

## 高能电子束辐照对金丝绞瓜贮藏特性的影响

高月霞, 彭雪, 李阳, 杨晨昱, 任亚梅\*  
(西北农林科技大学食品科学与工程学院 陕西杨凌 712100)

**摘要** 目的:确定高能电子束辐照处理金丝绞瓜的最优剂量,改善金丝绞瓜的贮藏特性。方法:分别以 0.3,0.4 kGy 和 0.5 kGy 剂量的高能电子束从两面处理金丝绞瓜。结果:0.4 kGy 高能电子束辐照处理使金丝绞瓜腐烂率降低 16.18%,其总酚含量维持较高水平,可溶性固形物含量降低,丙二醛积累量减少,呼吸强度、失重率、色彩饱和度、可滴定酸和过氧化物酶活性均与对照瓜无显著差异( $P>0.05$ ),在此剂量下,超氧化物歧化酶的活性高峰是对照瓜的 1.14 倍,瓜丝细胞超微结构完整;在贮藏 120 d 时,脆度、葫芦巴碱含量和苯丙氨酸解氨酶活性分别是对照瓜的 1.58,3.34 倍和 1.84 倍。结论:0.4 kGy 是适宜的高能电子束辐照剂量,有望将其用于金丝绞瓜的贮藏保鲜。

**关键词** 金丝绞瓜; 高能电子束; 贮藏特性; 抗病性

**文章编号** 1009-7848(2023)03-0290-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.03.030

金丝绞瓜 (*Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo*), 又称金瓜、绞瓜、金丝瓜、搅瓜或四季瓜,是葫芦科南瓜属美洲南瓜种的一个变种。其瓜丝气味清香,口感脆爽,且富含对人体有益的葫芦巴碱和丙醇二酸,具有调节代谢、减肥、抗癌的功效。其在我国的种植面积逐渐增加,其中安徽泗县是我国最为著名的金丝绞瓜产区,栽培面积常年在 1 000 hm<sup>2</sup> 以上,且品质较高<sup>[1]</sup>。金丝绞瓜受温湿度影响较大,不耐贮藏,其采收期主要集中在 6 月和 11 月,采收后恰逢梅雨和高温,易感染各种病菌,极易腐烂,采后 2 个月的腐烂率严重时高达 80% 以上,损失较大<sup>[2]</sup>。另外,金丝绞瓜含水量高达 95%,贮藏期失水较为严重。目前对于金丝绞瓜的研究主要集中于营养价值<sup>[3-4]</sup>、食用与加工<sup>[5-6]</sup>、栽培技术<sup>[7-9]</sup>、病害<sup>[10]</sup>和种质资源鉴定和品种选育<sup>[11]</sup>,对其贮藏保鲜的研究较少,部分地区仍采用常温贮藏的方法。有研究表明,低温贮藏和浸钙<sup>[12]</sup>可以延长金丝绞瓜的贮藏期。

高能电子束可通过电子转移、蛋白质交联、产生活性自由基等多种机制改变果蔬贮藏特性,杀灭多种细菌、真菌及虫卵,加速物质转化,且不会改变食品的营养成分,无放射性污染,是一种新型

绿色物理冷加工技术<sup>[13]</sup>,可用于食品保鲜或推迟后熟延长货架期。不同剂量的电子束辐照对果蔬的作用效果有差异,用其处理的新鲜水果和蔬菜时能量应低于 10 MeV,总体平均吸收剂量不能大于 1.5 kGy<sup>[14]</sup>。低剂量电子束辐照可杀灭致病微生物,诱导果蔬体内保护酶系统的启动,抑制细胞体内膜脂过氧化进程,减少果蔬腐烂率,延长贮藏期;中高剂量电子束辐照在具有杀灭微生物作用的同时也会促进果蔬成熟,严重时甚至会破坏果蔬细胞完整性,加速营养物质的消耗,降低口感和风味,导致果蔬短时间内快速腐烂。不同果蔬之间对电子束辐照的吸收也有差异,国内外有研究表明电子束辐照可以延缓哈密瓜<sup>[15]</sup>、柑橘<sup>[16]</sup>、蘑菇<sup>[17]</sup>等的衰老。周任佳等<sup>[18]</sup>发现用 1.5 kGy 剂量的高能电子束辐照处理,使哈密瓜保持较好的贮藏特性。李阳等<sup>[19]</sup>用 0.4,0.6 kGy 和 0.8 kGy 高能电子束分别辐照金丝绞瓜的 4 面,结果破坏了瓜丝细胞完整性,加速营养物质的消耗,使口感和风味下降。

本试验在李阳等<sup>[19]</sup>研究的基础上,降低辐照剂量并减少辐照次数,采用 0.3,0.4 kGy 和 0.5 kGy 3 个剂量辐照金丝绞瓜的两个面,旨在有效延长金丝绞瓜的贮藏期,减少贮藏损失。

收稿日期: 2022-03-06

第一作者: 高月霞,女,硕士生

通信作者: 任亚梅 E-mail: 715189648@qq.com

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

泗县“拍砸 2 号”金丝绞瓜,于 2020 年 6 月

20 日采收,7 月 3 日放入冷库。选择 150 个大小均匀,成熟度适宜,无冷害、病害和冻害,表皮无明显伤痕的金丝绞瓜,平均分为 3 组。分别在 0.3、0.4 kGy 和 0.5 kGy 3 个辐照剂量下照射,辐照位置为每个瓜相对的两个面。将辐照处理的与未处理(CK)的样品贮藏在冷库 [(9±1)℃, 湿度 65%~70%] 中,备用。

## 1.2 仪器与设备

行波直线型电子加速器(功率 27 W、额定能量 10 MeV、束流 2 mA、扫描宽度 800 cm),陕西方圆高科实业有限公司;TA.XT PLUS/50 物性测定仪,英国 SMS 公司;TECNAI G2 SPIRIT BIO 透射电子显微镜,美国 FEI 公司;Ci7600 色度仪,爱色丽(上海)色彩科技有限公司;HC-3018R 高速冷冻离心机,安徽中科中佳科学仪器有限公司;E-MUC7 超薄切片机,徕卡仪器有限公司。

## 1.3 测定指标及方法

1.3.1 呼吸强度 用 Telaire7001 红外线 CO<sub>2</sub> 分析仪测定。

1.3.2 腐烂率

$$\text{腐烂率}(\%) = \frac{\text{腐烂果数}}{\text{检查总果数}} \times 100 \quad (1)$$

1.3.3 失重率

$$\text{失重率}(\%) = \frac{\text{初质量} - \text{末质量}}{\text{初质量}} \times 100 \quad (2)$$

1.3.4 色泽 用色差仪测定,色泽采用色彩饱和度(C\*)和亮度(L\*)值表示。

1.3.5 质构特性 用物性测定仪测定硬度和脆度。每个处理均设置 3 个平行,3 个重复。

硬度:在每个金丝绞瓜的赤道部位取 2 cm×2 cm×2 cm 的小块,使用 P5 探头在 TPA 模式下测定,单位为 kg/cm<sup>2</sup>。

脆度:每个重复取 5 根粗细相近的瓜丝,选用 A/CKB 轻刀片探头。

1.3.6 营养物质含量 可滴定酸(TA):酸碱滴定法;可溶性固性物(TSS):便携式速显糖度计;葫芦巴碱含量:高效液相色谱法,参照徐雅琴等<sup>[20]</sup>的方法,略有改进。

1.3.7 总酚含量 福林酚试剂法,参照史萌等<sup>[21]</sup>的方法,略有改进。

1.3.8 丙二醛含量(MDA) 参照曹建康等<sup>[22]</sup>的方法,略有改进。

1.3.9 酶活性 苯丙氨酸解氨酶(PAL):参照曹

建康等<sup>[22]</sup>的方法,略有改进;超氧化物歧化酶(SOD):氮蓝四唑比色法<sup>[23]</sup>;过氧化物酶(POD):参照高俊凤等<sup>[24]</sup>的方法,略有改进。

1.3.10 细胞壁超微结构观察 取约 1 mm<sup>3</sup> 的瓜丝块,通过透射电镜(TEM)观察金丝绞瓜瓜丝的细胞结构。

## 1.4 数据分析

所有指标测定 3 次,结果以平均值±标准差表示,数据分析和作图采用 Excel、Origin 8.5 和 Minitab18.0。

## 2 结果与分析

### 2.1 高能电子束处理对呼吸强度的影响

果实在离开植物体后仍保持旺盛的呼吸作用。呼吸作用需消耗呼吸底物,导致采后果实的腐烂加速,因此保鲜措施均在一定程度上抑制果实的呼吸作用。如图 1 所示,金丝绞瓜贮藏过程中呼吸强度均呈先升高后降低的趋势,在贮藏 60 d 达到呼吸高峰,且呼吸峰值随辐照剂量的增大而增大。贮藏 120 d,0.3 kGy 与 0.5 kGy 辐照瓜的呼吸强度均大于对照瓜,二者差异均不显著(P>0.05)。整个贮藏过程中 0.4 kGy 剂量辐照瓜的呼吸强度与对照瓜相近。选用 0.4 kGy 高能电子束辐照能保持较低的呼吸强度。

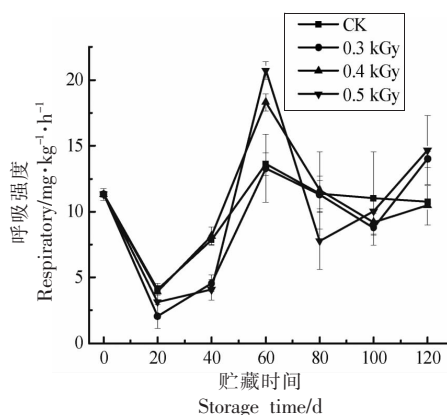


图 1 高能电子束处理对呼吸强度的影响

Fig.1 Effects of high energy electron beam processing on respiratory

### 2.2 高能电子束处理对腐烂率和失重率的影响

如图 2a 所示,金丝绞瓜的腐烂率与贮藏时间呈正相关。0.4 kGy 和 0.5 kGy 辐照瓜在贮藏前 20 d 均无腐烂现象,贮藏 60~120 d,各剂量辐照瓜的

腐烂率均显著低于对照瓜( $P<0.05$ )。第120天,对照组瓜的腐烂率超过50.00%。结束观察,此时腐烂率分别是0.3 kGy(35.00%),0.4 kGy(45.00%)和0.5 kGy(32.50%)辐照瓜的1.75,1.36倍和1.88倍。郭一丹等<sup>[25]</sup>用500 Gy和800 Gy高能电子束辐照冬枣,贮藏结束时辐照组的腐烂率显著低于对照组,与本试验结果一致。

失重与果实萎焉、变质及腐烂密切相关。如图2b所示,整个贮藏期间,对照组、0.3 kGy和0.4 kGy辐照瓜的失重率均呈上升趋势,且0.3 kGy和0.4 kGy辐照瓜的失重率均大于对照瓜,差异均不

显著( $P>0.05$ ),其中0.4 kGy辐照瓜的失重率始终小于0.3 kGy辐照瓜。0.5 kGy辐照瓜在第20天的失重率 $<0$ ,可能是辐照剂量太大造成细胞壁破损,水分从环境中进入金丝绞瓜内部。由图2a可知,0.5 kGy辐照瓜的腐烂率始终显著低于对照瓜( $P<0.05$ ),说明0.5 kGy高能电子束辐照能显著抑制微生物的生长对金丝绞瓜营养物质的消耗。选择0.4 kGy高能电子束辐照能显著降低金丝绞瓜的腐烂率( $P<0.05$ ),有效保持其新鲜度,而0.5 kGy高能电子束辐照剂量过高,会破坏其组织结构。

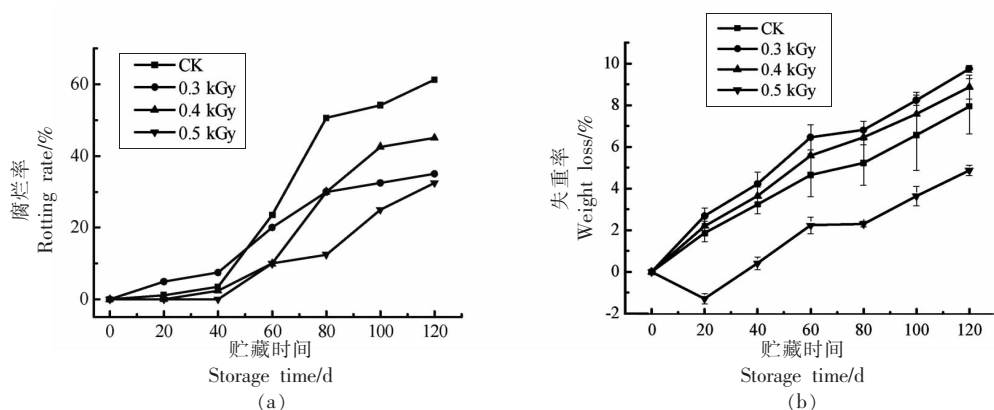


图2 高能电子束处理对腐烂率(a)和失重率(b)的影响

Fig.2 Effects of high energy electron beam processing on rotting rate (a) and weight loss rate (b)

### 2.3 高能电子束处理对瓜丝亮度和色彩饱和度的影响

如图3a所示,随着贮藏时间的延长,各剂量高能电子束辐照处理金丝绞瓜的 $C^*$ 值整体呈上升趋势。0.5 kGy辐照瓜在整个贮藏期的 $C^*$ 值与对照瓜相近,贮藏100 d显著低于对照瓜( $P<0.05$ );20 d时,0.3 kGy和0.4 kGy辐照瓜的 $C^*$ 值分别为31.23和30.74,显著高于对照瓜的 $C^*$ 值28.66( $P<0.05$ );贮藏40~120 d,0.4 kGy辐照瓜的 $C^*$ 值始终低于对照瓜,其中在40~60 d期间差异显著( $P<0.05$ );0.3 kGy辐照瓜在60~120 d期间的 $C^*$ 值高于对照瓜,且在60,80,120 d差异显著( $P<0.05$ ),说明辐照对金丝绞瓜的色彩饱和度的影响随辐照剂量的增加而增大。

如图3b所示,随着贮藏时间的延长,各剂量高能电子束辐照处理金丝绞瓜亮度 $L^*$ 值整体呈逐渐降低趋势。0.3 kGy和0.4 kGy辐照瓜的 $L^*$ 值

在整个贮藏期低于对照瓜,且在贮藏40~120 d有差异显著( $P<0.05$ );0.5 kGy辐照瓜的 $L^*$ 值贮藏20~40 d显著高于对照瓜( $P<0.05$ ),而60~120 d显著低于对照瓜( $P<0.05$ ),说明辐照会降低金丝绞瓜丝的亮度。

### 2.4 高能电子束处理对瓜丝质构特性的影响

如图4a所示,金丝绞瓜的硬度均呈降低趋势,其中对照瓜的硬度最大,0.5 kGy辐照瓜的硬度最小。贮藏20~40 d,辐照瓜的硬度均显著低于对照瓜( $P<0.05$ );贮藏40~60 d对照瓜的硬度迅速下降,与其腐烂率呈反比;第40天,0.3 kGy和0.5 kGy辐照瓜的硬度显著低于0.4 kGy辐照瓜( $P<0.05$ );贮藏60~80 d,0.4 kGy与0.3 kGy辐照瓜硬度无显著差异( $P>0.05$ );120 d时0.4 kGy辐照瓜的硬度是0.3 kGy辐照瓜的1.39倍。

图4b表明,整个贮藏期间,对照瓜脆度呈逐渐降低趋势,0.3 kGy和0.4 kGy辐照瓜均呈先下

降后上升趋势,0.5 kGy 呈波动上升趋势。贮藏至 80 d,0.4 kGy 辐照瓜的脆度显著高于 ( $P<0.05$ ) 另外 3 组。120 d 时,0.4 kGy 辐照瓜的脆度分别是对照瓜,0.3 kGy 和 0.5 kGy 辐照瓜的 1.58,1.03 和 1.19 倍。0.4 kGy 的辐照剂量可较好地维持硬度和

脆度。杜庆平等<sup>[26]</sup>研究表明,果实硬度与脆度的关系较为复杂,脆度好、坏不能直接通过硬度的高低来判断。刘春香等<sup>[27]</sup>认为影响黄瓜质地的因素有很多,各因素的作用仍有待研究和验证。金丝绞瓜硬度与脆度的关系还需进一步研究。

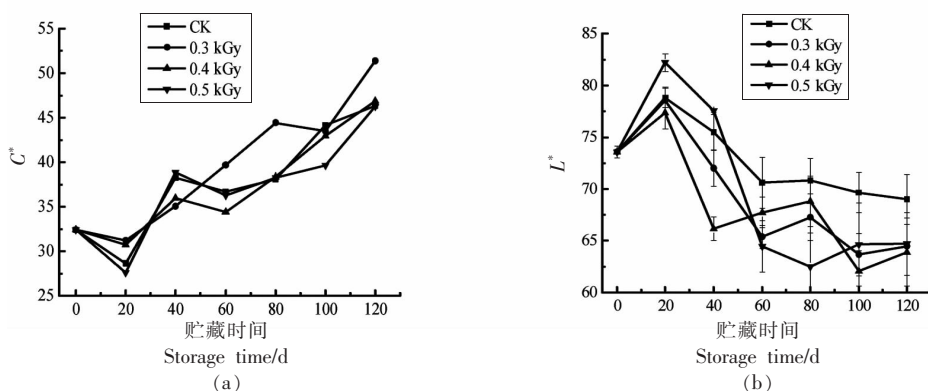


图 3 高能电子束辐照对瓜丝  $C^*$  值(a)和  $L^*$  值(b)的影响

Fig.3 Effects of high energy electron beam processing on the  $C^*$  value (a) and  $L^*$  value (b) of silk of spaghetti squash

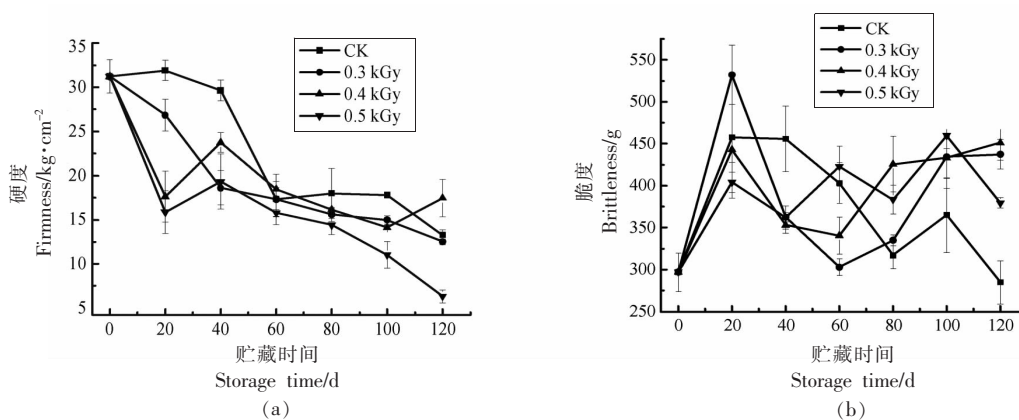


图 4 高能电子束辐照对瓜丝质地特性的影响

Fig.4 Effects of high energy electron beam processing on firmness (a) and brittleness (b) of silk of spaghetti squash

## 2.5 高能电子束处理对瓜丝 TSS 和 TA 含量的影响

可溶性固形物包括糖类及其它可溶物质,其含量可以反映生理代谢强度。如图 5a 所示,贮藏期间金丝绞瓜部分有机酸转化为可溶性糖,导致 TSS 含量上升。此后,随着生理代谢的进行,营养物质不断消耗,TSS 含量逐渐减少。第 40 天时对照瓜和 0.5 kGy 辐照瓜 TSS 含量出现高峰,且对照瓜的最高值是 0.5 kGy 辐照瓜的 1.36 倍;第 20 天

时 0.3 kGy 辐照瓜 TSS 含量出现高峰;第 100 天时 0.4 kGy 辐照瓜 TSS 含量出现高峰;40~60 d,对照瓜 TSS 含量显著高于各辐照瓜( $P<0.05$ );贮藏第 100 天,各辐照瓜的 TSS 含量均显著高于对照瓜( $P<0.05$ )。表明辐照的金丝绞瓜丝在贮藏后期会加速瓜丝糖化。此时,对照瓜 TSS 含量较低,可能与其呼吸强度较大,TSS 被消耗有关。

TA 是果蔬呼吸作用的底物之一,其含量反映果蔬采后生命的活动强度。如图 5b 所示,贮藏

40~60 d, 0.3 kGy 剂量的辐照能延缓瓜丝 TA 的上升; 贮藏 80~120 d, 0.3 kGy 辐照瓜的 TA 含量高于对照瓜, 表明该辐照处理可抑制金丝绞瓜的呼吸等生理代谢, 减缓 TA 含量的下降; 各辐照瓜间的

TA 含量并无显著差异 ( $P>0.05$ )。可见, 其 TA 含量不受辐照剂量的影响, 与李阳等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。

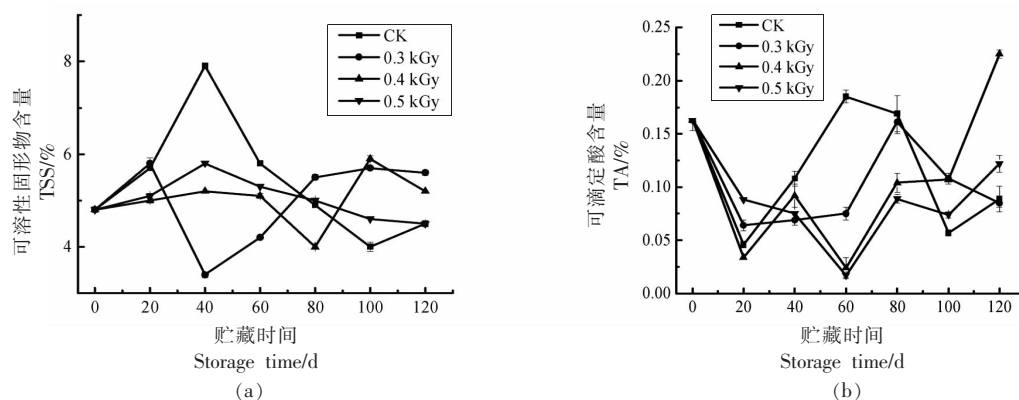


图5 高能电子束处理对瓜丝 TSS(a)和 TA(b)含量的影响

Fig.5 Effects of high energy electron beam processing on total soluble solids (a) and titratable acid (b) content of silk of spaghetti squash

## 2.6 高能电子束处理对瓜丝葫芦巴碱和多酚含量的影响

金丝绞瓜含有普通瓜类没有的葫芦巴碱, 具有降血糖活性, 其含量与金丝绞瓜的贮藏品质成正比。如图 6a 所示, 各剂量高能电子束辐照处理金丝绞瓜的葫芦巴碱含量均呈下降趋势。贮藏 100~120 d, 各剂量处理辐照瓜的葫芦巴碱含量均大于对照瓜, 且贮藏的第 120 天, 0.3, 0.4 kGy 和 0.5 kGy 辐照瓜的葫芦巴碱含量分别是对照瓜的 1.70, 3.34 倍和 2.53 倍, 说明高能电子束辐照能减缓金丝绞瓜贮藏后期葫芦巴碱含量的降低。其中 0.4 kGy 辐照瓜贮藏 40~120 d, 葫芦巴碱含量始终

高于其它剂量辐照瓜, 且在 40 d 和 80~120 d 葫芦巴碱含量均显著高于对照瓜 ( $P>0.05$ ), 说明该剂量电子束辐照能有效维持金丝绞瓜葫芦巴碱的含量。

酚类物质具有抗菌功能, 其含量高、低是评价果实抗病性强、弱的指标之一。图 6b 所示, 对照瓜的总酚含量在贮藏第 80 天达到最高, 辐照瓜的总酚含量不断下降。贮藏第 20 天, 0.4 kGy 和 0.5 kGy 辐照瓜多酚含量均显著高于对照瓜 ( $P<0.05$ ), 0.3 kGy 辐照瓜多酚含量虽低于对照瓜, 但无显著性差异 ( $P>0.05$ ), 说明电子束剂量越高对多酚的诱导效应越强, 可能是辐照处理会抑制微生物的

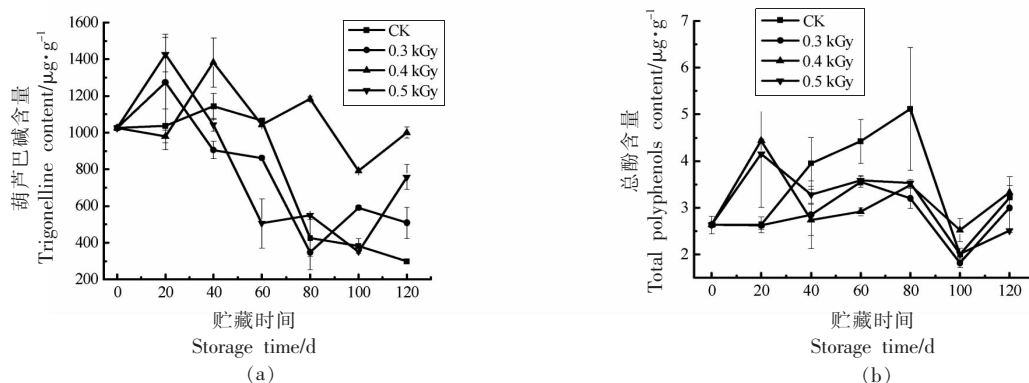


图6 高能电子束辐照对瓜丝葫芦巴碱(a)和总酚(b)含量的影响

Fig.6 Effects of high energy electron beam processing on trigonelline (a) and total polyphenols (b) content of silk of spaghetti squash

生长,微生物的生长繁殖会诱导果蔬多酚的生成。与黄天姿等<sup>[28]</sup>发现辐照处理会在一定程度抑制猕猴桃中灰葡萄孢霉菌的生长,导致辐照组多酚含量低于对照组的结果一致。

## 2.7 高能电子束处理对瓜丝 MDA 含量和 PAL 活性的影响

MDA 含量可衡量果肉细胞受到伤害的程度,MDA 含量越高,果实膜脂氧化程度越大。如图 7a 所示,不同剂量高能电子束辐照的金丝绞瓜在贮藏过程中丙二醛均整体上升。0.3 kGy 辐照瓜贮藏 0~60 d,MDA 含量均小于对照瓜,而贮藏 80~120 d 的 MDA 含量均大于对照瓜,且贮藏 100 d 和 120 d 均与对照瓜差异显著( $P<0.05$ )。0.5 kGy 辐照瓜贮藏 40~80 d,MDA 含量均大于对照瓜,且无显著差异( $P>0.05$ )。贮藏 0~100 d,0.4 kGy 辐照瓜

MDA 含量均小于对照瓜,且在第 20,40 d 和 80 d 差异显著( $P<0.05$ )。综上,0.4 kGy 辐照瓜膜脂质过氧化程度较低,该剂量辐照对金丝绞瓜损伤较小。

PAL 是催化苯丙烷类代谢的关键酶和限速酶,可增强果实抗病性。如图 7b 所示,对照瓜 PAL 活性基本呈先升高后降低的趋势,0.3 kGy 和 0.4 kGy 辐照瓜均呈整体上升趋势,0.5 kGy 辐照瓜呈先上升后下降再上升趋势。0.4 kGy 辐照瓜的 PAL 活性高于 0.3 kGy 辐照瓜的,分别在贮藏第 20,100,120 天差异显著( $P<0.05$ ),在贮藏 80~120 d, PAL 活性大于 0.5 kGy 辐照瓜,且 120 d 时 0.4 kGy 辐照瓜的 PAL 活性分别是对照瓜、0.3 kGy 和 0.5 kGy 辐照瓜的 1.84,1.61 倍和 1.61 倍。0.4 kGy 辐照瓜贮藏过程中可以保持较高的 PAL 活性。

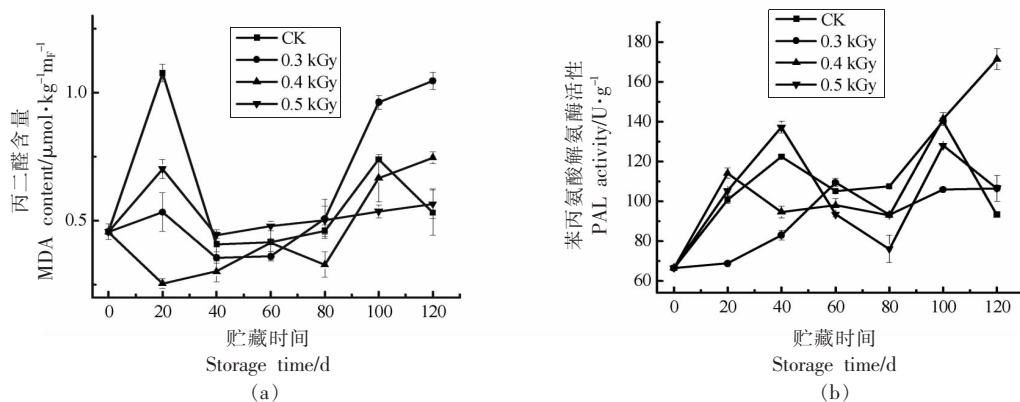


图 7 高能电子束辐照对瓜丝 MDA 含量(a)和 PAL 活性(b)的影响

Fig.7 Effects of high energy electron beam processing on MDA content (a) and PAL activity (b) of silk of spaghetti squash

## 2.8 高能电子束处理对瓜丝 SOD 和 POD 活性的影响

SOD 酶活增强与抗病性呈正相关。如图 8a 所示,0.4 kGy 辐照瓜的 SOD 活性高峰是第 60 天,较其它处理瓜提前 20 d,且分别是对照瓜、0.3 kGy 和 0.5 kGy 辐照瓜的 1.14,1.01 倍和 1.02 倍。0.4 kGy 辐照瓜的 SOD 活性在整个贮藏期均大于对照瓜,且在贮藏第 40,60,120 天均显著大于对照瓜( $P<0.05$ )。说明 0.4 kGy 高能电子束辐照可显著增强 SOD 活性,诱导金丝绞瓜抗病性增强。

POD 活性用于衡量系统清除自由基的能力,与果实的抗病性密切相关。如图 8b 所示,对照瓜

和 0.4,0.5 kGy 辐照瓜的 POD 活性均呈先上升后下降的趋势,0.3 kGy 辐照瓜的 POD 活性变化较小,始终保持在 2.76~6.66 U/g。0.4 kGy 辐照瓜的 POD 活性高峰比对照瓜提前 20 d,两者的活性高峰间无显著差异( $P>0.05$ ),且除 80 d 外两者间的 POD 活性均无显著差异( $P>0.05$ )。0.5 kGy 辐照瓜的 POD 活性高峰比对照瓜提前 40 d,是对照瓜高峰的 2.84 倍,活性高峰间有极显著差异( $P<0.01$ ),且贮藏 20~60 d,两者间的 POD 活性均有极显著差异( $P<0.01$ )。可见,0.3 kGy 高能电子束辐照处理会降低金丝绞瓜的 POD 活性;0.4 kGy 辐照对瓜的 POD 活性影响不显著( $P>0.05$ ),会使其活性高

峰提前 20 d;0.5 kGy 辐照会极显著提高瓜的 POD 活性( $P<0.01$ ),使 POD 活性高峰提前 40 d,说明 0.5 kGy 高能电子束辐照的剂量过大,加速了瓜丝

自由基的积累,增加其 POD 活性。综上,维持金丝绞瓜 POD 活性的最适辐照剂量是 0.4 kGy。

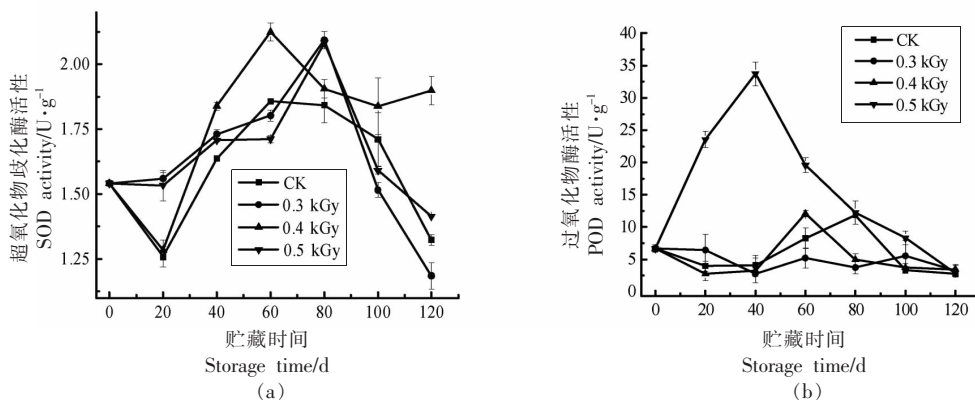


图 8 高能电子束处理对瓜丝 SOD(a)和 POD(b)活性的影响

Fig.8 Effects of high energy electron beam processing on SOD (a) and POD (b) activity of silk of spaghetti squash

## 2.9 高能电子束处理对瓜丝细胞超微结构的影响

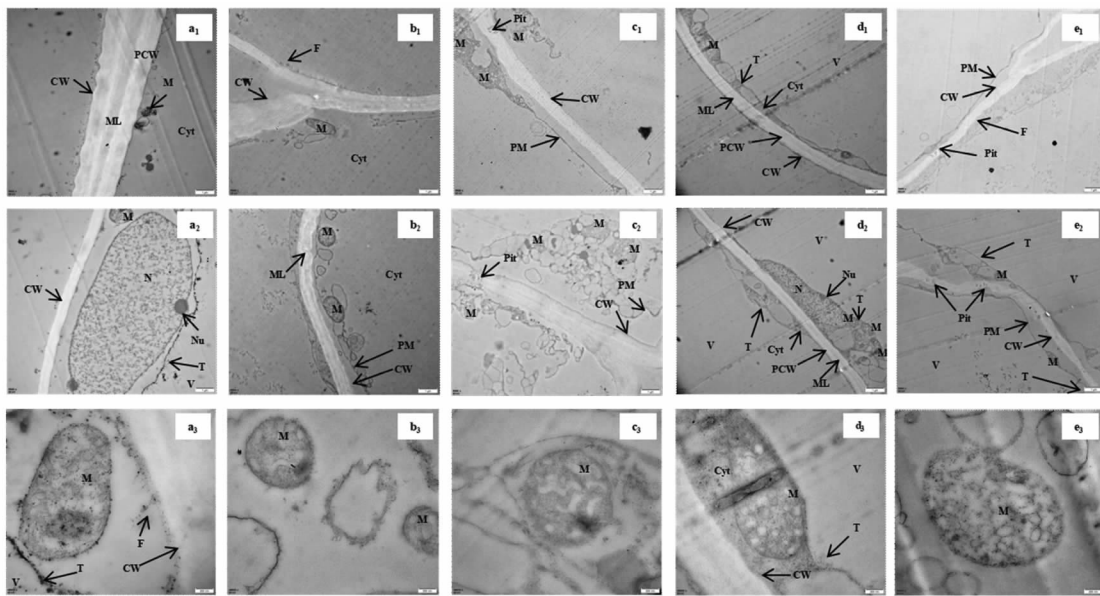
透射电镜显示,采收初期,金丝绞瓜丝相邻两细胞所共有的细胞壁为 3 层,即中胶层与两侧初生壁,中胶层为一薄的高电子密度的暗层,没有次生壁。瓜丝细胞壁厚度一致,结构完整,呈明显的明-暗-明分区结构,细胞膜结构完整,原生质层紧贴细胞壁(图 9a<sub>1</sub>、9a<sub>2</sub>);细胞核结构清晰完整,细胞器无降解(图 9a<sub>2</sub>);线粒体结构清晰,无损伤。(图 9a<sub>3</sub>)。

采收贮藏 100 d,对照组瓜丝细胞壁降解并弯曲变形,中胶层电子密度降低,微纤丝呈絮状物降解,细胞内有黑色絮状物(图 9b<sub>1</sub>);发生质壁分离,液泡膜破损,液泡及细胞器内含物与细胞质互溶(图 9b<sub>2</sub>);线粒体降解,出现小泡(图 9b<sub>3</sub>)。0.3 kGy 辐照瓜瓜丝细胞壁轻微弯曲变形,中胶层降解严重,且有纹孔出现,质壁分离严重(图 9c<sub>1</sub>、9c<sub>2</sub>);细胞器降解严重,液泡膜个别破裂,内容物与原生质互溶(图 9c<sub>2</sub>);线粒体结构保持较为完好(图 9c<sub>3</sub>)。0.4 kGy 辐照瓜细胞壁结构致密,厚度一致,呈明显的明-暗-明分区结构,中胶层均匀而连续,细胞膜结构完整,无质壁分离(图 9d<sub>1</sub>);液泡膜完整,液泡无破损现象,细胞核结构完整,细胞器降解不严重(图 9d<sub>2</sub>);线粒体结构保持完好,内脊和双层膜结构清晰可辨(图 9d<sub>3</sub>、9d<sub>2</sub>)。0.5 kGy 辐照瓜细胞

壁严重变形,中胶层基本降解,微纤丝松懈,部分位置有纹孔出现,有质壁分离现象(图 9e<sub>1</sub>、9e<sub>2</sub>);液泡膜完整,液泡无破损,而细胞器降解严重(图 9e<sub>2</sub>);部分线粒体内含物与原生质互溶,内部结构消失,(图 9e<sub>3</sub>)。综上,0.4 kGy 高能电子束辐照在瓜丝贮藏后期可保持细胞壁完整性,阻止质壁分离的发生,保持液泡、细胞核和线粒体结构完整,降低其它细胞器的降解程度,是适宜的辐照剂量。

## 3 结论

本试验降低了辐照剂量和辐照次数,分别以 0.3,0.4,0.5 kGy 剂量高能电子束辐照处理金丝绞瓜的两个面,探究金丝绞瓜在 120 d 内贮藏品质和生理特性的变化,结果发现未经辐照的金丝绞瓜贮藏 80 d 的腐烂率在 50%以上,而 3 种剂量高能电子束辐照的金丝绞瓜均可达 120 d,说明高能电子束辐照可显著降低金丝绞瓜的腐烂率( $P<0.05$ )。辐照后脆度增加,可滴定酸含量无显著变化。辐照无法抑制金丝绞瓜呼吸强度,可降低瓜丝的亮度和硬度,加速糖化。3 种辐照剂量中 0.3 kGy 辐照处理对金丝绞瓜中葫芦巴碱含量、总酚含量、SOD 和 POD 活性影响较小,说明剂量没有达到延长贮藏期的要求。0.5 kGy 辐照处理引起金丝绞瓜细胞变形,细胞器降解,部分线粒体内部结构消失,说明辐照剂量过高;而 0.4 kGy 辐照处理



注:a. 贮藏第 0 天对照瓜; b~e. 分别表示贮藏第 100 天的对照瓜和 0.3, 0.4, 0.5 kGy 辐照瓜; 下标 1~3. 分别表示重点观察的细胞壁(9 300 倍)、细胞器状态(9 300 倍)和线粒体(49 000 倍)。CW: 细胞壁; ML: 中胶层; PCW: 初生壁; PM: 细胞质膜; F: 微纤丝; Cyt: 原生质; Pit: 纹孔; M: 线粒体; V: 液泡; T: 液泡膜; N: 细胞核; Nu: 核仁。

图 9 高能电子束处理对瓜丝细胞超微结构的影响

Fig.9 Effects of high energy electron beam processing on cell ultrastructure of silk of spaghetti squash

使金丝绞瓜中葫芦巴碱含量、总酚含量、PAL 活性维持较高水平,可溶性固形物含量降低,丙二醛积累量减少,SOD 活性显著提高( $P < 0.05$ ),保持瓜丝细胞超微结构的完整性,因此 0.4 kGy 是最适宜的辐照剂量。

本研究证实高能电子束辐照对金丝绞瓜有积极和消极两个方面的影响。适宜剂量的辐照(0.4 kGy)可使金丝绞瓜的贮藏期延长 2 个月,并有效保持其生理特性及品质特性,提升其利用周期。电子束辐照技术成熟、成本低、无污染,有望广泛用于果蔬的贮藏保鲜。

### 参 考 文 献

- [1] 庄小林. 泗县金丝绞瓜绿色高效栽培技术[J]. 现代农业科技, 2019, 750(16): 73-74.  
ZHANG X L. Green and high-efficiency cultivation techniques of spaghetti squash in Sixian county[J]. Modern Agricultural Technology, 2019, 750(16): 73-74.
- [2] 李阳, 马晶, 高月霞, 等. 泗县金丝绞瓜高效栽培和贮藏技术[J]. 北方园艺, 2020, 466(19): 169-173.
- [3] LI Y, MA J, GAO Y X, et al. High-efficiency cultivation and storage technology of spaghetti squash in Sixian county[J]. Northern Horticulture, 2020, 466(19): 169-173.
- [4] WADAS W, MIODUSZEWSKA H, KALINOWSKI K. Effects of selected agronomical factors on the content of health-promoting compounds in spaghetti squash (*Cucurbita pepo* L. subsp. *pepo*)[J]. Folia Horticulturae, 2012, 24(1): 33-39.
- [5] WADAS W, MIODUSZEWSKA H. The effect of the sowing date on the content of carotenoids and L-ascorbic acid in spaghetti squash (*Cucurbita pepo* L.)[J]. Acta Scientiarum Polonorum-hortorum Cultus, 2011, 10(1): 41-48.
- [6] STEPIEN B. Methods and apparatuses for preparing spaghetti squash: US15/265416[P]. 2016-09-14.
- [7] [s.n.]. 崇明金瓜吃法小妙招 [J]. 长江蔬菜, 2021, 519(1): 15.  
[s.n.]. Chongming gourd eating tips[J]. Yangtze River Vegetables, 2021, 519(1): 15.
- [8] CASTAGNINO A M, SASTRE-VÁZQUEZ P, DÍAZ K E, et al. Adaptación de una nueva hortaliza (*Cucurbita pepo* var. vegetable spaghetti) a difer-



- entes condiciones de cultivo [J]. Revista Chapingo Serie Horticultura, 2008, 14(3): 292-299.
- [8] 张春静, 张兴洪, 钱春桃. 美国金瓜春季爬地高效栽培技术[J]. 现代农业科技, 2020, 761(3): 76, 82.
- ZHANG C J, ZHANG X H, QIAN C T. High efficient cultivation techniques of American gourd in spring [J]. Modern Agricultural Technology, 2020, 761(3): 76, 82.
- [9] 郭成君. 泗县金丝绞瓜的特征特性及高产栽培技术[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(1): 48-49.
- GUO C J. Characteristics and high-yield cultivation techniques of spaghetti squash in Sixian County [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(1): 48-49.
- [10] WADAS W, KALINOWSKI K. The effect of selected agricultural factors on the yielding of spaghetti squash (*Cucurbita pepo* L.) [J]. Acta Scientiarum Polonorum-hortorum Cultus, 2010, 9(2): 93-101.
- [11] 朱爱萍, 李虹, 朱忠南, 等. 耐贮金瓜种质资源的鉴定与筛选初报[J]. 农产品加工, 2019, 488(18): 51-53.
- ZHU A P, LI H, ZHU Z N, et al. Preliminary report on identification and screening of storable golden melon germplasm resources [J]. Processing of agricultural products, 2019, 488(18): 51-53.
- [12] 茅惠昌, 李虹, 朱爱萍, 等. 硝酸钙肥对提高崇明金瓜果实耐贮性研究[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(7): 66, 70.
- MAO H C, LI H, ZHU A P, et al. Study on calcium nitrate fertilizer for improving the storage ability of Chongming gourd fruit [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(7): 66, 70.
- [13] 张莹, 朱加进. 电子束辐照技术及其在食品工业中的应用研究[J]. 食品与机械, 2013, 29(1): 236-239, 258.
- ZHANG Y, ZHU J J. Review of development of electron accelerators on foods [J]. Food and Machinery, 2013, 29(1): 236-239, 258.
- [14] 中华人民共和国卫生部. 辐照新鲜水果、蔬菜类卫生标准: GB 14891.5-1997[S]. 北京: 中华人民共和国卫生部, 1997: 454-456.
- Ministry of Health of the People's Republic of China. Hygienic standard for irradiated fresh fruits and vegetables: GB14891.5-1997[S]. Beijing: Ministry of Health of the People's Republic of China, 1997: 454-456.
- [15] GIRENNAVAR B, JAYAPRAKASHA G K, MCLIN S E, et al. Influence of electron-beam irradiation on bioactive compounds in grapefruits (*Citrus paradisi* Macf.) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(22): 10941-10946.
- [16] NAM H A, RAMAKRISHNAN S R, KWON J H. Effects of electron-beam irradiation on the quality characteristics of mandarin oranges (*Citrus unshiu* (Swingle) Marcov) during storage [J]. Food Chemistry, 2019, 286: 338-345.
- [17] YURTTAS Z S, MOREIRA R G, CASTELL-PEREZ E. Combined vacuum impregnation and electron-beam irradiation treatment to extend the storage life of sliced white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) [J]. Journal of Food Science, 2014, 79(1): 39-46.
- [18] 周任佳, 乔勇进, 王海宏, 等. 高能电子束辐照处理对鲜切哈密瓜品质及微生物控制效果的影响[J]. 保鲜与加工, 2011, 11(6): 27-30, 36.
- ZHOU R J, QIAO J Y, WANG H H, et al. Effect of high energy electron beam irradiation on quality and microorganism control of fresh-cut hami melon [J]. Preservation and Processing, 2011, 11(6): 27-30, 36.
- [19] 李阳, 沙飞, 高月霞, 等. 高能电子束辐照对金丝绞瓜的保鲜效果[J]. 现代食品科技, 2021, 37(2): 171-182.
- LI Y, SHA F, GAO Y X, et al. Preservation effects of high energy electron beam irradiation on spaghetti squash (*Cucurbita pepo* L. subsp. pepo) [J]. Modern Food Technology, 2021, 37(2): 171-182.
- [20] 徐雅琴, 王翀, 崔崇士. 高效液相色谱法测定南瓜果肉中葫芦巴碱含量[J]. 食品科学, 2010, 31(10): 209-211.
- XU Y Q, WANG C, CUI C S. HPLC determination of trigonelline in pumpkin pulp [J]. Food Science, 2010, 31(10): 209-211.
- [21] 史萌, 许立兴, 林琼, 等. UV-C 处理抑制马铃薯贮藏期发芽及相关机理研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 242-247, 252.
- SHI M, XU L X, LIN Q, et al. Study on UV-C treatment inhibits germination and related mechanism of potato during storage [J]. Food Industry Technology, 2019, 40(13): 242-247, 252.
- [22] 曹健康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验

- 指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007: 154–155.
- CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Physiological and biochemical experiment guidance for fruits and vegetables after harvest[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 154–155.
- [23] 王鸿飞, 绍兴锋. 果品蔬菜贮藏与加工实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 65–67.
- WANG H F, SHAO X F. Experimental guidance on storage and processing of fruits and vegetables[M]. Beijing: Science Press, 2012: 65–67.
- [24] 高俊凤. 植物生理学实验技术[M]. 西安: 世界图书出版公司, 2000: 25–28.
- GAO J F. Plant physiology experiment technology[M]. Xi'an: World Book Publishing Company, 2000: 25–28.
- [25] 郭一丹, 李奎, 蔚江涛, 等. 电子束和<sup>60</sup>Co $\gamma$ -射线辐照对冬枣的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 276–281.
- GUO Y D, LI K, WEI J T, et al. Effects of electron beam and <sup>60</sup>Co $\gamma$ -ray irradiations on the fresh-keeping of winter jujube[J]. Food Industry Technology, 2021, 42(6): 276–281.
- [26] 杜庆平, 李伶俐, 徐强, 等. 加工类型黄瓜果实脆度与其组织结构的关系[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(5): 940–942.
- DU Q P, LI L L, XU Q, et al. Studies on the relations between fruit crispness and the structure of pickling-type cucumber (*Cucumis sativus* L.) [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(5): 940–942.
- [27] 刘春香, 何启伟, 于占东. 黄瓜质地与组织结构、纤维素及果胶含量的关系[J]. 中国蔬菜, 2003(5): 10–14.
- LIU C X, HE Q W, YU Z D. The relationship between cucumber texture and tissue structure, cellulose and pectin content [J]. Chinese Vegetables, 2003(5): 10–14.
- [28] 黄天姿, 梁锦, 王丹, 等. 电子束辐照对猕猴桃品质及抗性系统的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 70–76.
- HUANG T Z, LIANG J, WANG D, et al. Effect of electron beam irradiation on quality and resistance system of kiwifruit[J]. Food Science, 2021, 42(9): 70–76.

### Effects of High Energy Electron Beam Irradiation on Storage Characteristics of *Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo*

Gao Yuexia, Peng Xue, Li Yang, Yang Chenyu, Ren Yamei\*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi)

**Abstract** Objective: To determine the optimal dose of high energy electron beam irradiation to treat the *Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo* and improve its storage characteristics. Method: This experiment irradiated the two sides of *Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo* with high energy electron beams at doses of 0.3, 0.4 kGy and 0.5 kGy respectively. Results: 0.4 kGy high energy electron beam irradiation can reduce the rotting rate of *Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo* by 16.18%, its total phenol content remained at a high level, the soluble solid content decreased, and the accumulation of malondialdehyde decreased. And the respiratory intensity, weight loss rate, color saturation, titratable acid and peroxidase activity were not significantly different from the control melon ( $P>0.05$ ). At this dose, the peak activity of superoxide dismutase was 1.14 times that of the control melon, and the ultrastructure of the melon silk cell was complete. When stored for 120 days, the brittleness, trigonelline content and phenylalanine ammonia-lyase activity were 1.58, 3.34 times and 1.84 times higher than those of the control melon, respectively. Conclusion: So 0.4 kGy irradiated *Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo* two sides is the suitable radiation dose, it is expected to be used for the storage and preservation of *Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo*.

**Keywords** *Cucurbita pepo* L. subsp. *Pepo*; high energy electron beam; storage characteristics; disease resistance