improvement of product quality[D/OL]. Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021: 49-50.
- [11] 谢容, 李俏, 张云书, 等. 不同剥皮次数对青稞米品质的影响[J/OL]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(4): 971-981.  
XIE R, LI Q, ZHANG Y S, et al. Effect of different pearling times on the quality of hull-less barley rice[J/OL]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(4): 971-981.
- [12] 樊真宏, 党斌, 杨希娟. 不同脱皮次数青稞米中营养品质与蒸煮性能分析[J/OL]. 农产品加工, 2022(7): 60-64.  
FAN Z H, DANG B, YANG X J. Analysis of the nutritional quality and cooking performance of highland barley rice in different peeling times[J/OL]. Farm Products Processing, 2022(7): 60-64.
- [13] KUMAR P, PRAKASH K S, JAN K, et al. Effects of gamma irradiation on starch granule structure and physicochemical properties of brown rice starch[J/OL]. Journal of Cereal Science, 2017, 77: 194-200.
- [14] XUE P, ZHAO Y, WEN C, et al. Effects of electron beam irradiation on physicochemical properties of corn flour and improvement of the gelatinization inhibition[J/OL]. Food Chemistry, 2017, 233: 467-475.
- [15] ZHENG Q, WANG Z, XIONG F, et al. Enzyme inactivation induced by thermal stabilization in highland barley and impact on lipid oxidation and aroma profiles[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1097775.
- [16] 李永富, 王雪真, 黄金荣, 等. 基于自由基控制的青稞脂肪酶射频灭活技术研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(7): 46-54.  
Li Y F, WANG X Z, HUANG J R, et al. Radio frequency for lipase Inactivation of highland barley based on free radicals control[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(7): 46-54.
- [17] WANG Z, WANG K, ZHANG M, et al. Effect of electron beam irradiation on shelf life, noodle quality, and volatile compounds of fresh millet-wheat noodles[J/OL]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(12).
- [18] CHEN Y, JIANG W, JIANG Z, et al. Changes in physicochemical, structural, and sensory properties of irradiated brown japonica rice during storage[J/OL]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(17): 4361-4369.
- [19] TANG Y, XU L, YU Z, et al. Influence of 10 MeV electron beam irradiation on the lipid stability of oat and barley during storage[J/OL]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 100904.
- [20] QU L, ZHAO Y, LI Y, et al. Oxidative stability and pasting properties of high-moisture japonica brown rice following different storage temperatures and its cooked brown rice flavor[J/OL]. Foods, 2024, 13(3): 471.
- [21] NIU M, ZHANG B, JIA C, et al. Multi-scale structures and pasting characteristics of starch in whole-wheat flour treated by superfine grinding[J/OL]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 104: 837-845.
- [22] PAN L, XING J, LUO X, et al. Influence of electron beam irradiation on the moisture and properties of freshly harvested and sun-dried rice[J/OL]. Foods, 2020, 9(9): 1139.
- [23] PAN L, XING J, ZHANG H, et al. Electron beam irradiation as a tool for rice grain storage and its effects on the physicochemical properties of rice starch[J/OL]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 2915-2921.
- [24] 陈晓平, 金玉, 孟岩, 等. 高能电子束对大米食用品质的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(3): 71-74.  
CHEN X P, JIN Y, MENG Y, et al. Effect of high-energy electron beam Irradiation on eating quality of rice[J]. Food Science, 2016, 37(3): 71-74. 完