

# 高能电子束辐照对金丝绞瓜的保鲜效果

李阳<sup>1</sup>, 沙飞<sup>2</sup>, 高月霞<sup>1</sup>, 李佳佳<sup>1</sup>, 彭雪<sup>1</sup>, 任亚梅<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

(2. 安徽省泗县虹城科技农业开发有限公司, 安徽泗县 234300)

**摘要:** 为探究高能电子束辐照对金丝绞瓜保鲜效果及贮藏品质的影响。本研究采用 0 kGy (CK)、0.4 kGy、0.6 kGy 和 0.8 kGy 不同剂量高能电子束分别辐照金丝绞瓜的四个面, 置于温度  $9\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度 65%~70% 冷库中贮藏, 研究不同剂量高能电子束对金丝绞瓜不同部位贮藏品质的影响。结果表明, 与对照瓜相比, 该辐照促进了成熟金丝绞瓜的呼吸作用, 其呼吸强度是对照瓜的 2.75 倍 ( $p<0.05$ ); 不同部位营养物质消耗加快, 失重率上升, 是对照瓜的 2.90 倍; 同时破坏了细胞膜完整性, 丙二醛积累较多, 加速软化衰老进程, 使其硬度、脆度和水分含量降低, 口感和风味下降。贮藏第 15 d, 对照瓜硬度是辐照瓜的 2.25 倍, 贮藏末期辐照瓜腐烂率是对照瓜的 2.16 倍 ( $p<0.05$ ), 但可滴定酸和 Vc 含量并不受辐照剂量的影响 ( $p>0.05$ )。综上所述, 0.4 kGy、0.6 kGy 和 0.8 kGy 的剂量照射 4 次对金丝绞瓜的品质具有积极和消极影响, 该剂量可对因气候原因不能正常成熟、或者采收稍早急需食用的金丝绞瓜起催熟作用, 进一步研究可降低辐照剂量或减少辐照次数, 有望用于金丝绞瓜的采后贮藏保鲜。

**关键词:** 高能电子束; 金丝绞瓜; 贮藏品质; 生理特性

文章编号: 1673-9078(2021)02-171-182

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.2.0694

## Effects of High Energy Electron Beam Irradiation on the Preservation of Spaghetti Squash

LI Yang<sup>1</sup>, SHA Fei<sup>2</sup>, GAO Yue-xia<sup>1</sup>, LI Jia-jia<sup>1</sup>, PENG Xue<sup>1</sup>, REN Ya-mei<sup>1</sup>

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China) (2.Hongcheng Science and Technology Agricultural Development Co. Ltd., of Sixian County Anhui Province, Sixian 234300, China)

**Abstract:** In order to study the effects of high electron beam irradiation on preservation and storage quality of spaghetti squash, the four sides of the spaghetti squash were irradiated with different doses of high-energy electron beam: 0 kGy (CK), 0.4 kGy, 0.6 kGy and 0.8 kGy, then stored at  $9\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , RH 65%~70% for use. Effects of different high-energy electron beam doses on the storage quality of different parts of the spaghetti squash were studied. Results showed that the respiration intensity of mature spaghetti squash was promoted by the irradiation, whose respiration intensity was 2.75 times that of the control ( $p<0.05$ ). The nutrient consumption of different parts was accelerated, and the weight loss rate was 2.90 times higher than that of control. Damage of cell membrane integrity led to more MDA accumulation, which promoted maturity, accelerated the process of softening and aging, decreased its hardness, brittleness and moisture content, decreased taste and flavor quality, and increased decay rate. On the 15th day of storage, the hardness of control was 2.25 times that of the irradiated spaghetti squash, and the rotting rate of the irradiated spaghetti squash was 2.16 times that of control at the end of storage ( $p<0.05$ ); however, the contents of titratable acid and Vc were not affected by the irradiation dose ( $p>0.05$ ). In a word, the doses of 0.4 kGy, 0.6 kGy and 0.8 kGy irradiation for 4 times had a positive and negative impact on the quality of spaghetti squash. The dose could accelerate the ripening of spaghetti squash which could not mature normally due to climatic reasons, earlier harvest or needs for urgent eating. Further research can reduce the irradiation dose or times, which is expected to be used for the postharvest storage and preservation of the spaghetti squash.

引文格式:

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,2020, 37(2):171-182

LI Yang, SHA Fei, GAO Yue-xia, et al. Effects of high energy electron beam irradiation on the preservation of spaghetti squash [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 37(2): 171-182

收稿日期: 2020-07-23

基金项目: 西北农林科技大学校企合作项目 (K4030219015)

作者简介: 李阳 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工及贮藏; 通讯作者: 任亚梅 (1970-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬深加工与贮藏

**Key words:** high energy electron beam; spaghetti squash; storage quality; physiological characteristics

金丝绞瓜 (*Cucurbita pepo* L. subsp. *pepo*) 原产于美洲南部<sup>[1]</sup>, 目前在我国南方广泛种植, 其果肉清香、质脆可口、营养丰富, 誉有“绿色保健果蔬”之美称<sup>[2]</sup>。近年来金丝绞瓜种植面积逐渐增加, 但生长周期较长, 一方面采收后在贮藏期间易发生白霉病、灰霉病和黑腐病等病害, 导致贮藏品质大幅下降<sup>[3]</sup>。另一方面失水也是影响金丝绞瓜品质变化的主要重要原因。本实验室研究发现金丝绞瓜采收时水分含量较高, 其瓜瓤、瓜丝和瓜皮的水分含量分别为 95.91、95.98 和 94.58 g/100 g。采后由于呼吸作用引起有机物消耗及蒸发失水, 组织细胞萎焉, 细胞膜透性增大, 脂膜过氧化作用增强, 硬度明显降低, 引起一系列不利的生理代谢反应。目前金丝绞瓜大多常温贮藏, 不能有效抑制生命活动和微生物病害的发生。因此研究有效提高贮藏品质的保鲜技术是保障金丝绞瓜市场需求的关键步骤。

近年辐照处理作为一种新型技术得到了越来越多的研究, 电子束辐照已被证明是许多新鲜农产品的有效保鲜方法, 在延长蓝莓、哈密瓜、葡萄柚、蘑菇及茼蒿等农产品保鲜期、消毒和去污等方面具有良好的应用前景<sup>[4-8]</sup>。低剂量电子束辐照可将致病微生物杀死, 控制采后腐烂, 延长保质期; 中剂量电子束辐照具有杀菌和保鲜作用; 高剂量电子束辐照可促进果蔬成熟。每年 11 月份采收的金丝绞瓜, 因气温低, 阴雪天气多等不利的气候条件, 瓜农不得不提早采收, 但金丝绞瓜成熟度不够, 此时可采用高剂量电子束辐照对其处理, 使其达到最佳食用品质并及早供应市场。但高剂量辐照会对已成熟的果蔬造成不利影响, 如降低果蔬硬度、营养物质含量和感官品质, 严重情况甚至对果蔬组织细胞产生不可逆损伤, 导致果蔬耐贮性降低, 短时间内快速腐烂。杨俊丽等<sup>[9]</sup>研究发现 5 kGy 电子束辐照导致草莓色泽消退、果实塌软, 草莓硬度和感官品质迅速下降。王秋芳等<sup>[10]</sup>研究发现 1.5 kGy 和 2.5 kGy 电子束辐照对巨峰葡萄细胞结构造成损伤, 加快其衰老进程, 果梗易褐变, 葡萄色泽、形态和营养成分在贮藏期间也不断损失。因此金丝绞瓜在冷藏前应通过相应试验以确定出有效的辐照催熟或保鲜剂量, 对其不同需求的品质调控将起到积极作用。

辐照处理具有去污、消毒、杀菌、保鲜等作用, 而金丝绞瓜采后品质劣变的问题也一直困扰着其产业的发展, 因此我们推测高能电子束辐照技术可能有助于缓解采后贮藏金丝绞瓜的劣变。目前尚未有关于高能电子束辐照技术应用到采后贮藏金丝绞瓜的研究报

道。本研究主要目的是探讨辐照处理对金丝绞瓜贮藏过程中品质和生理特性的潜在影响, 参照葫芦科哈密瓜辐照剂量的基础上<sup>[6,11]</sup>, 采用 0.4、0.6 和 0.8 kGy 三个辐照剂量, 因辐照的穿透距离只有 5.00 cm, 金丝绞瓜体积和重量较大, 一般为 1.50~2.50 kg, 因此辐照了 4 个面。粮食及农业组织、国际原子能机构和国家食品法典委员等均认为食品的总体辐照剂量小于 10 kGy 时, 辐照食品不会出现任何毒理学危害、营养和微生物问题, 因此本试验所选的剂量对金丝绞瓜是安全的<sup>[12,13]</sup>。本试验研究高能电子束辐照对其采后未熟瓜的催熟作用或贮藏保鲜效果, 研究结果为高能电子束辐照技术在金丝绞瓜采后贮藏过程中品质调控提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试材

金丝绞瓜于 2019 年 6 月 15 日采收于安徽省泗县草沟镇秦桥村种植基地, 采摘时已达到商业成熟度。采收后预冷, 挑选大小均一、成熟度一致、无病虫害的金丝绞瓜进行辐照。由传动装置送至电子扫描窗下, 分别在 0.4 kGy、0.6 kGy 和 0.8 kGy 三个辐照剂量下对其照射, 每个金丝绞瓜的四个面均辐照 1 次。将辐照后的金丝绞瓜和未辐照的金丝绞瓜 (CK) 均置于温度  $9\pm 1$  °C, 湿度 65%~70% 的冷库中贮藏。

### 1.2 仪器与设备

行波直线型电子加速器, 额定能量为 10 MeV、功率 27 W、束流 2 mA、扫描宽度 800 cm, 陕西方圆高科实业有限公司; TAXT PLUS/50 物性测定仪, 英国 SMS 公司; LC-20A 高效液相色谱, 岛津企业管理中国有限公司; HC-3018R 高速冷冻离心机, 安徽中科中佳科学仪器有限公司; 紫外可见分光光度计, 上海仪电分析仪器有限公司。

### 1.3 测定指标及方法

$$(1) \text{腐烂率: } \text{腐烂率}/\% = \frac{\text{腐烂绞瓜数}}{\text{总瓜数}} \times 100\%$$

$$(2) \text{失重率: } \text{失重率}/\% = \frac{\text{初瓜重} - \text{贮后瓜重}}{\text{初瓜重}} \times 100\%$$

(3) 硬度: 采用 TAXT PLUS/50 物性测定仪测定, 将金丝绞瓜切成同样大小的样品块 (2.00 cm×2.00 cm×2.00 cm) 在 TPA 的模式下测定。



(4) 脆度: 每个处理挑取 15 根长短、粗细一致的瓜丝, 采用 TAXT PLUS/50 物性测定仪测定, 选用 A/CKB 轻刀片探头, 操作模式选择压缩返回模式, 下压程度 99%, 触发力 5 g<sup>[14]</sup>。

(5) 呼吸强度: 使用 CO<sub>2</sub> 分析仪测定<sup>[15]</sup>。

(6) 可滴定酸含量: 采用氢氧化钠溶液滴定法。

(7) Vc 含量: 参照李国秀等的高效液相色谱法, 略有改进<sup>[16]</sup>。

(8) 过氧化物酶 (POD) 活性: 参照曹建康等的愈创木酚法, 略有改进<sup>[17]</sup>。

(9) 丙二醛含量: 参照曹建康等的硫代巴比妥酸比色法, 略有改进<sup>[17]</sup>。

(10) 多酚氧化酶 (PPO) 活性: 参考曹建康等的邻苯二酚比色法<sup>[17]</sup>。

(11)  $\beta$ -1,3-葡聚糖酶 (GLU) 活性: 参考曹建康等的方法<sup>[15]</sup>。

(12) 总酚含量: 参照谢敏的福林酚法<sup>[18]</sup>, 略有改进。

## 1.4 数据分析

数据表示为平均值 $\pm$ 标准差, 采用Excel和Origin 8.0, SPSS 20.0 软件分析数据和作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜腐烂率和失重率的影响

不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜贮藏过程中腐烂率的影响见图 1。随着贮藏时间延长, 金丝绞瓜的腐烂率随辐照剂量的增加而升高。0.4 kGy、0.6 kGy 辐照瓜和对照瓜在 30 d 前均无腐烂现象, 而 0.8 kGy 辐照瓜在 30 d 的腐烂率为 3.64%。贮藏至 45 d 时, 0.4 kGy、0.6 kGy 和 0.8 kGy 辐照瓜的腐烂率分别为 5.45%、9.09% 和 34.55%, 均显著高于对照瓜的腐烂率 1.85% ( $p<0.05$ )。贮藏 45~120 d 内, 各剂量辐照瓜腐烂率均高于对照瓜, 且辐照剂量越大, 腐烂率越高, 差异极显著 ( $p<0.01$ )。0.4 kGy、0.6 kGy 和 0.8 kGy 辐照的金丝绞瓜分别贮藏至 120、105 和 90 d 时, 腐烂率高达 50.00%, 停止贮藏。而对照瓜贮藏至 135 d 时腐烂率为 27.78%, 说明 0.4 kGy 电子束分别照射金丝绞瓜的 4 个面, 可能照射次数偏多导致剂量偏大, 金丝绞瓜组织结构破坏严重, 削弱了其抗病和抗衰老能力, 使其耐贮性降低, 易腐烂变质, 不利于贮藏保鲜。王秋芳等人<sup>[19]</sup>在研究高能电子束辐照对巨峰葡萄

品质的影响时发现 1.5 kGy 和 2.5 kGy 辐照剂量对于巨峰葡萄偏高, 此剂量的辐照加速了果实衰老, 加重了其腐烂和落粒情况, 与本试验研究结果一致。

图 1 表明, 随着贮藏时间延长, 金丝绞瓜的失重率逐渐升高, 失水程度加重, 且辐照剂量越大, 失重率越高, 说明辐照加速了绞瓜水分的损失<sup>[20]</sup>。0.4 kGy、0.6 kGy 和 0.8 kGy 辐照瓜的失重率在 30 d 时分别为 1.64%、1.98% 和 2.61%, 高于对照瓜的失重率 1.37%, 但差异不显著 ( $p>0.05$ )。0.8 kGy、0.6 kGy 和 0.4 kGy 辐照瓜分别从 30 d、45 d 和 75 d 开始失重率显著高于对照瓜 ( $p<0.05$ )。由于辐照剂量偏大破坏了细胞结构的完整性, 使细胞膜通透性增大, 细胞持水力下降, 绞瓜容易失水。贮藏至 90 d 时, 0.4 kGy、0.6 kGy 和 0.8 kGy 辐照瓜失重率分别为 12.59%、15.50% 和 22.97%, 而对照瓜的失重率仅为 4.34%, 差异极显著 ( $p<0.01$ )。可见各剂量辐照后的金丝绞瓜失水严重, 贮藏品质下降较快, 且各剂量对金丝绞瓜失重率的影响存在显著差异 ( $p<0.05$ )。陈志军等人<sup>[20]</sup>得出辐照剂量越高, 进口葡萄失重率越高的结果, 与本试验结果一致。

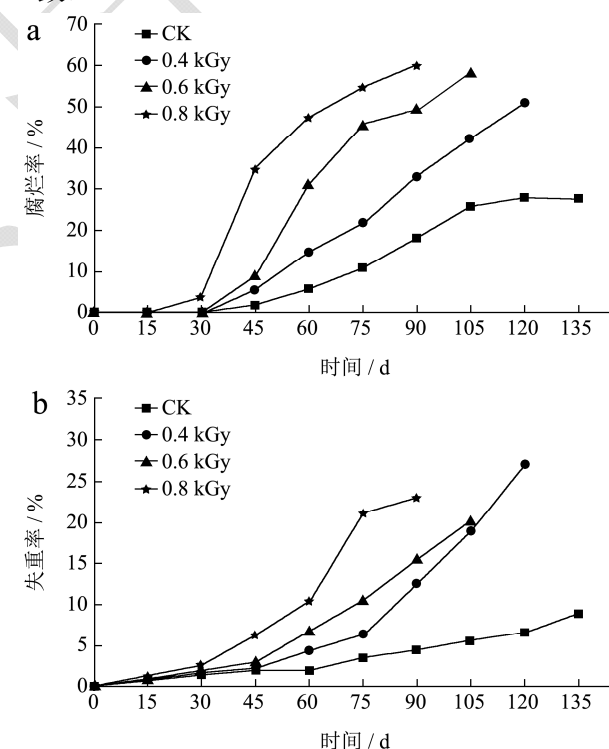


图 1 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜腐烂率 (a) 和失重率 (b) 的影响

Fig.1 Effects of different doses of high energy electron beam irradiation on rotting rate (a) and weight loss (b) of spaghetti squash

### 2.2 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜硬

## 度和脆度的影响

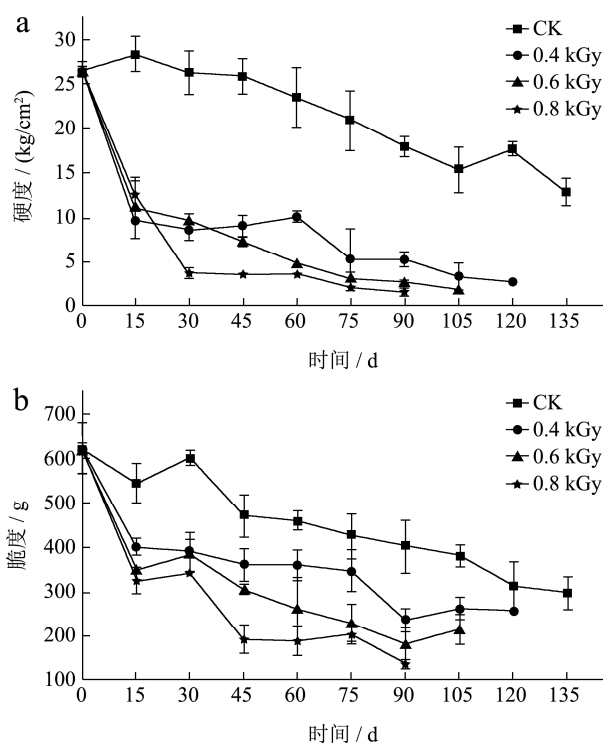


图2 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜硬度(a)和脆度(b)的影响

Fig.2 Effects of different doses high energy electron beam irradiation on firmness (a) and brittleness (b) of spaghetti squash

果实的硬度和脆度是衡量其新鲜状态和贮藏品质的重要指标,在贮藏过程中,金丝绞瓜的硬度和脆度均逐渐降低,这是其成熟衰老的表现。图2表明,辐照瓜因辐照剂量偏大促使其成熟,加快衰老进程,加速了绞瓜的软化。0.4 kGy、0.6 kGy和0.8 kGy辐照瓜在0~15 d时硬度迅速下降,分别降至9.64、10.90和12.63 kg/cm<sup>2</sup>,极显著低于对照瓜的硬度28.41 kg/cm<sup>2</sup> ( $p<0.01$ ),之后下降缓慢;瓜丝脆度分别降至398.87、348.98和322.44 g,低于对照瓜的脆度545.30 g,但差异不显著 ( $p>0.05$ )。贮藏30~60 d内,0.4和0.6 kGy辐照瓜硬度不存在显著差异 ( $p>0.05$ );60 d时0.4 kGy辐照瓜硬度显著高于0.6和0.8 kGy ( $p<0.05$ )。0.8 kGy、0.6 kGy和0.4 kGy辐照后金丝绞瓜的硬度在90 d、105 d和120 d分别为1.68、1.91和2.76 kg/cm<sup>2</sup>,极显著低于对照的17.66 kg/cm<sup>2</sup> ( $p<0.01$ ),且硬度均小于3.00 kg/cm<sup>2</sup>,失去贮藏价值,停止贮藏。在许多果蔬中均发现电子束辐照会引起其硬度下降,且硬度随辐照剂量的增加而下降<sup>[21-23]</sup>,其中用0.75 kGy和3 kGy的剂量分别辐照蓝莓,贮藏14 d其硬度下降从26.50%增

加至47.50%。可见辐照剂量越大,果实软化速度越快,与本试验金丝绞瓜硬度和脆度的变化一致。这可能是果蔬中的果胶成分和其他细胞结构构成物质对辐照较敏感,导致细胞壁降解;对染病的绞瓜可能是细菌通过破坏细胞内基质和减少中央液泡来降解糊状室的子实体,导致部分细胞塌陷和膨压损失<sup>[24]</sup>。

### 2.3 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜呼吸强度的影响

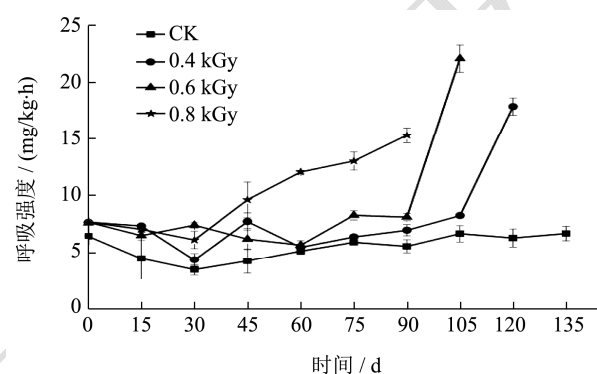


图3 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜呼吸强度的影响

Fig.3 Effects of different doses high energy electron beam irradiation on respiratory of spaghetti squash

果蔬采后呼吸作用越旺盛,果蔬品质下降越快,耐贮性越差。贮藏期间金丝绞瓜的呼吸强度呈逐渐升高趋势,且辐照剂量越大,呼吸强度越大,上升速度越快(图3)。在贮藏过程中,0.8 kGy辐照处理显著提高了金丝绞瓜的呼吸强度;贮藏至30 d时,0.8 kGy辐照瓜的呼吸强度为对照瓜的1.77倍;贮藏30~90 d期间,其呼吸强度显著高于对照瓜 ( $p<0.05$ );贮藏至90 d时其呼吸强度高达15.31 mg/(kg·h),对照瓜仅为5.57 mg/(kg·h),二者差异极显著 ( $p<0.01$ )。而0.4 kGy和0.6 kGy辐照瓜的呼吸强度在0~90 d内略高于对照瓜,差异不显著 ( $p>0.05$ ),0.4 kGy和0.6 kGy辐照后金丝绞瓜的呼吸强度在120 d和105 d分别为17.85和22.05 mg/(kg·h),是对照瓜呼吸强度的3.31和2.84倍。其他新鲜农产品例如其西兰花、茼蒿、芒果和蓝莓等,经电子束辐照后均提高了其呼吸强度,与本试验研究结果一致<sup>[5,8,25,26]</sup>。可能是高剂量辐照损伤了金丝绞瓜的组织细胞,且辐照产生大量自由基刺激了绞瓜的呼吸作用,导致呼吸强度逐渐升高<sup>[27]</sup>。

### 2.4 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜可滴定酸含量的影响

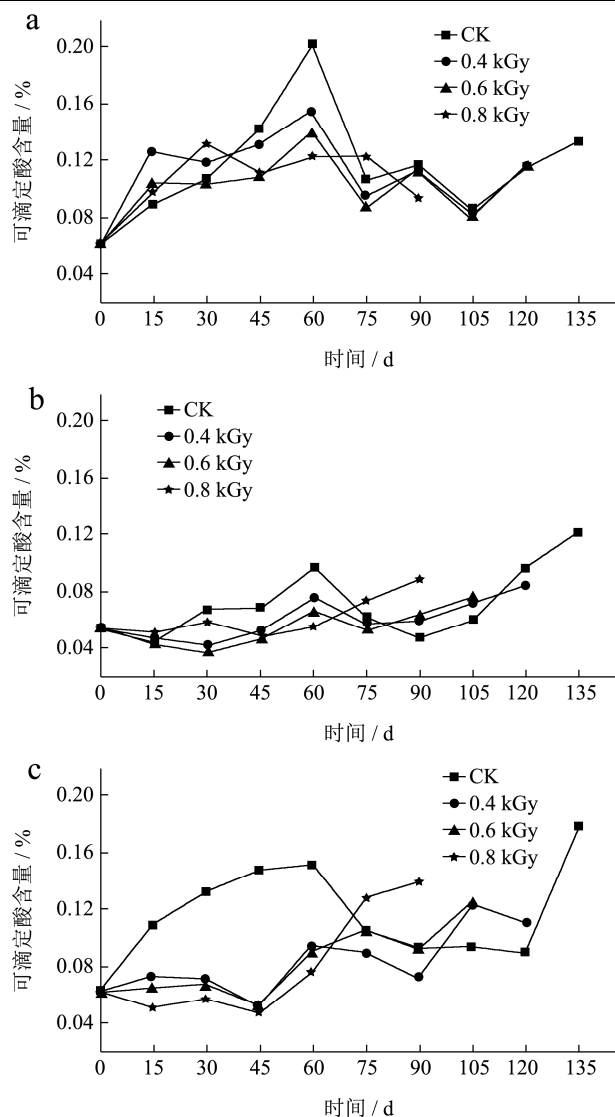


图4 不同剂量高能电子束辐照对瓜瓤(a)、瓜丝(b)和瓜皮(c)中可滴定酸含量的影响

Fig.4 Effects of different doses high energy electron beam irradiation on titratable acid content of flesh (a), silk (b) and skin (c) of spaghetti squash

不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜不同部位可滴定酸含量的影响见图4, 金丝绞瓜不同部位的可滴定酸含量均呈先上升后下降再上升的趋势, 且各部位可滴定酸含量大小的顺序为瓜瓤>瓜皮>瓜丝。贮藏前60 d内各辐照瓜不同部位的可滴定酸含量均低于对照瓜, 对照瓜瓜瓤、瓜丝和瓜皮在60 d时含量均最高, 含量分别为0.20%、0.10%和0.15%, 显著高于辐照瓜各部位的可滴定酸含量 ( $p<0.05$ ); 而60~120 d内辐照瓜与对照瓜均无显著差异 ( $p>0.05$ )。可见0~60 d内, 0.4 kGy、0.6 kGy和0.8 kGy剂量的电子束辐照可延缓金丝绞瓜可滴定酸含量的上升, 对保持金丝绞瓜原有风味具有重要作用; 贮藏60~90 d内, 有机酸作为新陈代谢的基质被消耗, 因此金丝绞瓜各部位可滴

定酸含量呈下降趋势, 与其呼吸强度快速上升密切相关<sup>[27,28]</sup>; 贮藏90~135 d内金丝绞瓜衰老速度加快, 各部位品质变差, 瓜瓤、瓜丝逐渐变粘、变酸, 因此可滴定酸含量又呈上升趋势。同时发现金丝绞瓜不同部位不同剂量辐照瓜之间的可滴定酸含量并无差异 ( $p>0.05$ ), 可见可滴定酸含量不受辐照剂量的影响, 其他新鲜农产品例如柑桔、葡萄和柠檬可滴定酸含量也不受电子束照射剂量影响, 与本试验的研究结果一致<sup>[29-31]</sup>。

## 2.5 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜 Vc 含量的影响

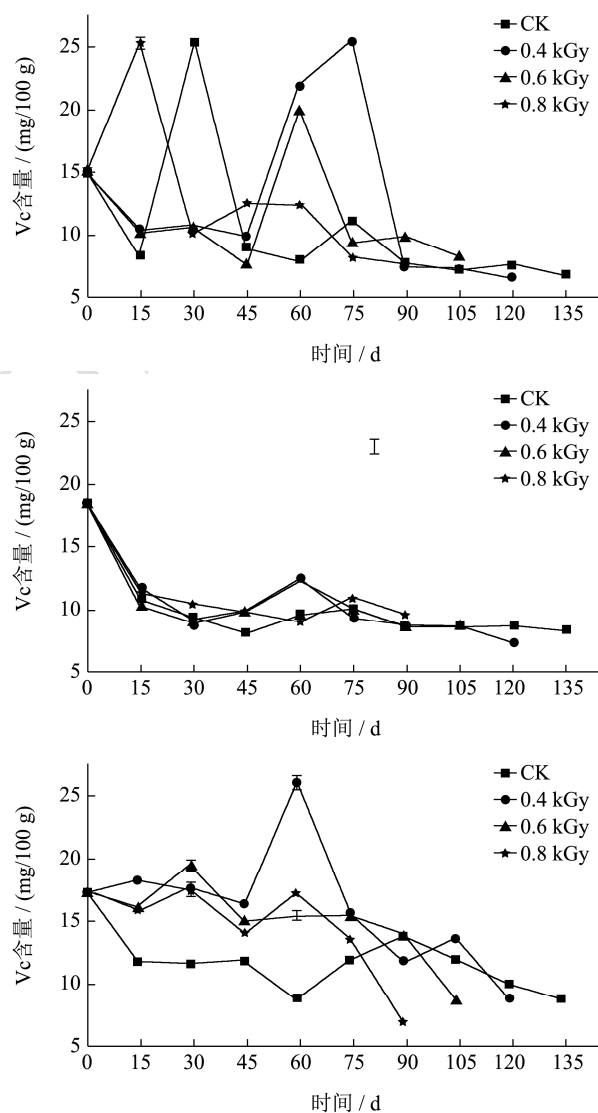


图5 不同剂量高能电子束辐照对瓜瓤(a)、瓜丝(b)和瓜皮(c)中Vc含量的影响

Fig.5 Effects of different doses high energy electron beam irradiation on Vc content of flesh (a), silk (b) and skin (c) of spaghetti squash

不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜不同部位 Vc 含量的影响见图 5。在贮藏过程中,瓜瓤和瓜皮中 Vc 含量均呈先上升后下降趋势,瓜丝中 Vc 含量呈逐渐下降趋势。0.4 kGy、0.6 kGy 和 0.8 kGy 辐照后的瓜瓤分别在 75 d、60 d 和 15 d Vc 含量最高,含量分别为 25.42、19.99 和 25.26 mg/100 g,与对照瓜相比,0.4 kGy 和 0.6 kGy 辐照后可延迟瓜瓤中 Vc 最高含量的出现,而 0.8 kGy 辐照瓜瓜瓤与之相反,原因是金丝绞瓜受到高水平的应激性损伤,暴露于电离辐射导致瓜瓤中 Vc 含量显著增加。贮藏 0~60 d 内,辐照瓜瓜皮中 Vc 含量均显著高于对照瓜,且 0.4 kGy 辐照瓜瓜皮在 60 d 时含量为 26.21 mg/100 g,显著高于其他辐照组瓜皮中 Vc 的含量 ( $p<0.05$ );贮藏 60~120 d 内略低于对照瓜,但差异不显著,说明 0.4 kGy、0.6 kGy 和 0.8 kGy 的辐照剂量对贮藏期间瓜皮的 Vc 含量有一定的保持作用,但剂量过大可加剧 Vc 的降解<sup>[32]</sup>。贮藏期内辐照瓜和对照瓜瓜丝中 Vc 含量并无显著差异 ( $p>0.05$ ),说明电子束辐照对瓜丝中 Vc 含量影响较小<sup>[33]</sup>。同时各辐照瓜之间的瓜瓤、瓜皮和瓜丝中 Vc 含量均无显著差异 ( $p>0.05$ ),说明金丝绞瓜各部位中 Vc 含量不受辐照剂量的影响。这与 Gomes C 等人<sup>[25]</sup>用 1~3 kGy 电子束辐照西兰花,发现辐照与未辐照西兰花的 Vc 含量差异不显著的研究结果一致。

## 2.6 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜

### POD 活性的影响

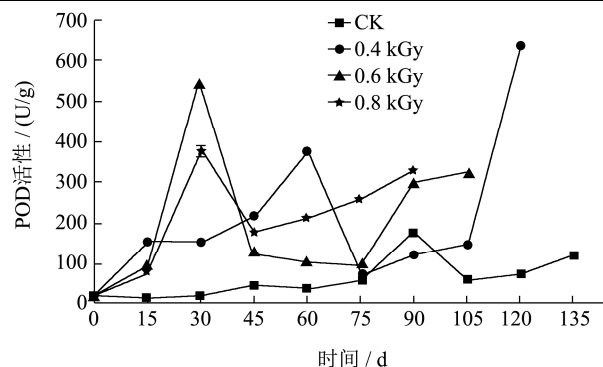
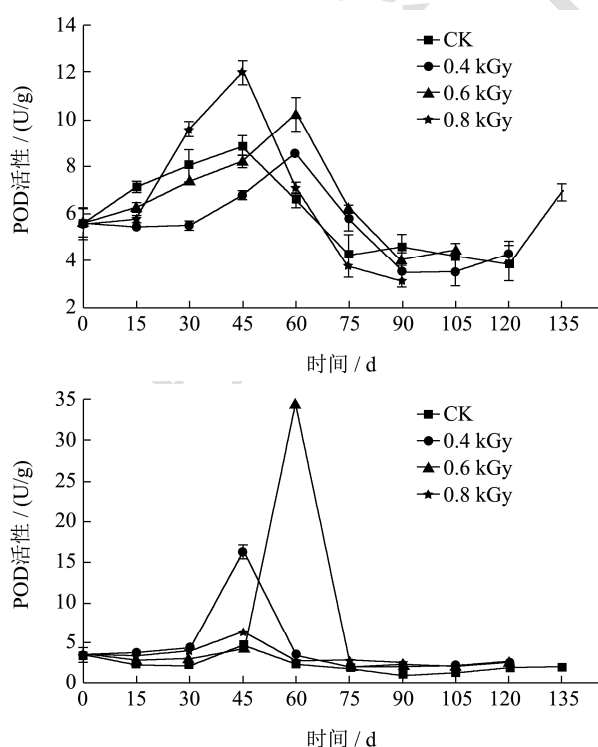


图 6 不同剂量高能电子束辐照对瓜瓤 (a)、瓜丝 (b) 和瓜皮 (c) 中 POD 含量的影响

Fig.6 Effects of different doses high energy electron beam irradiation on POD activity of flesh (a), silk (b) and skin (c) of spaghetti squash

POD 是果蔬体内普遍存在的一种重要的氧化还原酶,对维护细胞膜系统稳定、延缓细胞衰老具有重要作用。金丝绞瓜经电子束辐照后积累的自由基较多,激活了细胞保护酶体系,为了消除这些自由基,导致绞瓜体内 POD 活性升高,故在贮藏过程中不同剂量辐照瓜 POD 活性均高于对照瓜,且瓜皮中的 POD 活性显著高于瓜瓤和瓜丝 ( $p<0.05$ ) (图 6)。贮藏期间辐照瓜和对照瓜瓜瓤的 POD 活性呈先上升后下降的趋势。0.4 和 0.6 kGy 辐照处理将 POD 活性高峰延迟 15 d,而 0.8 kGy 辐照瓜与对照瓜瓜瓤均于第 45 d 出现活性高峰,且辐照瓜是对照瓜的 1.36 倍。贮藏 0~60 d 内,0.4 kGy 和 0.6 kGy 辐照瓜瓜瓤的 POD 活性均显著低于对照瓜 ( $p<0.05$ ),60~120 d 内均呈下降趋势且差异不显著。0.4 kGy 和 0.6 kGy 辐照瓜瓜丝分别在 45 d 和 60 d 出现了显著高于其他辐照组的峰值 ( $p<0.05$ );而 0.8 kGy 辐照瓜瓜丝 POD 活性略高于对照瓜,但差异不显著 ( $p>0.05$ )。0.6 kGy 辐照瓜瓜丝的 POD 活性比其他两个辐照组延迟 15 d 达到峰值,且峰值为 34.51 U/g,分别是 0.4、0.8 kGy 辐照组和对照组的 2.13 倍、5.53 倍和 7.36 倍。说明适当的辐照可提高金丝绞瓜的抗性。瓜皮的 POD 活性呈先上升后下降再上升的趋势,辐照处理激活了瓜皮细胞保护酶体系,机体内出现了清除自由基和过氧化物的抗逆反应,导致贮藏过程中 POD 活性增强<sup>[19]</sup>,且 0.4 kGy 辐照瓜与其他两个辐照组相比,活性高峰推迟了 30 d;随着贮藏时间的延长,辐照分解产物与瓜皮内产生的自由基发生了交联反应,从而抑制了 POD 的活性;贮藏后期,果蔬营养物质损耗严重,细胞衰老速度加快,POD 又呈上升趋势。综上所述,高能电子束辐照金丝绞瓜可诱导 POD 活性增加,同时 0.8 kGy 辐照可促使瓜瓤和瓜皮活性高峰提前出现,金丝绞瓜抗性能力提前产生;而

0.4 kGy 辐照推迟金丝绞瓜各部位 POD 活性高峰的出现, 使金丝绞瓜在贮藏中期的抗衰老能力增强。这与黄天姿等人<sup>[34]</sup>研究发现采用 0.4 kGy 剂量辐照人工接种灰葡萄孢霉的海沃德猕猴桃, POD 活性较其他辐照组高且活性高峰出现早, 与本试验研究结果一致。

## 2.7 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜丙二醛含量的影响

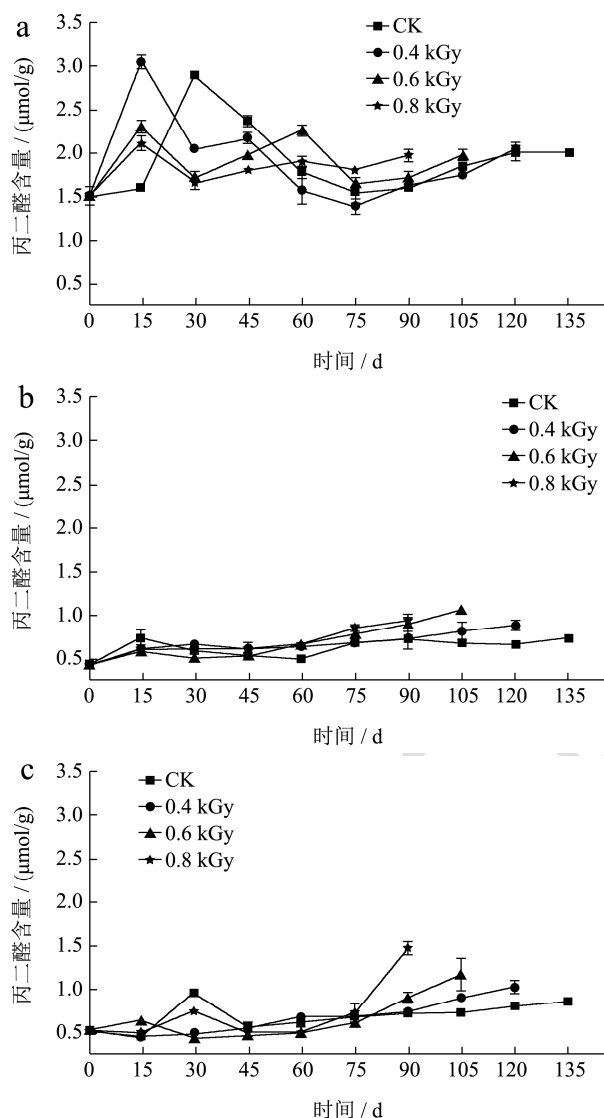


图7 不同剂量高能电子束辐照对瓜瓤(a)、瓜丝(b)和瓜皮(c)中丙二醛含量的影响

Fig.7 Effects of different doses of high energy electron beam irradiation on MDA content of flesh (a), silk (b) and skin (c) of spaghetti squash

丙二醛的积累会对果蔬细胞质膜和细胞器造成损伤<sup>[35,36]</sup>, 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜不同部位丙二醛含量的影响见图7。随着贮藏时间延长, 金丝绞瓜不同部位丙二醛含量均呈上升趋势, 说明膜脂

过氧化作用加强, 细胞膜伤害程度加剧, 绞瓜不断衰老。瓜瓤中丙二醛含量显著高于瓜丝和瓜皮 ( $p < 0.05$ ), 瓜丝和瓜皮中丙二醛含量差异不显著 ( $p > 0.05$ )。贮藏过程中各辐照瓜 POD 活性均高于对照瓜, 一定程度抑制了膜脂过氧化作用, 因此 0~30 d 内瓜丝和瓜皮中丙二醛含量均低于对照瓜, 但差异不显著 ( $p > 0.05$ ); 而辐照瓜瓜瓤贮藏第 15 d 时的丙二醛含量显著高于对照瓜瓜瓤, 0.4 kGy 辐照瓜瓜瓤分别是 0.6、0.8 kGy 辐照组和对照组的 1.32 倍、1.45 倍和 1.92 倍。贮藏 75 d~120 d 内 0.6 和 0.8 kGy 辐照处理使金丝绞瓜各部位的丙二醛含量均上升, 且显著高于对照瓜 ( $p < 0.05$ ), 而 0.4 kGy 辐照瓜与对照瓜各部位的丙二醛含量无显著差异。表明辐照处理对金丝绞瓜产生了一定程度的损失。Duan Z F 等<sup>[24]</sup>的研究证明, 辐照蘑菇的 MDA 含量显著低于对照蘑菇 ( $p < 0.05$ ), 认为辐照可有效防止贮藏过程中丙二醛的积累, 与本试验研究结果相反, 原因是合适的辐照剂量可减少辐照对果蔬的损伤, 贮藏过程中果蔬产生的丙二醛少。因此本试验的 3 个辐照剂量对金丝绞瓜均过高, 其腐烂和衰老症状大量出现, 绞瓜内部结构破坏, 其中瓜瓤破坏最严重。

## 2.8 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜 PPO 活性的影响

PPO 是果蔬机体酚类代谢的关键酶, 能催化多种酚类物质氧化形成醌类化合物, 进而引起果蔬组织褐变<sup>[37]</sup>。不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜贮藏过程中 PPO 活性的影响见图 8, 高剂量辐照会破坏金丝绞瓜的细胞结构, 激活潜在的 PPO, 故辐照瓜不同部位的 PPO 活性均呈先上升后下降的趋势, 且瓜丝的 PPO 活性显著高于瓜瓤和瓜皮 ( $p < 0.05$ )。0~60 d 内瓜瓤中的 PPO 活性逐渐增强, 仅 0.8 kGy 辐照瓜的瓜瓤显著高于对照瓜 ( $p < 0.05$ ), 其他辐照瓜均与对照瓜无显著差异。贮藏第 60 d 时, 辐照瓜和对照瓜瓜瓤出现 PPO 活性高峰, 0.4、0.8 kGy 辐照瓜和对照瓜分别是 0.6 kGy 的 2.29 倍、2.23 倍和 2.80 倍。说明适当的电子束辐照会钝化绞瓜贮藏过程中的 PPO 活性, 抑制果蔬褐变。辐照瓜瓜丝的 PPO 活性在 0~30 d 内迅速上升, 显著高于对照瓜 ( $p < 0.05$ ), 且辐照剂量越大, PPO 活性越高。贮藏至 60 d 时, 0.8 kGy 辐照瓜瓜丝的 PPO 活性为 0.03 U/(g·min), 是 0.4、0.6 kGy 辐照瓜和对照瓜的 1.82 倍、2.23 倍和 1.56 倍。此时瓜丝进入衰老的起点, PPO 活性大幅下降, 并在 75 d~120 d 内 PPO 活性较低。0~60 d 内各剂量辐照瓜瓜皮中的 PPO 活性均显著高于对照瓜 ( $p < 0.05$ ), 但 60 d~120 d 内各剂量辐照瓜

PPO 活性与对照瓜并无显著差异 ( $p>0.05$ )。王秋芳<sup>[19]</sup>等的研究表明辐照剂量小于 1 kGy 可显著钝化贮藏过程中葡萄的 PPO 活性, 1.5 kGy 处理显著提高其 PPO 活性, 使其升高至 48.00 U/(g·min), 此结果充分说明本研究所选剂量不是金丝绞瓜贮藏保鲜的合适剂量, 未能有效抑制金丝绞瓜的 PPO 活性。

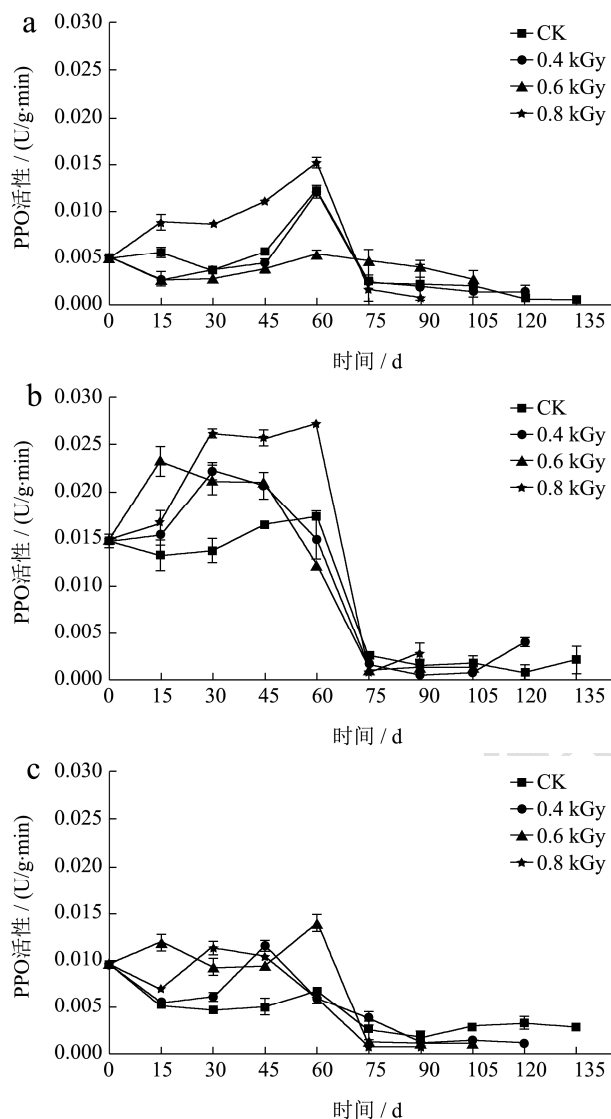


图8 不同剂量高能电子束辐照对瓜瓤(a)、瓜丝(b)和瓜皮(c)中PPO活性的影响

Fig.8 Effects of different doses high energy electron beam irradiation on PPO activity of flesh (a), silk (b) and skin (c) of spaghetti squash

## 2.9 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜GLU活性的影响

果蔬中的 GLU 能将真菌细胞壁的主要成分多糖水解为糊精或寡聚糖, 从而抑制真菌的生长繁殖并减弱其侵染能力<sup>[38]</sup>。不同剂量高能电子束对金丝绞瓜

贮藏过程中 GLU 活性的影响见图 9。0.4 kGy 电子束辐照 4 次, 因辐照剂量偏大, 绞瓜衰老加速, 微生物易侵染, 导致腐烂现象严重, 因此贮藏过程中辐照瓜的瓜丝和瓜皮中的 GLU 活性均极显著高于对照瓜 ( $p<0.01$ )。与其他两个辐照组相比, 0.4 kGy 辐照可将瓜丝中的 GLU 活性高峰推迟 15 d, 将瓜皮中的 GLU 活性高峰提前 30 d, 可见同一辐照剂量对金丝绞瓜不同部位的影响不同。

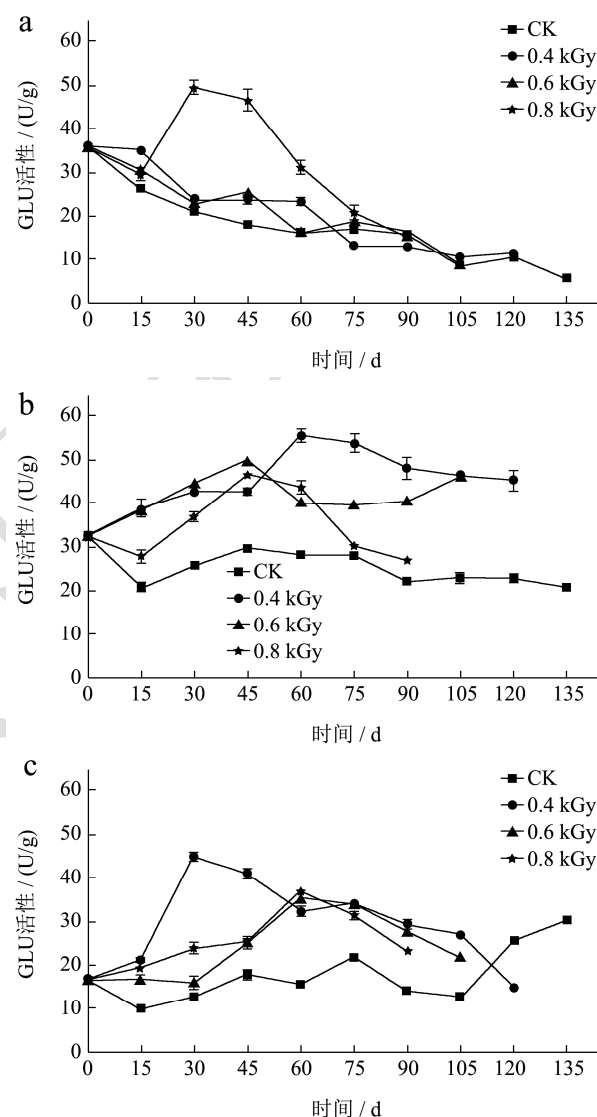


图9 不同剂量高能电子束辐照对瓜瓤(a)、瓜丝(b)和瓜皮(c)中GLU活性的影响

Fig.9 Effects of different doses electron high energy beam irradiation on GLU activity of flesh (a), silk (b) and skin (c) of spaghetti squash

此外辐照瓜的瓜丝和瓜皮的 GLU 活性在贮藏过程中均呈先上升后下降的趋势, 经偏大剂量的电子束辐照后, 绞瓜细胞受到伤害, 贮藏 0~60 d 内 GLU 活性提高; 贮藏 60~120 d 内金丝绞瓜进入衰老状态, 对不良外界刺激的抗性能力减弱, GLU 活性也降低。瓜

瓢的 GLU 活性在贮藏期间逐渐降低,其中 0.8 kGy 辐照瓜的 GLU 活性显著高于其他两个辐照组和对照组 ( $p<0.05$ )。0.4 和 0.6 kGy 辐照瓜瓢的 GLU 活性与对照瓜无显著差异 ( $p>0.05$ )。可能瓜瓢位于金丝绞瓜的中心部位,0.4 和 0.6 kGy 辐照对其影响的电离辐照剂量小,因此与对照瓜无显著差异;而 0.8 kGy 的辐照剂量破坏了瓜瓢的细胞结构,增强其抗逆反应,因此在贮藏 15~60 d 内 GLU 活性较高。黄天姿<sup>[34]</sup>等的研究表明,电子束辐照可改变猕猴桃果实组织的生化特性,诱导 GLU 等抗性酶活增强,增强果实抗病性,与本文瓜丝和瓜皮中 GLU 的变化结果一致。

## 2.10 不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜总酚含量的影响

酚类物质与果蔬品质、风味、色泽、成熟衰老进程、抗逆性和抗病代谢等作用密切相关<sup>[17]</sup>。图 10 为不同剂量高能电子束辐照对金丝绞瓜总酚含量的影响,瓜瓢中总酚含量显著高于瓜皮和瓜丝 ( $p<0.05$ ),且瓜丝中总酚含量最低,因此金丝绞瓜不同部位的抗病能力大小为瓜瓢>瓜皮>瓜丝。在贮藏过程中,瓜瓢和瓜丝中总酚含量呈逐渐上升的趋势,瓜皮中总酚含量呈先下降后上升的趋势。原因是电子束辐照增加了金丝绞瓜中苯丙氨酸解氨酶的活性,促进酚类物质合成,因此瓜瓢和瓜丝中的总酚含量呈上升趋势,同时辐照会显著提高瓜皮的 POD 活性,POD 能催化酚类物质的氧化和聚合,因此 0~30 d 的内瓜皮的总酚含量呈下降趋势,与图 6 辐照瓜瓜皮的 POD 活性变化结果一致。贮藏 30~45 d 期间,瓜丝褐变反应加剧,酚类物质被消耗,因此瓜丝中的总酚含量呈下降趋势。贮藏 45d~135 d 期间,绞瓜逐渐衰老,PPO 活性下降,褐变反应减缓,总酚逐渐积累,呈上升趋势,与图 8 中 PPO 活性变化结果一致。同时贮藏第 30 d 时,0.4 和 0.6 kGy 辐照瓜瓢总酚含量为 31.78 和 32.38 U/g,显著高于对照瓜和 0.8 kGy 瓜瓢的多酚含量 27.95 和 27.93 U/g;0.4、0.6 和 0.8 kGy 辐照瓜瓢丝多酚含量分别为 22.26、18.79 和 19.05 U/g,显著高于对照瓜瓜丝的多酚含量 15.71 U/g;而辐照瓜瓜皮在 45~75 d 内显著高于对照瓜瓜皮 ( $p<0.05$ )。可能是辐射的应激反应导致细胞结构发生了改变,增强了酶和底物之间的接触并促进了酚类化合物的提取和渗透,导致酚类化合物积累,含量高于对照瓜<sup>[39]</sup>。有学者用  $\gamma$  射线辐照柑桔,研究发现辐照后的柑桔多酚含量增大,且高剂量组多酚含量最大。与本试验辐照瓜多酚含量高于对照瓜结果一致,但 0.8 kGy 辐照瓜各部位的多酚含量低

于 0.4 和 0.6 kGy,这可能与果蔬种类及总酚组成等因素有关<sup>[40]</sup>。

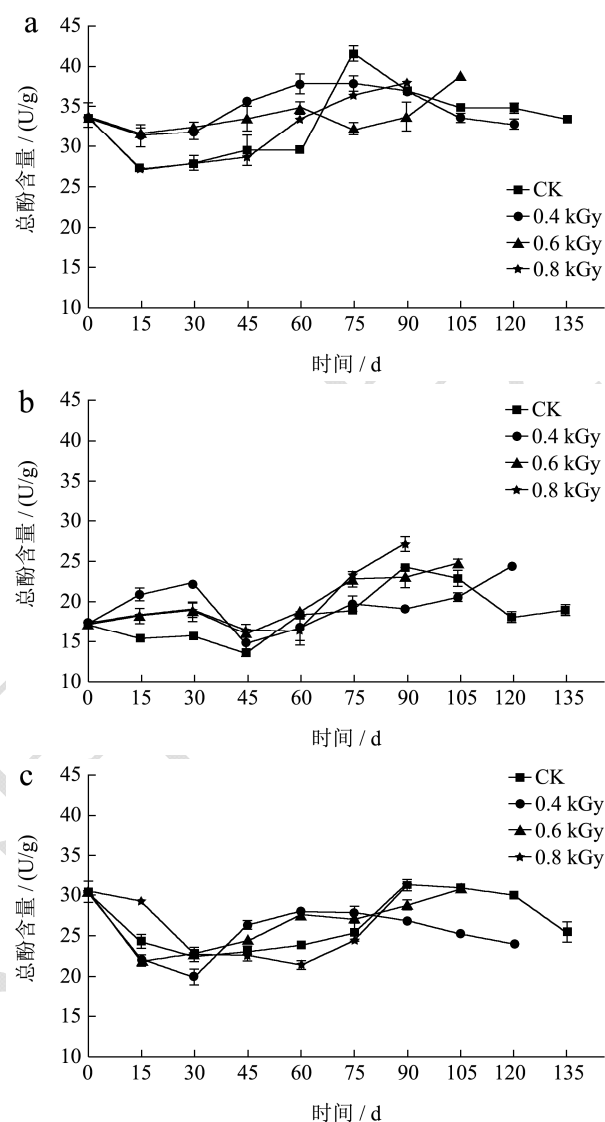


图 10 不同剂量高能电子束辐照对瓜瓢 (a)、瓜丝 (b) 和瓜皮 (c) 中总酚含量的影响

Fig.10 Effects of different doses high energy electron beam irradiation on total phenolic content of flesh (a), silk (b) and skin (c) of spaghetti squash

## 3 结论

3.1 本试验研究了 0.4、0.6 和 0.8 kGy 不同剂量高能电子束辐照金丝绞瓜 4 个面对其贮藏过程中品质和生理特性的影响。证实了辐照处理对金丝绞瓜品质具有积极和消极两方面的影响。金丝绞瓜的可滴定酸和 Vc 含量并不受辐照剂量的影响,从而更好地维持绞瓜的 Vc 含量,间接改善了金丝绞瓜的品质。但该辐照处理在一定程度上破坏了成熟金丝绞瓜的组织细胞,加强绞瓜呼吸作用,增加绞瓜不同部位营养物质消耗;破坏细胞膜完整性,丙二醛积累较多,加速金丝绞瓜的



软化和衰老进程,使其硬度、脆度和水分含量降低,口感和风味品质下降;同时金丝绞瓜机体防御能力下降,绞瓜腐烂率上升,对金丝绞瓜品质造成一定程度的损害。

3.2 目前国内外暂未有金丝绞瓜高能电子束处理和冷藏的文献报道,本研究选择的电子束辐照剂量是促进金丝绞瓜成熟的剂量,对金丝绞瓜因气候原因,不能正常成熟时,为按时供应市场,且达到最佳食用品质,有积极的催熟效果,但高能电子束辐照在金丝绞瓜贮藏保鲜工作中的有效剂量仍需进一步研究,目前已采用 0.3 kGy、0.4 kGy 和 0.5 kGy 辐照金丝绞瓜两个不同的面,以研究其在冷藏过程中的保鲜效果,具体研究结果见下篇文章报道。根据研究结果后续也可采用 0.1 kGy、0.2 kGy 和 0.3 kGy 辐照金丝绞瓜 4 个不同的面,或使用本试验所用辐照剂量且辐照次数减少为 2 次,其目的是得出金丝绞瓜保鲜的适宜高能电子束辐照剂量,为高能电子束辐照技术在金丝绞瓜采后贮藏过程中品质调控提供理论依据。同时感谢泗县虹城航天科技农业发展有限公司对本研究的支持,合适剂量的高能电子束辐照对金丝绞瓜的贮藏保鲜有利,并对金丝绞瓜产业链增值有重要的实践意义。

## 参考文献

- [1] 彭坚.鱼翅瓜栽培技术研究[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2005,3:69-72  
PENG Jian. Planting technology of *Cucurbitapepo* var. *Medullosa* [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2005, 3: 69-72
- [2] 王成超.美国金丝绞瓜高产栽培技术[J].种子世界,2004,5: 39  
WANG Cheng-chao. Technology of high yield cultivation of spaghetti squash in USA [J]. Seed World, 2004, 5: 39
- [3] 庄小林.泗县金丝绞瓜绿色高效栽培技术[J].现代农业科技, 2019,16:73-74  
ZHUANG Xiao-lin. Green and efficient cultivation technique of spaghetti squash in Sixian County [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019, 16: 73-74
- [4] Girenavar B, Jayaprakasha G K, Mcllin 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
- [5] Moreno M A, Castell-Perez M E, Gomes C, et al. Quality of electron beam irradiation of blueberries (*Vaccinium corymbosum* L.) at medium dose levels (1.0-3.2 kGy) [J]. Lwt - Food Science and Technology, 2007, 40(7): 1123-1132
- [6] Castell-Perez E, Moreno M, Rodriguez O, et al. Electron beam irradiation treatment of cantaloupes: effect on product quality [J]. Food Science and Technology International, 2004, 10(6): 383-390
- [7] 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
- [8] Han J, Gomes-Feitosa C L, Castell-Perez E, et al. Quality of packaged romaine lettuce hearts exposed to low-dose electron beam irradiation [J]. Lebensmittel-Wissenschaft Und-Technologie-Food Science and Technology, 2004, 37(7): 705-715
- [9] 杨俊丽,乔勇进,乔旭光.高能电子束辐照对草莓常温贮藏品质的影响[J].食品与发酵工业,2010,1:196-200  
YANG Jun-li, QIAO Yong-jin, QIAO Xu-guang. Effect of high energy electron beam irradiation on normal temperature storage quality of strawberry [J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 1: 196-200
- [10] 王秋芳,乔勇进,陈召亮,等.高能电子束辐照对花椰菜保鲜效果的研究[J].南京农业大学学报,2011,34(1):133-136  
WANG Qiu-fang, QIAO Yong-jin, CHEN Zhao-liang, et al. Study on preservation effects of high energy electron beam in cauliflower [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2011, 34(1): 133-136
- [11] Boynton B B, Welt B A, Sims C A, et al. Effects of low-dose electron beam irradiation on respiration, microbiology, texture, color, and sensory characteristics of fresh-cut cantaloupe stored in modified-atmosphere packages [J]. Journal of Food Science, 2006, 71(2): 149-155
- [12] 董婷,高鹏,汪菡月,等.电子束辐照对果蔬品质影响的研究进展[J].北方园艺,2020,16:133-138  
DONG Ting, GAO Peng, WANG Han-yue, et al. Research progress on the effects of electron beam irradiation on quality of fruits and vegetables [J]. Northern Horticulture, 2020, 16: 133-138
- [13] Ravindran R, Jaiswal A K. Wholesomeness and safety aspects of irradiated foods [J]. Food Chemistry, 2019, 285: 363-368
- [14] 蒋纬,谭书明,胡颖.泡制辣椒脆度影响因素的初探[J].中国调味品,2017,3:55-58  
JIANG Wei, TAN Shu-ming, HU Ying. Research on the influence factors of pickled pepper brittleness [J]. China Condiment, 2017, 3: 55-58

- [15] 辛颖,张元薇,金郑阳,等.温度波动对不同品种樱桃品质劣变的影响[J].河南工业大学学报(自然科学版),2019,40(2): 33-39  
XIN Ying, ZHANG Yuan-wei, JIN Zheng-yang, et al. Effect of temperature fluctuation on quality deterioration of different cherry varieties [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(2): 33-39
- [16] 李国秀,刘小宁,李劫.高效液相色谱法测定猕猴桃中的 Vc 含量[J].保鲜与加工,2016,5:89-93  
LI Guo-xiu, LIU Xiao-ning, LI Jie, et al. Determination of Vc in kiwifruit by HPLC [J]. Storage and Process, 2016, 5: 89-93
- [17] 曹建康,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,2007,80-145  
CAO Jian-kang, JIANG Wei-bo, ZHAO Yu-mei. Experiment Guidance of Postharvest Physiology and Biochemistry of Fruits and Vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007, 80-145
- [18] 谢敏.毛花猕猴桃酚类物质及相关抗氧化活性研究[D].南昌:江西农业大学,2017  
XIE Min. Research on phenolic and antioxidant activity in actinidia eriantha benth [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2017
- [19] 王秋芳,乔勇进,乔旭光.高能电子束辐照对巨峰葡萄生理品质的影响[J].中国农业科学,2010,3:134-140  
WANG Qiu-fang, QIAO Yong-jin, QIAO Xu-guang. Effects of high energy electron beam on physiological quality of kyoho grape [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 3: 134-140
- [20] 陈志军,孔秋莲,岳玲,等.电子束辐照对进口葡萄色泽及保鲜效果的影响[J].辐射研究与辐射工艺学报,2013,31(6):1-5  
CHEN Zhi-jun, KONG Qiu-lian, YUE Ling, et al. Effects of electronic beam irradiation on color and storage characteristics of table grape [J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2013, 31(6): 1-5
- [21] Yu L, Reitmeier C A, Love M H. Strawberry texture and pectin content as affected by electron beam irradiation [J]. Journal of Food Science, 1996, 61(4): 844-846
- [22] Miller W R, McDonald R E, McCollum T G, et al. Quality of climax blueberries after low-dosage electron-beam irradiation [J]. Journal of Food Quality, 1994, 17(1): 71-79
- [23] 王少丹.提高鲜切青椒微生物食用安全性的研究[D].泰安:山东农业大学,2012  
WANG Shao-dan. Studies on improving microbial food safety of fresh-cut green peppers [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012
- [24] Duan Z F, Xing Z T, Shao Y, et al. Effect of electron beam irradiation on postharvest quality and selected enzyme activities of the white button mushroom, *agaricus bisporus* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2010, 58(17): 9617-9621
- [25] Gomes C, Da Silva P, Chimbombi E, et al. Electron-beam irradiation of fresh broccoli heads (*Brassica oleracea* L. Italica) [J]. Lwt - Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1828-1833
- [26] Moreno M, Castell-Perez M E, Gomes C, et al. Effects of electron beam irradiation on physical, textural, and microstructural properties of "Tommy Atkins" mangoes (*Mangifera indica* L.) [J]. Journal of Food Science, 2006, 71(2): 80-86
- [27] 王秋芳,陈召亮,乔勇进,等.高能电子束辐照对巨峰葡萄保鲜效果的研究[J].核农学报,2010,24(2):319-324  
WANG Qiu-fang, CHEN Zhao-liang, QIAO Yong-jin, et al. Preservation effect of high energy electron beam on kyoho grape [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(2): 319-324
- [28] 杨俊丽.高能电子束辐照对草莓贮藏品质的影响[D].泰安:山东农业大学,2010  
YANG Jun-li. Effect of high energy electron beam irradiation on strawberry storage quality [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2010
- [29] 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
- [30] Tong J, Rakovski C, Prakash A. Phytosanitary irradiation preserves the quality of fresh blueberries and grapes during storage [J]. Hortscience, 2015, 50(11): 1666-1670
- [31] Ramakrishnan S R, Jo Y, Nam H A, et al. Implications of low-dose e-beam irradiation as a phytosanitary treatment on physicochemical and sensory qualities of grapefruit and lemons during postharvest cold storage [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 245: 1-6
- [32] 周慧娟,叶正文,施春晖,等.高能电子辐照对猕猴桃保鲜效果的影响[J].中国农学通报,2015,31(25):133-138  
ZHOU Hui-juan, YE Zheng-wen, SHI Chun-hui, et al. Effect of electron beam on fresh-keeping quality of kiwifruit [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(25): 133-138
- [33] Barkai-Golan R, Follett P A. Irradiation for Quality Improvement, Microbial Safety, and Phytosanitation of Fresh Produce [M]. Irradiation for Quality Improvement, Microbial

- Safety, and Phytosanitation of Fresh Produce, 2017, 1-5
- [34] 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/OL].食品科学,2020,1-12
- HUANG Tian-zi, LIANG Jin, WANG Dan, et al. Effects of electron beam irradiation on quality and resistance system of kiwifruit [J/OL]. Food Science, 2020, 1-12
- [35] 潘天贵,陈维信.鲜切果蔬酶促褐变物理控制研究进展[J].农产品加工(学刊),2007,12:9-12
- PAN Yong-gui, CHEN Wei-xin. The research progress on physical inhibition of fresh-cut fruits and vegetables enzymatic browning [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2007, 12: 9-12
- [36] Guillen-Sans R, Guzman-Chozas M. The thiobarbituric acid (TBA) reaction in foods: a review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1998, 38(4): 315-330
- [37] Nicolas J J, Richardforget F C, Goupy P M, et al. Enzymatic browning reactions in apple and apple products [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 1994, 34(2): 109-157
- [38] 罗杨,明建,曾凯芳.拮抗微生物诱导采后果蔬抗病性的机制[J].食品科学,2010,9:304-307
- LUO Yang, MING Jian, ZENG Kai-fang. Disease-resistant mechanism of post-harvest fruits and vegetables induced by antagonists [J]. Food Science, 2010, 9: 304-307
- [39] Kyung H K, Ramakrishnan S R, Kwon J H. Evaluation of capsaicinoid profile and antioxidant properties in dried korean red pepper (*Capsicum annuum* L.) as affected by variable dose rates of electron beam and gamma ray irradiation [J]. Journal of Food Science and Technology-Mysore, 2018, 55(10): 3902-3910
- [40] Dejesus ornelas-paz J, Meza M B, Obenland D, et al. Effect of phytosanitary irradiation on the postharvest quality of seedless kishu (*Citrus kinokuni* Mukakukishu) [J]. Food Chemistry, 2017, 230: 712-720

## (上接第 93 页)

- [9] Marinescu G C, Popescu R G, Stoian G, et al.  $\beta$ -Nicotinamide mononucleotide (NMN) production in *Escherichia coli* [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 1-11
- [10] Zhang R Y, Qin Y, Lv X Q, et al. A fluorometric assay for high-throughput screening targeting nicotinamide phosphoribosyltransferase [J]. Analytical Biochemistry, 2011, 412(1): 18-25
- [11] 吕小群.Nampt/Visfatin 酶活性筛选模型的建立[D].上海:第二军医大学,2010:1-67
- LYU Xiao-qun. Establishment of a Nampt/Visfatin activity-based screening system [D]. Shanghai: The Second Military Medical University, 2010: 1-67
- [12] Dietrich L S, Muniz O. Inhibition of nicotinamide phosphoribosyltransferase by pyridine nucleotides [J]. Biochemistry, 1972, 11(9): 1691-1695
- [13] Rongvaux A, Shea R, Mulks M, et al. Pre-B-cell colony-enhancing factor, whose expression is up-regulated in activated lymphocytes, is a nicotinamide phosphoribosyltransferase, a cytosolic enzyme involved in NAD biosynthesis [J]. European Journal of Immunology, 2002, 32(11): 3225-3234
- [14] Revollo J R, Grimm A A, Imai S I. The NAD biosynthesis pathway mediated by nicotinamide phosphoribosyltransferase regulates Sir2 activity in mammalian cells [J]. Journal of Biological Chemistry, 2004, 279(49): 50754-50763
- [15] 张伟,杨秀山.酶的固定化技术及其应用[J].自然杂志,2000, 22(5):282-286
- ZHANG Wei, YANG Xiu-shan. Immobilization of enzymes and their applications [J]. Chinese Journal of Nature, 2000, 22(5): 282-286
- [16] 韩志萍,叶剑芝,罗荣琼.固定化酶的方法及其在食品中的应用研究进展[J].保鲜与加工,2012,12(5):48-53
- HAN Zhi-ping, YE Jian-zhi, LUO Rong-qiong. Research progress on the methods of immobilized enzymes and their applications in food [J]. Preservation and Processing, 2012, 12(5): 48-53