^{60}Co-γ 射线和电子束辐照对辣椒干制品颜色的影响

张祺玲 徐远芳 周毅吉 易靖超 郭 峰 张 勇 邓 超 刘 涛 李文革

（湖南省核农学与航天育种研究所 湖南省农业生物辐照工程技术研究中心
生物辐照技术湖南省工程研究中心 长沙 410125）

摘要 本研究通过比较分析色差、非酶褐变值、色价和R/Y值来探讨^{60}Co-γ射线和电子束辐照对辣椒干制品颜色的影响。实验中设定不同剂量（0 kGy、3 kGy、7 kGy、16 kGy）处理和不同贮藏时间（0 d、30 d）。结果显示：在0 d贮藏条件下，经过16 kGy ^{60}Co-γ射线处理的干辣椒样品a^*值减小13%，非酶褐变值增加12%，R/Y值降低16%；而经过7 kGy电子束处理的干辣椒样品a^*值、b^*值和L^*值明显低于经过^{60}Co-γ射线处理的样品。此外，无论是经过^{60}Co-γ射线还是电子束处理后，随着剂量增加，0 d贮藏条件下辣椒粉样品的色差增加，非酶褐变值降低；在16 kGy剂量下，经过^{60}Co-γ射线处理得到的辣椒粉样品ΔE^*高于电子束处理得到的样品，并且非酶褐变值明显低于电子束处理。在贮藏30 d后，经过7 kGy剂量的^{60}Co-γ射线和电子束处理得到的辣椒粉样品ΔE^*显著高于其他剂量组，并且以经过7 kGy ^{60}Co-γ射线处理得到的样品ΔE^*最高。结果提示，与^{60}Co-γ射线相比电子束对于辣椒干制品颜色产生更小程度的影响；辐照对于辣椒粉的颜色影响大于干辣椒。

关键词 ^{60}Co-γ射线辐照，电子束辐照，干辣椒，辣椒粉，颜色变化

中图分类号 TL99

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0107

引用该文：

张祺玲, 徐远芳, 周毅吉, 等. ^{60}Co-γ射线和电子束辐照对辣椒干制品颜色的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2024, **42**(2): 020402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0107.

ZHANG Qiling, XU Yuanfang, ZHOU Yiji, *et al*. Effects of ^{60}Co γ-ray and electron-beam irradiation on the color of dried chili products[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2024, **42**(2): 020402. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2023-0107.

Effects of ^{60}Co γ-ray and electron-beam irradiation on the color of dried chili products

ZHANG Qiling XU Yuanfang ZHOU Yiji YI Jingchao GUO Feng ZHANG Yong
DENG Chao LIU Tao LI Wenge

(Hunan Institute of Nuclear Agricultural Science and Space Mutation Breeding, Hunan Academy of Agricultural Sciences/Hunan Province Engineering Technology Research Center of Agricultural Biological Irradiation, Changsha 410125, China)

ABSTRACT This study was conducted to investigate the effects of ^{60}Co γ-radiation and electron-beam irradiation

基金资助：湖南农业科技创新资金项目(2022CX96、2023CX60、2023CX61)资助
第一作者：张祺玲，女，1986年2月出生，2010 年于湖南农业大学微生物学专业获理学硕士学位，副研究员，主要从事辐射加工应用研究
通信作者：李文革，研究员，E-mail: 641386565@qq.com
收稿日期：初稿 2023-11-29；修回 2023-12-19
Supported by the Agricultural Science and Technology Innovation Project of Hunan Province (2022CX96, 2023CX60, 2023CX61)
First author: ZHANG Qiling (female) was born in February 1986, and obtained her master's degree of science in microbiology from Hunan Agricultural University in 2010, associate professor, mainly engaged in radiation processing application research
Corresponding author: LI Wenge, professor, E-mail: 641386565@qq.com
Received 29 November 2023; accepted 19 December 2023

on the color of dried chili products through comparative analysis of the color difference, non-enzymatic browning index, color value, and R/Y value. The experiment included different doses (0, 3, 7, and 16 kGy) and different storage times (0 and 30 d). The results revealed that when no storage time elapsed (0 d), the *a** value decreased by 13% in the dried chili samples treated with a ^{60}Co γ-ray dose of 16 kGy; the non-enzymatic browning value increased by 12%, and the R/Y value decreased by 16%. Moreover, the *a**, *b**, and *L** values of the samples treated with electron beams at 7 kGy were significantly lower than those treated with ^{60}Co γ-rays. Furthermore, increasing the dosage of either the ^{60}Co γ-rays or electron beam resulted in large color differences and small non-enzymatic browning values for the chili powder samples stored for 0 d. Notably, at a dose of 16 kGy, Δ*E** of the chili powder treated with ^{60}Co γ-rays was higher than that of the powder subjected to electron-beam treatment. By contrast, the non-enzymatic browning value of the ^{60}Co γ-ray-treated sample was significantly lower than that of the electron-beam-treated sample. After 30 d of storage, Δ*E** of the chili powder samples treated with a 7 kGy dose of either ^{60}Co γ-rays or electron beam was significantly higher than that recorded for the other dosage groups. Further, Δ*E** was the highest for the samples treated with a 7 kGy dose of ^{60}Co γ-rays. In conclusion, the impact of electron beams on the color of the dried chili products was less than that of the ^{60}Co γ-rays. Furthermore, the effect of irradiation on the color of the chili powder was stronger than that on the color of the dried chilis.

KEYWORDS ^{60}Co-γ ray irradiation, Electron beam irradiation, Dried peppers, Chili powder, Color change

CLC TL99

辣椒(*Capsicum annuum* L.)是日常生活中常见的药食同源蔬菜，具有驱寒、止痢、杀虫、增强食欲、促进消化等功能[1]。辣椒干制品作为我国部分居民饮食中不可缺少的调味品，是辣椒产业的重要组成部分，在促进乡村经济发展和增加农民收入方面发挥着重要作用[2]。目前，市场上辣椒干制品主要销售的类型有干辣椒和辣椒粉。辣椒在生长、采收、储运及加工过程中，生长环境、采收条件、生产条件、包装材料、机械损伤等因素[3]都会导致辣椒干制品在贮藏期间出现虫害[4]、微生物含量超标[5]和霉变毒素污染[6]等问题。

食品辐照是一种利用电离辐射提高食品安全性的安全食品加工技术[7]，FAO/IAEA/WHO联合专家委员会在1980年就宣布了辐照食品的安全性，目前已有50多个国家批准可进行辐照处理的食品有200多种，已有38个国家对食品辐照进行了商业化应用[8]。研究表明，食品辐照技术是控制香辛料微生物的有效方法[9-10]，目前主要采用辐照技术对香辛料进行灭菌处理[11]。

对辣椒干制品的γ辐照效果研究表明，6 kGy以下处理能将霉菌和曲霉数量下降到无法检测的水平[12]，10 kGy能将菌落总数从初始含菌量从10^6 CFU/g下降5个数量级[13]，但在实际辐照生产过程中，10 kGy的吸收剂量并不能完全有效规避微生物危害，并且随着剂量和贮藏期的增加，辣椒颜色会产生负面影响[14]。此外尚未见电子束辐照对辣椒干制品颜色影响的相关报道。本研究探讨了^{60}Co-γ射线和电子束辐照对干辣椒和辣椒粉颜色的影响，旨在为辣椒干制品的辐照杀菌工艺提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

干辣椒和辣椒粉均由湖南品冠调味品有限公司提供。辣椒品种为印度椒，辣椒粉由干辣椒粉碎过850 μm筛制成。丙酮(分析纯)购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器设备

^{60}Co放射源辐照装置，^{60}Co放射性活度为3.14×10^{16} Bq，湖南省核农学与航天育种研究所提供；10 MeV电子加速器辐照装置，湖南湘华华大生物科技有限公司提供；DS-420分光色差仪，杭州彩谱科技有限公司；BT 224 S电子天平，北京赛多利斯仪器系统有限公司；紫外可见分光光度计，北京莱伯泰科仪器股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品处理

干辣椒和辣椒粉样品置于超净工作台上，用透明PE自封袋分装，每袋100 g。辐照处理后于室

温（25 ℃）中分别贮藏0 d、30 d后检测。每个处理3个重复。

1.3.2 样品辐照

^{60}Co-γ射线辐照在湖南省农业科学院核农学与航天育种研究所湖南辐照中心进行，辐照方式为动态步进。电子束辐照在湖南湘华华大生物科技有限公司进行。辐照过程均进行剂量跟踪（γ射线辐照：3 kGy剂量跟踪为重铬酸银剂量计，7 kGy、16 kGy剂量跟踪为重铬酸钾剂量计；电子束辐照：剂量片（FWT-60），剂量计/片均经中国计量科学研究院国家剂量保证服务NDAS比对标定）。吸收剂量设定为：0 kGy、3 kGy、7 kGy和16 kGy，^{60}Co-γ射线辐照实测剂量分别为：0 kGy、2.6 kGy、6.7 kGy和15.6 kGy，电子束辐照实测剂量分别为：0 kGy、2.6 kGy、6.7 kGy和15.5 kGy。

1.3.3 色差测定

使用高精度色差仪对处理后样品进行L^*、a^*、b^*值测定，计算色差ΔE^*。计算见公式（1）。

$$\Delta E^*=\sqrt{\Delta L^{*2}+\Delta a^{*2}+\Delta b^{*2}} \tag{1}$$

式中：ΔL^*=处理后样品L^*−处理前样品L^*（明度/黑白差异）；Δa^*=处理后样品a^*−处理前样品a^*（红／绿差异）；Δb^*=处理后样品b^*−处理前样品b^*（黄/蓝差异）。

1.3.4 非酶褐变值测定

参照文献[15]的方法，略作修改进行。称取0.3 g去籽剪碎干辣椒或辣椒粉重悬于50 mL蒸馏水，30 ℃ 180 r/min提取水溶性色素2 h，过滤，用分光光度计测定滤液420 nm的吸光度（蒸馏水为空白）。以OD_{420}来反映不同处理间非酶褐变的变化情况。

1.3.5 色价测定

参照国标GB1886.34—2015[16]的方法，略作修改进行。精确称取3 g样品，用丙酮稀释于100 mL容量瓶中，用超声波处理15 min，在室温下避光萃取24 h，用滤纸过滤。再精确吸取10 mL稀溶液稀释到100 mL，用分光光度计测定其460 nm的吸光度（丙酮为空白）。以OD_{460}来代表不同处理间色价的变化。

1.3.6 R/Y值测定

参照文献[17]的方法，略作修改进行。精确称取3 g样品，用丙酮稀释于100 mL容量瓶中，用超声波处理15 min，在室温下避光萃取24 h，用滤纸过滤。再精确吸取10 mL稀溶液稀释到100 mL，用分光光度计测定其472 nm和508 nm的吸光度（丙酮为空白），按公式（2）计算R/Y值。

$$\mathrm{R/Y}=\frac{A_{508}\times 2\,144.0-A_{472}\times 403.3}{A_{472}\times 1\,724.3-A_{508}\times 2\,450.1} \tag{2}$$

式中：A_{508}、A_{472}为样品在508 nm和472 nm处的吸光度；2 450.1为红色素在472 nm处的消光系数；1 724.3为红色素在508 nm处的消光系数；2 144.0为黄色素在472 nm处的消光系数；403.3为黄色素在508 nm处的消光系数。

1.3.7 数据分析

试验数据采用Excel软件整理，利用SPSS19和origin2018进行数据分析及绘图。

2 结果与分析

2.1 ^{60}Co-γ射线和电子束辐照对辣椒干制品色差的影响

颜色是辨别辣椒干制品品质优劣最直观的指标，色差仪是以L^*、a^*、b^*来构建物品颜色坐标，反映物品表面的整体颜色[18]。表1是不同辐照源不同吸收剂量不同贮藏时间下干辣椒样品的Lab值及色差的变化值。由表1可知，与未辐照样品相比，^{60}Co-γ射线16 kGy处理0 d贮藏样品a^*值减小13%（$p<0.05$），^{60}Co-γ射线和电子束辐照对干辣椒其余样品a^*值、b^*值、L^*值影响差异不明显（$p>0.05$）；^{60}Co-γ射线和电子束辐照不同吸收剂量不同贮藏时间下ΔE^*差异不明显（$p>0.05$），这与Balakrishnan[14]的研究结果基本一致；但7 kGy辐照处理0 d贮藏样品中，电子束辐照处理样品的a^*值、b^*值、L^*值明显低于^{60}Co-γ射线辐照处理样品。30 d贮藏样品中，所有样品a^*值、b^*值、L^*值及ΔE^*差异不明显（$p>0.05$）。

表2是不同辐照源不同吸收剂量不同贮藏时间下辣椒粉样品的Lab值及色差的变化值。由表2可知，0 d贮藏样品中，辐照样品a^*值、b^*值、L^*值与未辐照样品相比差异不明显（$p>0.05$），这与Lee[19]的部分研究结果一致；ΔE^*值随着^{60}Co-γ射线吸收剂量而增加，16 kGy ^{60}Co-γ射线辐照处理样ΔE^*值明显高于电子束辐照（$p<0.05$）。30 d贮藏样品中，^{60}Co-γ射线辐照处理a^*值、b^*值、L^*值与未辐照样品相比有部分差异，但没有明显剂量相关；电子束辐照处理a^*值、b^*值、L^*值与未辐照样品相比差异不明显（$p>0.05$）；^{60}Co-γ射线和电子束7 kGy辐照处理样品ΔE^*值显著高于其他剂量处理

样品，且^{60}Co-γ射线7 kGy辐照处理样品Δ*E**值显著高于电子束7 kGy辐照处理样品。

表 1　干辣椒样品*Lab*值及色差值
Table 1　Color difference of dried chili pepper samples

处理方式 Treatment	剂量/kGy Dose	0 d *L**	0 d *a**	0 d *b**	0 d Δ*E**	30 d *L**	30 d *a**	30 d *b**	30 d Δ*E**
	0	32.9±1.2^{abc}	25.08±1.04^{ab}	12.89±1.74^{abc}	–	32.02±1.7^{a}	24.38±3.85^{a}	12.6±2.61^{a}	–
^{60}Co-γ	3	33.23±2.07^{ab}	24.28±1.98^{abc}	13.35±2.28^{ab}	3.11±1.58^{a}	33.2±1.21^{a}	25.22±3.04^{a}	13.8±1.88^{a}	3.49±1.85^{a}
射线	7	33.79±1.06^{a}	25.59±2.36^{a}	13.91±1.8^{a}	2.94±1.32^{a}	32.82±2.32^{a}	23.22±3.01^{a}	12.16±3.5^{a}	4.38±2.34^{a}
^{60}Co-γ ray	16	31.5±1.26^{bc}	21.69±3.09^{c}	11.14±2.15^{bc}	4.21±3.78^{a}	32.28±1.02^{a}	22.14±0.64^{a}	11.08±1.45^{a}	3.12±0.82^{a}
电子束	3	31.56±1.41^{bc}	22.65±1.66^{bc}	11.54±1.05^{abc}	3.37±1.88^{a}	31.98±1.01^{a}	21.82±1.8^{a}	10.7±1.6^{a}	3.59±1.85^{a}
Electron	7	31.17±1.25^{c}	22.33±1.88^{bc}	10.81±0.82^{c}	4.05±1.96^{a}	32.12±1.29^{a}	21.84±2.09^{a}	11.22±1.91^{a}	3.47±2.27^{a}
beams	16	32.88±1^{abc}	24.45±1.23^{abc}	12.88±1.79^{abc}	1.87±1.37^{a}	32.38±1.39^{a}	23.92±2.61^{a}	12.64±2.83^{a}	3.19±2.12^{a}

注：同列不同小写字母表示具有显著差异(p<0.05)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences (p<0.05).

表 2　辣椒粉样品*Lab*值及色差值
Table 2　Color difference of chilli powder samples

处理方式 Treatment	剂量/kGy Dose	0 d *L**	0 d *a**	0 d *b**	0 d Δ*E**	30 d *L**	30 d *a**	30 d *b**	30 d Δ*E**
	0	42.48±0.38^{a}	20.98±0.38^{a}	14.52±0.47^{a}	–	42.64±0.13^{bc}	21.14±0.47^{ab}	14.5±0.39^{a}	–
^{60}Co-γ	3	42.41±0.13^{a}	21.16±0.32^{a}	14.62±0.18^{a}	0.39±0.16^{ab}	42.88±0.08^{a}	21.24±0.05^{a}	14.44±0.05^{a}	0.28±0.05^{c}
射线	7	42.45±0.17^{a}	21.18±0.44^{a}	14.81±0.35^{a}	0.59±0.26^{ab}	42.68±0.11^{abc}	20.48±0.04^{d}	13.94±0.05^{b}	0.87±0.05^{a}
^{60}Co-γ ray	16	42.31±0.16^{a}	20.88±0.56^{a}	14.57±0.54^{a}	0.7±0.26^{a}	42.62±0.11^{c}	20.64±0.05^{cd}	14.24±0.05^{a}	0.57±0.06^{b}
电子束	3	42.62±0.24^{a}	21.25±0.24^{a}	14.66±0.24^{a}	0.41±0.32^{ab}	42.84±0.22^{ab}	21±0.27^{ab}	14.4±0^{a}	0.38±0.17^{c}
electron	7	42.56±0.27^{a}	21.09±0.24^{a}	14.59±0.13^{a}	0.35±0.15^{b}	42.68±0.2^{abc}	20.98±0.38^{abc}	14.26±0.4^{a}	0.59±0.16^{b}
beams	16	42.39±0.30^{a}	21.03±0.09^{a}	14.65±0.21^{a}	0.35±0.14^{b}	42.68±0.08^{abc}	20.84±0.05^{bc}	14.38±0.11^{a}	0.35±0.07^{c}

注：同列不同小写字母表示具有显著差异(p<0.05)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences (p<0.05).

2.2　^{60}Co-γ射线和电子束辐照对辣椒干制品非酶褐变值的影响

非酶褐变是辣椒干制品颜色劣变的主要原因之一[19–20]。图1是^{60}Co-γ射线和电子束辐照不同剂量不同贮藏时间对干辣椒样品褐变值的影响。0 d贮藏样品中，除^{60}Co-γ射线16 kGy辐照处理样品褐变值与未辐照样品比增加12%(p<0.05)，其余样品褐变值与未辐照样品比差异不明显(p>0.05)；30 d贮藏样品中，除电子束7 kGy辐照处理样品褐变值与未辐照样品比显著增加(p<0.05)，其余样品褐变值与未辐照样品比差异不明显(p>0.05)。

图2是^{60}Co-γ射线和电子束辐照不同剂量不同贮藏时间对辣椒粉样品褐变值的影响。0 d贮藏样品中，辐照处理辣椒粉随着剂量增加非酶褐变值降低，其中^{60}Co-γ射线7 kGy和16 kGy辐照处理样品非酶褐变值与未辐照样品比显著降低(p<0.05)；30 d贮藏样品中，^{60}Co-γ射线和电子束辐照处理样品褐变值与未辐照样品比显著降低(p＜0.05)，样品非酶褐变值随着吸收剂量的增加呈下降趋势。

辣椒干制品非酶褐变可能是美拉德反应和酚类物质及抗坏血酸氧化降解反应等多种反应共同作用导致。辐照对辣椒干制品非酶褐变的影响可能由于辐照对这些反应产生了影响，具体机理有待对非酶褐变相关指标(还原糖、游离氨基酸、5-羟甲基糠醛、总酚、L-抗坏血酸等)进行进一步分析。

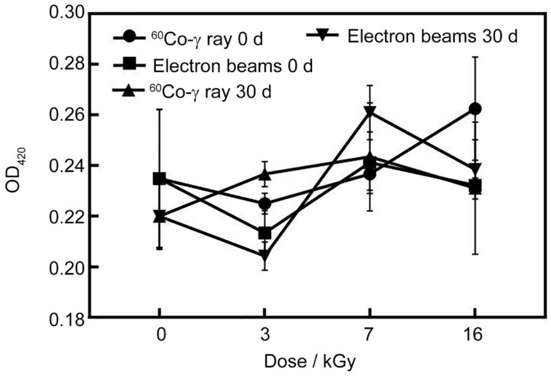

图1　辐照对干辣椒样品非酶褐变值的影响
Fig.1　Effect of irradiation on non-enzymatic browning value of dried chili pepper samples

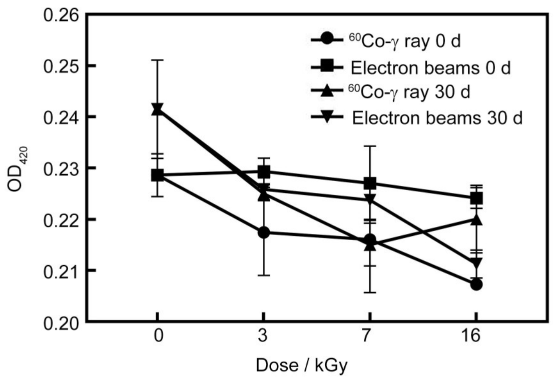

图2 辐照对辣椒粉样品非酶褐变值的影响

Fig.2 Effect of irradiation on non-enzymatic browning value of chilli powder samples

2.3 ^{60}Co-γ射线和电子束辐照对辣椒干制品色价的影响

辣椒红素是评价辣椒色泽品质的关键性指标，色价能够体现辣椒干制品中辣椒红色素的含量[21]。图3是^{60}Co-γ射线和电子束辐照不同剂量不同贮藏时间对干辣椒样品色价的影响。0 d贮藏样品中，辐照样品色价均有所降低，除电子束3 kGy辐照处理样品色价与未辐照样品比显著降低($p<0.05$)，其余样品色价与未辐照样品比差异不明显($p>0.05$)；30 d贮藏样品中，除^{60}Co-γ射线7 kGy和16 kGy辐照处理样品色价与未辐照样品比显著降低($p<0.05$)，其余样品色价与未辐照样品比差异不明显($p>0.05$)。

图4是^{60}Co-γ射线和电子束辐照不同剂量不同贮藏时间对辣椒粉样品色价的影响。0 d贮藏样品中，电子束3 kGy辐照处理样品色价与未辐照样品比显著增加($p<0.05$)，^{60}Co-γ射线16 kGy辐照处理样品色价与未辐照样品比显著降低($p<0.05$)；30 d贮藏样品中，各辐照样品色价随着吸收剂量的增加呈下降趋势，但与未辐照样品比差异不明显($p>0.05$)。

比较色差*a**值和色价的变化，我们可以看出，虽然*a**值代表的是红度，但与辣椒红色素含量变化不完全一致，表明*a**值的变化并不能代表辣椒红素的变化。此外，电子束辐照对辣椒干制品颜色的影响小于^{60}Co-γ射线辐照，有可能是两种辐照方式的作用性质存在差异：^{60}Co-γ射线主要是光子的康普顿效应，不带电荷，而电子束的电离激发携带的负电荷具有一定的还原作用，可使自由基之间的耦合终止反应发生概率增加，对细胞损伤较小，对发色基团的影响也会相对较小；也有可能是电子束比γ射线有更高的剂量率，能产生高穿透速度的氧气从而削弱了氧化损伤效应。

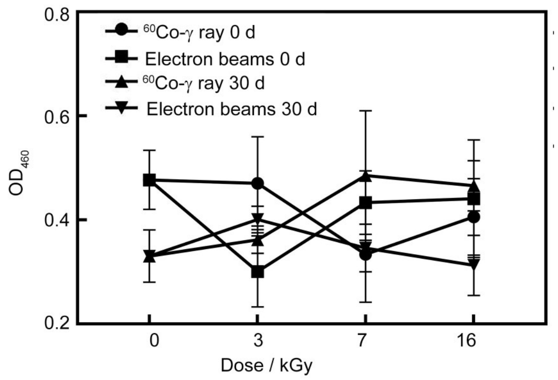

图3 辐照对干辣椒样品色价的影响

Fig.3 Effect of irradiation on color value of dried chili pepper samples

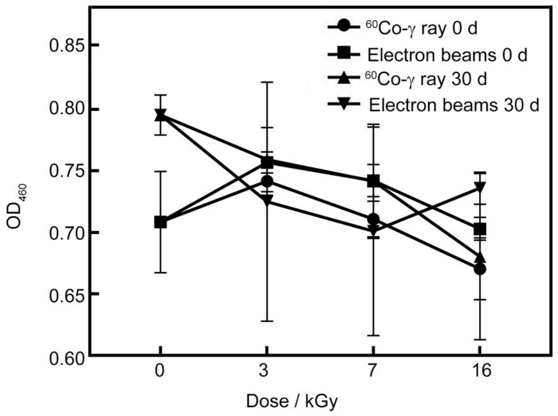

图4 辐照对辣椒粉样品色价的影响

Fig.4 Effect of irradiation on color value of chilli powder samples

2.4 ^{60}Co-γ射线和电子束辐照对辣椒干制品R/Y值的影响

R/Y值能避免皂化造成的色素损耗，直观看出辣椒中红色类胡萝卜素含量和黄色类胡萝卜素含量的比值[17]。图5是^{60}Co-γ射线和电子束辐照不同剂量不同贮藏时间对干辣椒样品R/Y值的影响。0 d贮藏样品中，^{60}Co-γ射线7 kGy、16 kGy辐照处理样品R/Y值与未辐照样品比显著降低($p<0.05$)，电子束辐照处理样品R/Y值与未辐照样品比有所降低但差异不显著($p>0.05$)；30 d贮藏样品中，^{60}Co-γ射线辐照处理样品R/Y值与未辐照样品比有所增加但差异不显著($p>0.05$)，电子束3 kGy、7 kGy辐照处理样品R/Y值与未辐照样品比有所增加($p<0.05$)。

图6是^{60}Co-γ射线和电子束辐照不同剂量不同

贮藏时间对辣椒粉样品R/Y值的影响。0 d贮藏样品中，^{60}Co-γ射线辐照处理样品R/Y值与未辐照样品比有所增加但差异不显著(p >0.05)，电子束辐照处理样品R/Y值与未辐照样品比有所降低但差异不显著(p >0.05)；30 d贮藏样品中，^{60}Co-γ射线3 kGy辐照处理样品R/Y值与未辐照样品增加6%，电子束7 kGy、16 kGy辐照处理样品R/Y值与未辐照样品比有所降低(p <0.05)。由上可知，^{60}Co-γ射线和电子束辐照对辣椒红色素与黄色素的影响存在差异。

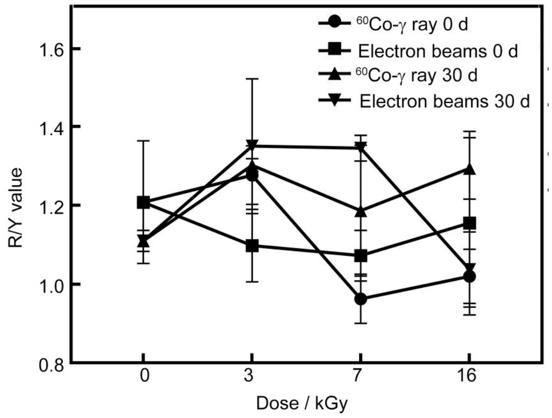

图5 辐照对干辣椒样品R/Y值的影响

Fig.5 Effect of irradiation on R/Y value of dried chili pepper samples

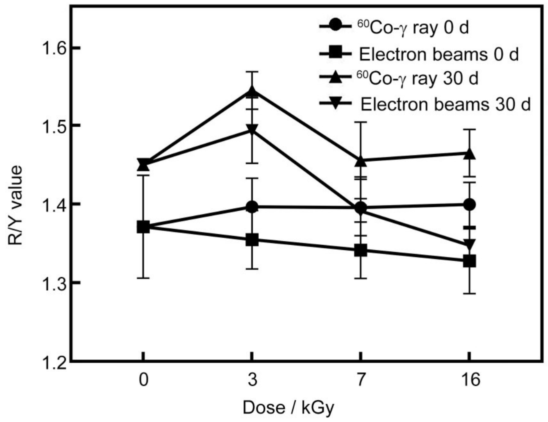

图6 辐照对辣椒粉样品R/Y值的影响

Fig.6 Effect of irradiation on R/Y value of chilli powder samples

3 结论

本研究分析了^{60}Co-γ射线和电子束辐照对辣椒干制品颜色的影响。研究结果表明，^{60}Co-γ射线辐照不会引起干辣椒色差明显差异，16 kGy ^{60}Co-γ射线辐照加速了干辣椒非酶褐变；辣椒粉色差与^{60}Co-γ射线剂量呈正相关，16 kGy ^{60}Co-γ射线辐照降低了辣椒粉非酶褐变、减少了辣椒红色素且红色素降低速率高于黄色素；电子束辐照对辣椒干制品颜色的影响明显低于^{60}Co-γ射线辐照。贮藏一段时间后，辐照处理对干辣椒非酶褐变的影响降低，辣椒粉色差在7 kGy辐照处理下最大且^{60}Co-γ射线辐照影响大于电子束辐照，辐照降低了辣椒粉非酶褐变，电子束辐照对辣椒粉中黄色素的影响大于^{60}Co-γ射线辐照。整体来说，电子束辐照对辣椒干制品的影响小于^{60}Co-γ射线辐照，辐照对辣椒粉颜色的影响大于干辣椒。

作者贡献声明 张祺玲完成了论文实验设计，实验数据的处理和分析，论文的撰写和修改以及提供部分经费；徐远芳完成了色差的测定；周毅吉完成了非酶褐变值的测定；易靖超和刘涛完成了色价和R/Y值的测定；郭峰和邓超完成了辐照前样品的处理；张勇完成了样品的辐照处理；李文革提供本文的研究思路及经费，对文章进行了修改。所有作者均已阅读并认可该论文最终版的所有内容。

参考文献

1 李志坚, 谭欢, 林树花, 等. ^{60}Co-γ射线辐照对辣椒粉杀菌效果及营养品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2022(12): 71-76. DOI: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2022.012.016.

LI Zhijian, TAN Huan, LIN Shuhua, *et al*. Effect of ^{60}Co-γ ray irradiation on sterilization and nutritional quality of chilli powder[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2022(12): 71-76. DOI: 10.16498/j.cnki.hnnykx.2022.012.016.

2 魏文莉. 脉冲强光结合姜黄素技术对干红辣椒杀菌效果及品质研究[D]. 南京: 江苏大学, 2022.

WEI Wenli. Disinfection effect and quality study of combined pulsed light and curcumin technology for dried chilies[D]. Nanjing: Jiangsu University, 2022.

3 李小毛, 张昊, 张楠欣, 等. 辣椒干制品贮藏技术研究进展[J]. 中国果菜, 2023, **43**(8): 16-22. DOI: 10.19590/j.cnki.1008-1038.2023.08.004.

LI Xiaomao, ZHANG Hao, ZHANG Nanxin, *et al*. Research progress on storage technologies of dried pepper products[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, **43**(8): 16-22. DOI: 10.19590/j.cnki.1008-1038.2023.08.004.

4 韩学俭. 干椒贮藏期的害虫及其防治[J]. 当代蔬菜, 2005(1): 36-37.

HAN Xuejian. Pests of dried pepper during storage and their control[J]. Modern Vegetable, 2005(1): 36-37.

5 王俊, 刘敏, 马韵韵, 等. 2014年贵阳市辣椒粉微生物污

染状况分析[J]. 食品研究与开发, 2016, **37**(7): 198-199. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2016.07.048.
WANG Jun, LIU Min, MA Yunyun, *et al*. Analysis of the microorganism contamination of paprika of Guiyang in 2014[J]. Food Research and Development, 2016, **37**(7): 198-199. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6521.2016.07.048.

6 陈露, 尹礼国, 张超, 等. 干制辣椒中黄曲霉毒素B1污染及暴露风险研究进展[J]. 云南化工, 2022, **49**(1): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1004-275X.2022.01.02.
CHEN Lu, YIN Liguo, ZHANG Chao, *et al*. Research progress of aflatoxin B_1 pollution and exposure risk in dried chili[J]. Yunnan Chemical Technology, 2022, **49**(1): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1004-275X.2022.01.02.

7 Ravindran R, Jaiswal A K. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods[J]. Food Chemistry, 2019, **285**: 363-368. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.02.002.

8 汪菡月, 陈谦, 谢珂, 等. ^{60}Co-γ辐照辣椒红油护色工艺的优化[J]. 中国调味品, 2021, **46**(1): 5-10. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9973.2021.01.002.
WANG Hanyue, CHEN Qian, XIE Ke, *et al*. Optimization of color protection process of chili oil irradiated by ^{60}Co- γ irradiation[J]. China Condiment, 2021, **46**(1): 5-10. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-9973.2021.01.002.

9 Vajdi M, Pereira R R. Comparative effects of ethylene oxide, gamma irradiation and microwave treatments on selected spices[J]. Journal of Food Science, 1973, **38**(5): 893-895. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1973.tb02102.x.

10 Duncan S E, Moberg K, Amin K N, *et al*. Processes to preserve spice and herb quality and sensory integrity during pathogen inactivation[J]. Journal of Food Science, 2017, **82**(5): 1208-1215. DOI: 10.1111/1750-3841.13702.

11 Farkas J, Mohácsi-Farkas C. History and future of food irradiation[J]. Trends in Food Science & Technology, 2011, **22**(2/3): 121-126. DOI: 10.1016/j.tifs.2010.04.002.

12 Iqbal Q, Amjad M, Asi M R, *et al.* Mold and aflatoxin reduction by gamma radiation of packed hot peppers and their evolution during storage[J]. Journal of Food Protection, 2012, **75**(8): 1528-1531. DOI: 10.4315/0362-028X.JFP-12-064.

13 Rico C W, Kim G R, Ahn J J, *et al*. The comparative effect of steaming and irradiation on the physicochemical and microbiological properties of dried red pepper (*Capsicum annum* L.)[J]. Food Chemistry, 2010, **119**(3): 1012-1016. DOI: 10.1016/j.foodchem.2009.08.005.

14 Balakrishnan N, Yusop S M, Rahman I A, *et al*. Effect of gamma radiation and storage time on the microbial and physicochemical properties of dried byadgi chili (capsicum annuum) [J]. Agriculture, 2022, **12**(5): 639. DOI: 10.3390/agriculture12050639.

15 Rhim J W, Hong S I. Effect of water activity and temperature on the color change of red pepper (*Capsicum annuum* L.) powder[J]. Food Science and Biotechnology, 2011, **20**(1): 215-222. DOI: 10.1007/s10068-011-0029-2.

16 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂 辣椒红: GB 1886.34—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Food additive Capsanthin: GB1886.34—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015.

17 Hornero-Méndez D, Mínguez-Mosquera M I. Rapid spectrophotometric determination of red and yellow isochromic carotenoid fractions in paprika and red pepper oleoresins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, **49**(8): 3584-3588. DOI: 10.1021/jf010400l.

18 屠大伟, 翁盈秋, 李青青, 等. 火锅常用干辣椒品质及挥发性成分研究[J]. 食品工业科技, 2023, **44**(16): 358-366. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022100262.
TU Dawei, WENG Yingqiu, LI Qingqing, *et al*. Quality and volatile components of dried peppers commonly used in hot pot[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, **44**(16): 358-366. DOI: 10.13386/j. issn1002-0306.2022100262.

19 Lee J H, Sung T H, Lee K T, *et al*. Effect of gamma-irradiation on color, pungency, and volatiles of Korean red pepper powder[J]. Journal of Food Science, 2004, **69**(8): 585-592. DOI: 10.1111/j.1365-2621.2004.tb09904.x.

20 Topuz A, Feng H, Kushad M. The effect of drying method and storage on color characteristics of paprika[J]. LWT - Food Science and Technology, 2009, **42**(10): 1667-1673. DOI: 10.1016/j.lwt.2009.05.014.

21 陈琪. 辣椒红油的制备、光稳定性研究及其在风干肠的应用[D]. 成都: 成都大学, 2023. DOI: 10.27917/d.cnki.gcxdy.2023.000383.
CHEN Qi. Preparation, light stability and application of Chili red oil in air-dried sausage[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023. DOI: 10.27917/d. cnki. gcxdy. 2023. 000383.