

电子束辐照对黑木耳粉灭菌效果和品质的影响

王翠坚¹ 罗先群^{2*} 何达崇² 董 玲³ 蒋永强¹ 黄雪星¹ 李发盛² 廖振娟³

(1. 广西科学院生物研究所有限责任公司, 广西 南宁 530012; 2. 广西科学院, 广西 南宁 530012; 3. 百色市广业保鲜技术服务有限公司, 广西 百色 533013)

摘要:【目的】探究电子束辐照对黑木耳(*Auricularia heimuer*, *A. heimuer*)粉灭菌效果和品质的影响, 开发黑木耳粉灭菌加工新方法。【方法】以黑木耳粉为研究对象, 采用 0~10 kGy 剂量的电子束辐照对样品进行灭菌处理, 考察辐照剂量为 2、4、6、8、10 kGy 时对其微生物数量的影响, 并探究辐照剂量为 2、4、6 kGy 时对其主要营养成分、氨基酸营养价值、抗氧化活性以及感官品质的影响。【结果】电子束辐照可以抑制和杀灭黑木耳粉中的微生物, 菌落总数的 D_{10} 值为 1.77 kGy。当辐照剂量为 4 kGy 时, 黑木耳粉的粗多糖、蛋白质、药用氨基酸和必需氨基酸的质量分数均最高, 分别为 14.80%、13.60%、6.34%、4.00%, 且均与对照组有显著差异($P<0.05$); 氨基酸营养价值显著提升($P<0.05$); 抗氧化活性显著增强($P<0.05$); 总糖质量分数(73.4%)和感官品质无显著变化($P>0.05$)。【结论】可采用电子束辐照技术对黑木耳粉进行灭菌处理, 辐照剂量为 4 kGy 时效果最佳, 抗氧化活性最强, 氨基酸营养价值最高, 且不会造成品质下降。

关键词: 黑木耳粉; 电子束辐照; 灭菌; 氨基酸; 抗氧化活性

Effects of Electron Beam Irradiation on Sterilization and Quality of *Auricularia heimuer* Powder

WANG Cuijian¹ LUO Xianqun^{2*} HE Dachong² DONG Ling³ JIANG Yongqiang¹
HUANG Xuexing¹ LI Fasheng² LIAO Zhenjuan³

(1. Institute of Biology Co., Ltd., Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530012, China; 2. Guangxi Academy of Sciences, Nanning 530012, China; 3. Baise Guangye Preservation Technology Service Co., Ltd., Baise 533013, China)

Abstract: [Objective] The aim of the study is to explore the effects of electron beam irradiation on the sterilization and quality of *Auricularia heimuer* (*A. heimuer*) powder and pave a new way for sterilization of the powder. [Method] The *A. heimuer* powder samples were sterilized by electron beam irradiation at the doses within the range of 0~10 kGy. The effects of irradiation at doses of 2, 4, 6, 8, 10 kGy on the microbial count were studied. The effects of irradiation at doses of 2, 4, 6 kGy on the main components, nutritional value regarding amino acids, antioxidant activity, and sensory quality were also investigated. [Result] Electron beam irradiation killed or inhibited the microorganisms in *A. heimuer* powder, and the D_{10} value of the total colony count was 1.77 kGy. When the dose was 4 kGy, the mass fractions of crude polysaccharides (14.80%), protein (13.60%), medicinal amino acids (6.34%), and essential amino acids (4.00%) in *A. heimuer* powder were the highest, and they all had differences from those in the control group ($P<0.05$). Moreover, the *A. heimuer* powder irradiated at 4 kGy showed improvement in the nutritional value regarding amino acids ($P<0.05$), enhancement in the antioxidant activity ($P<0.05$), and no significant changes in the mass fraction of total sugar (73.4%) or sensory quality ($P>0.05$).

基金项目: 广西科技基地和人才专项项目(桂科 AD23023007); 广西食用菌产业科技先锋队项目(桂农科盟 202408-03)。

通信作者: 罗先群(1965—), 男, 学士, 教授级高级工程师, 主要从事生物工程与技术研究。E-mail: 1016024710@qq.com

收稿日期: 2024-05-17 修回日期: 2024-12-27

[Conclusion] Electron beam irradiation could be used for the sterilization of *A. heimuer* powder. The best effect was achieved at an irradiation dose of 4 kGy, under which the processed *A. heimuer* powder had the strongest antioxidant activity and the highest nutritional value regarding amino acids without causing quality decline.

Keywords: *Auricularia heimuer* powder; electron beam irradiation; sterilization; amino acids; antioxidant activity

黑木耳富含蛋白质、氨基酸、多糖、维生素和钙、铁等矿质元素,具有补气养血、润肺止咳、降血压、降血糖及通便等作用^[1-3],是营养丰富、药食同源的优质食用菌。黑木耳原产于中国,是中国人工栽培的第二大菇种,有“国草”之称^[4],深受广大消费者的喜爱,但在采收、加工及贮藏等过程中,黑木耳易发生变质、腐败,因此开发和实施更加绿色、高效的加工保存方法对黑木耳全产业链的发展至关重要。

辐照技术是一种新兴的绿色冷加工灭菌技术,辐照过程中产品升温小,具有节能、环保、高效的优势。由于不需高温灭菌,它能避免传统高温灭菌对食品原有风味、口感以及理化品质的影响,对于密度低、体积小的产品适宜采用辐照灭菌。目前,电子束辐照广泛应用于各类食品、保健品及中药等灭菌贮藏^[5-9]。作者以黑木耳粉为研究对象,综合评价电子束辐照对黑木耳粉微生物数量的杀灭效果及对其营养价值、感官品质等方面的影响,明确适宜的辐照剂量范围,为食用菌产品加工贮藏提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黑木耳:广西食用菌资源开发技术创新中心;葡萄糖、重蒸苯酚、甲基红指示剂、水杨酸、三氯乙酸、酵母浸膏、胰蛋白胨、十二烷基硫酸钠:上海麦克林生化科技股份有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼、硫酸亚铁、半乳糖醛酸、无水乙醚:上海阿拉丁生化科技股份有限公司;总抗氧化能力测试盒(DPPH法)、超氧阴离子清除能力测试盒:苏州梦犀生物医药科技有限公司。

1.2 仪器与设备

紫外-可见分光光度计:LAMBDA35型,美国PE公司;超高速全自动氨基酸分析仪:LA8080型,日立科学仪器(北京)有限公司;营养素自动化分析系统(纤维分析仪):Fibertec 8000型,丹麦福斯集团公司;电子加速器(10 MeV、20 kW):

DZ-10/20型,中广核达胜加速器技术有限公司。

1.3 方法

1.3.1 黑木耳粉样品制备

黑木耳置于50℃烘箱内烘干,粉碎后过60目筛,分装于聚乙烯自封袋,外加自立包装袋,密封包装,每袋130 g。制备好的黑木耳粉样品交由百色市广业保鲜技术服务有限公司,通过电子加速器进行不同剂量的辐照,辐照剂量为2、4、6、8、10 kGy,其中以未辐照样品为对照,每组均设3个重复,辐照后的样品于室温避光保存。

在样品辐照后的第3、8、13、18、23天分别进行微生物数量、主要营养成分、氨基酸组成、抗氧化活性以及感官品质的检测。

1.3.2 微生物数量的测定

对经过0、2、4、6、8、10 kGy辐照处理的样品进行微生物数量测定,分别参照GB 4789.2—2022、GB 4789.3—2016、GB 4789.15—2016的方法,对菌落总数、大肠菌群以及霉菌和酵母菌进行计数。

1.3.3 主要营养成分质量分数的测定

对经过0、2、4、6 kGy辐照处理的样品进行主要营养成分质量分数的测定。分别参照GB 5009.5—2016、GB/T 15672—2009、NY/T 1676—2023、GB/T 5009.10—2003、GB 5009.6—2016的方法,测定样品中蛋白质、总糖、粗多糖、粗纤维、脂肪的质量分数。

1.3.4 氨基酸组成的测定

参照GB/T 5009.124—2016的方法对经过0、2、4、6 kGy辐照处理的样品进行氨基酸组成测定。

1.3.5 氨基酸营养价值评价

参照文献[10-11]的方法对必需氨基酸比值(ratio of essential amino acid, RAA)、氨基酸比值系数(ratio coefficient of amino acid, RC)、氨基酸比值系数分(score of ratio coefficient of amino acid, SRC)进行评价。

1.3.6 抗氧化活性测定

采用可见分光光度法对经0、2、4、6 kGy辐照处理的样品进行抗氧化活性的测定。

1) DPPH 自由基清除率的测定: 用总抗氧化能力测试盒(DPPH 法)并根据其说明书进行测定, 按式(1)计算 DPPH 自由基清除率^[12]。

$$S = \frac{(X_0 - X_j)}{X_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

S ——DPPH 自由基清除率, %;

X_0 ——空白组的 OD 值;

X_j ——测定组的 OD 值。

2) 超氧阴离子自由基清除率的测定: 用超氧阴离子自由基清除能力测试盒并根据其说明书进行测定, 按式(2)计算超氧阴离子自由基清除率。

$$I = \frac{A_0 - (A_j - A_c)}{A_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

I ——超氧阴离子自由基清除率, %;

A_0 ——空白组的 OD 值;

A_j ——测定组的 OD 值;

A_c ——对照组的 OD 值。

1.3.7 感官品质评价

挑选 10 名感官评判员对经过 0、2、4、6 kGy 辐照处理后的样品进行感官评价。根据 GB 7096—2014 的检验方法, 取适量的样品放在光滑洁白的容器里, 让感官评判员对样品的气味、颜色、状态进行评价。将样品置于 100 °C 的开水中搅拌至溶解, 让感官评判员对样品的滋味进行评价。

1.3.8 数据处理

试验数据通过 SPSS 19.0 软件进行统计分析, 比较各处理组间的差异显著性 ($P < 0.05$), 用 Microsoft Excel 2016 制表和绘图。

2 结果与讨论

2.1 不同辐照剂量处理的黑木耳粉微生物数量

电子束辐照技术是通过电子加速器产生的电子束射线照射微生物, 使微生物细胞中的脱氧核糖核酸和细胞膜结构被破坏, 失去正常生理功能^[13]。Egea 等^[14]发现辐照破坏了细胞内 DNA 的双螺旋结构, 导致 DNA 无法复制, 从而引起细胞衰亡。王海宏等^[15]研究发现电子束辐照处理能有效杀灭食源性致病菌。颜伟强等^[16]采用电子束辐照技术能快速杀灭烧卖里的微生物, 延长商品保质期。如表 1 所示, 当辐照剂量为 2 kGy 时, 黑木耳粉的微生物数

量相较于对照组明显下降, 菌落总数下降至 1.5×10^4 CFU/g、霉菌和酵母菌总数 $< 1.0 \times 10^1$ CFU/g、大肠菌群数 < 0.3 MPN/g, 均达到 GB 16740—2014《食品安全国家标准 保健食品》的要求(固态或半固态产品的菌落总数 $\leq 3 \times 10^4$ CFU/g、大肠菌群数 ≤ 0.92 MPN/g、霉菌和酵母总数 ≤ 50 CFU/g)。 D_{10} 值指杀死 90% 微生物所需的辐照剂量, 是确定辐照灭菌剂量的重要参数^[15]。根据表 1 中辐照剂量和对应的菌落总数得到拟合方程 $y = -0.565 4x + 5.199 0$ ($R^2 = 0.997 3$), 得出电子束辐照对黑木耳粉中菌落总数杀菌剂量的 D_{10} 值为 1.77 kGy, 即当辐照剂量为 1.77 kGy 时, 能杀灭黑木耳粉中 90% 的菌落总数。大肠菌群的 D_{10} 值极低, 辐照剂量为 0.03~0.24 kGy 时即可将其灭杀^[17]。因此, 电子束辐照具有较好的灭菌效果, 能有效杀灭黑木耳粉中的微生物。

表 1 不同辐照剂量处理的黑木耳粉微生物数量

Table 1 Microbial counts in *A. heimuer* powder irradiated at different doses

辐照剂量/kGy	菌落总数/ (CFU/g)	霉菌和酵母菌 总数/(CFU/g)	大肠菌群数/ (MPN/g)
0	1.3×10^5	4.5×10^2	9.2
2	1.5×10^4	$< 1.0 \times 10^1$	< 0.3
4	1.0×10^3	$< 1.0 \times 10^1$	< 0.3
6	5.0×10^1	$< 1.0 \times 10^1$	< 0.3
8	5.0×10^0	$< 1.0 \times 10^1$	< 0.3
10	$< 1.0 \times 10^1$	$< 1.0 \times 10^1$	< 0.3

2.2 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的主要营养成分质量分数

总糖、粗多糖、粗纤维、脂肪、蛋白质的质量分数是黑木耳品质的重要指标, 因此对辐照前后黑木耳粉中这 5 种成分的质量分数进行测定, 分析电子束辐照是否会对黑木耳粉的主要营养成分产生影响。

如表 2 所示, 与对照组相比, 经过 2、4、6 kGy 辐照处理的黑木耳粉总糖质量分数均未发生显著变化 ($P > 0.05$)。辐照剂量为 2 kGy 时, 粗多糖质量分数为 12.40%, 与对照组相比无显著差异 ($P > 0.05$); 辐照剂量为 4 kGy 时, 粗多糖质量分数显著增加 ($P < 0.05$), 为 14.80%; 辐照剂量为 6 kGy 时, 粗多糖质量分数下降至 14.50%。电子束辐照对黑木耳粉的脂肪和粗纤维质量分数略有影响。相较于对照组,

经过 2、4、6 kGy 辐照的黑木耳粉的脂肪和粗纤维的质量分数都显著降低($P<0.05$),脂肪质量分数降幅为 10.0%~20.0%,粗纤维质量分数的降幅为 4.2%~6.2%,这与魏会惠等^[18]和 Marçal 等^[9]的研究结果类似。对照组的蛋白质质量分数为 13.20%,经 2、4、6 kGy 辐照的黑木耳粉的蛋白质质量分数分别比对照组降低 1.5%、增加 3.0%、增加 1.5%,均未出现显著下降($P>0.05$),当辐照剂量为 4 kGy 时,蛋白质质量分数最高(13.60%),与对照组相比存在显著差异,这与文春露^[19]采用电子束辐照对山羊奶进行灭菌的蛋白质质量分数结果类似。电子

束辐照主要通过交联、断裂或改变化学结构来影响食品中的蛋白质^[17]。Zhao 等^[20]发现电子束辐照能使核桃蛋白质发生聚集或交联,5 kGy 的电子束辐照不影响其水解物的物理稳定性,且能增强核桃蛋白质的热稳定性。蛋白质的二级结构是决定蛋白质功能和稳定性的关键因素之一^[17]。Jin 等^[21]研究表明 5.40 kGy 的电子束辐照并未破坏鸡蛋蛋白质的二级结构。Wang 等^[22]发现将辐照技术与糖基化修饰方法相结合可明显改善改性蛋白质的功能特性。因此,适合的辐照剂量可维持或提升食品中蛋白质的功能特性。

表 2 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的主要营养成分的质量分数

Table 2 Mass fractions of main nutritional components of *A. heimuer* powder irradiated at different doses

辐照剂量/kGy	总糖质量分数/%	粗多糖质量分数/%	脂肪质量分数/%	粗纤维质量分数/%	蛋白质质量分数/%
0	73.50±1.10 ^{ab}	12.40±0.95 ^b	2.00±0.12 ^a	4.80±0.04 ^a	13.20±0.33 ^b
2	75.10±1.70 ^a	12.40±0.26 ^b	1.80±0.05 ^b	4.50±0.10 ^b	13.00±0.19 ^b
4	73.40±1.42 ^{ab}	14.80±0.46 ^a	1.60±0.08 ^c	4.50±0.08 ^b	13.60±0.17 ^a
6	72.30±1.14 ^b	14.50±0.53 ^a	1.60±0.08 ^c	4.60±0.10 ^b	13.40±0.06 ^{ab}

注:每列不同字母表示显著差异($P<0.05$)。

2.3 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的氨基酸组成和营养评价

食物营养价值的评判标准主要是看食物中的氨基酸组成和质量分数^[23]。如表 3 所示,与对照组相比,辐照组除蛋氨酸和精氨酸以外,其余 14 种氨基酸质量分数均无显著变化($P>0.05$)。当辐照剂量为 6 kGy 时,蛋氨酸质量分数显著增加($P<0.05$),由 0.18% 增加到 0.24%;当辐照剂量为 4 kGy 时,精氨酸质量分数最高,由对照组的 0.67% 提高到 0.72%,两者具有显著差异($P<0.05$)。

电子束辐照还可提高黑木耳粉中必需氨基酸质量分数、非必需氨基酸质量分数、药用氨基酸质量分数和总氨基酸质量分数。如表 4 所示,当辐照剂量为 4 kGy 时,黑木耳粉的总氨基酸质量分数、必需氨基酸质量分数、非必需氨基酸质量分数最高,比对照组分别提高了 4.7%、5.8%、4.1%。药用氨基酸包括蛋氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、酪氨酸、赖氨酸、天冬氨酸、甘氨酸、谷氨酸和精氨酸。4 个辐照剂量处理的黑木耳粉中均检测到这 9 种药用氨基酸,当辐照剂量为 4 kGy 时,这 9 种药用氨基酸质量分数比对照组增加了 5.0%,因此适宜剂量的电

子束辐照可提高黑木耳粉药用氨基酸的质量分数。

食物营养价值的高低取决于食物氨基酸的组成是否接近人体,且是否能被人体消化吸收,两者同时满足则食物营养价值高^[24]。根据 FAO/WHO 的理想模式要求,营养价值高的食品蛋白质中,必需氨基酸在总氨基酸中的占比约 40.0%,必需氨基酸在非必需氨基酸的占比大于 60.0%^[25]。如表 4 所示,对照组的必需氨基酸质量分数占非必需氨基酸质量分数的 61.6%,必需氨基酸质量分数占总氨基酸质量分数的 38.1%,均符合 FAO/WHO 的理想模式要求。经 2、4、6 kGy 辐照后,必需氨基酸质量分数与非必需氨基酸质量分数的比值和必需氨基酸质量分数与总氨基酸质量分数的比值均随着辐照剂量的增加而略有提高,当剂量为 6 kGy 时,必需氨基酸质量分数占非必需氨基酸质量分数的 62.8%,必需氨基酸质量分数占总氨基酸质量分数的 38.6%,这表明 2~6 kGy 的辐照剂量不影响黑木耳粉的品质。

氨基酸比值系数法是通过计算样品中的 RAA、RC 和 SRC 来评价氨基酸营养价值。RC=1 表示食物中氨基酸组成与氨基酸模式一致;RC>1 表示氨基酸相对过剩;RC<1 则表示该氨基酸相对不足;

表3 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的氨基酸质量分数

Table 3 Mass fractions of amino acids in *A. heimuer* powder irradiated at different doses

辐照剂量/kGy	苏氨酸 质量分数/%	缬氨酸 质量分数/%	蛋氨酸 质量分数/%	异亮氨酸 质量分数/%	亮氨酸 质量分数/%	苯丙氨酸 质量分数/%
0	0.68±0.04	0.60±0.02	0.18±0.01	0.38±0.04	0.85±0.02	0.55±0.03
2	0.68±0.03	0.60±0.03	0.20±0.02	0.38±0.02	0.87±0.04	0.56±0.03
4	0.72±0.03	0.62±0.02	0.22±0.02	0.40±0.03	0.90±0.03	0.57±0.03
6	0.68±0.02	0.60±0.02	0.24±0.02*	0.38±0.04	0.86±0.02	0.54±0.03
辐照剂量/kGy	赖氨酸 质量分数/%	天冬氨酸 质量分数/%	丝氨酸 质量分数/%	谷氨酸 质量分数/%	脯氨酸 质量分数/%	甘氨酸 质量分数/%
0	0.54±0.03	1.14±0.03	0.58±0.03	1.14±0.04	0.48±0.04	0.52±0.02
2	0.56±0.02	1.14±0.03	0.58±0.03	1.16±0.11	0.47±0.02	0.56±0.03
4	0.57±0.04	1.16±0.03	0.62±0.03	1.20±0.17	0.48±0.02	0.54±0.02
6	0.56±0.02	1.12±0.03	0.59±0.03	1.18±0.18	0.50±0.03	0.52±0.02
辐照剂量/kGy	丙氨酸 质量分数/%	酪氨酸 质量分数/%	组氨酸 质量分数/%	精氨酸 质量分数/%		
0	0.84±0.02	0.45±0.05	0.32±0.03	0.67±0.02		
2	0.88±0.03	0.46±0.03	0.34±0.03	0.66±0.03		
4	0.88±0.03	0.46±0.06	0.33±0.03	0.72±0.03*		
6	0.84±0.04	0.44±0.03	0.31±0.04	0.65±0.03		

注：“*”表示同种氨基酸质量分数在该剂量下与对照组相比差异显著($P<0.05$)。

表4 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的氨基酸组成

Table 4 Amino acid composition of *A. heimuer* powder irradiated at different doses

辐照剂量/kGy	必需氨基酸质量分数/%	非必需氨基酸质量分数/%	药用氨基酸质量分数/%	总氨基酸质量分数/%
0	3.78±0.06	6.14±0.10	6.04±0.10	9.92±0.16
2	3.85±0.13	6.25±0.07	6.17±0.08	10.10±0.20
4	4.00±0.10*	6.39±0.04*	6.34±0.10*	10.39±0.12*
6	3.86±0.03	6.15±0.07	6.11±0.08	10.01±0.07

注：“*”表示同种氨基酸质量分数在该剂量下与对照组相比差异显著($P<0.05$)。

RC最小的氨基酸则是该食物的第一限制性氨基酸^[24]。由表5可知,在4种辐照剂量处理的黑木耳粉中,缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸以及赖氨酸的RC均接近1,说明黑木耳粉中的蛋白质营养价值较高。2、4、6 kGy辐照剂量处理的黑木耳粉的第一限制性氨基酸(蛋氨酸+胱氨酸)的RC比对照组高,其他RC无明显变化,对照组的SRC为

66.66,经2、4、6 kGy辐照剂量处理的黑木耳粉的SRC均为68.09,比对照组提高了2.1%。因此,电子束辐照能提升黑木耳粉的氨基酸营养价值。李湘等^[26]研究了电子束辐照对大米营养和蒸煮品质的影响,结果表明,辐照对大米的营养品质没有不良影响,且能提高氨基酸含量,与作者的研究结果一致。

表5 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的RC和SRC

Table 5 RC and SRC of *A. heimuer* powder irradiated at different doses

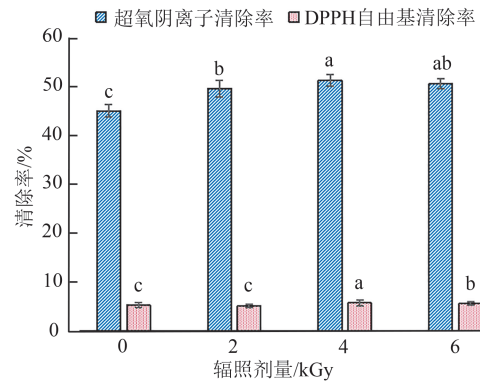
辐照剂量/kGy	RC							SRC
	苏氨酸	缬氨酸	蛋氨酸+胱氨酸	异亮氨酸	亮氨酸	苯丙氨酸+酪氨酸	赖氨酸	
0	1.58	1.12	0.48	0.89	1.13	0.89	0.92	66.66
2	1.56	1.03	0.53	0.87	1.14	0.85	0.94	68.09
4	1.60	1.10	0.56	0.89	1.15	0.85	0.93	68.09
6	1.57	1.11	0.64	0.88	1.14	0.83	0.94	68.09

2.4 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的抗氧化活性

考察样品的 DPPH 自由基清除率和超氧阴离子清除率可以明确黑木耳粉的抗氧化活性。由图 1 可知,不同剂量的电子束辐照对黑木耳粉的抗氧化活性有一定的影响。2、4、6 kGy 辐照后的黑木耳粉的超氧阴离子清除率分别为 49.58%、51.20%、50.59%,与对照组相比均显著提高($P<0.05$)。当辐照剂量为 4 kGy 时,DPPH 自由基清除率与超氧阴离子清除率最高。结果表明,电子束辐照能使黑木耳粉抗氧化活性有所提高,当剂量为 4 kGy 时,抗氧化活性最强。Mami 等^[27]研究了 5 种剂量的电子束辐照对双孢菇的影响,发现电子束辐照可以促进抗氧化成分的产生,从而增加其营养价值。Villarodriguez 等^[28]发现电子束辐照能有效提高抗氧化物含量,且是最有效的电离辐射源。

2.5 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的感官品质

考察黑木耳粉感官品质的主要指标有气味、色泽、滋味和状态。黑木耳的挥发性成分以醇类、酸类、醛类、酯类为主,表现出果香、甜香、烘烤香、蘑菇香等气味^[29-30]。不同辐照剂量处理的黑木耳粉的感官品质评价结果见



同一指标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的抗氧化活性

Fig. 1 Antioxidant activity of *A. heimuer* powder irradiated at different doses

表 6,对照组的黑木耳粉呈现中灰色,滋味甘甜、润滑,具有甜香、酸香、烘烤香等多种香味为一体的特点,没有其他异味,样品外观没有异物、虫蛀以及霉变等现象。经 2、4、6 kGy 电子束辐照后,黑木耳粉的色泽、滋味、状态与对照组相比均无明显差异,仍保留了黑木耳粉原本具有的色泽、气味等感官品质,表明 2~6 kGy 剂量的电子束辐照对黑木耳粉感官品质无明显影响。

表 6 不同辐照剂量处理的黑木耳粉的感官品质

Table 6 Sensory quality of *A. heimuer* powder irradiated at different doses

辐照剂量/kGy	色泽	气味	滋味	状态
0	中灰色	甜香、酸香、烘烤香等特征香气,无异臭	甘甜,润滑,无异味	无可见的外来异物,无霉变,无虫蛀
2	中灰色	甜香、酸香、烘烤香等特征香气,无异臭	甘甜,润滑,无异味	无可见的外来异物,无霉变,无虫蛀
4	中灰色	甜香、酸香、烘烤香等特征香气,无异臭	甘甜,润滑,无异味	无可见的外来异物,无霉变,无虫蛀
6	中灰色	甜香、酸香、烘烤香等特征香气,无异臭	甘甜,润滑,无异味	无可见的外来异物,无霉变,无虫蛀

3 结论

作者检测了不同剂量的电子束辐照对黑木耳粉灭菌效果和品质的影响,结果表明,电子束辐照技术可用于黑木耳粉的灭菌处理。用适宜剂量的电子束辐照不但能达到良好的灭菌效果,还能提高黑木耳粉中主要营养成分质量分数、抗氧化活性以及氨基酸营养价值,对黑木耳粉氨基酸组成和营养价值有明显的改善作用。电子束辐照能改变蛋白质结构,增加蛋白质的热稳定性,维持和改善食物蛋白质的功能特性,有利于保持产品品质。电子束辐照对黑木耳粉

其他成分、微观形态结构以及贮藏期等方面的影响有待进一步研究。

参考文献

- [1] 陈香利,周天天,李庆伟,等. 黑木耳营养功能、产品开发的现状与趋势[J]. 食药菌,2021,29(5):380-387. CHEN X L, ZHOU T T, LI Q W, et al. A review on nutritional function, product development status and trend of *Auricularia auricula* [J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2021, 29(5):380-387. (in Chinese)
- [2] XIANG H, SUN-WATERHOUSE D, CUI C. Hypoglycemic polysaccharides from *Auricularia auricula* and *Auricularia polytricha* inhibit oxidative stress, NF- κ B

- signaling and proinflammatory cytokine production in streptozotocin-induced diabetic mice[J]. Food Science and Human Wellness, 2021, 10(1): 87-93.
- [3] 李博文, 毛雪, 姜威, 等. 黑木耳降血糖的研究进展及趋势分析[J]. 中国农学通报, 2024, 40(2): 143-151.
- LI B W, MAO X, JIANG W, et al. Research progress and trend analysis of hypoglycemia of *Auricularia auricula*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(2): 143-151. (in Chinese)
- [4] 姚方杰, 张友民, 鲁丽鑫, 等. 黑木耳遗传育种研究进展[J]. 菌物研究, 2015, 13(3): 125-128, 122.
- YAO F J, ZHANG Y M, LU L X, et al. Research progress on genetics and breeding of *Auricularia auricula-judae*[J]. Journal of Fungal Research, 2015, 13(3): 125-128, 122. (in Chinese)
- [5] 毛青秀, 徐远芳, 陈渠玲, 等. 辐照方式对南酸枣糕品质及货架期的影响[J]. 食品与机械, 2024, 40(2): 109-116, 138.
- MAO Q X, XU Y F, CHEN Q L, et al. Effects of irradiation methods on quality and shelf life of *Choerospondias axillaris* pastilles[J]. Food & Machinery, 2024, 40(2): 109-116, 138. (in Chinese)
- [6] 何毅, 王丹, 梅星月, 等. 电子束辐照对川麦冬品质及抗氧化活性的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(8): 1816-1824.
- HE Y, WANG D, MEI X Y, et al. Effects of electron-beam irradiation on quality and antioxidant properties of *Ophiopogon japonicus* [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(8): 1816-1824. (in Chinese)
- [7] 雷英杰, 陈尚戊, 敬楹莹, 等. 电子束辐照处理对生鲜猪肉的保鲜作用[J]. 现代食品科技, 2021, 37(10): 136-144.
- LEI Y J, CHEN S W, JING Y Y, et al. Effect of electron beam irradiation on the preservation of fresh pork [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(10): 136-144. (in Chinese)
- [8] ZHONG Y Y, DONG S T, CUI Y, et al. Recent advances in postharvest irradiation preservation technology of edible fungi: a review[J]. Foods, 2022, 12(1): 103.
- [9] MARÇAL S, SOUSA A S, TAOFIQ O, et al. Impact of postharvest preservation methods on nutritional value and bioactive properties of mushrooms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 110: 418-431.
- [10] BANO Z, RAJARATHRAM S. Pleurotus mushroom as a nutritious food[M]. Hong Kong: The Chinese University Press, 1982.
- [11] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Amino-acid content of foods and biological data on proteins [J]. FAO Nutritional Studies, 1970, 26(24): 1-285.
- [12] WANG L, DI T M, PENG J, et al. Comparative metabolomic analysis reveals the involvement of catechins in adaptation mechanism to cold stress in tea plant (*Camellia sinensis* var. *sinensis*) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2022, 201: 104978.
- [13] 杨永佳, 孔芃, 景赛, 等. 食用菌采后品质变化及物理保鲜技术研究进展[J]. 包装工程, 2024, 45(1): 139-147.
- YANG Y J, KONG P, JING S, et al. Progress in postharvest quality change and physical preservation technologies of edible fungi[J]. Packaging Engineering, 2024, 45(1): 139-147. (in Chinese)
- [14] EGEA M I, SÁNCHEZ-BEL P, MARTÍNEZ-MADRID M C, et al. The effect of beta ionization on the antioxidant potential of 'Búlida' apricot and its relationship with quality [J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 46(1): 63-70.
- [15] 王海宏, 郑琦, 颜伟强, 等. 电子束辐照抑制几种常见食源性致病菌生长的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2021, 40(10): 91-97.
- WANG H H, ZHENG Q, YAN W Q, et al. Inhibition of growth of several common food borne pathogens by electron beam irradiation [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2021, 40(10): 91-97. (in Chinese)
- [16] 颜伟强, 岳玲, 李华平, 等. 电子束辐照对烧卖中微生物生长模型及货架期的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2023, 42(11): 74-80.
- YAN W Q, YUE L, LI H P, et al. Study on microbial growth model and shelf-life of Shao-Mai during electron beam irradiation [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2023, 42(11): 74-80. (in Chinese)
- [17] 陈瑞珍, 戚州扬. 关于中药及其制剂辐照灭菌的效果研究[J]. 时珍国医国药, 2007, 18(1): 243-244.
- CHEN R Z, QI Z Y. Study on the effect of irradiation sterilization of traditional Chinese medicine and its preparations [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2007, 18(1): 243-244. (in Chinese)
- [18] 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 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]. Modern Food Science and Technology, 2017, 33(2): 142-147. (in Chinese)
- [19] 文春露. 电子束辐照对山羊奶品质的影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- [20] ZHAO Y, SUN N, LI Y, et al. Effects of electron beam irradiation (EBI) on structure characteristics and thermal properties of walnut protein flour [J]. Food Research

- International, 2017, 100:850-857.
- [21] JIN Y, LIANG R, LIU J B, et al. Effect of structure changes on hydrolysis degree, moisture state, and thermal denaturation of egg white protein treated by electron beam irradiation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 77:134-141.
- [22] WANG Y Y, ZHANG A Q, WANG Y X, et al. Effects of irradiation on the structure and properties of glycosylated soybean proteins [J]. Food & Function, 2020, 11(2): 1635-1646.
- [23] 伍芳芳, 林婉玲, 李来好, 等. 草鱼脆化过程中肌肉品质变化[J]. 南方水产科学, 2014, 10(4):70-77.
WU F F, LIN W L, LI L H, et al. Quality change of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) muscle during crisping process[J]. South China Fisheries Science, 2014, 10(4): 70-77. (in Chinese)
- [24] 朱圣陶, 吴坤. 蛋白质营养价值评价: 氨基酸比值系数法[J]. 营养学报, 1988, 10(2):187-190.
ZHU S T, WU K. Nutritional evaluation of protein: ratio coefficient of amino acid [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 1988, 10(2):187-190. (in Chinese)
- [25] 陈佳捷, 吴文惠, 倪玲, 等. 蚕蛹蛋白和蚕蛹短肽的模拟胃肠道消化特性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(1): 333-338.
CHEN J J, WU W H, NI L, et al. Nutritional characteristics of silkworm pupae protein and peptides after simulated gastric and simulated intestinal digestion *in vitro* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(1):333-338. (in Chinese)
- [26] 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. (in Chinese)
- [27] MAMI Y, PEYVAST G, ZIAIE F, et al. Improvement of shelf life and postharvest quality of white button mushroom by electron beam irradiation [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2013, 38(4):1673-1681.
- [28] VILLARODRIGUEZ J A, PALAFOXCARLOS H, YAHIA E M, et al. Maintaining antioxidant potential of fresh fruits and vegetables after harvest [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(6): 806-822.
- [29] 松桂花, 王怡文, 周志磊, 等. 亚东黑木耳特征香气物质研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(15):306-314.
SONG G H, WANG Y W, ZHOU Z L, et al. Study on characteristic aroma components in *Exidia* sp. [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(15): 306-314. (in Chinese)
- [30] 李翔, 邓杰, 徐宏, 等. 椴木木耳和袋栽木耳挥发性成分及特征风味物质比较分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5):249-252, 269.
LI X, DENG J, XU H, et al. Comparative analysis of volatile components and key flavor compounds of basswood and bagging *Auricularia auricula* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(5):249-252, 269. (in Chinese)

(责任编辑: 闫林红)