申慧珊, 马国帅, 崔赞, 等. 电子束辐照对大黄米结构、理化性质和蒸煮品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(13): 145−151. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070136

SHEN Huishan, MA Guoshuai, CUI Zan, et al. Effect of Electron Beam Irradiation on the Structure, Physicochemical Properties and Cooking Quality of Proso Millet[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(13): 145−151. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070136

·研究与探讨·

电子束辐照对大黄米结构、理化性质和蒸煮品质的影响

申慧珊[1,2,3], 马国帅[1], 崔　赞[1], 姚佳杭[1,3], 王宏伟[1,2], 彭乃卫[4], 刘兴丽[1,2], 张　华[1,2,3,*]

（1.郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南郑州 450001;
2.面制食品国家地方联合工程研究中心（河南）, 河南郑州 450001;
3.中原食品实验室, 河南漯河 462300;
4.郑州宏源生物工程有限公司, 河南郑州 450000）

摘　要: 为了探究电子束辐照对大黄米结构、理化性质及蒸煮品质的影响，本研究采用不同剂量的电子束（0、3、6、9、12 kGy）对大黄米进行辐照处理，系统分析了大黄米的结晶结构、短程有序结构、直链淀粉含量、破损淀粉含量、糊化特性、热力学特性、溶解度、膨胀力、蒸煮特性以及质构特性的变化。结果表明，电子束辐照破坏了大黄米的结晶结构，随着辐照剂量的增加，大黄米的相对结晶度从 19.46% 显著降低至 11.76%（P<0.05），直链淀粉含量由 4.93% 降至 2.25%，而淀粉酶指数则由 75.86% 增加至 76.53%。经过电子束辐照处理，大黄米的峰值黏度、谷值黏度、最终黏度等黏度参数、热力学转变温度和膨胀力显著降低（P<0.05），而溶解度显著增加（P<0.05）。最终，这些变化改善了大黄米的蒸煮品质，经 12 kGy 辐照处理后，熟制米样的硬度和咀嚼性分别降低了 54.93% 和 81.02%，可溶性固形物含量增加了 285.44%。电子束辐照有效改善了大黄米的加工特性，使其更适合制作具有黏稠质地和柔软口感的粥类食品。研究结果揭示了电子束辐照对大黄米品质的影响规律，为该技术在粮食高效保鲜与高值化加工中的应用提供了科学依据，对推动大黄米产业可持续发展具有重要实践意义。

关键词: 大黄米, 电子束辐照, 结构, 理化性质, 蒸煮品质

中图分类号: TS210.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)13−0145−07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070136　　本文网刊:

Effect of Electron Beam Irradiation on the Structure, Physicochemical Properties and Cooking Quality of Proso Millet

SHEN Huishan[1,2,3], MA Guoshuai[1], CUI Zan[1], YAO Jiahang[1,3], WANG Hongwei[1,2], PENG Naiwei[4], LIU Xingli[1,2], ZHANG Hua[1,2,3,*]

（1.College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2.National & Local United Engineering Laboratory of Wheat Flour Food, Zhengzhou 450001, China;
3.Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, China;
4.Zhengzhou Hongyuan Bioengineering Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China）

Abstract: To investigate the effect of electron beam irradiation (EBI) on the structure, physicochemical properties, and cooking quality, this study applied electron beam irradiation at different doses (0, 3, 6, 9, and 12 kGy) to proso millet. The crystalline structure, short-range ordered structure, amylose content, damaged starch content, pasting properties, thermal

收稿日期: 2025−07−10

基金项目: 河南省青年托举人才工程项目（2025HYTP089）; 河南省高等学校重点科研项目（25A550001）; 陕西省教育厅科学研究计划一般专项项目（24JK0429）。

作者简介: 申慧珊（1994−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 淀粉结构修饰和功能化调控, E-mail: shen1685778117@163.com。

*** 通信作者:** 张华（1975−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 速冻食品加工与安全控制, E-mail: 2009046@zzuli.edu.cn。

properties, solubility, swelling power, cooking characteristics, and textural properties of proso millet were measured. The results showed that EBI destroyed the crystalline structure of proso millet. As the irradiation dose increased, the relative crystallinity significantly decreased from 19.46% to 11.76% (P<0.05), accompanied by a reduction in amylose content from 4.93% to 2.25% and an increase in the amylose index from 75.86% to 76.53%. Consistent with these structural alterations, EBI led to a substantial decline in the pasting properties, thermodynamic transition temperature, and swelling power (P<0.05). In contrast, the solubility increased considerably (P<0.05). These changes collectively contributed to an improvement in cooking quality, after 12 kGy irradiation, manifested by a reduction in the hardness and chewiness of the cooked proso millet by 54.93% and 81.02%, respectively, and an 285.44% increase in soluble solid content. EBI effectively improved the processability of proso millet, making it more suitable for making porridge with a thick texture and soft taste. The results revealed the influence of EBI on the quality of proso millet. It provides a scientific basis for the application of EBI in the efficient preservation and high-value processing of grain. Besides, this study is of great practical significance to promote the sustainable development of the proso millet industry.

Key words: proso millet; electron beam irradiation; structure; physicochemical properties; cooking quality

大黄米由禾本科黍属一年生草本植物的籽粒经脱壳加工而成，其适应性广，具有耐旱、耐热、耐盐碱、喜光、生育期短等特性，在非洲、北美洲及我国西北、华北及西南等地的山区广泛种植[1−2]。大黄米的营养价值丰富，含有蛋白质、碳水化合物、膳食纤维、维生素、活性成分、微量元素等多种营养物质[3−4]。大黄米蛋白中含有 17 种氨基酸，其中人体必需的 8 种氨基酸含量均高于玉米、小麦和大米，且其蛋白质中必需氨基酸构成比例较平衡，可作为人体优质蛋白的补充来源[5]；更重要的是，大黄米蛋白质组成与小麦类似，但不含致敏性麸质蛋白，是乳糜泻患者和麸质过敏人群的理想食物[6]。大黄米常见的食用方式主要包括直接煮粥、制作粽子等传统食品，或经粉碎加工后用于制作各类糕点，如大黄米汤圆、黄米年糕、黄米锅巴及饼类食品，还常用于酿造药食两用的黄酒。但是，大黄米在储存和加工过程中易受到微生物污染和虫害侵扰，造成资源浪费，同时，天然大黄米的功能特性有限，我国对大黄米的利用率较低，精深加工产品种类较少[7−9]。因此，研究兼具杀虫灭菌功效以提升储存稳定性，并能有效改善大黄米品质的新型加工技术，对于推动大黄米加工产业提质升级、持续发展具有重要意义。

电子束辐照是一种新型非热加工技术，因效率高、耗能少、操作简单和灭菌彻底等优点而被广泛用于食品工业生产中[10−11]。电子束辐照不仅可以杀灭粮食和食品中的害虫和微生物，改善其储藏品质，同时也会对粮食中淀粉、蛋白质等成分产生影响，改善食品品质[12]。目前的研究揭示了电子束辐照在小麦粉、玉米、高粱、稻谷、青稞等谷物中的应用，Pan 等[13]、赵军轻[14] 报道电子束辐照处理能有效抑制稻谷和小麦中微生物生长，增强稻谷和小麦的储藏稳定性，延缓稻谷和小麦品质劣变。李克等[15] 发现电子束辐照可以降解玉米中的玉米赤霉烯酮和呕吐毒素，为电子束辐照在粮食真菌毒素降解中的应用提供了理论参考。陈雪从等[16] 发现在 0~1.5 kGy 剂量内，电子束辐照处理不仅能够有效杀菌，还能保持青稞米的氨基酸组成和含量，确保其蛋白质营养价值不受影响。但是，不同谷物因其组分和结构特性的差异，在品质改良和货架期延长等方面对电子束辐照剂量的响应存在显著区别。杨苗等[17] 发现电子束辐照能显著提升大黄米的酚类物质含量并增强其抗氧化活性。然而，目前关于电子束辐照对大黄米结构和理化特性影响的研究仍显不足，这在一定程度上制约了大黄米在食品工业中的深度开发和广泛应用。

因此，本研究使用不同剂量电子束辐照处理大黄米，研究电子束辐照对大黄米的结晶结构、短程有序结构、糊化特性、溶解度、膨胀力、热力学特性等结构和理化性质的影响，为大黄米精深加工产品的开发提供理论参考，推动大黄米产业转型升级与提质增效。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

糯性大黄米　张家口惠康食品有限公司；溴化钾（KBr）　天津市光复科技发展有限公司；硼酸　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；碘化钾　上海源叶生物科技有限公司；所有化学试剂均为分析纯。

10 MeV 高能电子加速器　郑州宏源生物工程有限公司；XA-3 高速粉碎机　常州苏瑞仪器有限公司；ULTIMA IV 型 X 射线衍射仪　日本理学公司；Vertex 70 傅里叶变换红外光谱仪　德国 Bruker 公司；UV-1100 紫外分光光度计　上海佑科仪器仪表有限公司；SD Matic-2 破损淀粉测定仪　法国 Sdmatic 公司；S3500 激光衍射粒度分析仪　美国贝克曼库尔特有限公司；RVA 4500 型快速黏度分析仪　瑞典 Perten 仪器公司；DSC Q20 差示扫描量热仪　美国 Waters 公司；TA-XT plus 质构分析仪　英国 Stable Micro Systems 公司。

1.2 实验方法

1.2.1　电子束辐照处理大黄米　称量 500 g 大黄米装进透明聚乙烯塑料袋并密封，轻轻按压使其厚度大概为 1 cm。使用 10 MeV/20 kW 高能电子加速器对大黄米样品进行 3、6、9、12 kGy 剂量的辐照处理，未辐照大黄米（0 kGy）作为对照组。借助高速粉碎机将大黄米研磨成粉末，过 100 目筛，备用。

1.2.2　结晶结构　使用 X 射线衍射仪(XRD)测定大黄米的结晶结构，使用 Cu 靶作为辐射源，衍射角范围为 5°~50°之间，工作电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA，步长为 0.02°，扫描速度为 5°/min。

1.2.3　短程有序结构　使用傅里叶变换红外光谱仪(FT-IR)测定大黄米的短程有序结构。将大黄米样品与干燥的 KBr 按照 1∶100 的质量比例混合研磨之后压片。条件参数：KBr 薄片作背景，扫描范围 4000~400 cm^{-1}，分辨率 4 cm^{-1}。

1.2.4　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》。

1.2.5　破损淀粉含量的测定　称量 3.0 g 的硼酸和 3.0 g 的碘化钾放入反应杯中，加入 120 mL 的蒸馏水，滴加 1 滴 0.1 mol/L 的硫代硫酸钠溶液配制试剂，然后准确称取 1 g 的大黄米加入到反应杯中，并放到破损淀粉测定仪中进行测试。

1.2.6　粒度分布　取少量大黄米放入去离子水中，充分振荡，超声 2 min 充分分散大黄米粉，形成折射率在 10%~15% 的悬浮液，用粒度分析仪对样品进行测定。

1.2.7　糊化特性　称取 3 g 大黄米于专用铝盒内，加入 25 mL 蒸馏水，混匀后放入快速黏度分析仪中进行测定。程序参数设置为：初始温度 50 ℃，搅拌速率 960 r/min，保持 1 min；以 12 ℃/min 的速度升温至 95 ℃，搅拌速率 160 r/min，保持 2.5 min；最后以 12 ℃/min 的速度降温至 50 ℃，保持 2 min。

1.2.8　热力学特性　称取 3 mg 大黄米于铝制坩埚中，加入 9 μL 去离子水，加盖密封，4 ℃ 平衡 12 h。参数设置为：空坩埚作对照，加热温度范围 20~120 ℃，升温速率 10 ℃/min，N_2 作保护气，流速为 50 mL/min。

1.2.9　溶解度和膨胀力　称取 0.5 g(W)大黄米，加入 25 mL 蒸馏水配制成质量分数为 2% 的乳液，将其涡旋混匀后置于 90 ℃ 水浴锅中加热 30 min，期间保持 120 r/min 持续振荡。然后以 3500 r/min 离心 15 min，上清液倒入已恒重的铝盒中烘干至恒重，得到被溶解样品量 A(g)；称量沉淀物质量记为 B(g)。按照下列公式计算溶解度(S)和膨胀力(P)：

$$溶解度S(\%)=\frac{A}{W}\times 100 \qquad 式（1）$$

$$膨胀力P(g/g)=\frac{B}{W\times(100-S)} \qquad 式（2）$$

1.2.10　蒸煮特性　称取 7 g(W_1)大黄米放入装有 120 mL 沸水的烧杯中，然后置于电炉上煮 20 min。然后通过双层纱布过滤，将煮熟的大黄米从米汤中分离出来。随后测定吸水率、可溶性固形物含量。

1.2.10.1　吸水率　将从米汤中分离出来的大黄米置于滤纸上 30 min，去除表面水分后称重，记为 W_2(g)。按照下列公式计算吸水率：

$$吸水率(\%)=\frac{W_2-W_1}{W_1}\times 100 \qquad 式（3）$$

1.2.10.2　可溶性固形物含量　将分离出大黄米的米汤转移至 100 mL 容量瓶，定容，吸取 20 mL 至 50 mL 离心管中，并以 4000 r/min 的速度离心 15 min，将 10 mL 上清液转移至已经恒重(M_1)的铝盒中，然后在 105 ℃ 的烘箱中干燥至恒重(M_2)。按照下列公式计算可溶性固形物含量：

$$可溶性固形物含量(\%)=\frac{10\times(M_2-M_1)}{W_1}\times 100 \qquad 式（4）$$

1.2.11　质构特性　称取 3 g 大黄米放置在铝制容器中，按照水米比 1.3∶1 加入蒸馏水浸泡 30 min，将铝制容器置于电饭煲中蒸 30 min，然后保温 10 min。使用配备 P/36R 探头的质构分析仪对蒸熟的大黄米进行质构分析。采用 TPA 测试模式，参数设置为：应变 50%，测前、测中和测后速度分别设定为 2、1 和 10 mm/s。

1.3　数据处理

所有实验均重复测定 3 次，结果以平均值±标准差呈现。采用 SPSS 19.0 软件进行 ANOVA 方差分析，$P<0.05$ 表示具有显著性差异，并利用 Origin 8.2 软件绘图。

2　结果与分析

2.1　电子束辐照对大黄米结晶结构的影响

X 射线衍射是反映淀粉结晶结构的有效指标。如图 1 所示，未辐照大黄米在衍射角(2θ)为 15°、17°、18°和 23°处显示出较强的衍射峰，表明大黄米中淀粉为 A 型结晶结构。电子束辐照处理后，大黄

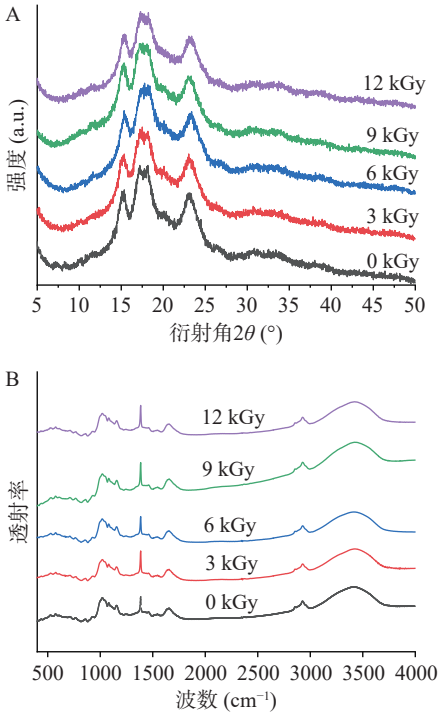


图 1　电子束辐照后大黄米的 XRD 图谱(A)和 FT-IR 图谱(B)

Fig.1　XRD patterns (A) and FT-IR spectra (B) of proso millet after electron beam irradiation

米的衍射峰位置未发生明显变化，表明电子束辐照没有改变大黄米中淀粉的晶型。电子束辐照对大黄米相对结晶度的影响见表 1，未辐照大黄米（0 kGy）的相对结晶度为 19.46%，经过 3、6、9、12 kGy 电子束辐照处理后，大黄米的相对结晶度分别降低至 18.42%、16.91%、14.60% 和 11.76%。电子束辐照处理的水稻[13] 和藜麦[18] 中也发现相似的结果。这可能是电子束辐照产生的自由基打断了淀粉分子间的糖苷键，支链淀粉侧链断裂，淀粉的有序结构被破坏，最终导致相对结晶度下降。

表 1 电子束辐照对大黄米相对结晶度、$R_{1047/1022}$、直链淀粉含量和破损淀粉含量的影响

Table 1 Effect of electron beam irradiation on the relative crystallinity, $R_{1047/1022}$, amylose content, and damaged starch content of proso millet

辐照剂量（kGy）	相对结晶度（%）	$R_{1047/1022}$	直链淀粉含量（%）	淀粉酶指数（%）
0	19.46±0.13^{a}	0.826±0.006^{d}	4.93±0.13^{a}	75.86±0.03^{d}
3	18.42±0.09^{b}	0.836±0.001^{cd}	3.28±0.07^{b}	76.17±0.02^{c}
6	16.91±0.28^{c}	0.846±0.007^{bc}	3.36±0.08^{b}	76.23±0.07^{c}
9	14.60±0.06^{d}	0.852±0.000^{ab}	2.21±0.13^{c}	77.05±0.14^{a}
12	11.76±0.28^{e}	0.859±0.004^{a}	2.25±0.07^{c}	76.53±0.04^{b}

注：同一列中不同小写字母表示差异显著（P<0.05），表2~表5同。

2.2 电子束辐照对大黄米短程有序结构的影响

傅里叶变换红外光谱是分析淀粉分子结构的有效方法。FT-IR 图谱中 1047 cm^{-1} 处的吸收峰强度与淀粉结晶有序结构有关，1022 cm^{-1} 处的吸收峰强度反映无定形区淀粉分子的数量，1047/1022 cm^{-1} 峰强度比（$R_{1047/1022}$）可评估淀粉的短程有序性[19]。如图 1B 所示，所有大黄米样品的 FT-IR 光谱在特征峰方面没有差异，表明电子束辐照处理没有使大黄米产生新的官能团。电子束辐照对大黄米 $R_{1047/1022}$ 值的影响见表 1，未辐照大黄米（0 kGy）的 $R_{1047/1022}$ 值为 0.826，随着辐照剂量的增加，$R_{1047/1022}$ 值逐渐增加，表明电子束辐照处理导致大黄米重新组合形成稳定的最终产物，从而增强了淀粉的短程有序性。Lei 等[20] 报告了电子束辐照导致马铃薯淀粉的 $R_{1047/1022}$ 值呈现先上升后下降的趋势，辐照处理过程中小淀粉分子重新组合形成稳定的最终产物，从而加强了淀粉的短程有序性。

2.3 电子束辐照对大黄米直链淀粉含量的影响

直链淀粉含量影响大黄米的许多理化和功能性质，如水合特性、糊化特性、消化特性等。由表 1 可知，未辐照大黄米（0 kGy）的直链淀粉含量为 4.93%，与杨清华[9] 的研究中报道的糯性大黄米直链淀粉含量在 2.24%~5.55% 之间相符。电子束辐照处理显著降低了大黄米的直链淀粉含量（P<0.05），经 3、6、9 和 12 kGy 剂量辐照，大黄米的直链淀粉含量分别降低为 3.28%、3.36%、2.21% 和 2.25%。这是因为电子束辐照引起直链淀粉链的降解，导致直链淀粉和碘分子之间的络合能力降低。Wang 等[21] 也发现山药粉的直链淀粉含量随电子束辐照剂量的增加而降低，未辐照山药粉的直链淀粉含量为 25.09%，在 14.97 kGy 剂量处理下降低至 17.00%。

2.4 电子束辐照对大黄米破损淀粉含量的影响

破损淀粉是评价大黄米品质的重要指标，淀粉酶指数表示破损淀粉含量在样品中所占的比例，淀粉酶指数越高，表示样品中破损淀粉含量越高。如表 1 所示，经电子束辐照处理后，大黄米的淀粉酶指数显著上升（P<0.05）。原因可能是电子束辐照产生的高能电子束轰击大黄米，导致其中的淀粉颗粒表面及内部结构产生破裂，从而提高了破损淀粉含量。同样的结果在魏会惠等[22] 的研究中观察到，随着电子束辐照剂量的增加，小麦粉的破损淀粉含量随之增加。

2.5 电子束辐照对大黄米粒径的影响

表 2 为电子束辐照处理后大黄米的粒径分布。$D_{(4,3)}$为体积平均直径，反映样品颗粒的总体体积分布；D_{10}、D_{50} 和 D_{90} 为累积分布百分数达到 10%、50% 和 90% 时所对应的粒径值。由表 2 可知，电子束辐照剂量增加到 12 kGy 时，大黄米的 $D_{(4,3)}$、D_{10}、D_{50} 和 D_{90} 分别从 75.49、6.64、62.17 和 169.19 μm 增加至 94.30、11.73、86.76 和 187.05 μm，而比表面积由 4666.54 m^2/g 减小至 3364.61 m^2/g，表明电子束辐照处理后，大黄米的粒径显著增加。这可能是因为在电子束辐照的作用下，大黄米颗粒发生聚集和膨胀，导致粒径的增加。这与张捷[23] 采用 γ 射线辐照处理面粉的粒径分布结果一致，经 25 kGy 的 γ 射线辐照处理，面粉中淀粉的 $D_{(4,3)}$、D_{10}、D_{50} 和 D_{90} 增加到 23.54、7.44、21.81 和 38.40 μm。

2.6 电子束辐照对大黄米糊化特性的影响

电子束辐照对大黄米糊化特性参数的影响见表 3。电子束辐照处理显著降低了大黄米的峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度和回生值（P<0.05），且降低幅度与电子束辐照剂量正相关，但对糊化

表 2 电子束辐照对大黄米粒径的影响

Table 2 Effect of electron beam irradiation on particle size of proso millet

辐照剂量（kGy）	$D_{(4,3)}$（μm）	比表面积（m^2/g）	D_{10}（μm）	D_{50}（μm）	D_{90}（μm）
0	75.49±2.82^{bc}	4666.54±81.82^{a}	6.64±0.10^{c}	62.17±3.16^{b}	169.19±4.85^{b}
3	78.60±4.75^{bc}	4215.83±74.29^{ab}	7.86±0.19^{bc}	69.14±7.38^{ab}	165.47±5.84^{b}
6	71.43±1.17^{c}	4093.62±214.91^{ab}	8.99±1.03^{b}	64.52±0.39^{b}	144.84±1.90^{c}
9	85.12±12.01^{ab}	3678.55±566.28^{bc}	10.64±2.59^{ab}	77.28±16.34^{ab}	170.66±13.85^{b}
12	94.30±6.23^{a}	3364.61±363.41^{c}	11.73±2.07^{a}	86.76±10.51^{a}	187.05±2.52^{a}

表 3　电子束辐照对大黄米糊化特性的影响

Table 3　Effect of electron beam irradiation on pasting properties of proso millet

辐照剂量(kGy)	峰值黏度(cP)	谷值黏度(cP)	崩解值(cP)	最终黏度(cP)	回生值(cP)	糊化温度(℃)
0	868.57±16.07^{a}	438.67±8.62^{a}	430.00±4.51^{a}	742.33±14.01^{a}	303.37±5.51^{a}	77.10±0.05^{a}
3	553.00±6.93^{b}	296.00±5.57^{b}	257.00±4.36^{b}	469.67±6.11^{b}	173.67±0.58^{b}	77.08±0.03^{a}
6	433.67±11.85^{c}	197.33±2.08^{c}	236.33±9.81^{c}	298.00±2.65^{c}	100.67±1.15^{c}	77.10±0.05^{a}
9	242.00±7.00^{d}	85.67±1.53^{d}	156.33±5.51^{d}	138.33±2.89^{d}	52.67±1.53^{d}	77.07±0.12^{a}
12	167.33±3.51^{e}	50.67±0.58^{e}	116.67±3.06^{e}	85.33±1.53^{e}	34.67±1.15^{e}	77.07±0.07^{a}

温度无显著影响(P>0.05)。类似的糊化黏度降低现象也在电子束辐照处理的高粱、大米和小米中观察到[24−26]。电子束辐照使大黄米中的淀粉和蛋白质分子链断裂，产生更多小分子片段并暴露更多极性基团，从而增加了大黄米中的可溶性固形物含量，导致糊化黏度降低[17]。此外，根据 Xue 等[27] 的研究报道，电子束辐照处理会使谷物粉表面诱导带相同电荷，由于相同电荷之间的排斥效应，淀粉分子间的相互作用力被削弱，从而进一步降低了体系的糊化黏度。崩解值表示大黄米在加热过程中黏度的下降程度，反映了大黄米的热稳定性。经电子束辐照处理后，大黄米的崩解值显著降低(P<0.05)，表明辐照处理后的大黄米在受热过程中能够更好地维持其结构稳定性，表现出更高的热稳定性。回生值是表征大黄米老化能力的重要参数。辐照大黄米的回生值显著低于未辐照大黄米(P<0.05)，表明电子束辐照能够有效延缓大黄米的短期老化过程，对维持其品质稳定性具有积极作用。

2.7　电子束辐照对大黄米热力学特性的影响

电子束辐照对大黄米热力学特性的影响见表 4。未辐照大黄米(0 kGy)的起始温度(To)、峰值温度(Tp)和终值温度(Tc)分别为 70.12、75.50 和 86.53 ℃，电子束辐照处理显著降低了大黄米的 To、Tp 和 Tc(P<0.05)，且降低幅度与电子束辐照剂量正相关。电子束辐照处理后，大黄米中淀粉多尺度结构的变化包括分子量的降低、支链淀粉链的断裂、结晶结构的改变，直链淀粉的浸出及无定形区域的减少，这些因素都可能导致大黄米热力学性质的变化。糊化焓(ΔH)代表淀粉颗粒糊化过程中双螺旋有序结构解旋和熔融所需的能量。随着电子束辐照剂量的增加，大黄米的ΔH 呈逐渐下降趋势，表明电子束辐照处理的大黄米加热糊化所需的能量更少，更容易糊化。这可能是因为电子束辐照引起支链淀粉侧链断裂，双螺旋和结晶结构破坏，导致热力学温度和糊化焓降低[28]。

表 4　电子束辐照对大黄米热力学特性的影响

Table 4　Effect of electron beam irradiation on thermal properties of proso millet

辐照剂量(kGy)	To(℃)	Tp(℃)	Tc(℃)	ΔH(J/g)
0	70.12±0.05^{a}	75.50±0.14^{a}	86.53±0.14^{a}	8.11±0.07^{a}
3	69.62±0.29^{ab}	74.79±0.24^{b}	83.40±0.46^{b}	7.85±0.01^{b}
6	69.55±0.59^{ab}	74.57±0.34^{bc}	83.39±1.26^{b}	7.60±0.83^{c}
9	69.50±0.17^{b}	74.36±0.37^{bc}	81.91±0.84^{c}	7.28±0.10^{d}
12	68.72±0.14^{c}	74.16±0.22^{c}	81.71±0.27^{c}	6.87±0.02^{e}

2.8　电子束辐照对大黄米溶解度和膨胀力的影响

溶解度和膨胀力是反映淀粉与水分子相互作用的重要指标。如图 2(A)所示，未辐照大黄米(0 kGy)的溶解度较低(6.81%)，经电子束辐照处理后，大黄米的溶解度显著增加(P<0.05)，12 kGy 辐照处理的大黄米的溶解度高达 37.21%。一方面，电子束辐照打断了大黄米中淀粉分子之间的糖苷键，导致淀粉分子解聚、支链淀粉长链断裂，形成更多短链糊精和小分子物质，从而提高了大黄米的溶解度[29]；另一方面，电子束辐照破坏了淀粉的结晶结构，使大黄米更易糊化和溶解。另外，电子束辐照产生的自由基破坏了大黄米中蛋白质分子的结构，使多肽链断裂，提高蛋白质的水合能力，增强大黄米的溶解度。

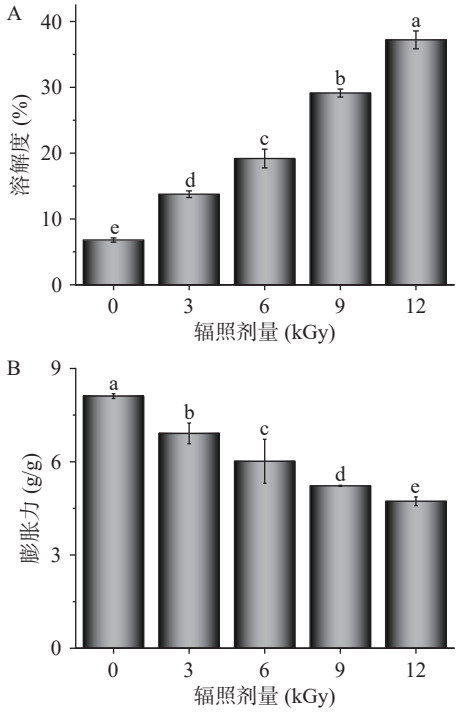


图 2　电子束辐照对大黄米溶解度(A)和膨胀力(B)的影响

Fig.2　Effect of electron beam irradiation on solubility (A) and swelling power (B) of proso millet

注：图中不同小写字母表示差异显著 P<0.05。

如图 2(B)所示，未辐照大黄米(0 kGy)的膨胀力为 8.11 g/g，经电子束辐照处理后，大黄米的膨胀力显著降低(P<0.05)，12 kGy 辐照处理的大黄米的膨胀力降低至 4.73 g/g。一方面，电子束辐照破坏了淀

表 5 电子束辐照对大黄米蒸煮特性和质构特性的影响

Table 5 Effect of electron beam irradiation on cooking characteristics and textural properties of proso millet

辐照剂量(kGy)	吸水率(%)	可溶性固形物含量(%)	硬度(g)	咀嚼性	弹性	胶着度	黏聚性	回复性
0	211.37±0.01^{a}	4.74±0.17^{d}	5241.87±61.01^{a}	350.55±16.79^{b}	0.25±0.00^{c}	1410.19±78.48^{a}	0.27±0.02^{b}	0.13±0.01^{a}
3	190.75±6.34^{b}	8.42±0.35^{c}	3855.69±41.04^{b}	401.26±29.17^{a}	0.34±0.24^{a}	1169.69±3.79^{b}	0.30±0.00^{a}	0.12±0.00^{a}
6	175.815±0.11^{c}	12.79±1.34^{b}	3113.98±43.84^{c}	249.00±13.22^{c}	0.29±0.29^{b}	847.39±12.14^{c}	0.27±0.00^{b}	0.10±0.02^{b}
9	165.32±2.46^{d}	15.06±1.32^{b}	3022.59±28.83^{c}	133.81±1.04^{d}	0.23±0.23^{c}	578.59±11.73^{d}	0.19±0.01^{c}	0.08±0.00^{c}
12	140.14±0.54^{e}	18.27±0.99^{a}	2362.50±104.61^{d}	66.55±4.16^{e}	0.18±0.18^{d}	379.59±19.33^{e}	0.16±0.02^{d}	0.07±0.00^{d}

粉颗粒的无定形和结晶结构，促使直链淀粉浸出，并推动颗粒膨胀；另一方面，电子束辐照产生了自由基，自由基的作用对支链淀粉链的破坏程度更高[30]。Sudheesh 等[31] 发现电子束辐照棕榈淀粉之后，其膨胀力随着辐照剂量的增加逐渐降低。

2.9 电子束辐照对大黄米蒸煮特性的影响

电子束辐照对大黄米蒸煮特性的影响见表 5。吸水率代表了大黄米在烹饪过程中吸收水分的能力，未辐照大黄米的吸水率最高（211.37%），经电子束辐照处理后大黄米的吸水率显著降低（P<0.05），12 kGy 电子束辐照处理后的大黄米的吸水率降低至 140.14%。这可能是因为辐照会解聚大黄米中的淀粉分子，导致支链淀粉链断裂，晶体结构破坏，从而使淀粉颗粒的吸水性能下降。同样的结果在 Li 等[25] 的研究中观察到，随着电子束辐照剂量的增加，小米的吸水率呈逐渐下降趋势。

可溶性固形物是指大黄米加热时溶解在水中的物质。电子束辐照处理显著提高了大黄米的可溶性固形物含量（P<0.05）。这种现象可能是因为辐照破坏了大黄米中淀粉的分子结构，使直链淀粉和支链淀粉解聚，形成更易溶于水的小分子片段[32]。此外，电子束辐照导致大黄米的细胞壁结构部分破裂，减少了对可溶性物质的束缚作用，从而促进其在煮制过程中的释放[33]。类似的现象在辐照后的水稻中发现，其可溶性固形物含量随辐照剂量增加呈上升趋势[34]。

2.10 电子束辐照对大黄米质构特性的影响

电子束辐照对大黄米质构特性的影响见表 5。未辐照大黄米的硬度为 5241.87 g，随着电子束辐照剂量的增加，煮后大黄米的硬度呈逐渐下降趋势，12 kGy 辐照后大黄米的硬度降低至 2362.50 g，表明电子束辐照使大黄米煮后变软。电子束辐照降解了大黄米中的淀粉分子，增强了淀粉颗粒的吸水膨胀能力，使糊化过程更充分，从而显著降低煮后米粒的硬度。熟制大黄米的硬度与其咀嚼性密切相关，硬度越大则咀嚼感越强[3]，电子束辐照处理后大黄米的咀嚼性整体变化趋势与硬度一致，在以前的研究中也观察到了类似的现象[35]。此外，电子束辐照处理降低了煮后大黄米的黏聚性，这可能是由于辐照处理破坏了分子间作用力（如分子链断裂）并促进可溶性固形物溶出，进而导致黏聚性下降。辐照后的大黄米由于较高的可溶性固形物含量和较低的硬度、咀嚼性和黏聚性，适合用于制作口感黏稠柔软的粥类食品。

3 结论

本文研究了电子束辐照对大黄米结构、理化特性及蒸煮品质的影响。结果表明，电子束辐照未改变大黄米的晶型，但相对结晶度显著降低，同时增强了短程有序性。经过电子束辐照处理后，大黄米的直链淀粉含量显著降低，破损淀粉含量和粒径显著增加。随着辐照剂量的增加，大黄米的糊化黏度（峰值黏度、谷值黏度、崩解值、最终黏度和回生值）、热力学参数（起始温度、峰值温度、最终温度）和膨胀力显著降低，而溶解度显著增加。此外，电子束辐照处理不仅显著降低了大黄米煮制后的硬度和咀嚼性，还提高了其可溶性固形物含量，使大黄米更适合制作口感黏稠柔软的粥类食品。电子束辐照作为一种有效的杀菌技术，可以杀灭粮食和食品中的害虫和微生物，但其对大黄米储藏品质的影响尚不清楚，后续将继续探究电子束辐照对大黄米储藏品质的影响。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 王洪露. 不同氮肥水平对糜子籽粒蛋白质及淀粉调控效应研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2023. [WANG Honglu. Study on the effects of different nitrogen fertilizer levels on the regulation of protein and starch in proso millet (*Panicum miliaceum* L.)[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.]

[2] DAS S, KHOUND R, SANTRA M, et al. Beyond bird feed: Proso millet for human health and environment[J]. Agriculture, 2019, 9(3): 64.

[3] YUAN Qiuyan, YANG Miao, YUE Xiaofeng, et al. Effects of electron beam irradiation on cooking quality and volatile components of waxy and non-waxy proso millet (*Panicum miliaceum* L.)[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 119: 103997.

[4] 原秋艳, 简磊, 贾明月, 等. 超声波处理对发芽糜子品质及抗氧化活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(13): 25−31. [YUAN Qiuyan, JIAN Lei, JIA Mingyue, et al. Effect of ultrasonic treatment on quality and antioxidant activity of germinated proso millet[J]. Food Research and Development, 2024, 45(13): 25−31.]

[5] 乌日图. 60 份糜子品种（系）农艺性状和营养蒸煮食味品质分析[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学, 2022. [WU Ritu. Analysis of agronomic characters and nutritional cooking and eating quality of 60 common millet cultivars (lines)[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.]

[6] GULATI P, JIA S G, LI A X, et al. *In vitro* pepsin digestibili-

ty of cooked proso millet（*Panicum miliaceum* L.）and related species from around the world[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(27): 7156−7164.
[7] 李馨怡, 范雨婷, 姚洋, 等. 不同类型黄米品种理化特性与加工特性[J]. 食品科学, 2025, 46(20): 66−74. [LI Xinyi, FAN Yuting, YAO Yang, et al. Physicochemical and processing properties of different types and varieties of proso millet[J]. Food Science, 2025, 46(20): 66−74.]
[8] 肖瑜, 杨新标, 林楠, 等. 不同蛋白质对大黄米淀粉老化特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 45−51. [XIAO Yu, YANG Xinbiao, LIN Nan, et al. Effects of adding different proteins on retrogradation properties of proso millet starch[J]. Food Science, 2020, 41(16): 45−51.]
[9] 杨清华. 粳糯糜子品种品质评价与蒸煮食味品质特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020. [YANG Qinghua. Comparison and evaluation of cooking edibility qualities in waxy and non-waxy proso millet[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.]
[10] RAVINDRAN R, JAISWAL A K. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 363−368.
[11] 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 Yuan, LIU Xueting, CHEN Jinding, et al. Research progress of electron beam irradiation technology and its application in food industry[J]. The Food Industry, 2021, 42(7): 257−261.]
[12] PILLAI S D, SHAYANFAR S. Electron beam technology and other irradiation technology applications in the food industry[J]. Topics in Current Chemistry, 2017, 375: 6.
[13] PAN Lihong, XING Jiali, ZHANG Hao, et al. Electron beam irradiation as a tool for rice grain storage and its effects on the physicochemical properties of rice starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 2915−2921.
[14] 赵军轻. 电子束处理对小麦储藏性能及加工品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2017. [ZHAO Junqing. Effect of electron beam treatment on storage character and processing property of wheat[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.]
[15] 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]. 食品与发酵工业, 2019, 45(21): 73−78. [LI Ke, PAN Lihong, LUO Xiaohu, et al. Degradation of zearalenone and deoxynivalenol in corn by electron beam irradiation[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(21): 73−78.]
[16] 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 Xuecong, YANG Xijuan, ZHANG Wengang, 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.]
[17] 杨苗, 林姿娜, 王永伦, 等. 基于电子束辐照处理的粳糯糜子理化特性及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 43−50. [YANG Miao, LIN Zina, WANG Yonglun, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of non-waxy and waxy proso millet（*Panicum miliaceum* L.）subjected to electron beam irradiation[J]. Food Science, 2023, 44(17): 43−50.]
[18] DU Zhihong, LI Yulin, LUO Xiaohu, et al. Effects of electron beam irradiation on the physicochemical properties of quinoa and starch microstructure[J]. Starch-Stärke, 2020, 72(11-12): 1900178.
[19] LUO Haiyu, LIANG Danyang, LIU Qing, et al. Investigation of the role of sodium chloride on wheat starch multi-structure, physicochemical and digestibility properties during X-ray irradiation[J]. Food Chemistry, 2024, 447: 139012.
[20] LEI Xiaoqing, YU Jiangtao, HU Yayun, et al. Comparative investigation of the effects of electron beam and X-ray irradiation on potato starch: Structure and functional properties[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 236: 123909.
[21] WANG Gang, WANG Dan, QING Chuan, et al. Impacts of electron-beam-irradiation on microstructure and physical properties of yam（*Dioscorea opposita* Thunb.）flour[J]. LWT, 2022, 163: 113531.
[22] 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]. 现代食品科技, 2017, 33(2): 142−147. [WEI Huihui, LUO Xiaohu, WANG Li, et al. Effect of electron beam irradiation on the sterilization, quality, and bacterial count of wheat flour[J]. Modern Food Science & Technology, 2017, 33(2): 142−147.]
[23] 张捷. 辐照对面粉特征组分结构与理化特性及面团品质的影响[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2024. [ZHANG Jie. Effects of irradiation on the structure and physicochemical properties of flour components and dough quality[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2024.]
[24] YAN Mengting, SUN Chenyang, YU Jiangtao, et al. The promoting effect of electron beam irradiation on enzymatic saccharification and alcohol fermentation of sorghum meal: Related mechanisms[J]. Journal of Cereal Science, 2024, 116: 103878.
[25] LI Min, HE Shanshan, YANG Sifan, et al. Deoxynivalenol removal and quality evaluation of foxtail millet under electron beam irradiation[J]. Food Control, 2025, 174: 111245.
[26] LUO Xiaohu, LI Yulin, YANG Dan, et al. Effects of electron beam irradiation on storability of brown and milled rice[J]. Journal of Stored Products Research, 2019, 81: 22−30.
[27] XUE Peiyu, ZHAO Yue, WEN Chengrong, et al. Effects of electron beam irradiation on physicochemical properties of corn flour and improvement of the gelatinization inhibition[J]. Food Chemistry, 2017, 233: 467−475.
[28] ZHENG Jiayu, ZHU Weijie, LIU Xinyue, et al. Effects of electron beam irradiation pretreatment on the substitution degree, multiscale structure and physicochemical properties of OSA-esterified rice starch[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103136.
[29] SHEN Huishan, YU Jiangtao, BAI Junqing, et al. A new pregelatinized starch preparing by spray drying and electron beam irradiation of oat starch[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133938.
[30] ONEH A J, GYEBI D K, MINNAAR A. Effect of *γ*-irradiation on some physicochemical and thermal properties of cowpea（*Vigna unguiculata* L. Walp）starch[J]. Food Chemistry, 2006, 95(3): 386−393.
[31] SUDHEESH C, SUNOOJ K V, GEORGE J, et al. Impact of *γ*-irradiation on the physico-chemical, rheological properties and *in vitro* digestibility of kithul（*Caryota urens*）starch; a new source of nonconventional stem starch[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2019, 162: 54−65.
[32] ABU J O, MINNAAR A. Gamma irradiation of cowpea（*Vigna unguiculata* L. Walp）seeds: Effect on colour, cooking quality and pasting characteristics[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2009, 44(12): 2335−2341.
[33] WANG Ruolin, SHEN Heyu, BAI Junqing, et al. Electron beam and X-ray irradiation promote extraction of bioactive compounds from walnut green husk: Structural, physicochemical, and functional properties[J]. Food Bioscience, 2024, 61: 104739.
[34] POLESI L F, da MATTA J M D, SARMENTO S B S, et al. Starch digestibility and physicochemical and cooking properties of irradiated rice grains[J]. Rice Science, 2017, 24(1): 48−55.
[35] DING Chao, CHANG Le, LUO Yao, et al. Influence of cooking and texture attributes of far infrared radiated Japonica rice during storage[J]. Journal of Cereal Science, 2023, 112: 103710.