

电子束辐照对干枸杞生虫及品质的影响

程竹林¹, 王晓雨¹, 任贵平¹, 倪小慧¹, 杨晶¹, 黄文书^{1,2*}

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

(2. 新疆果品采后科学与技术重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 利用电子束辐照, 研究辐照对干枸杞品质的影响, 确定干枸杞辐照杀虫工艺剂量。采用电子辐照加速器对干枸杞进行辐照处理, 研究不同剂量辐照对干枸杞复水比、生虫率、颜色以及还原糖、类胡萝卜素等理化指标含量的影响。结果表明: 辐照处理后干枸杞复水比显著低于未经辐照的干枸杞。电子束辐照处理可显著抑制干枸杞的生虫率, 且辐照剂量越高对生虫率的抑制效果越显著; 辐照剂量为 4~8 kGy 时, 直至试验结束未曾出现生虫枸杞, 辐照剂量为 2 kGy 试验结束时生虫率为 0.57%, 皆显著低于未经辐照干枸杞的 0.97%。剂量 ≥ 8 kGy 时, 干枸杞 L^* 、 a^* 、 b^* 均显著低于未经辐照的干枸杞。辐照对干枸杞还原糖、枸杞多糖含量显著上升, 对可溶性糖、游离氨基酸无明显影响, 当辐照剂量 ≥ 8 kGy 时干枸杞类胡萝卜素、黄酮含量明显下降。综上所述, 干枸杞的电子束辐照剂量应在 4~8 kGy 范围内。该剂量范围内能有效抑制干枸杞生虫, 且最大程度保持干枸杞原有的食用品质。

关键词: 干枸杞; 电子束辐照; 生虫率; 色泽; 工艺剂量; 理化指标

文章编号: 1673-9078(2023)02-221-228

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.0383

Effects of Electron Beam Irradiation on the Infestation and Quality of Dried Goji (*Lycium barbarum*)

CHENG Zhulin¹, WANG Xiaoyu¹, REN Guiping¹, NI Xiaohui¹, YANG Jing¹, HUANG Wenshu^{1,2*}

(1. College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China) (2. Xinjiang Key Laboratory of Fruit Postharvest Science and Technology, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: The effects of electron beam irradiation on the quality of dried goji were examined, and the dosage of irradiation as an insecticide was determined. Dried goji was irradiated using an electron irradiation accelerator, and the effects of different doses of irradiation on the rehydration ratio, insect infestation rate, color, reducing sugars, carotenoids, and other physicochemical indicators were evaluated. The rehydration ratio of irradiated dried goji was significantly lower than that of non-irradiated dried goji. Electron beam irradiation treatment significantly inhibited the insect infestation of dried goji, and the higher the irradiation dose, the more significant the inhibitory effect on the infestation rate. At the irradiation doses of 4~8 kGy, no insects appeared in goji until the end of the experiment. At the irradiation dose of 2 kGy, the infestation rate was 0.57% at the end of the experiment, which was significantly lower than that in the non-irradiated dried goji (0.97%). At doses of 8 kGy or higher, the L^* , a^* , and b^* values of dried goji were significantly lower than those of non-irradiated dried goji. Irradiation significantly increased the contents of reducing sugars and polysaccharides in dried goji but did not significantly affect soluble sugars and free amino acids. The carotenoid and flavonoid content of dried goji decreased significantly at irradiation doses of 8 kGy or higher. In summary, the electron beam irradiation dose of dried goji should be in the range of 4~8 kGy. Doses in this range can effectively inhibit the infestation of dried goji and allow for maintaining their original edible quality to the greatest possible extent.

Key words: dried goji; electron beam irradiation; infestation rate; color; process dosage; physicochemical indicators

引文格式:

程竹林, 王晓雨, 任贵平, 等. 电子束辐照对干枸杞生虫及品质的影响[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 221-228

CHENG Zhulin, WANG Xiaoyu, REN Guiping, et al. Effects of electron beam irradiation on the infestation and quality of dried Goji (*Lycium barbarum*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 221-228

收稿日期: 2022-04-03

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD1002303)

作者简介: 程竹林 (1997-), 女, 在读硕士, 研究方向: 农产品加工, E-mail: czl15509293665@163.com

通讯作者: 黄文书 (1975-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: xjnd-hws@126.com

枸杞 (*Lycium chinense*) 是一种药食同源的名贵中药材和营养滋补品^[1,2]。传统加工储藏的制品以枸杞干为主, 它色泽鲜红, 粒大饱满、营养丰富, 具有滋补肝肾、益精明目的功效, 常用于治疗虚劳精亏、腰膝酸痛、眩晕耳鸣、内热消渴、血虚萎黄、目昏不明等症^[3-6]。传统加工储藏的制品以枸杞干为主, 干枸杞在储藏、运输、内销外贸过程中, 易受害虫的危害和微生物滋生繁殖使其腐败变质, 难以长期保存, 由此造成严重的经济损失^[7,8]。虽然传统的化学药物熏蒸法具有一定的杀虫灭菌效果, 但所用化学药剂对人、食品和环境均有危害^[9,10]。

食品辐射灭菌法是利用电离辐射与物质相互作用的物理、化学和生物效应, 杀灭食品中的害虫和腐败微生物、致病菌, 从而达到延长保藏期和提高食品品质的目的^[11,12]。其与传统方法相比具有杀菌效果好、不需加温、不需化学添加剂、无残留、不会破坏产品原有品质、不污染环境 and 能耗低等特点^[13-15]。电子束辐照是一种新型的辐照处理办法, 与传统辐照技术相比, 拥有辐照剂量均匀、可控性强、射线利用率高、无射线废源处理问题等众多优点, 有研究表明, 辐照处理会对果蔬贮藏过程中的微生物及害虫生长繁殖产生抑制^[16,17]。枸杞中主要色素为类胡萝卜素, 辐照可能会造成类胡萝卜素的降解, 对枸杞品质产生破坏^[18]。本研究对干枸杞进行不同剂量的辐照处理, 研究电子束辐照对干枸杞生虫及品质的影响。确定干枸杞电子束辐照的工艺剂量, 旨在将电子束辐照技术应用于干枸杞的贮藏提供工艺参数。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

枸杞干果。采摘于新疆维吾尔自治区博乐精河县托里镇的新鲜枸杞, 经挑选出表面无破损的枸杞果, 在 45 °C 的烘箱进行干制, 待水分降至 13% 以下时, 采用热封包装成 (50±1) g 每包的小包。

干枸杞的包装材料为 PET+PE 复合材料, 包装为食品级材质的透明光面真空袋, 包装袋大小为 12×17 cm。

试剂: 分析标准品葡萄糖、绿原酸、亮氨酸、葱酮、硫代巴比妥酸、福林酚 (纯度均>99%), 上海源叶生物科技有限公司; 乙酸锌、亚铁氰化钾、3,5-二硝基水杨酸、氢氧化钠、酒石酸钾钠、亚硫酸钠、碳酸钠、茚三酮 (分析纯), 天津市致远化学试剂有限公司。浓硫酸、苯酚、磷酸、浓盐酸、石油醚、丙酮 (分析纯), 天津市鑫铂化工有限公司。

1.2 仪器设备

DZKW 型电热恒温水浴锅, 北京市永光明医疗仪器厂; T6 新世纪紫外可见分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; 电子万用炉, 北京市永光明医疗仪器有限公司; LE204E/02 电子天平, 上海浦春计量仪器有限公司; 烘箱 NH-A-1808 型高品质电脑色差仪, 深圳市三恩科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品分装与存放

干枸杞在 45 °C 烘箱中干制, 采用水分测定仪测定枸杞水分含量, 待干枸杞水分含量下降至 13% 以下时, 取出, 进行包装, 包装规格为 (50±1) g 的小包。将包装好的干枸杞辐照处理后, 贮藏于室温光照的环境中。实验分三组进行, 每组选用的干枸杞为同一批采摘干制的枸杞, 每组每次取样一包, 进行各项指标的测定, 取样时间间隔为四周 (28 d)。

1.3.2 辐照处理

将包装好的干枸杞, 送往新疆金士康药业有限公司进行电子束辐照处理, 型号为 10 MeV、20 kW 电子辐射加速器, 能量为 10 MeV。初始辐照剂量为 2、4、6、8、10 kGy 静态连续辐照, 辐照中途进行翻转样品, 以确保辐照处理更为均匀, 以未辐照处理的样品为空白对照。

1.3.3 生虫率检测

通过放大镜对 50 g 的干枸杞进行观察, 表面有霉点、虫絮、虫点等的干枸杞皆记为生虫枸杞, 生虫率表示生虫枸杞占总枸杞数的百分比。

1.3.4 干枸杞复水比测定^[19]

称取 6 g 左右的干枸杞, 放置于烧杯中, 加入 80 °C 的热水 100 mL, 放置在温度为 80 °C 的恒温水浴锅中, 水浴 20 min, 取出后用干净的滤纸吸干枸杞表面水分, 阴凉处放置 30 min, 称取复水前后枸杞质量。复水比计算公式如下:

$$B = \frac{M_2}{M_1} \quad (1)$$

式中:

B——复水比;

M_2 ——复水后质量, g;

M_1 ——复水前质量, g。

1.3.5 干枸杞颜色值测定

色泽测定使用色差仪测定枸杞 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 每次随机选取 5 枚枸杞测定, 每个样品重复测量 6 次,

记录平均值。并做精密度、重复性、稳定性试验,结果均良好。

1.3.6 干枸杞理化指标的测定

可溶性糖采用苯酚硫酸法。还原糖含量的测定采用 DNS 比色法^[20]。游离氨基酸含量采用茚三酮比色法^[21]。类胡萝卜素含量测定参照杨丽的方法^[22]。黄酮含量测定参照刘元林^[23]的方法。枸杞多糖含量采用苯酚硫酸法^[24]。

1.4 数据分析

所有图表采用 Microsoft Excel 2010 软件进行绘制, IBM SPSS Statistics 软件进行数据分析。

2 结果与讨论

2.1 辐照剂量对贮藏期干枸杞生虫率的影响

枸杞不恰当的贮藏方法会导致干枸杞发生霉变、虫蛀等品质劣变。对包装后的干枸杞进行不同剂量的辐照处理,干枸杞生虫率如表 1 所示,未经辐照的干枸杞在贮藏第 84 天,开始出现虫果,贮藏结束时生虫率为 0.97%。辐照剂量为 2 kGy 时,在贮藏第 112 天时开始出现虫果,贮藏结束时生虫率为 0.57%,而辐照剂量 ≥ 4 kGy 的干枸杞直至实验结束后,也未有虫果的出现,由此可知,电子束辐照处理可显著抑制干

枸杞的生虫率,且辐照剂量越高对生虫率的抑制效果越显著。干枸杞贮藏期间生虫的原因可能有两点,其一是枸杞再生、干制、加工过程中,本身携带了虫卵;其二为贮藏过程中受到污染,导致生虫。通过包装,基本隔绝了贮藏期间外界环境对干枸杞的污染,而辐照处理则会杀死隐藏于干枸杞内的虫卵,从而达到减少干枸杞生虫率的作用。与其他研究相比,王吉德^[25]用 γ 射线辐照枸杞干,获得杀死枸杞表面自然污染虫卵的适宜辐照剂量为 3.5 kGy,与本实验所得辐照剂量相接近。

2.2 辐照剂量对贮藏期干枸杞复水率的影响

通过测定干枸杞在贮藏期间的复水比,由表 2 可知,随着储藏时间的延长,各组样品复水比均呈缓慢下降的趋势。在辐照后第 0~112 天,辐照与未辐照样品的复水比差别不大,甚至部分剂量样品略高于未辐照,但至 140 d,未辐照样品的复水比明显大于辐照样品。这说明,辐照对干枸杞的表面结构可能有轻微破坏,导致复水性能略有下降,品质变化在贮藏后期才显现。这与姜程耀等^[26]研究结果一致,通过观察电子束辐照后葵花子的微观结构,获得辐照会改变葵花籽微观结构。辐照会对枸杞表皮的微观结构产生破坏。在实际的生产中要确定辐照工艺的最高耐受剂量。

表 1 不同辐照剂量下干枸杞的生虫率

Table 1 Insect growth rates of dried *Lycium barbarum* at different irradiation doses

贮藏时间/d	生虫率/%					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	--	--	--	--	--	--
28	--	--	--	--	--	--
56	--	--	--	--	--	--
84	0.37±0.26	--	--	--	--	--
112	0.75±0.27	0.19±0.27	--	--	--	--
140	0.97±0.18	0.57±0.00	--	--	--	--

表 2 不同辐照剂量干枸杞贮藏期间复水比变化

Table 2 Changes in rehydration rate of dried *Lycium barbarum* during storage of different irradiation doses

贮藏时间/d	复水比					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	2.19±0.03 ^a	2.21±0.04 ^a	2.23±0.02 ^a	2.17±0.02 ^a	2.17±0.03 ^a	2.20±0.03 ^a
28	2.04±0.02 ^a	2.06±0.01 ^a	2.03±0.05 ^a	2.05±0.02 ^a	2.07±0.03 ^a	2.06±0.03 ^a
56	2.03±0.03 ^a	1.99±0.02 ^{ab}	1.98±0.01 ^{ab}	2.02±0.03 ^{ab}	2.02±0.03 ^{ab}	1.97±0.02 ^b
84	1.97±0.04 ^a	1.95±0.01 ^a	1.96±0.01 ^a	1.98±0.01 ^a	1.97±0.03 ^a	1.96±0.02 ^a
112	1.93±0.03 ^a	1.94±0.01 ^a	1.95±0.03 ^a	1.96±0.02 ^a	1.96±0.02 ^a	1.95±0.02 ^a
140	1.95±0.03 ^a	1.91±0.02 ^{ab}	1.93±0.02 ^a	1.91±0.03 ^{ab}	1.89±0.03 ^{ab}	1.86±0.03 ^b

注:同行右肩不同小写字母表示具有显著差异($P < 0.05$),下表同。

2.3 辐照剂量对贮藏期干枸杞色差值的影响

色泽变化是评价果蔬品质优劣的重要指标,色泽直接影响着消费者对产品的接受程度。如表3所示,辐照处理剂量 ≥ 8 kGy的干枸杞 L^* 值会显著降低,贮藏0 d时,干枸杞 L^* 值分别为52.30、52.24、52.56、52.24、51.48、51.33,辐照组与对照组差异不显著,从第28~56 d开始,辐照剂量为8、10 kGy的干枸杞 L^* 值显著低于其他处理组。如表4所示,贮藏0 d时,对照组干枸杞 a^* 值为38.15,这与辐照剂量为2、4、6 kGy的干枸杞 a^* 值没有显著性差异,显著高于辐照剂量为8、10 kGy的干枸杞 a^* 值。贮藏56 d时,辐照剂量为8、10 kGy的干枸杞 a^* 值显著低于对照组的30.18。贮藏84~140 d时,辐照剂量为10 kGy的干枸

杞 a^* 值显著低于对照组,其他辐照处理组与对照组差异不显著。由此可知,当辐照剂量 ≥ 8 kGy会使干枸杞 a^* 值降低。如表5所示,辐照剂量 ≥ 8 kGy的干枸杞 b^* 显著低于对照组。贮藏0 d时,干枸杞 b^* 值辐照组与对照组之间差异不显著;贮藏28~140 d时,对照组与辐照剂量为2、4、6 kGy的干枸杞 b^* 之间差异不显著,辐照剂量 ≥ 8 kGy的干枸杞 b^* 值显著低于对照组。综上所述,辐照剂量 ≥ 8 kGy的干枸杞 L^* 、 a^* 、 b^* 值均显著低于对照组,由此可知,当辐照剂量 ≥ 8 kGy,干枸杞颜色会产生破坏。与其他研究相比,Kortei^[27]用 γ 射线辐照蘑菇,获得辐照会对蘑菇贮藏期间色泽值产生影响。由此可知,干枸杞辐照剂量应低于8 kGy。

表3 不同辐照剂量干枸杞贮藏期间 L^* 值变化

Table 3 Changes in L^* values during storage of dried *Lycium barbarum* at different irradiated doses

贮藏时间/d	L^*					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	52.30±0.74 ^a	52.24±0.64 ^a	52.56±0.46 ^a	52.24±0.86 ^a	51.48±0.96 ^a	51.33±0.92 ^a
28	50.12±0.97 ^a	50.10±1.04 ^a	50.04±0.68 ^a	49.98±1.00 ^a	48.28±0.91 ^b	47.97±1.11 ^b
56	46.10±0.50 ^a	45.92±0.71 ^a	45.86±0.64 ^a	46.37±0.79 ^a	44.56±1.05 ^b	44.40±0.88 ^b
84	43.36±0.92 ^{abc}	43.76±0.80 ^{ab}	43.76±0.77 ^{ab}	43.89±0.51 ^a	42.20±1.03 ^c	42.18±1.43 ^c
112	40.16±1.15 ^a	40.21±1.14 ^a	40.16±0.88 ^a	40.23±1.05 ^a	38.46±0.72 ^b	38.63±1.25 ^b
140	39.85±0.76 ^a	39.76±0.61 ^a	39.78±0.55 ^a	39.78±1.06 ^a	37.30±0.74 ^b	37.30±1.31 ^b

表4 不同辐照剂量干枸杞贮藏期间 a^* 值变化

Table 4 Changes in a^* values during storage of dried *Lycium barbarum* at different irradiated doses

贮藏时间/d	a^*					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	38.15±1.08 ^a	38.17±0.57 ^a	38.04±1.09 ^a	37.54±1.09 ^{ab}	36.56±0.98 ^b	37.07±0.93 ^{ab}
28	33.18±1.50 ^{ab}	33.29±1.02 ^{ab}	33.35±0.77 ^a	31.88±1.07 ^{ab}	32.89±0.78 ^{ab}	31.78±1.00 ^b
56	30.18±1.23 ^a	29.98±1.10 ^{ab}	29.85±0.77 ^{ab}	29.82±0.87 ^{ab}	28.63±0.67 ^{bc}	27.97±1.17 ^c
84	29.28±2.77 ^a	29.22±1.03 ^a	28.73±0.70 ^{ab}	28.76±0.67 ^{ab}	27.87±0.84 ^{ab}	26.90±0.70 ^b
112	24.76±0.85 ^a	24.51±0.86 ^a	24.74±1.12 ^a	24.39±0.77 ^a	23.91±1.38 ^{ab}	22.78±1.24 ^b
140	23.28±0.71 ^a	23.11±1.10 ^a	23.15±1.15 ^a	22.49±0.85 ^a	21.87±1.12 ^{ab}	20.71±1.38 ^b

表5 不同辐照剂量干枸杞贮藏期间 b^* 值变化

Table 5 Changes in b^* values during storage of dried *Lycium barbarum* at different irradiated doses

贮藏时间/d	b^*					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	26.32±1.00 ^{ab}	26.92±0.30 ^a	26.72±0.75 ^a	26.50±0.86 ^a	25.92±0.73 ^{ab}	25.32±0.72 ^b
28	23.86±0.42 ^a	23.96±1.05 ^a	23.69±0.90 ^a	23.11±0.71 ^a	22.02±0.97 ^b	22.14±0.92 ^b
56	22.71±0.67 ^a	22.33±1.32 ^{ab}	22.32±0.77 ^{ab}	22.01±0.89 ^{abc}	21.01±1.19 ^{bc}	20.83±0.91 ^c
84	19.61±1.08 ^a	19.57±0.69 ^a	19.74±0.75 ^a	19.45±0.52 ^a	18.18±0.84 ^b	18.41±0.67 ^b
112	19.14±0.95 ^a	18.41±0.88 ^{abc}	18.60±0.82 ^b	18.31±1.02 ^{abc}	17.27±0.73 ^c	17.49±0.59 ^{bc}
140	17.67±0.97 ^a	17.46±0.93 ^a	17.51±1.02 ^a	17.81±1.27 ^a	15.93±0.55 ^b	16.69±1.01 ^{abc}

2.4 辐照剂量对干枸杞贮藏期间糖含量的影响

2.4.1 辐照剂量对贮藏期干枸杞还原糖的影响

不同辐照剂量对干枸杞中枸杞还原糖含量的影响见表 6。由表 6 可知,随着贮藏期的延长,不同辐照剂量干枸杞还原糖含量均呈现下降趋势。贮藏期为 0 d 时,辐照处理组与对照组之间还原糖含量差异不显著。在贮藏期为 140 d 时,对照组还原糖含量为 0.33 g/g,显著低于各辐照组。说明辐照处理能延缓干枸杞还原糖含量的下降。

2.4.2 辐照剂量对贮藏期干枸杞枸杞多糖的影响

不同辐照剂量对干枸杞中枸杞多糖含量的影响见表 7。由表 7 可知,在贮藏期为 0 d 时,干枸杞枸杞多糖含量为 7.64 g/100 g,显著低于辐照剂量为 10 kGy

的干枸杞,在贮藏期为 140 d 时,对照组干枸杞枸杞多糖含量为 4.43 g/100 g,显著低于各处理组。在整个贮藏过程中,干枸杞枸杞多糖含量下降率依次为 42.02%、26.13%、21.07%、21.58%、24.13%、30.29%,由此可知,辐照会使干枸杞枸杞多糖含量显著增加,且能够延缓干枸杞枸杞多糖含量的下降。

2.4.3 辐照剂量对贮藏期干枸杞可溶性糖的影响

不同辐照剂量对干枸杞中可溶性糖含量的影响见表 8。由表 8 可知,不同辐照剂量处理干枸杞贮藏期间可溶性糖含量均呈现下降趋势。在整个贮藏过程中,辐照组可溶性糖含量与对照组之间并无显著性差异 ($P < 0.05$),说明辐照处理对干枸杞可溶性糖含量无显著性影响。

表 6 不同辐照剂量贮藏期间干枸杞还原糖含量变化

Table 6 Changes in reducing sugar content of dried *Lycium barbarum* during storage of different irradiation doses

贮藏时间/d	还原糖/(g/g)					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	0.57±0.02 ^a	0.59±0.01 ^a	0.57±0.03 ^a	0.59±0.01 ^a	0.58±0.01 ^a	0.58±0.04 ^a
28	0.48±0.01 ^c	0.57±0.02 ^a	0.49±0.01 ^c	0.55±0.01 ^a	0.52±0.01 ^b	0.50±0.00 ^c
56	0.41±0.01 ^d	0.48±0.01 ^b	0.45±0.03 ^c	0.53±0.02 ^a	0.50±0.01 ^{ab}	0.48±0.01 ^b
84	0.38±0.01 ^e	0.43±0.01 ^c	0.44±0.00 ^c	0.46±0.00 ^b	0.48±0.01 ^a	0.42±0.01 ^d
112	0.36±0.01 ^d	0.38±0.01 ^{bc}	0.40±0.01 ^{ab}	0.40±0.01 ^a	0.41±0.01 ^a	0.37±0.01 ^c
140	0.33±0.00 ^e	0.37±0.01 ^c	0.35±0.00 ^d	0.38±0.00 ^a	0.37±0.00 ^b	0.36±0.00 ^d

表 7 不同辐照剂量贮藏期间干枸杞枸杞多糖含量变化

Table 7 Changes in polysaccharide content of dried *Lycium barbarum* during storage of different irradiation doses

贮藏时间/d	枸杞多糖/(g/100 g)					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	7.64±0.36 ^{cb}	7.96±0.13 ^{ab}	7.64±0.54 ^b	7.97±0.13 ^{ab}	8.33±0.26 ^{ab}	8.65±0.35 ^a
28	7.28±0.27 ^{bc}	7.28±0.27 ^{bc}	7.18±0.45 ^{bc}	7.14±0.38 ^c	8.18±0.43 ^a	7.78±0.32 ^{ab}
56	6.21±0.10 ^{bc}	7.14±0.47 ^{ab}	6.87±0.14 ^{bc}	6.95±0.16 ^{ab}	7.92±0.33 ^a	7.72±0.57 ^{ab}
84	5.35±0.37 ^b	7.11±0.31 ^a	6.63±0.37 ^a	6.85±0.18 ^a	7.13±0.14 ^a	7.27±0.28 ^a
112	4.48±0.14 ^c	6.67±0.05 ^a	6.13±0.27 ^b	6.33±0.16 ^{ab}	6.53±0.15 ^a	6.67±0.14 ^a
140	4.43±0.20 ^b	5.88±0.20 ^a	6.03±0.24 ^a	6.25±0.33 ^a	6.32±0.31 ^a	6.03±0.18 ^a

表 8 不同辐照剂量贮藏期间干枸杞可溶性糖含量变化

Table 8 Changes in soluble sugar content of dried *Lycium barbarum* during storage of different irradiation doses

贮藏时间/d	可溶性糖/(g/g)					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	0.52±0.01 ^a	0.54±0.00 ^a	0.53±0.01 ^a	0.54±0.02 ^a	0.54±0.01 ^a	0.54±0.01 ^a
28	0.50±0.01 ^a	0.51±0.01 ^a	0.51±0.01 ^a	0.51±0.02 ^a	0.51±0.01 ^a	0.52±0.01 ^a
56	0.47±0.01 ^a	0.48±0.01 ^a	0.48±0.01 ^a	0.48±0.02 ^a	0.49±0.01 ^a	0.49±0.01 ^a
84	0.43±0.01 ^a	0.43±0.01 ^a	0.44±0.02 ^a	0.44±0.02 ^a	0.44±0.01 ^a	0.44±0.01 ^a
112	0.40±0.01 ^a	0.40±0.01 ^a	0.41±0.01 ^a	0.41±0.02 ^a	0.41±0.01 ^a	0.42±0.00 ^a
140	0.36±0.01 ^a	0.36±0.01 ^a	0.36±0.01 ^a	0.37±0.01 ^a	0.37±0.01 ^a	0.37±0.01 ^a

通过对辐照组和对照组贮藏期将还原糖、枸杞多糖和可溶性糖含量进行测定。对照组还原糖、枸杞多糖含量显著低于辐照组,辐照后干枸杞还原糖枸杞多糖含量上升的原因在于,辐照促使大分子物质分解。与其他研究相比,金友兰^[28]用 γ 射线辐照绿茶茶渣,获得随着辐照剂量的增大,还原糖含量显著提高,糖含量增加的原因在于辐照会使大分子降解为小分子物质,从而引起糖含量的增加。干枸杞贮藏期间,可溶性糖含量辐照组与对照组差异不显著。与其他研究相比,Liu等^[29]用剂量为0~10 kGy的电子束辐照花生,获得辐照对糖含量影响不大,与本实验获得的研究结果一致。

2.5. 辐照剂量对贮藏期干枸杞营养成分的影响

2.5.1 辐照剂量对贮藏期干枸杞类胡萝卜素的影

不同辐照剂量对干枸杞类胡萝卜素含量的影响见表9,由表9可知,辐照处理降低了干枸杞中类胡萝卜素含量,但不同剂量辐照处理对干枸杞类胡萝卜素含量的影响存在差异。贮藏期内,对照组干枸杞类胡萝卜素含量依次为41.14、38.78、36.24、32.25、30.25、30.40 mg/g,这与辐照剂量为2、4 kGy时干枸杞类胡萝卜素含量不存在显著性差异,当辐照剂量为6、8、10 kGy时,干枸杞类胡萝卜素含量显著低于对照组($P<0.05$)。由此可知,辐照剂量 ≥ 6 kGy的干枸杞类胡萝卜素含量显著下降。与其他研究相比,Omeera

等^[30]用 γ 射辐照红辣椒,获得9 kGy辐照会导致辣椒类胡萝卜素含量显著降低,这与本实验获得的最高耐受剂量存在一定差异,原因在于辣椒与枸杞品种不同,最高耐受剂量亦存在差异。

2.5.2 辐照剂量对贮藏期干枸杞黄酮含量的影响

枸杞黄酮是中药材枸杞子主要的有效成分,也是其质量优劣的主要评价指标。由表10可知,随着贮藏期的延长,不同辐照剂量干枸杞黄酮含量均呈现下降趋势。在贮藏0 d时,对照组黄酮含量为1.50 g/100 g,这与辐照剂量为2、4 kGy的干枸杞黄酮含量差异不显著,当辐照剂量为6、8、10 kGy时,干枸杞黄酮含量为1.41、1.39、1.37 g/100 g,显著低于对照组,在贮藏期为28~112 d时,对照组黄酮含量依次为1.40、1.27、1.12、0.99 g/100 g,这与辐照剂量为2、4、6 kGy干枸杞黄酮含量差异不显著,显著高于辐照剂量为8、10 kGy的干枸杞。在贮藏期为140 d时,对照组黄酮含量为0.86 g/100 g,辐照剂量为2、4、6、8 kGy的干枸杞黄酮含量为0.87、0.85、0.85、0.84 g/100 g,两者之间黄酮含量差异不显著,当辐照剂量为10 kGy时,干枸杞黄酮含量为0.77 g/100 g,显著低于对照组。由此可知,辐照剂量 ≥ 8 kGy的干枸杞,黄酮含量显著低于对照组。与其他研究相比,Abd El Rahman^[31]用 γ 射线辐照干薄荷,获得辐照剂量为5、10、15 kGy的干薄荷在黄酮含量上显著低于对照组,这与本实验获得的高剂量的辐照处理会使干枸杞黄酮含量产生破坏的结果一致。

表9 不同辐照剂量贮藏期间干枸杞类胡萝卜素含量变化

Table 9 Changes in carotenoid content of dried *Lycium barbarum* during storage of different irradiation doses

贮藏时间/d	类胡萝卜素/(mg/g)					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	41.14±0.19 ^b	42.19±0.39 ^a	41.54±0.34 ^{ab}	39.37±0.42 ^d	40.30±0.46 ^c	37.14±0.32 ^e
28	38.78±0.27 ^a	39.25±0.27 ^a	38.63±0.38 ^a	36.86±0.27 ^b	36.27±0.38 ^b	34.94±0.54 ^c
56	36.24±0.27 ^b	38.10±0.49 ^a	35.53±0.46 ^b	33.11±0.40 ^c	32.62±0.35 ^c	29.67±0.55 ^d
84	32.52±0.19 ^a	32.39±0.39 ^a	32.64±0.33 ^a	28.80±0.43 ^b	27.50±0.49 ^c	26.35±0.23 ^d
112	30.25±0.23 ^b	31.37±0.23 ^a	30.97±0.35 ^{ab}	27.28±0.38 ^c	24.86±0.46 ^d	23.68±0.52 ^e
140	30.04±0.35 ^a	29.98±0.68 ^a	29.05±0.51 ^a	23.50±0.46 ^b	21.54±0.36 ^c	19.87±0.46 ^d

表10 不同辐照剂量贮藏期间干枸杞黄酮含量变化

Table 10 Variation of flavonoid content in dried *Lycium barbarum* during storage of different irradiation doses

贮藏时间/d	黄酮/(g/100 g)					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	1.50±0.01 ^a	1.47±0.02 ^a	1.45±0.03 ^{ab}	1.41±0.04 ^{bc}	1.39±0.02 ^c	1.37±0.02 ^c
28	1.40±0.016 ^a	1.30±0.02 ^b	1.27±0.02 ^{bc}	1.26±0.02 ^{bc}	1.25±0.02 ^c	1.24±0.02 ^c
56	1.27±0.02 ^{ab}	1.28±0.03 ^a	1.21±0.04 ^{bc}	1.22±0.02 ^{bc}	1.18±0.02 ^{cd}	1.12±0.01 ^d
84	1.12±0.01 ^a	1.12±0.03 ^a	1.11±0.02 ^a	1.14±0.04 ^a	1.04±0.01 ^b	0.99±0.04 ^c
112	0.99±0.04 ^{ab}	1.03±0.03 ^a	0.95±0.02 ^{bc}	0.95±0.01 ^{bc}	0.90±0.02 ^c	0.91±0.02 ^c
140	0.86±0.02 ^a	0.87±0.03 ^a	0.85±0.01 ^a	0.85±0.02 ^a	0.84±0.02 ^a	0.77±0.02 ^b

2.5.3 辐照剂量对贮藏期干枸杞游离氨基酸含量影响

游离氨基酸是枸杞果实的主要营养成分,同时也是重要的功效成分,其种类和含量决定果实营养品质和药用价值。如表 11 所示,在贮藏结束时,未经辐照的干枸杞游离氨基酸含量为 8.53%,辐照剂量为 2、4、6、8、10 kGy 的干枸杞游离氨基酸含量依次为 8.48%、

8.38%、8.41%、8.42%、8.35%,辐照组与对照组游离氨基酸含量差异不显著。由此可知,辐照对干枸杞贮藏期间游离氨基酸含量不存在显著性影响。与其他研究相比,顾可飞^[32]用剂量为 0~10 kGy 的电子束辐照甜高粱,获得辐照对氨基酸含量影响不大,与本实验获得的研究结果一致。

表 11 不同辐照剂量贮藏期间干枸杞游离氨基酸含量变化

Table 11 Changes in free amino acid content of dried *Lycium barbarum* during storage of different irradiation doses

贮藏时间/d	游离氨基酸/%					
	0 kGy	2 kGy	4 kGy	6 kGy	8 kGy	10 kGy
0	12.50±0.73 ^a	12.48±0.66 ^a	12.56±0.18 ^a	12.30±0.68 ^a	12.04±0.08 ^a	12.12±0.17 ^a
28	11.55±0.12 ^a	11.63±0.26 ^a	11.62±0.33 ^a	11.67±0.13 ^a	11.61±0.21 ^a	11.84±0.21 ^a
56	10.34±0.21 ^a	10.24±0.24 ^a	10.15±0.27 ^a	10.17±0.12 ^a	10.04±0.03 ^a	10.16±0.13 ^a
84	9.63±0.27 ^a	9.56±0.29 ^a	9.44±0.28 ^a	9.42±0.22 ^a	9.41±0.18 ^a	9.27±0.19 ^a
112	9.31±0.24 ^a	9.28±0.25 ^a	9.21±0.10 ^a	9.20±0.22 ^a	9.25±0.21 ^a	9.17±0.11 ^a
140	8.53±0.20 ^a	8.48±0.16 ^a	8.38±0.13 ^a	8.41±0.12 ^a	8.42±0.18 ^a	8.35±0.13 ^a

3 讨论

从电子束辐照对干枸杞生虫率的抑制效果来看,对照组干枸杞于贮藏 84 d 时出现生虫枸杞,在贮藏时间达到 140 d 时,生虫率为 0.97%,显著高于辐照组。辐照剂量为 2 kGy 的干枸杞于贮藏 112 d 时开始出现生虫枸杞,贮藏 140 d 时生虫率为 0.57%,显著高于其他辐照处理组。

从辐照对干枸杞复水比和颜色的影响上看,过高的辐照剂量会对干枸杞的表皮结构和颜色产生破坏,与对照组相比辐照处理会使干枸杞复水比下降,干枸杞复水比下降率显著增加。同辐照剂量处理干枸杞,辐照剂量 ≥ 8 kGy, L^* 、 a^* 、 b^* 值均显著低于对照组。

从辐照对干枸杞营养成分的影响上看,过高剂量会对干枸杞营养成分产生破坏。辐照对干枸杞营养成分的影响也可以确定干枸杞的最高耐受剂量。辐照会使干枸杞还原糖含量升高,枸杞多糖含量显著上升,辐照剂量 ≥ 8 kGy 的干枸杞类胡萝卜素、黄酮含量显著显著低于对照组,与对照组相比辐照处理对干枸杞可溶性糖、游离氨基酸含量影响不显著。

综上所述,干枸杞辐照灭虫的剂量应低于 8 kGy,高于这个剂量干枸杞颜色等品质指标会显著低于对照组,辐照剂量应高于 4 kGy,低于这个辐照剂量则不能达到理想的灭虫效果。

4 结论

本实验通过采用电子辐照加速器对干枸杞进行辐照处理,研究辐照处理后及贮藏期间干枸杞生虫率、

复水比、颜色、糖以及营养成分的变化,探究干枸杞电子束辐照处理的最适剂量。通过研究获得辐照处理抑制生虫的效果显著,辐照的剂量应在 4~8 kGy 范围内。该辐照剂量范围内,可以达到理想的抑制生虫效果,而且对干枸杞颜色、营养物质影响较小,可以满足干枸杞贮藏的需求。

参考文献

- [1] 周剑,马建苹,田浩,等.枸杞化学成分及生物活性研究进展[J].中国食品工业,2019,11:74-77
- [2] LIU Zenggen, LIU Baolong, WEN Huaixiu, et al. Phytochemical profiles, nutritional constituents and antioxidant activity of black wolfberry (*Lycium ruthenicum* Murr.) [J]. Industrial Crops & Products, 2020, 154: 112692
- [3] Bartosz Kulczyński, Anna Gramza-Michałowska. Goji berry (*Lycium barbarum*): Composition and health effects - a review [J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2016, 66(2)
- [4] YANG Di, SU Guohui, Lo Amy Cy. *Lycium barbarum* polysaccharide extracts preserve retinal function and attenuate inner retinal neuronal damage in a mouse model of transient retinal ischaemia [J]. Clinical & Experimental Ophthalmology, 2017, 45(7): 717-729
- [5] Harunobu Amagase, Norman R Farnsworth. A review of botanical characteristics, phytochemistry, clinical relevance in efficacy and safety of *Lycium barbarum* fruit (Goji) [J]. Food Research International, 2011, 44(7): 1702-1717
- [6] Kwok-Fai So. Wolfberry and neuroprotection [J]. Toxicol,

- 2019, 158: s1-s2
- [7] 赵军. 中药保管中存在的问题和改进措施[J]. 中国卫生产业, 2018, 15(29): 48-49
- [8] 邹慧琴, 闫永红. 中药的贮藏与养护[J]. 家庭中医药, 2015, 22(5): 60-62
- [9] Sortino G, Allegra A, Passafiume R. et al. Postharvest application of sulphur dioxide fumigation to improve quality and storage ability of "red Globe" grape cultivar during long cold storage [J]. Chemical Engineering Transactions (CET Journal), 2017, 58: 403-408
- [10] 卢晓琳. 硫磺熏蒸对白芷化学成分、药效和安全性影响的研究[D]. 成都: 成都中医药大学, 2013
- [11] Mohammad Habibur Rahman, Saiful Islam, Shahida Begum, et al. Scientific opinion on the standards and regulations of irradiated food [J]. Nutrition & Food Sciences, 2018, 8(4): 1-6
- [12] Washio Masakazu. Practical application of electron-beam irradiation technology [J]. Journal of the Atomic Energy Society of Japan, 2019, 61(12)
- [13] Pillai Suresh, Shayanfar Shima. Electron beam technology and other irradiation technology applications in the food industry [J]. Topics in Current Chemistry (Cham), 2017, 375(1): 249-268
- [14] Ashwini Wagh. Is irradiated food dangerous? [J]. Journal of Experimental Food Chemistry, 2021, 7(2): e120
- [15] Rajeev Ravindran, Amit K Jaiswal. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods [J]. Food Chemistry, 2019, 285
- [16] Barry P Fairand. Radiation Sterilization for Health Care Products [M]. Taylor and Francis. CRC Press: 2014-04-21
- [17] M Humayun Kabir, Anisur Rahman Khan, Marufa Zerin Akhter, et al. Effect of radiation sterilization on the physicochemical properties and microbial load of amoxicillin tri-hydrate powder [J]. Bangladesh Journal of Microbiology, 2006, 23(2): 165-167
- [18] 李紫薇, 姜有霞, 腊萍, 等. 枸杞色素的提取及稳定性研究[J]. 伊犁师范学院学报(自然科学版), 2009, 4: 28-30
- [19] 张丽丽, 吴姗姗, 黄延盛, 等. 不同储存温度对青海枸杞品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(12): 24-29
- [20] 王永华. 食品分析(第二版)[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2016
- [21] 曹建康. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2017
- [22] 杨丽. 枸杞子颜色变化与物质基础相关性研究[D]. 成都: 成都中医药大学, 2015
- [23] 刘元林, 龙鸣, 田晓静, 等. 枸杞总黄酮提取工艺优化及不同年份枸杞总黄酮含量测定[J]. 西北民族大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 70-75
- [24] GB 18672-2014, 枸杞[S]
- [25] 王吉德, 张星魁, 王成, 等. 枸杞干商业化辐照杀虫研究[J]. 核农学通报, 1995, 6: 266-268
- [26] 姜程耀, 林松毅, 李冬梅, 等. 电子束辐照对葵花籽蛋白微观结构和水解特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(1): 100-104
- [27] Nii Korley Kortei, George Tawia Odamten, Mary Obodai, et al. Determination of color parameters of gamma irradiated fresh and dried mushrooms during storage [J]. Croatian Journal of Food Technology, Biotechnology and Nutrition, 2015, 10(1): 66-71
- [28] 金友兰, 刘安, 肖文军. 辐照预处理辅助纤维素酶水解绿茶茶渣制备水溶性糖研究[J]. 茶叶通讯, 2019, 46(3): 335-339
- [29] Kunlun Liu, Ying Liu, Fusheng Chen. Effect of gamma irradiation on the physicochemical properties and nutrient contents of peanut [J]. LWT, 2018, 96: 535-542
- [30] Ayob Omeera, Hussain Peerzada Rashid, Suradkar Prashant, et al. Gamma irradiation and storage effects on quality and safety of *Himalayan paprika* (Waer) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 147: 111667
- [31] Abd El Rahman Abd El Raouf Ahmed, Gamal Kamal Arafah, Helmy El Sayed Hassan, et al. Effect of gamma radiation on oil quality of dried mint leaves [J]. American Journal of Agricultural and Biological Sciences, 2020, 15(1): 83-97
- [32] 顾可飞, 秦秋伟, 张翔. 电子束辐照技术对甜高粱鲜品营养品质的影响[J]. 食品工业, 2021, 42(10): 315-319