李敏, 杨思梵, 彭乃卫, 等. 电子束辐照对绿豆沙食用品质及功能特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 254−264. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060258

LI Min, YANG Sifan, PENG Naiwei, et al. Effects of Electron Beam Irradiation on the Edible Quality and Functional Properties of Mung Bean Paste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 254−264. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060258

·工艺技术·

电子束辐照对绿豆沙食用品质及功能特性的影响

李　敏[1,2], 杨思梵[1], 彭乃卫[3], 张艳艳[1,2], 王宏伟[1,2], 申慧珊[1,2], 刘兴丽[1,2], 张　华[1,2,*]

（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.郑州宏源生物工程有限公司, 河南郑州 450001）

摘　要: 本研究旨在探讨电子束辐照（EBI）对绿豆沙品质及功能特性的影响。首先优化绿豆沙提取工艺的关键参数（浸泡时间与温度、料液比和蒸煮时间），随后采用 0~20 kGy 剂量的 EBI 处理绿豆，测定处理后绿豆沙的出沙率、品质指标（基本成分、质构特性、流变特性、持油性、色泽）及功能特性（总黄酮含量、总多酚含量、抗氧化活性）。结果显示，最佳提取条件为 40 ℃ 浸泡 6 h、料液比 1∶6（g∶mL）、蒸煮时间 35 min，此条件下出沙率为 67.57%；EBI 处理后，出沙率呈先稳定后下降的趋势；水分、总淀粉、蛋白质和脂肪含量未发生显著变化，而直链淀粉含量则出现小幅降低；硬度、咀嚼度及储能模量（G'）、损耗模量（G"）均随辐照剂量增加而显著降低，而持油性呈剂量依赖性增加；L^*和 b^*值无显著变化，但当剂量大于 12 kGy 时，a^*值显著上升；此外，总黄酮含量无显著变化，总多酚含量及 DPPH、$ABTS^+$自由基清除能力均呈上升的趋势。本研究为提升绿豆沙加工效率与产品品质提供技术支撑，也为 EBI 技术在豆类加工中的应用奠定了基础。

关键词: 电子束辐照, 绿豆沙, 食用品质, 功能特性, 加工工艺优化
中图分类号: TS213.2　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0254−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060258
本文网刊:

Effects of Electron Beam Irradiation on the Edible Quality and Functional Properties of Mung Bean Paste

LI Min[1,2], YANG Sifan[1], PENG Naiwei[3], ZHANG Yanyan[1,2], WANG Hongwei[1,2], SHEN Huishan[1,2], LIU Xingli[1,2], ZHANG Hua[1,2,*]

（1.College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2.National & Local Joint Engineering Research Center of Cereal-Based Foods (Henan), Zhengzhou 450001, China;
3.Zhengzhou Hongyuan Bioengineering Co., Ltd., Zhengzhou 450001, China）

Abstract: In this study, the effects of electron beam irradiation (EBI) on the edible quality and functional properties of mung bean paste were investigated. Key parameters of the extraction process, including soaking time and temperature, solid-to-liquid ratio, and cooking time, were optimized. Subsequently, the mung beans were treated with EBI at doses ranging from 0 to 20 kGy. The yield, quality attributes (proximate composition, texture, rheological properties, oil-holding capacity, and color parameters), and functional characteristics (total flavonoid content, total phenolic content, and antioxidant activity) of the resulting mung bean paste were measured. The optimal extraction conditions were soaking at 40 ℃ for 6 h with a solid-to-liquid ratio of 1∶6 (g∶mL) and a cooking time of 35 min. Under these conditions, the paste yield reached

收稿日期: 2025−06−20
基金项目: 河南省重点研发项目（231111113200）; 中原科技创新领军人才（254000510024）; 河南省科技攻关项目（262102110086, 242103810090）。
作者简介: 李敏（1989−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品加工与安全控制, E-mail: 2017074@zzuli.edu.cn。
*** 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。

67.57%. After EBI treatment, the yield initially remained stable before decreasing. No significant changes were observed in moisture, total starch, crude protein, and crude fat, while a minor reduction was found in amylose content. However, hardness, chewiness, storage modulus (G'), and loss modulus (G") decreased significantly with increasing irradiation dose, while oil-holding capacity showed a dose-dependent increase. The L^* and b^* values did not significantly change. However, the a^* value was notably increased at doses exceeding 12 kGy. In addition, while total flavonoid content remained unchanged, total polyphenol content and the DPPH and $ABTS^+$ radical scavenging capacities exhibited increasing trends. This study provides technical support to improve the processing efficiency and product quality of mung bean paste, and also lays the foundation for the application of EBI technology in legume processing.

Key words: electron beam irradiation; mung bean paste; edible quality; functional properties; processing technology optimization

绿豆是我国重要的豆类作物，富含蛋白质、膳食纤维、维生素及矿物质，营养价值突出[1]。此外，还含有多酚、黄酮和皂苷等生物活性物质，使其具有抗氧化、降血脂和控血糖等功能特性[2]。经蒸煮、制沙、过筛等工艺制成的绿豆沙，香甜细腻、香气浓郁，广泛用作绿豆糕、绿豆冰沙及馅料等产品的原料，深受消费者喜爱[3]。然而，绿豆种皮致密、组织坚硬导致水渗透性差，蒸煮耗时较长[4]。现行加工需依赖长时间浸泡以软化豆粒结构[5−6]，这不仅显著延长制沙流程的整体耗时、降低日常食用的便利性，还会引起多酚、黄酮等抗氧化物质降解，造成营养与功能成分流失[7]。此外，传统蒸煮或研磨工艺还易使豆沙颗粒粗大、硬度过高、咀嚼感过强，影响口感及消费者的接受度[8]。目前已采用多种加工技术改良绿豆的特性，以提升绿豆沙的加工效率与食用品质。

Kumari 等[9] 研究表明，黑豆和黄豆经 12 h 浸泡后，其总酚含量分别降低 11% 和 6%。Xu 等[10] 也发现，浸泡会使青豌豆、黄豌豆与鹰嘴豆的总多酚下降，降幅分别为 4.9%~11.5%、2.2%~11.6% 及 2.77%~9.0%；而采用常规蒸煮处理时，三者总多酚的降幅显著增大，分别达到 43.9%~47.4%、41.5%~48.1% 和 50.0%~55.7%。罗佳燕等[11] 系统比较了不同蒸煮方式对预浸泡红豆的影响，结果显示 12 h 浸泡会导致红豆中黄酮和总酚的损失率分别达 39.51% 和 38.23%，后续的蒸煮处理（尤其是高压煮制）进一步加剧这些活性成分的流失；不过，高压煮制得到的豆沙硬度与黏度适中、口感细腻，更受消费者欢迎。为缓解上述问题，Sikora 等[2] 采用 $NaHCO_3$ 溶液浸泡绿豆，不仅显著缩短了蒸煮时间，还提高了绿豆沙中的总多酚含量与抗氧化能力，同时增加了抗性淀粉含量、降低了淀粉消化率，但该方法仍需长时间浸泡，难以适应现代快节奏的生活需求。因此，开发新型高效的绿豆加工技术，仍是当前推动豆类产业发展的关键。

电子束辐照（Electron beam irradiation, EBI）是一种新型非热加工技术，其原理是利用高能电子加速器产生的电子束射线对物料进行辐照处理，使电子束流与物质之间发生一系列物理、化学和生物反应，最终达到物料改性的目的[12]。该技术主要应用于灭虫、杀菌保鲜、抑制发芽、品种改良等领域[13−14]，与其他技术相比，具有穿透力强、无残留、安全性高、操作简单、耗能较低等优势[15]。近年来，EBI 在改变食品的功能特性和提升食品品质方面受到广泛关注。陈雪从等[16] 研究发现，经 EBI 处理后的青稞米，其基本营养成分含量与氨基酸组成无显著变化，但糊化特性降低，弹性模量和储能模量升高，而质构和感官品质基本保持不变。徐鹏程等[17] 对留胚米的研究表明，EBI 可抑制脂肪酶活性，显著延长保质期。低剂量辐照对留胚米的理化指标和食用品质影响较小；而高剂量处理则会增加爆腰率与碎米率，降低水分含量，提高直链淀粉含量，导致米饭硬度增大，最终使食用品质下降。由此可见，EBI 对不同类型食品品质的影响具有差异性[18]，这可能与其细胞壁结构及主要成分（淀粉/蛋白质比例）的不同有关。绿豆种皮坚硬，细胞壁含有纤维素、半纤维素和果胶，且其蛋白质含量（占总干重 20%~25%）远高于青稞米、留胚米等谷物类食品[19]。这些结构特性和成分上的显著差异，可能导致绿豆在 EBI 下的响应与谷物不同。然而，目前 EBI 对绿豆及其制品（如绿豆沙）食用品质与功能特性的影响尚未见报道。

本研究以绿豆为研究对象，采用 EBI 技术进行处理，系统探究不同辐照剂量对其制品——绿豆沙的出沙率、食用品质及功能特性的影响，以期为 EBI 技术应用于改良绿豆沙品质提供理论依据，进而推动豆类产业的健康发展。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

绿豆（品种‘明光’，2024 年秋季收获；水分含量 10.38%，总淀粉含量 51.15%，直链淀粉含量 23.45%，蛋白质含量 9.39%）　福建省辉业食品集团有限公司；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical, DPPH）　西格玛奥德里奇（上海）贸易有限公司；2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸（2,2-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸, ABTS）　上海麦克林生化有限公司；马铃薯直链淀粉、福林酚（BR）、碘（AR）、碘化钾（AR）、没食子酸（HPLC≥98%）、芦丁（HPLC≥98%）　上海源叶生物科技有限公司；亚甲基蓝、亚甲基蓝指示剂、硝酸铝（AR）、

亚硝酸钠(AR)、硼酸(AR) 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 亚铁氰化钾(AR)、酒石酸钾钠(AR)、硫酸铜(AR)、硫酸钠(AR)、乙酸铅(GR) 天津市科密欧化学试剂有限公司。

TA-XT Plus 质构仪 英国 Stable Micro System 公司; UV-1100 紫外分光光度计 上海美普达仪器有限公司; Discovery 流变仪 美国 TA 公司; XH-T 旋涡混合器 金坛区白塔新宝仪器厂; 3K15 离心机 德国 Sigma 公司; DZKW-4 水浴锅 北京中兴伟业仪器有限公司; DHG-9076A 烘箱 上海精宏实验设备有限公司; WSC-80C 全自动色差计 北京康光光学仪器有限公司; DZ-10 MeV/20 kW 电子直线加速器(能量 10 MeV, 剂量率 3.3 kGy/s) 郑州宏源生物工程有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 绿豆沙的制备 取 50 g 绿豆, 清洗后置于 500 mL 烧杯中, 按料液比 1∶6(g∶mL)加入蒸馏水, 于 40 ℃ 条件下浸泡 6 h。浸泡完成后, 将烧杯置于电炉上蒸煮 35 min。将煮熟的绿豆转移至 40 目筛, 通过手工反复揉搓(揉搓方式为单向, 每操作 30 s 间歇 10 s, 以手心轻柔力度持续揉搓至豆皮脱落)使豆沙充分释出, 期间不断加水直至细沙完全滤入下方容器, 制沙洗沙时间不少于 30 min。样品经 6000 r/min 离心 10 min 后, 去除上清液, 收集管底沉淀物, 经冷冻干燥处理制得绿豆沙。

1.2.2 绿豆沙制备工艺选择 以绿豆吸水率为指标, 分别对浸泡温度(常温、30、40、50、60 ℃), 浸泡时间(1、2、4、6、8、10、12 h), 蒸煮时间(5、15、25、35、45 min), 料液比(1∶4、1∶6、1∶8、1∶10 g∶mL)进行优化。当优化其中一个因素时, 其他因素均设定为最优条件。

1.2.3 绿豆辐照处理 将绿豆装于尺寸为 20 cm×32 cm 的自封袋中(500 g/每袋)进行密封包装, 确保铺平后的厚度≤2 cm。然后送至郑州宏源生物工程有限公司采用电子直线加速器对绿豆进行辐照处理, 辐照剂量分别为 0、3、6、9、12、15、20 kGy(剂量选择范围参考同类谷物的辐照研究[20]), 每个剂量 3 个平行, 其中 0 kGy 为未辐照对照样品。辐照处理后, 所有样品均置于 4 ℃ 条件下保存备用。

1.2.4 绿豆固形物含量的测定 准确称取40 g 绿豆样品(w_1), 转移至 500 mL烧杯中, 加入 200 mL 蒸馏水, 置于电炉上加热, 沸腾后继续煮制 35 min。煮制结束后, 用纱布过滤, 收集绿豆汤, 经冷冻干燥后得到固形物(w_2)。固形物含量按下式计算:

$$可溶性固形物含量(\%) = (w_2/w_1)\times 100$$

1.2.5 绿豆沙基本成分的测定 绿豆沙的水分、粗脂肪、总淀粉、粗蛋白及直链淀粉含量分别依据食品安全国家标准 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》、GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》、GB 5009.9-2023《食品安全国家标准 食品中淀粉的测定》、GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》和 GB/T 7648-1987《水稻、玉米、谷子籽粒直链淀粉测定法》进行测定。

1.2.6 绿豆沙质构特性的测定 使用模具将绿豆沙制成 Φ30 mm×20 mm 的圆柱形, 采用质构仪(P/36 圆柱形探头)对其质构特性进行测定。测定条件如下: 形变量 50%, 测前、测中、测后速度分别为 1.0、5.0 和 5.0 mm/s。

1.2.7 绿豆沙流变特性的测定 参考赵贵婷[21]的方法, 使用 Discovery 流变仪进行测定。具体步骤如下: 称取 1.5 g 绿豆沙, 加入 15 mL 蒸馏水, 配制成浓度为 10%(w/v)的悬浮液。将该悬浮液置于 95 ℃ 水浴锅中加热 15 min, 加热期间每隔 30 s 用玻璃棒手动搅拌一次, 以形成均匀的淀粉凝胶。将凝胶室温冷却 1 min, 并转移至直径 40 mm、间距 2 mm 的平行板上, 随后通过频率扫描测试(频率范围 0.1~10 Hz, 应变 0.1%)获取储能模量(G')和损耗模量(G")随频率的变化曲线。

1.2.8 绿豆沙持油性的测定 参考王玲玉等[22]的方法测定豆沙的持油性。将 0.1 g(m_1)绿豆沙置于已预先称重的离心管(m_2)中, 加入 8 mL 大豆油, 振荡充分混匀, 室温下静置 60 min 后, 于 4000 r/min 条件下离心 20 min; 移去上清液, 使用滤纸条吸净管壁和残留物表面的油后, 记录离心管与残留物总质量 m_3。

$$持油性(g/g) = (m_3-m_2-m_1)/m_1$$

1.2.9 绿豆沙色泽的测定 使用色差仪测定绿豆沙的色泽, 记录三维矩形颜色空间参数 L^*、a^*和 b^*。其中 L^*代表亮度(0=黑, 100=白); a^*代表绿色(−)和红色(+); b^*代表蓝色(−)和黄色(+)。

1.2.10 绿豆沙色泽的感官评价 参考杨益叶等[23]的方法对绿豆沙色泽进行感官评价。各取 30 g 经不同剂量 EBI 处理后的绿豆沙, 由 10 名具有食品相关专业背景及基础感官评价经验的品评人员(7 男 3 女)组成感官评价小组, 对绿豆沙的色泽进行感官评价。评价采用 4 级评分制, 分别为优(16~20)、良(11~15)、中(6~10)、差(1~5)。具体感官评分标准见表 1。

表 1 绿豆沙色泽的感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria for the color of mung bean paste

评价指标	评分细则	感官评分
色泽	有光泽, 色泽亮丽均匀	16~20
	稍有光泽, 颜色偏褐	11~15
	无光泽, 颜色较黯	6~10
	无光泽, 颜色黯淡	1~5

1.2.11 总黄酮、总多酚含量的测定 参考刘仙俊

等[24]的方法测定绿豆沙中总黄酮和总多酚含量。

提取液的制备：称取 1.0 g 绿豆沙，置于 50 mL 离心管中，加入 20 mL 75% 乙醇溶液进行超声处理 20 min（常温，功率 250 W），离心（4000 r/min，10 min）后，收集上清液。往残留物中再次加入同等体积的 75% 乙醇溶液，重复上述超声、离心步骤。最后合并两次获得的上清液，转移至 50 mL 容量瓶中，定容至刻度，混匀备用。

总黄酮含量的测定：取绿豆沙提取液 0.80 mL 置于体积为 10 mL 的具塞比色管中，补加 3.2 mL 蒸馏水。依次加入 0.4 mL $NaNO_2$ 溶液（50 mg/mL），混匀静置 6 min；继续加入 0.4 mL $Al(NO_3)_3$ 溶液（100 mg/mL），混匀后再次静置 6 min；随后加入 1.6 mL NaOH 溶液（4 mg/mL），蒸馏水定容至刻度，混匀静置 15 min。以试剂空白作为参比，于 510 nm 波长下测定溶液的吸光度。以芦丁为标准品配制不同浓度梯度的溶液，通过绘制浓度-吸光度标准曲线得到回归方程 y=1.12x+0.001（R^2=0.9997），进而计算绿豆沙中总黄酮的含量。

总多酚含量的测定：取绿豆沙提取液 0.2 mL 置于体积为 10 mL 的具塞比色管中，加入福林酚试剂 0.5 mL，混合均匀后静置 3 min。随后加入 1.5 mL Na_2CO_3 溶液（质量分数为 10%），用蒸馏水定容至刻度，混匀静置 20 min。以空白试样溶液为参比，于 765 nm 波长下测定溶液的吸光度。以没食子酸标准品建立浓度-吸光度标准曲线，根据回归方程 y=0.2258x+0.0656（R^2=0.9949），计算绿豆沙中总多酚含量。

1.2.12　DPPH 自由基清除能力的测定　取 1 mL 绿豆沙提取液，依次加入 1×10^{-4} mol/L DPPH 溶液 2 mL 和无水乙醇 2 mL，混匀，避光静置 30 min，在波长 517 nm 下测定溶液的吸光度值 A_1。同时设置两组对照组：第一组将 3 mL 无水乙醇与 2 mL DPPH 溶液混合，测定吸光度 A_2；第二组将 4 mL 无水乙醇与 1 mL 绿豆沙提取液混合，测定吸光度值 A_0。DPPH 自由基清除率根据以下公式计算：

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = [(A_2-(A_1-A_0))/A_2]\times100$$

1.2.13　$ABTS^+$自由基清除能力的测定　吸取样品提取液 1 mL，再加入 ABTS 工作液 5 mL，涡旋振荡后室温反应 6 min，于 724 nm 波长下测样品吸光度 A_1；用无水乙醇代替 ABTS 工作液作为空白吸收度 A_0；用无水乙醇代替样品，作为 ABTS 工作液吸光度 A_2。根据下列公式计算提取液对 $ABTS^+$自由基的清除率：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%) = [(A_2-(A_1-A_0))/A_2]\times100$$

1.3　数据处理

实验数据均以“平均值±标准差”表示，每组设置 3 次平行重复。利用 Excel 进行数据整理，通过 IBM SPSS Statistics 27 进行单因素方差和 Duncan 检验，采用 Origin 2021 绘图。组间显著性差异采用不同上标字母标注（P<0.05）。

2　结果与分析

2.1　绿豆沙提取工艺的优化

2.1.1　绿豆浸泡温度和浸泡时间对绿豆吸水率的影响　绿豆结构致密、组织坚硬，蒸煮前需经浸泡处理以软化种皮，适宜的浸泡条件可促进豆粒吸水膨胀，从而加速蒸煮过程中淀粉的糊化，缩短蒸煮时间[25]。若浸泡时间过短，豆粒无法充分吸水膨胀，将不利于蒸煮时淀粉的糊化；而浸泡时间过长，则会导致豆皮色素及豆粒内容物溶出，造成营养成分流失[26]。为此，本研究对绿豆浸泡时间和温度对绿豆吸水率的影响进行了考察。由图 1 可知，当浸泡时间低于 4 h 时，绿豆吸水率随浸泡温度升高而增加，表明高温显著加速了水分扩散进程。然而，当浸泡时间超过 4 h 后，50 ℃ 和 60 ℃ 下的吸水率反而低于低温条件。这可能归因于高温诱导的淀粉糊化与蛋白质变性[27]，导致细胞壁结构致密化，阻碍水分进一步吸收。此外，实验过程中观察到，温度高于 50 ℃ 时，浸泡仅 1 h 溶液颜色即明显加深。这表明过高的温度可能使豆粒酶系失活并破坏组织结构，导致内容物快速溶出，造成营养成分流失。由此可见，浸泡温度不宜超过 50 ℃。

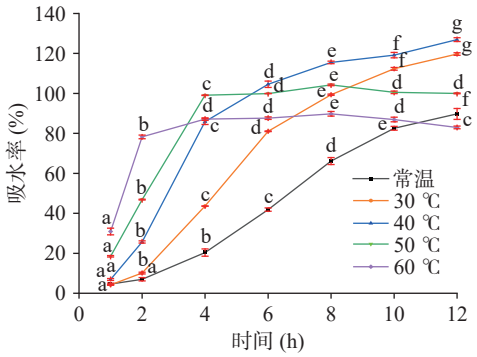


图 1　浸泡温度和浸泡时间对绿豆吸水率的影响

Fig.1　Effects of soaking temperature and time on the water absorption rate of mung beans

注：不同小写字母表示差异显著（P<0.05）；图 2、图 3、图 4、图 6 和图 8 同。

在 40 ℃ 下浸泡时，相同浸泡时间的吸水率均高于 30 ℃ 和常温浸泡。但浸泡时间超过 6 h 后，溶液颜色开始变深，溶出物开始析出。综合考虑能耗、生产效率及营养成分保留等因素，最终确定绿豆浸泡条件为 40 ℃、6 h。在此条件下，绿豆吸水率可达 104.59%，且溶液保持澄清，表明无可溶物溶出。

2.1.2　蒸煮时间对出沙率的影响　由图 2 可知，出沙率随蒸煮时间延长呈先升后降趋势，并于 35 min 时达到峰值（67.57%）。蒸煮时间过短时，绿豆细胞结构保存完整。此时，细胞壁和蛋白质会阻碍水分渗透[28]，致使淀粉未能完全糊化，进而导致出沙率较低。此外，蒸煮时间不足会使细胞颗粒间的果胶溶解不完全，破碎的细胞聚集体无法完全通过筛网，进一

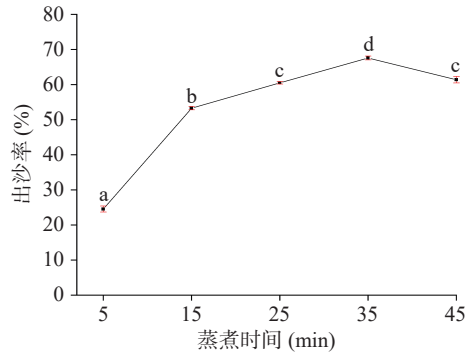


图 2 蒸煮时间对绿豆出沙率的影响

Fig.2 Effect of cooking time on the paste yield of mung beans

步降低出沙率[4]。随着蒸煮时间延长至适宜范围，豆粒淀粉颗粒吸水溶胀、结构松弛，显著提升其 α 化程度与糊化度，从而有利于出沙率的提升。然而，当蒸煮时间过长时，出沙率开始下降。这可能是因为过度加热破坏了细胞壁中的蛋白质结构，使淀粉颗粒从细胞中溶出[29]。因此，选择绿豆的蒸煮时间为 35 min。

2.1.3 料液比对出沙率的影响 由图 3 可知，出沙率随料液比的增加呈现先上升后趋于稳定的趋势，在料液比为 1∶6 时达到峰值(67.57%)。料液比过低时，水分不足导致绿豆淀粉在糊化过程中无法充分吸水膨胀，糊化程度较低[25]。随着料液比增加，水分供应充足，淀粉得以充分糊化。然而，当料液比继续增大时，出沙率不再显著提高并趋于平稳。这可能是由于此时淀粉已基本完全糊化，其形成的凝胶网络会阻碍水分进一步向未糊化淀粉颗粒内部渗透，使得剩余淀粉颗粒的糊化变得困难[30]。而此时蒸煮温度不变，这部分淀粉难以继续糊化，因此出沙率保持稳定。因此，料液比选择 1∶6(g∶mL)。

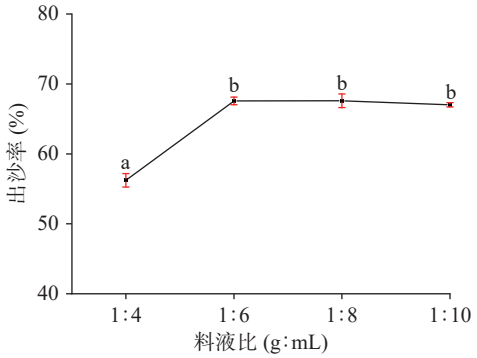


图 3 料液比对绿豆出沙率的影响

Fig.3 Effect of solid-to-liquid ratio on the paste yield of mung beans

综上，绿豆沙最佳制备工艺参数为：浸泡温度 40 ℃，浸泡时间 6 h，蒸煮时间 35 min，料液比为 1∶6(g∶mL)。

2.2 EBI 对绿豆沙出沙率的影响

在绿豆沙最佳制备工艺的基础上，考察了 EBI 对其出沙率的影响(图 4)。由图 4 可看出，在辐照剂量为 3 kGy 时，出沙率达到最大值(66.24%)，与未辐照组相比无显著性差异。类似地，李湘等[31] 的研究指出，低剂量 EBI 对大米的脂肪酸值无显著影响。当剂量继续增至 6 kGy 时，出沙率显著下降至 60.58%。此后，在 9 kGy 和 12 kGy 下，出沙率保持基本稳定的趋势。但当剂量继续增加至 15 kGy 时，出沙率降至最低值(56.92%)，并在之后更高剂量下趋于平衡。综上，出沙率随辐照剂量的增加呈总体下降趋势。经测定，当辐照剂量从 0 增加至 20 kGy 时，绿豆汤中固形物含量由 4.34 g/100 g 升高至 7.66 g/100 g，其中溶出淀粉在固形物中的占比为 7.44% 至 30.66%。由此可见，辐照处理会促使绿豆中的固形物更多地溶出并进入绿豆汤中，进而导致绿豆出沙率降低。同样地，Yuan 等[32] 使用 2、4 和 6 kGy 的辐照剂量处理大黄米，测定其蒸煮特性时发现：固形物含量随剂量增加由54.17 mg/g显著升高至 179.92 mg/g。他们推测，辐照导致大黄米淀粉降解，表现为长链断裂为短链片段，从而促进了淀粉的溶出和溶解度的提高，进而使固形物含量升高。Li 等[20] 采用 EBI 处理糯性和非糯性小米也观察到类似规律：当辐照剂量从 0 kGy 增加至 20 kGy 时，非糯性小米的可溶性固形物含量从 5% 增加至 49.02%，糯性小米则从 16.81% 增加至 53.70%。综合可见，EBI 提高谷物蒸煮体系中固形物的溶出量，是导致绿豆出沙率降低的关键因素。

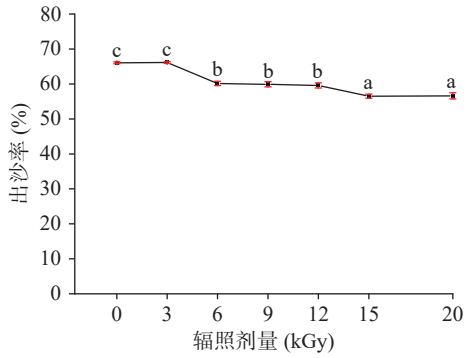


图 4 EBI 对绿豆出沙率的影响

Fig.4 Effect of EBI on the paste yield of mung beans

2.3 EBI 对绿豆沙品质的影响

2.3.1 基本成分 由表 2 可知，未辐照绿豆沙的水分、总淀粉、直链淀粉、蛋白质和脂肪含量分别为 6.01%、60.53%、30.81%、31.62% 和 0.64%。经 EBI 处理后，绿豆沙的水分、总淀粉、蛋白质及脂肪含量均未发生显著变化；而直链淀粉含量呈现总体下降的趋势，但下降幅度较小。Luo 等[33] 采用 EBI 对玉米进行了辐照处理，结果表明辐照显著降低了玉米中的直链淀粉含量：当辐照剂量从 5 kGy 增加至 50 kGy 时，直链淀粉含量从 22.28% 降低至 10.19%。他们推测辐照降解了直链淀粉链，进而导致其与碘结合的能力下降。Li 等[20] 采用 0~20 kGy 剂量的 EBI 处理糯性和非糯性小米，研究发现，与对照组相比，EBI 均未改变两种小米中水分、直链淀粉、蛋白质和粗脂肪

表 2　EBI 对绿豆沙基本成分的影响

Table 2　Effects of EBI on the proximate composition of mung bean paste

辐照剂量（kGy）	水分(%)	总淀粉(%)	直链淀粉(%)	粗蛋白(%)	粗脂肪(%)
0	6.01±0.15^{a}	60.53±0.23^{a}	30.81±0.31^{b}	31.62±0.03^{a}	0.64±0.01^{a}
3	6.00±0.22^{a}	60.34±0.70^{a}	29.94±0.36^{a}	32.02±0.45^{a}	0.66±0.01^{a}
6	6.03±0.11^{a}	60.29±0.65^{a}	29.59±0.30^{a}	32.49±0.44^{a}	0.66±0.03^{a}
9	5.93±0.11^{a}	59.80±0.81^{a}	30.26±0.30^{a}	32.25±0.49^{a}	0.67±0.09^{a}
12	6.06±0.00^{a}	59.75±0.47^{a}	30.10±0.66^{a}	32.36±0.90^{a}	0.66±0.07^{a}
15	6.08±0.18^{a}	59.65±0.59^{a}	29.94±0.72^{a}	32.95±0.35^{a}	0.67±0.02^{a}
20	5.94±0.07^{a}	59.65±0.42^{a}	30.42±0.81^{b}	32.19±0.89^{a}	0.68±0.01^{a}

注：同一列中相同字母表示差异不显著（P>0.05）。

等基本成分的含量，这一结果与本研究结论一致。然而，Xue 等[34] 报道称，玉米粉的水分含量随辐照剂量的增加成比例升高。当剂量从 0 kGy 增加至 5.4 kGy 时，水分含量从 11.95% 增加至 13.12%。他们解释道，经辐照的玉米粉暴露于空气中而非密封储存，导致玉米粉与空气中的水分子间吸附作用增强。在本研究中，绿豆沙制备后及时进行了水分含量的测定，降低了空气中水分的影响。此外，在本实验辐照过程中未观察到绿豆表面温度的显著变化。Reddy 等[35] 研究发现，当辐照剂量从 0 kGy 增加至 15 kGy 时，小米粉中粗蛋白质含量从 6.85 g/100 g 显著增加至 8.51 g/100 g，可归因于辐照将复杂蛋白质分子分解为简单形式，从而提高提取率。Cui 等[36] 对鲜玉米进行了辐照处理后发现，当辐照剂量达到 10 kGy 时，玉米粗脂肪含量较未辐照组增加了 42.68%。这可能是由于辐照破坏了玉米的组织结构，导致结合脂质与淀粉/蛋白质之间的连接断裂，促使结合脂质分离并使游离脂质含量增加[37]。综上，EBI 对不同谷物基本成分的影响具有差异性。这些差异可能与谷物种类、辐照环境和条件等因素有关，导致其敏感性不同。本研究推测绿豆沙对辐照的敏感性较低，主要表现为除直链淀粉含量略有变化外，其他基本成分均未发生显著变化。

2.3.2　质构特性　质构特性参数是评价谷物品质的常用指标。如表 3 所示，不同辐照剂量下绿豆沙的硬度、咀嚼性、弹性、粘聚性和粘附性均发生变化。其中，豆沙的硬度是决定消费者选择的重要因素，也是描述豆沙口感的关键指标，质地柔软的豆沙会更受消费者青睐。与对照组相比，辐照处理的绿豆沙硬度随辐照剂量增加呈剂量依赖性降低。当辐照剂量增至 20 kGy 时，硬度从 9420.79 g 降至 2460.69 g，降幅达 73.88%。与本研究结果一致，Li 等[20] 发现 EBI 处理后糯性小米的硬度显著下降，从 0 kGy 时的 3208.63 g 显著降至 20 kGy 时的 982.58 g，并推测辐照破坏了糯性小米中的支链淀粉，降低了其黏性，进而导致其硬度下降。Tappiban 等[38] 采用 EBI 处理马铃薯淀粉，结果显示，与未辐照组相比（硬度 35.46 gf），2 kGy 处理后硬度降至 22.22 gf。他们推测，这是由于直链淀粉和支链淀粉的广泛降解导致质地变软。此外，已有研究[39] 提出直链淀粉含量与硬度呈正相关，但本研究中 EBI 未明显改变绿豆沙中直链淀粉的含量。因此推测，辐照处理后绿豆沙质构的下降，可能归因于辐照破坏了绿豆中的淀粉结构，削弱了淀粉链间的结合力，导致蒸煮后颗粒质地软化[40]。值得注意的是，蒸煮过程中淀粉及其他可溶性化合物的浸出也会使硬度降低[41]，本文中出沙率降低的结果与之相一致。

咀嚼度是表征固体食物从咀嚼到可吞咽状态所需时间与能量的关键质地特性，与消费者体验和口感直接相关。从理论上讲，较低的咀嚼度值表明该食物更容易咀嚼（消耗更少的能量或咀嚼次数），这对提升食品适口性和消费者满意度至关重要[42]。还有研究指出，煮熟谷物的硬度直接影响其咀嚼度，硬度越大，咀嚼度越大[32]。由表 3 可知，随着辐照剂量的增加，绿豆沙的咀嚼度降低，当辐照剂量从 0 kGy 增加至 20 kGy 时，咀嚼度从 354.70 降低至 18.55，这与硬度的变化趋势一致。结果表明，EBI 可显著降低绿豆沙的咀嚼度，优化其整体口感品质，满足消费者的需求，增强产品的市场竞争力。Yuan 等[32] 研究发现，EBI 可显著降低大黄米的咀嚼度：在 2、4 和 6 kGy 时，咀嚼度分别降低 18.09%、30.17% 和 97.86%，本文研究结果与之一致。

弹性是研究豆沙质构特性的重要指标，表征了食品受压后回弹至初始状态的能力。其测量原理基于样品在两次连续压缩（第一次与第二次）间所表现的恢复程度[42]。从表 3 可以看出，随着辐照剂量的增加，绿豆沙的弹性呈现先降低后趋于稳定的趋势，

表 3　EBI 对绿豆沙质构特性的影响

Table 3　Effects of EBI on the textural properties of mung bean paste

辐照剂量(kGy)	硬度(g)	弹性	粘聚性	咀嚼度	粘附性
0	9420.79±72.28^{f}	0.16±0.00^{d}	0.23±0.00^{d}	354.70±7.20^{f}	−65.63±0.34^{a}
3	7563.79±258.37^{e}	0.13±0.00^{c}	0.19±0.00^{c}	189.74±4.14^{e}	−65.32±0.19^{a}
6	7225.30±102.48^{e}	0.10±0.01^{b}	0.18±0.01^{c}	166.04±18.40^{d}	−65.47±2.07^{a}
9	5119.02±192.85^{d}	0.07±0.02^{a}	0.15±0.01^{b}	111.87±0.82^{c}	−65.72±1.45^{a}
12	4565.55±47.20^{c}	0.07±0.02^{a}	0.11±0.00^{a}	54.45±1.78^{b}	−64.69±0.21^{a}
15	3189.06±138.97^{b}	0.07±0.01^{a}	0.11±0.00^{a}	33.19±0.34^{a}	−65.43±0.46^{a}
20	2460.69±114.12^{a}	0.06±0.01^{a}	0.11±0.01^{a}	18.55±0.35^{a}	−66.33±0.61^{a}

注：同一列中不同字母表示差异显著（P<0.05），表4同。

并在 20 kGy 时达到最低值。同样地, Tappiban 等[38]研究发现, 辐照降低了马铃薯淀粉的弹性。

粘聚性是指食品内部颗粒或分子间相互吸引并紧密结合的能力, 反映了食品内部结构的紧密程度和稳定性[42]。从表 3 可以看出, EBI 处理降低了绿豆沙的粘聚性, 这一现象可能是由于辐照处理通过破坏分子间作用力(如分子链断裂)并促进固形物溶出, 进而导致粘聚性下降。此外, EBI 技术对绿豆沙的粘附性没有显著性影响。

综上所述, EBI 对绿豆沙的质构特性有一定的影响, 能够使豆沙质地变软。

2.3.3 流变特性 通过动态扫描对不同辐照剂量下绿豆沙的流变特性进行了评价。其中, 储能模量 G'与损耗模量 G"分别表征样品的弹性和黏性特性。由图 5 可知, G'>G", 表明绿豆沙体系的弹性大于黏性, 适合固体产品的开发[43]。未辐照和辐照处理的绿豆沙均表现出 G'和 G"随频率增加而增大的趋势。然而, 在相同频率范围内, 辐照样品的 G'和 G"值均显著低于未辐照样品, 且该降低幅度随辐照剂量的增加而更显著。这些结果表明, EBI 处理显著降低了绿豆沙的黏弹性。这可能是因为辐照产生的高能电子导致绿豆淀粉分子发生断链, 致使长链聚合物降解为短链片段, 从而削弱了淀粉凝胶网络的强度[44]。此外, 辐照能量还破坏淀粉分子间及淀粉-蛋白质间的氢键作用力, 使凝胶结构变得松散, 最终导致 G'和 G"值的下降[45]。类似地, Du 等[46] 的研究表明, EBI 会导致藜麦粉的 G'和 G"降低。该发现反映出 EBI 削弱了藜麦粉颗粒间及淀粉间的相互作用, 以及藜麦粉所形成凝胶网络的牢固性。Shen 等[47] 采用 EBI 处理燕麦淀粉时, 也观察到 G'和 G"呈现类似的下降趋势。

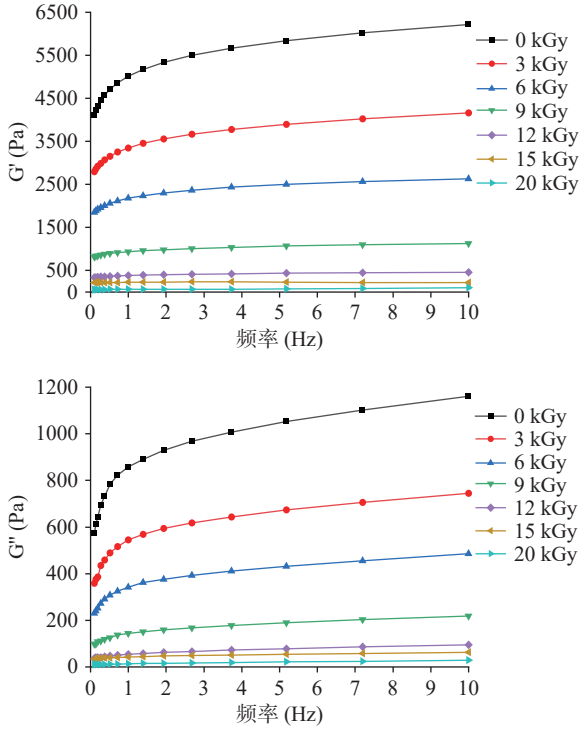


图 5 EBI 对绿豆沙流变学特性的影响

Fig.5 Effect of EBI on the rheological properties of mung bean paste

2.3.4 持油性 持油性是豆沙类食品的重要品质指标, 直接影响产品的口感、保质期及加工适应性。不同辐照剂量下绿豆沙的持油性如图 6 所示。由图 6 可知, 绿豆沙的持油性随辐照剂量的增加呈上升趋势: 当辐照剂量从 0 kGy 增加至 20 kGy 时, 持油性从 1.5% 提升至 2.5%。这一变化意味着绿豆沙在加工或储存过程中对油脂的保留能力增强, 不仅能改善绿豆沙的口感, 使其更湿润、细腻, 还能延长货架期并提高营养保留率[22]。这一现象可能是由于 EBI 导致蛋白质构象发生变化, 暴露出原本折叠在内部的疏水基团。表面疏水性的增加使得蛋白质和油滴之间发生更有效的吸附与扩散, 从而增加了蛋白-油相互作用。申慧珊等[48] 报道指出, 辐照可显著提升面筋蛋白的持油性, 且在 15 kGy 剂量下达到最大值(4.33 g/g), 该结论与本研究的结果一致。Yao 等[49] 对大米蛋白的辐照处理研究中, 也观察到持油性呈现类似的变化趋势。

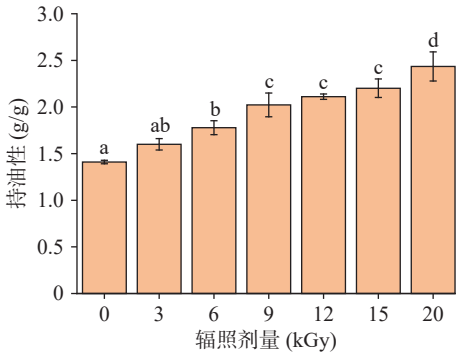


图 6 EBI 对绿豆沙持油性的影响

Fig.6 Effect of EBI on oil-holding properties of mung bean paste

2.3.5 色差 绿豆沙的色泽直接影响其外观品质, 是吸引消费者的关键因素[50]。采用色差仪对绿豆沙的色泽进行了量化分析, 如表 4 所示。相较于对照组, 辐照处理对绿豆沙的 L^*和 b^*值未产生显著影响。当辐照剂量≤12 kGy 时, a^*值基本保持不变; 然而, 当剂量>12 kGy 后, a^*值则呈现显著上升趋势, 表明辐

表 4 EBI 对绿豆沙色差的影响

Table 4 Effects of EBI on the color parameters of mung bean paste

辐照剂量(kGy)	L^*	a^*	b^*
0	76.61±0.40^{ab}	0.71±0.01^{a}	17.99±0.01^{ab}
3	76.33±0.12^{a}	0.72±0.01^{a}	18.04±0.03^{b}
6	76.52±0.30^{ab}	0.74±0.01^{a}	18.08±0.16^{b}
9	77.02±0.70^{ab}	0.73±0.04^{a}	17.46±0.21^{ab}
12	77.04±0.52^{ab}	0.73±0.01^{a}	17.37±0.36^{a}
15	76.78±0.11^{ab}	1.31±0.01^{b}	17.60±0.45^{ab}
20	77.52±0.26^{b}	1.87±0.01^{c}	17.85±0.29^{ab}

照处理增强了绿豆沙的红色色调。原因可能是高剂量辐照(>12 kGy)抑制了多酚氧化酶的活性，阻断了花青素的酶促氧化降解途径，从而更好地保留绿豆种皮中花青素所呈现的天然红色[51]。此外，也有可能是由于辐照过程中淀粉与蛋白质发生降解，其产生的小分子物质发生美拉德反应所致。Luo 等[52] 采用 EBI 处理玉米籽粒时发现，随辐照剂量的增加，a^*和 b^*值显著降低。他们推测，色泽的变化是由于辐照诱导了胡萝卜素、花青素等决定玉米籽粒颜色的重要色素分解所致。Bhat 等[53] 报道称，全麦粉的 L^*和 b^*值随辐照剂量的增加而降低，但变化并不显著。由此可见，EBI 对不同样品色差的影响存在差异，这些差异可能归因于基质种类的不同。

色泽是产品带给消费者的第一印象，是决定其喜好的最直观因素。绿豆沙色泽的感官评价结果如图 7 所示。当辐照剂量<15 kGy 时，绿豆沙的色泽感官评分与对照组相比无显著差异，该结果与色差测定数据一致。当辐照剂量≥15 kGy 时，绿豆沙呈现出有光泽但略微偏褐的色泽，其感官评分有所下降，但仍处于消费者可接受的范围内。

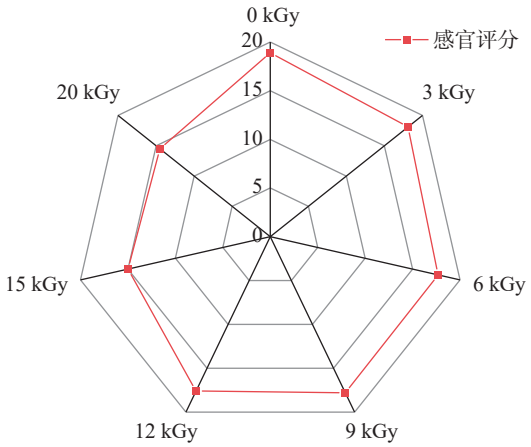


图 7　不同剂量 EBI 处理下绿豆沙的感官评定雷达图

Fig.7　Radar plot for sensory evaluation of mung bean paste under EBI with different doses

2.4　EBI 对绿豆沙功能特性的影响

2.4.1　EBI 对总黄酮和总多酚含量的影响　绿豆富含黄酮和多酚类物质，其中黄酮和多酚通过其抗炎、抗衰老、促进新陈代谢和预防癌症等生物活性，对人体健康产生积极影响[51]。EBI 处理对绿豆沙总黄酮和总多酚含量的影响如表 5 所示。相较于对照组，辐照处理未显著改变绿豆沙的总黄酮含量。这一结果可能与黄酮类物质的结构有关，在杂豆中黄酮多以糖苷形式存在[54]，糖苷结构中的糖基可能通过空间位阻效应降低了其辐照敏感性。

表 5　EBI 对绿豆沙中总黄酮和总多酚含量的影响

Table 5　Effects of EBI on the contents of total flavonoids and total polyphenols of mung bean paste

剂量(kGy)	总黄酮(mg/g)	总多酚(mg/g)
0	0.87±0.64^{a}	2.30±0.09^{a}
3	0.80±0.64^{a}	2.43±0.02^{bc}
6	0.84±0.56^{a}	2.46±0.10^{c}
9	0.86±0.32^{a}	2.53±0.03^{cd}
12	0.82±0.32^{a}	2.64±0.02^{e}
15	0.80±0.85^{a}	2.58±0.01^{de}
20	0.80±0.32^{a}	2.35±0.04^{ab}

注：同一列中不同字母表示差异显著(P<0.05)。

由表 5 可知，随着辐照剂量的增加，绿豆沙中总多酚含量呈现先上升后下降的趋势，并在 12 kGy 时达到最大值。尽管存在这一峰值变化，但与未辐照对照组相比，在实验剂量范围内，总多酚含量整体上仍呈现上升趋势。这一变化可能与辐照破坏植物细胞壁的化学结构，进而促进多酚类物质的溶出有关。Han 等[55] 和邹光铭等[56] 研究发现，EBI 处理可使南瓜皮和核桃青皮的表面结构变得破碎、粗糙，并出现不规则形状、孔洞和裂纹，这为上述机理的解释提供了支撑。此外，杨苗等[57] 的研究也表明，辐照处理有效提高了粳糯糜子的总多酚含量，本文研究结果与之一致。

2.4.2　EBI 对绿豆沙抗氧化活性的影响　植物提取物的抗氧化活性主要通过供氢作用体现。绿豆沙中富含黄酮、多酚等具有供氢能力的物质，因此表现出较高的抗氧化活性。本研究通过测定 EBI 后绿豆沙对 DPPH 和 ABTS$^+$自由基清除能力，以评估其抗氧化活性的变化。

DPPH 在乙醇溶液中呈深紫色，在 517 nm 波长下具有最大吸收峰。当体系中含有抗氧化物质时，DPPH 自由基会被还原为黄色 DPPH-H 分子。由

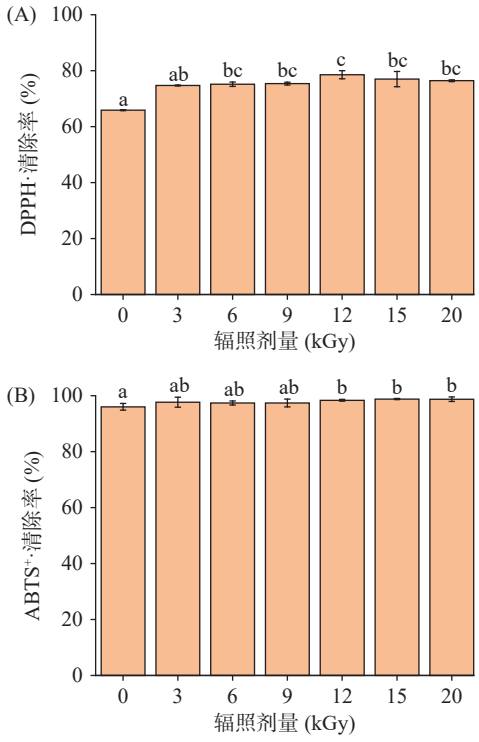


图 8　EBI 对绿豆沙 DPPH(A)和 ABTS$^+$(B)自由基清除率的影响

Fig.8　Effect of EBI on DPPH (A) and ABTS$^+$ (B) radical scavenging rates of mung bean paste

图 8(A)可以看出,辐照组的 DPPH 自由基清除率高于对照组,并在 12 kGy 时达到最大值(78.57%),较对照组增幅达 19.28%。

ABTS 在过硫酸钾的氧化作用下会生成稳定的阳离子自由基 $ABTS^+$,该物质呈现蓝绿色,并且在 724 nm 波长处具有最大吸收峰。当体系中含有抗氧化剂时,$ABTS^+$会被还原为 ABTS,进而导致溶液颜色变浅。抗氧化剂的抗氧化活性越强,其促使这一还原转变的能力就越强。由图 8(B)可知,$ABTS^+$自由基清除率随辐照剂量增加呈先上升后趋于稳定的趋势,且整体上高于对照组。当辐照剂量为 12 kGy 时,清除率达到最大值(98.33%),较对照组提高了 2.80%。

DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除实验结果表明,EBI 有效提升了绿豆沙的抗氧化活性。这一结果可能与辐照处理提高了绿豆沙的总多酚含量有关[58]。Fernandes 等[59] 发现,电子束处理可显著增强食用菌的 DPPH 自由基清除能力;Wang 等[60] 研究也表明,佛手提取物的 DPPH、$ABTS^+$自由基清除能力随辐照剂量增加而升高,本研究结果与之一致。

3 结论

本研究首先对绿豆沙提取工艺的关键工序参数进行优化,最终确定其最佳提取工艺为:浸泡时间 6 h,浸泡温度 40 ℃,料液比 1∶6(g∶mL)、蒸煮时间 35 min。在此基础上,进一步探究了 EBI 对绿豆沙品质及功能特性的影响。实验结果表明,EBI 未显著改变绿豆沙的基本成分(水分、总淀粉、直链淀粉、蛋白质和脂肪含量),但其储能模量 G'、损耗模量 G"、硬度及咀嚼度均显著降低,同时绿豆沙的持油性得到显著提升,且色差也受到一定影响。进一步分析显示,总黄酮含量无显著变化,总多酚含量呈先上升后下降的趋势(但整体仍高于未辐照组);DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除能力显著提升,表明 EBI 有效增强了绿豆沙的抗氧化活性。这项工作表明,EBI 技术在保持绿豆沙基本营养成分的同时,通过显著降低硬度和咀嚼度有效改善了其质构特性(使质地变软),并提升了持油性和抗氧化活性等关键功能特性。综合实验结果,EBI 处理绿豆的剂量不宜超过 3 kGy,此剂量下出沙率稳定,且质构与功能特性改善效果显著。该技术提高了绿豆沙制作的便利性,并有效避免了浸泡过程中黄酮、多酚等功能成分的损失,在绿豆沙制品(如绿豆糕)工业化生产的预处理环节中具有潜在的应用潜力。后续研究将重点分析 EBI 处理对绿豆沙挥发性风味物质、保质期等的影响,并结合感官评价结果进一步优化辐照工艺参数,从而为 EBI 技术在豆类产业中的广泛应用提供理论支撑。

© 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] 靳晓琳, 贾易天, 张小梅, 等. 氯化钙处理对发芽绿豆营养品质和抗氧化能力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(16): 151−158. [JIN X L, JIA Y T, ZHANG X M, et al. Effects of calcium chloride treatment on nutritional components and antioxidant capacity of germinated mung bean[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(16): 151−158.]

[2] SIKORA M, ŚWIECA M, GAWLIK-DZIKI U, et al. Nutritional quality, phenolics, and antioxidant capacity of mung bean paste obtained from seeds soaked in sodium bicarbonate[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 97: 456−461.

[3] 黄英, 王小东, 张波, 等. 绿豆沙品质评价方法及原料适应性研究[J]. 食品科技, 2012, 37(2): 93−97. [HUANG Y, WANG X D, ZHANG B, et al. Quality evaluation methods and material adaptability for mung bean paste[J]. Food Science and Technology, 2012, 37(2): 93−97.]

[4] HUANG P H, CHENG Y T, CHAN Y J, et al. Effect of cooking treatment on the formation mechanism and physicochemical properties of mung bean (*Vigna radiata* L.) paste[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 16: 101054.

[5] KINYANJUI P K, NJOROGE D M, MAKOKHA A O, et al. Hydration properties and texture fingerprints of easy- and hard-to-cook bean varieties[J]. Food Science & Nutrition, 2015, 3(1): 39−47.

[6] FABBRI A D T, CROSBY G A. A review of the impact of preparation and cooking on the nutritional quality of vegetables and legumes[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2016, 3: 2−11.

[7] 刘阳. 超声协同碳酸氢钠处理对绿豆预熟化品质的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2022. [LIU Y. Effect of ultrasound and sodium bicarbonate treatment on the pre-cooking qualities of mung bean[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.]

[8] 曲美霖, 胡俊君, 程哲, 等. 绿豆预熟化工艺及品质研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 227−232. [QU M L, HU J J, CHENG Z, et al. Research progress of mung bean pre-curing technology and quality[J]. Food and Machinery, 2024, 40(2): 227−232.]

[9] KUMARI S, KRISHNAN V, SACHDEV A. Impact of soaking and germination durations on antioxidants and anti-nutrients of black and yellow soybean (*Glycine max*. L) varieties[J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2015, 24(3): 355−358.

[10] XU B J, CHANG S K C. Effect of soaking, boiling, and steaming on total phenolic contentand antioxidant activities of cool season food legumes[J]. Food Chemistry, 2008, 110(1): 1−13.

[11] 罗佳燕, 徐菲菲, 刘飞, 等. 蒸煮方式对红豆全豆豆沙品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2024, 43(6): 11−20. [LUO J Y, XU F F, LIU F, et al. Effect of cooking methods on the quality of whole adzuki bean paste[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(6): 11−20.]

[12] ZHAO W Q, LIANG W, OSPANKULOVA G, et al. Electron beam irradiation modification of ultra-high pressure treated broad bean starch: Improvement of multi-scale structure and functional properties[J]. Food Chemistry, 2023, 427: 136690.

[13] WANG K H, IQRAR I, YU J T, et al. Effect of electron beam irradiation treatment on preservation of freshly fava bean (*Vicia faba* L.) in modified atmosphere packaging[J]. LWT-Food Science and Technology, 2025, 218: 117488.

[14] AKHILA P P, SUNOOJ K V, AALIYA B, et al. Application

of electromagnetic radiations for decontamination of fungi and mycotoxins in food products: A comprehensive review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 114: 399−409.
[15] ZHENG J Y, WANG D D, DUAN H, et al. The effects of E-beam irradiation and microwave combination treatment on the morphology, structure and physicochemical properties of red adzuki bean starch[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 152: 109913.
[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 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.]
[17] 徐鹏程, 王苾玮, 罗小虎, 等. 电子束辐照对留胚米理化性质及食用品质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(4): 41−47. [XU P C, WANG J W, LUO X H, et al. Effect of electron beam irradiation on physicochemical properties and edible qualities of rice with remained germ[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(4): 41−47.]
[18] LI C, ZHANG R R, SOGORE T, et al. Electron beam irradiation in food processing:current applications and strategies for commercial scale implementation[J]. Sustainable Food Technology, 2025, 3(4): 875-893.
[19] 周素梅, 李若凝, 唐健, 等. 绿豆营养功能特性及其在植物基食品开发中的应用[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(2): 16−23,12. [ZHOU S M, LI R N, TANG J, et al. Nutritional components and health functions of mung bean and its application in the development of plant-based food[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(2): 16−23.]
[20] LI M, HE S S, YANG S F, et al. Deoxynivalenol removal and quality evaluation of foxtail millet under electron beam irradiation [J]. Food Control, 2025, 174: 111245.
[21] 赵贵婷. 自然发酵对小麦淀粉凉皮品质影响机制及调控[D]. 郑州: 河南工业大学, 2024. [ZHAO G T. The mechanism and regulation of natural fermentation on the quality of wheat starch liangpi[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2024.]
[22] 王玲玉, 赵雪玲, 王安琪, 等. 油莎豆不溶性膳食纤维理化性质、结构特征和乳化特性研究[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(1): 156−163. [WANG L Y, ZHAO X L, WANG A Q, et al. Study on physicochemical, structural and emulsifying properties of insoluble dietary fiber of *Cyperus esculentus*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(1): 156−163.]
[23] 杨益叶, 周宏胜, 胡花丽, 等. 绿豆沙配方优化研究[J]. 保鲜与加工, 2019, 19(5): 88−92. [YANG Y Y, ZHOU H S, HU H L, et al. Study on the formula optimization of mung bean paste[J]. Storage and Process, 2019, 19(5): 88−92.]
[24] 刘仙俊, 张慧珍, 王潇潇, 等. 5 种豆类中总多酚、总黄酮含量及抗氧化活性比较研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(7): 52−57. [LIU X J, ZHANG H Z, WANG X X, et al. Comparative study on total polyphenols, total flavonoids and antioxidant activity in five kinds of legumes[J]. Food Research and Development, 2020, 41(7): 52−57.]
[25] 成楠, 秦礼康, 解春芝. 红小豆沙加工工艺及其营养功能成分流向研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(1): 187−191. [CHENG N, QIN L K, XIE C Z. Study on processing technology of red adzuki bean paste and flow distribution of nutritional and functional components[J]. Food and Machinery, 2018, 34(1): 187−191.]
[26] 王立东, 张桂芳, 包国凤. α-化快熟红小豆制备工艺研究及质构特性分析[J]. 农产品加工, 2015, 7: 43−46. [WANG L D, ZHANG G F, BAO G F. Preparing technique of gelatinization fast-cooking red bean and texture properties analysis[J]. Farm Products Processing, 2015, 7: 43−46.]
[27] SCHWENKE K D, ZIRWER D, GAST K, et al. Changes of the oligomeric structure of legumin from pea (*Pisum sativum* L.) after succinylation[J]. European Journal of Biochemistry, 1990, 194 (2): 621−627.
[28] 王苗苗. 热加工对芸豆子叶细胞内含淀粉结构及体外消化性的影响机制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019. [WANG M M. Mechanisic study for the structure features and digestion properties of starches in intact pinto bean cotyledon cells influenced by heating process[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.]
[29] HSIEH H M, SWANSON B G, LUMPKIN T A. Starch gelatinization and microstructure of azuki an granules prepared from whole, abraded, or ground beans[J]. LWT-Food Science and Technology, 1999, 32(8): 469−480.
[30] 李永富, 介敏, 蒋全松, 等. 高温流化改良红小豆蒸煮品质及其机理研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(4): 26−32. [LI Y F, JIE M, JIANG Q S, et al. Improving the cooking quality of adzuki beans based on high-temperature air fluidization[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(4): 26−32.]
[31] 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 X, GUO D Q, CHEN Y T, et al. Effect of electron beam irradiation on nutritive and cooking qualities of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 251−257.]
[32] YUAN Q Y, YANG M, YUE X F, 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.
[33] LUO X H, ZHAI Y H, QI L J, et al. Influences of electron beam irradiation on the physical and chemical properties of Zearalenone- and ochratoxin A-contaminated corn and *in vivo* toxicity assessment[J]. Foods, 2020, 9(3): 376.
[34] XUE P Y, ZHAO Y, WEN C R, 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.
[35] REDDY C K, VISWANATH K K. Impact of γ-irradiation on physicochemical characteristics, lipoxygenase activity and antioxidant properties of finger millet[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(5): 2651−2659.
[36] CUI L, WANG X, ZHANG D, et al. Effects of irradiation on the quality of fresh waxy corn[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2024, 216: 111468.
[37] LI X N, WANG B Y, HU W J, et al. Effect of γ-irradiation on structure, physicochemical property and bioactivity of soluble dietary fiber in navel orange peel[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100274.
[38] TAPPIBAN P, ZHAO J J, ZHANG Y, et al. Effects of single and dual modifications through electron beam irradiation and hydroxypropylation on physicochemical properties of potato and corn starches[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 220: 1579−1588.
[39] YU S F, MA Y, SUN D W. Impact of amylose content on starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage[J]. Journal of Cereal Science, 2009, 50(2): 139−144.
[40] POLESI L F, MATTA 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.
[41] 张子涵. 富硒蒸谷米加工工艺及品质变化研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2024. [ZHANG Z H. The processing technology and quality changes of selenium-enriched parb oiled rice[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2024.]
[42] 岳佳豪. 超高压协同抗老化剂处理对薏米饭回生及品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2024. [YUE J H. Study on the effect of ultra-high pressure treatment and anti-aging agents on the rejuvenation and quality of convenient adlay[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2024.]
[43] 欧玲, 李意思, 袁洁瑶, 等. 植物乳杆菌发酵绿豆制备面条的研究[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(10): 67−73. [OU L, LI Y S, YUAN J Y, et al. Preparation of noodles with mung bean fermented by *Lactobacillus plantarum*[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(10): 67−73.]
[44] HE C A, ZHANG R, FAN R, et al. Starch modification by low-dose electron beam irradiation: A comprehensive study between buckwheat starch, potato starch and pea starch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283: 137810.
[45] 瞿佳丽. 加工过程中添加 α-淀粉酶和风味蛋白酶对红小豆沙食用品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [QU J L. Effects of α-amylase and flavourzyme on the edible quality of adzuki bean paste during processing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]
[46] DU Z H, LI Y L, LUO X H, et al. Effects of electron beam irradiation on the physicochemical properties of quinoa and starch microstructure[J]. Starch-Stärke, 2020, 72(11−12): 1900178.
[47] SHEN H S, YU J T, BAI J Q, et al. A new pre-gelatinized starch preparing by spray drying and electron beam irradiation of oat starch[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133938.
[48] 申慧珊, 张捷, 张艳艳, 等. γ 射线辐照对小麦粉面筋蛋白结构及功能特性的影响研究[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(4): 76−83. [SHEN H S, ZHANG J, ZHANG Y Y, et al. effect of γ-irradiation on functional properties and structure of wheat gluten protein[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(4): 76−83.]
[49] YAO G, GUO Y A, CHENG T F, et al. Effect of γ-irradiation on the physicochemical and functional properties of rice protein[J]. Food Science and Technology, 2022, 42: e12422.
[50] 成楠, 秦礼康, 解春芝, 等. 杂粮复合豆沙营养及功能品质评价[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(9): 14−19,27. [CHENG N, QIN L K, XIE C Z, et al. Nutritional and functional evaluation of compound cereal bean paste[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(9): 14−19,27.]
[51] PATRAS A, BRUNTON N P, O'DONNELL C, et al. Effect of thermal processing on anthocyanin stability in foods; mechanisms and kinetics of degradation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(1): 3−11.
[52] LUO X H, QI L J, LIU Y T, et al. Effects of electron beam irradiation on zearalenone and ochratoxin A in naturally contaminated corn and corn quality parameters[J]. Toxins, 2017, 9(3): 84.
[53] BHAT N A, WANI I A, HAMDANI A M, et al. Physicochemical properties of whole wheat flour as affected by gamma irradiation[J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 71: 175−183.
[54] 战川,朱磊,于昕楚. 杂豆中酚类物质的组成、生物活性及其应用研究进展 [J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2023, 35 (6): 59-67. [ZHAN C, ZHU L, YU X C. Research progress on the compositions, bioactivities and applications of phenols in beans[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023, 35(6): 59-67.]
[55] HAN H, LUO Y, BAI J Q, et al. Electron beam irradiation pretreatment for efficient extraction of pectin from spaghetti squash peel: Structural, functional, and biological properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 148: 109451.
[56] 邹光铭, 郭亦佳, 崔林晔, 等. 电子束辐照预处理核桃青皮对其多糖性质的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 165−176. [ZOU G M, GUO Y J, CUI L Y, et al. The effect of electron beam irradiation pretreatment of walnut green husk on the properties of its polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 165−176.]
[57] 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 M, LIN Z N, WANG Y L, 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.]
[58] RODRIGUES F T, KOIKE A C R, Da SILVA P G, et al. Effects of electron beam irradiation on the bioactive components of goji-berry[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2021, 179: 109144.
[59] FERNANDES A, BARREIRA J C M, ANTONIO A L, et al. How does electron beam irradiation dose affect the chemical and antioxidant profiles of wild dried *Amanita* mushrooms[J]. Food Chemistry, 2015, 182: 309−315.
[60] WANG S W, LI Y X, QU Y, et al. Enhancing effects of ^{60}Co irradiation on the extraction and activities of phenolic components in edible *Citri sarcodactylis* Fructus[J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135919.