

# $^{60}\text{Co}$ $\gamma$ 辐照对低温贮藏蓝莓品质和膜脂过氧化作用的影响

王琛<sup>1,2</sup>, 李雪涛<sup>2</sup>, 陶焱<sup>2</sup>, 孟宪军<sup>1,\*</sup>

(1.沈阳农业大学食品学院, 辽宁 沈阳 110866; 2.辽宁省农业科学院, 辽宁 沈阳 110161)

**摘要:**为探索 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照处理对蓝莓果实保鲜效果的影响, 采用不同辐照剂量处理“蓝丰”蓝莓, 定期检测其冷藏期间感官品质、营养品质、呼吸作用和膜脂过氧化作用的相关指标。结果表明: 0.5 kGy辐照处理对蓝莓果实的保鲜效果不明显, 3.0 kGy辐照处理能够加速贮藏后期蓝莓果实的衰老进程; 辐照处理后, 蓝莓果实的可溶性固形物含量和可滴定酸含量变化不明显, 但VC含量和花青素含量均有所下降, 且与辐照剂量呈负相关; 辐照处理后, 蓝莓果实的呼吸强度和乙烯释放量提高, 且与辐照剂量呈正相关, 同时伴随脂氧合酶活性、丙二醛含量和细胞膜透性相对对照略微提高; 1.0~2.5 kGy的辐照处理能够通过抑制贮藏期间蓝莓果实的呼吸作用和膜脂过氧化作用, 推迟蓝莓果实的衰老进程, 延缓蓝莓果实中营养物质的降解; 2.5 kGy辐照处理对蓝莓果实的保鲜效果最佳, 既能有效降低蓝莓果实腐烂率, 又能最大程度地保持蓝莓果实的营养品质。因此, $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照处理对于采后蓝莓的低温保鲜是一个行之有效的方法。

**关键词:**  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照; 蓝莓; 贮藏品质; 膜脂过氧化

Effect of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -Irradiation on Storage Quality and Membrane Lipid Peroxidation of Blueberry Fruits during Cold Storage

WANG Chen<sup>1,2</sup>, LI Xuetao<sup>2</sup>, TAO Ye<sup>2</sup>, MENG Xianjun<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** This study aimed to examine the influence of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation on the preservation of blueberry fruits. “Bluecrop” blueberries were treated by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation at different doses and then cold stored. Indicators of sensory quality, nutritional quality, respiration and membrane lipid peroxidation in blueberry fruits were regularly assayed during storage. The results showed that 0.5 kGy irradiation was not effective in preserving the quality of blueberries and that treatment at 3.0 kGy accelerated the senescence process of blueberry fruits during the later stages of storage. After irradiation, the contents of total soluble solid (TSS) and soluble acid (TA) in blueberry fruits did not change markedly, whereas the contents of vitamin C (VC) and anthocyanin declined, showing a negative correlation with irradiation dose. On the other hand, respiration rate and ethylene release were increased after irradiation, displaying a positive correlation with dose. It was also found that lipoxygenase (LOX) activity, malondialdehyde (MDA) content and cell membrane permeability were increased slightly compared with CK during the storage of blueberry fruits, irradiation treatments at 1.0–2.5 kGy could, retard fruit senescence and the degradation of nutrients by inhibiting respiration and membrane lipid peroxidation. The effect of 2.5 kGy irradiation on the preservation of blueberry fruits was the best, which could not only effectively reduce the fruit rot rate, but also maintain the nutritional quality of blueberries to the greatest extent. Therefore,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation treatment may be an effective method for preservation of blueberry at low temperature.

**Key words:**  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation; blueberry fruit; storage quality; membrane lipid peroxidation

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622049

中图分类号: TS255.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2016) 22-0318-06

收稿日期: 2016-06-10

基金项目: 沈阳市科技局农业攻关项目 (F16-140-300)

作者简介: 王琛 (1979—), 女, 助理研究员, 硕士研究生, 研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail: wangchen0913@163.com

\*通信作者: 孟宪军 (1960—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品贮藏与加工。E-mail: mengxjsy@126.com

引文格式:

王琛, 李雪涛, 陶烨, 等.  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照对低温贮藏蓝莓品质和膜脂过氧化作用的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 318-323.

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622049. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Chen, LI Xuetao, TAO Ye, et al. Effect of  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -irradiation on storage quality and membrane lipid peroxidation of blueberry fruits during cold storage[J]. Food Science, 2016, 37(22): 318-323. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.7506/spkx1002-6630-201622049. <http://www.spkx.net.cn>

蓝莓 (*Semen trigonellae*), 又名越橘、蓝浆果, 杜鹃花科 (Ericaceae) 越橘亚科越橘属 (*Vaccinium* spp.) 植物, 多年生落叶或常绿灌木果树。蓝莓果实色泽美观、果肉细腻、酸甜适口、风味独特、营养丰富, 具有多种生理功能, 堪称“世界水果之王”<sup>[1]</sup>。随着人们生活水平的不断提高, 保健意识的不断加强, 蓝莓因其独特的风味和营养保健功能逐渐被人们接受和认可。近几年, 我国蓝莓的生产规模持续不断扩大, 产量不断提高, 集中的采收时期导致大量的果实不能及时销售, 真菌感染和生理变化引起果实快速腐烂变质, 严重影响了蓝莓产业的良性发展。低温贮藏虽然在一定程度上缓解了这些问题, 但是冷藏后果实的营养价值、商品价值又受到了很大的影响, 市场售价相对下降, 贮藏时间仍然十分有限。

目前, 国内外学者已经开展了一些关于蓝莓采后保鲜新技术的研究。Song等<sup>[2]</sup>发现初始气体条件为3%  $\text{O}_2$  + 15%  $\text{CO}_2$ 时, 蓝莓的贮藏品质明显好于未气调处理。孟宪军等<sup>[3]</sup>研究了不同气体比例对“伯利克”蓝莓生理变化的影响, 结果显示5%  $\text{O}_2$  + 30%  $\text{CO}_2$ 的气体组合比其他更有利于延缓衰老。Jongen<sup>[4]</sup>指出一定浓度的壳聚糖能够有效地延长蓝莓果实的货架期和提高其贮藏品质。纪淑娟等<sup>[5]</sup>的研究结果显示1-甲基环丙烯用量为1.0  $\mu\text{L/L}$ 比0.5  $\mu\text{L/L}$ 能更有效地保留蓝莓果实的品质。但是这些技术的保鲜效果并不理想, 特别是在贮藏后期, 果实表面色泽变浅, 果实失水软化, 贮藏期病害加重等等一系列问题的出现, 导致蓝莓的贮藏品质和贮藏期限受到影响。因此, 寻找一种安全、环保、高效的蓝莓保鲜技术, 已经刻不容缓。

$^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照是一种食品加工新技术, 通过利用 $^{60}\text{Co}$ 放射源产生的一定剂量的 $\gamma$ 射线处理果蔬, 使其微生物发生一系列物理、化学反应, 同时抑制其呼吸作用、内源乙烯的产生、过氧化物酶活性, 抑制发芽, 杀灭害虫及寄生虫, 防止腐烂, 延长贮藏时间。很多国内外学者针对辐照食品的安全性展开了大量的研究工作, 认为 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照技术可以成功地取代传统灭菌技术, 应用于微生物的消毒<sup>[6]</sup>, 延长生鲜食品的货架期<sup>[7]</sup>。此外, 一些研究表明适当的辐照处理能够在不影响果蔬感官和营养品质的前提下, 通过抑制呼吸代谢和膜脂过氧化作用, 延缓衰老和延长贮藏期, 这些果蔬包括桃<sup>[6]</sup>、梨<sup>[7-8]</sup>、草莓<sup>[9-10]</sup>、

芒果<sup>[11-12]</sup>、西红柿<sup>[13-14]</sup>、荔枝<sup>[15]</sup>、草菇<sup>[16]</sup>等。本实验旨在通过研究不同辐照剂量对冷藏期间蓝莓果实外观品质、营养品质、呼吸作用和膜脂过氧化作用的影响, 明确不同辐照剂量对蓝莓果实贮藏效果的影响规律, 进而分析辐照保鲜蓝莓的机制, 探讨辐照保鲜蓝莓的可行性, 为 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照技术在蓝莓保鲜中的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

“蓝丰”蓝莓, 2014年7月20日人工采摘于沈阳时圣蓝莓种植基地 (位于辽宁省沈阳市辽中县), 挑选完全成熟的, 大小、色泽一致的, 且无病虫害和机械损伤的蓝莓果实, 经预冷后分装到规格为105 mm × 100 mm × 45 mm、厚度为0.4 mm、带有12个透气孔的PET保鲜盒中, 每盒净质量125 g左右, 并于当日用带冰泡沫周转箱运回实验室进行实验。

### 1.2 仪器与设备

CT3-10k型质构仪 (探头直径为8 mm) 美国 Brookfield公司; PB-10型pH计 北京赛多利斯仪器系统有限公司; TU-1810紫外分光光度计 北京善析通用有限公司; 580型气相色谱仪 美国Gow-Mac公司; 雷磁DDS-307型电导率仪 上海精密科学仪器有限公司; CT14RD台式高速冷冻离心机 上海天美生化仪器设备工程有限公司; H-7650透射扫描电子显微镜 日本日立公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 辐照处理

辐照处理在辽宁省农科院钴源辐照中心进行, 其源强为 $7.51 \times 10^{15}$  Bq, 设定的辐照剂量分别为0、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 kGy, 静态辐照, 采用硫酸亚铁剂量计测得各点辐照剂量率分别为0、0.115、0.235、0.345、0.462、0.581、0.710 Gy/s, 辐照时间统一为72 min。辐照处理一半时间后, 上下前后同时翻转。每个处理重复3次。辐照处理后的蓝莓放入温度 $(0 \pm 0.5)$   $^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度85%~95%的冷库中贮藏, 每组样品每隔7 d定期随机抽取蓝莓3盒, 进行各指标的测定; 每个指标重复3次, 取平均值。

## 1.3.2 指标测定

## 1.3.2.1 腐烂率

通过观察,表面上至少有一处出现果肉质地塌陷、汁液渗出、霉菌生长的果实为腐烂果,计数统计,根据如下公式计算果实腐烂率:

$$\text{果实腐烂率}/\% = \frac{\text{烂果数}}{\text{总果数}} \times 100$$

## 1.3.2.2 果实硬度

采用CT3-10k型质构仪进行测量。采用直径为2 mm的测试仪探头压入深度5 mm,测试前速率为2 mm/s,测试速率为1 mm/s,单位用牛顿(N)表示。

## 1.3.2.3 营养物质含量

需要测定的营养物质主要包括总可溶性固形物(total soluble solid, TSS)含量、可滴定酸(titratable acidity, TA)含量、VC含量和花青素含量,这些指标的测试均参考曹建康等<sup>[17]</sup>的方法。

## 1.3.2.4 呼吸强度

以CO<sub>2</sub>积累量来衡量果实的呼吸强度。采用Gow-Mac 580气相色谱仪测定,色谱条件:载气为高纯N<sub>2</sub>,流速30 mL/min,检测器为热导检测器,色谱柱为1.2 m×3.18 mm的不锈钢填充柱,柱温40℃,检测室温度23℃,单位以mg CO<sub>2</sub>/(kg·h)表示。

## 1.3.2.5 乙烯释放量

按照1.3.2.4节的方法抽取1 mL样气,采用Gow-Mac 580气相色谱仪及其配套的数据处理系统进行检测。色谱条件为:载气为高纯N<sub>2</sub>,流速4.0 mL/min,气相色谱仪检测器为火焰离子化检测器,色谱柱为1 m×0.4 mm, GDX-502不锈钢柱,柱温60℃,检测室温度270℃,单位以μL C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/(kg·h)表示。

## 1.3.2.6 细胞膜透性

果皮细胞膜透性测定采用电导率仪法<sup>[18]</sup>。

## 1.3.2.7 丙二醛(malondialdehyde, MDA)含量

采用硫代巴比妥酸比色法测定<sup>[19]</sup>。

## 1.3.2.8 脂氧合酶(lipoxygenase, LOX)活性

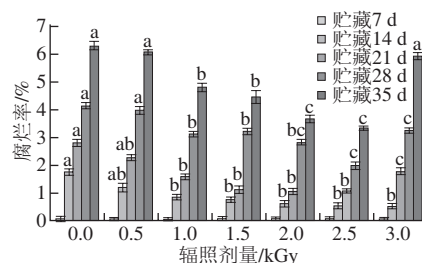
参考曹建康等<sup>[17]</sup>的方法,略有改进。每个处理组中取适量蓝莓样品,放入事先预冷的研钵中研磨,准确称取1.0 g蓝莓浆液,加入5 mL 0.1 mol/L磷酸缓冲液(pH 6.8,含0.4 g聚乙二醇吡咯烷酮),于4℃、12 000 r/min冷冻离心10 min,提取上清液备用。将10 mmol/L的亚油酸钠0.1 mL与100 mmol/L的磷酸缓冲液(pH 6.4) 2.7 mL混合均匀,30℃水浴10 min,然后加入酶提取液0.2 mL,立即倒入比色皿,在234 nm波长条件下测试吸光度1 min内的变化,以每克蓝莓每分钟234 nm波长处吸光度变化0.01表示一个酶活力单位U。

## 1.4 数据统计与分析

所得数据用Origin 8.1软件进行图的绘制分析,采用SPSS 17.0软件对测定的结果进行方差分析。

## 2 结果与分析

## 2.1 辐照处理对果实腐烂率的影响



同一贮藏时间字母不同表示差异显著( $P < 0.05$ ),未标注字母表示差异不显著。下同。

图1 辐照处理对冷藏中蓝莓果实腐烂率的影响

Fig. 1 Effect of irradiation treatment on the decay rate of blueberries during cold storage

如图1所示,蓝莓果实的腐烂率均随贮藏时间的延长而升高,其中0.5 kGy辐照处理组的变化与对照组的变化几乎一致,说明较低剂量的辐照处理对蓝莓果实的腐烂率没有影响。贮藏后期,蓝莓果实的腐烂率均处于一个较低的水平,且各组之间没有明显差异( $P > 0.05$ )。贮藏后期,3.0 kGy辐照处理组的果实腐烂率突然快速升高,且与对照(6.31%)接近,说明较高剂量的辐照处理能够提高贮藏后期蓝莓果实的腐烂率。整个贮藏期间,2.5 kGy辐照处理组的果实腐烂率始终保持最低,在贮藏35 d时仅为3.35%,比对照降低了约47.0%。所以,适当的辐照处理能够降低蓝莓果实的腐烂率,特别是贮藏后期的果实腐烂率。

## 2.2 辐照处理对果实硬度的影响

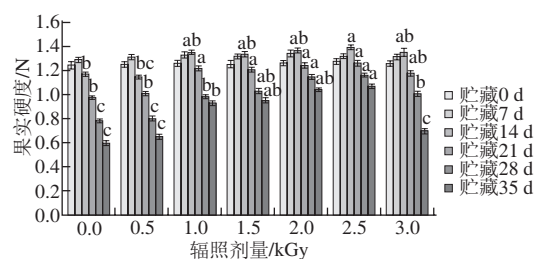


图2 辐照处理对冷藏中蓝莓果实硬度的影响

Fig. 2 Effect of irradiation treatment on the firmness of blueberries during cold storage

如图2所示,辐照处理当天,蓝莓果实硬度差异并不显著( $P > 0.05$ ),说明辐照处理对蓝莓果实硬度没有直接的影响。随着贮藏时间的延长,由于受到低温环境的影响,各组蓝莓果实硬度的变化均呈一个先升高后下降的趋势,其中0.5 kGy辐照处理组和对照组的变化一致,在贮藏7 d时出现小高峰,而其他辐照处理组均在贮藏14 d时才出现小高峰,说明较低剂量的辐照处理对冷藏期间蓝莓果实的硬度没有影响,但较高剂量的辐照处



理能够有效推迟蓝莓果实硬度的下降。贮藏后期, 3.0 kGy辐照处理组的果实硬度快速下降到0.70 N, 与对照(0.61 N)接近, 而2.5 kGy辐照处理组的果实硬度最高(1.08 N), 1.5 kGy和2.0 kGy辐照组的次之。

### 2.3 辐照处理对营养成分的影响

**表1 辐照处理对冷藏蓝莓果实营养成分的影响**  
**Table 1 Effect of irradiation treatment on the nutrient composition of blueberries during cold storage**

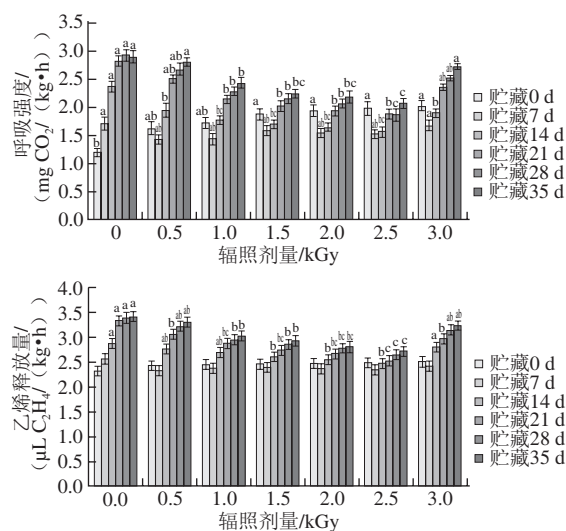
指标	辐照剂量/ kGy	贮藏时间/d					
		0	7	14	21	28	35
TSS含量/%	0	13.76±0.25	13.63±0.30	12.78±0.25	11.65±0.33 <sup>b</sup>	10.26±0.36 <sup>b</sup>	8.87±0.43 <sup>c</sup>
	0.5	13.40±0.36	14.10±0.37	12.83±0.29	11.83±0.39 <sup>b</sup>	10.43±0.29 <sup>b</sup>	8.96±0.34 <sup>c</sup>
	1.0	13.43±0.37	14.47±0.25	13.57±0.48	12.56±0.29 <sup>ab</sup>	11.57±0.39 <sup>a</sup>	10.83±0.32 <sup>b</sup>
	1.5	13.50±0.39	14.50±0.40	13.79±0.46	13.23±0.48 <sup>a</sup>	11.83±0.32 <sup>a</sup>	10.70±0.48 <sup>b</sup>
	2.0	13.60±0.37	14.47±0.40	13.97±0.47	13.42±0.34 <sup>a</sup>	12.06±0.51 <sup>a</sup>	11.77±0.40 <sup>a</sup>
	2.5	13.83±0.26	14.93±0.37	13.90±0.47	12.90±0.50 <sup>ab</sup>	12.04±0.24 <sup>a</sup>	12.01±0.33 <sup>a</sup>
	3.0	13.70±0.48	14.60±0.27	13.30±0.37	11.93±0.34 <sup>b</sup>	11.13±0.50 <sup>ab</sup>	10.07±0.33 <sup>bc</sup>
TA含量/%	0	0.99±0.030	0.74±0.03	0.66±0.03	0.65±0.03 <sup>b</sup>	0.62±0.03 <sup>b</sup>	0.556±0.02 <sup>c</sup>
	0.5	0.95±0.022	0.76±0.04	0.72±0.06	0.67±0.03 <sup>ab</sup>	0.67±0.03 <sup>ab</sup>	0.59±0.04 <sup>bc</sup>
	1.0	0.94±0.037	0.82±0.03	0.76±0.03	0.75±0.04 <sup>a</sup>	0.74±0.04 <sup>a</sup>	0.68±0.04 <sup>ab</sup>
	1.5	0.95±0.026	0.82±0.03	0.81±0.05	0.77±0.04 <sup>a</sup>	0.77±0.04 <sup>a</sup>	0.70±0.03 <sup>ab</sup>
	2.0	0.95±0.02	0.82±0.03	0.80±0.03	0.79±0.03 <sup>a</sup>	0.80±0.02 <sup>a</sup>	0.71±0.03 <sup>a</sup>
	2.5	0.97±0.03	0.85±0.04	0.80±0.04	0.79±0.03 <sup>ab</sup>	0.80±0.03 <sup>a</sup>	0.74±0.02 <sup>a</sup>
	3.0	0.97±0.02	0.80±0.04	0.73±0.04	0.70±0.04 <sup>ab</sup>	0.68±0.04 <sup>ab</sup>	0.59±0.02 <sup>c</sup>
VC含量/%	0	9.83±0.18	8.56±0.27	7.75±0.19	6.68±0.12 <sup>c</sup>	6.06±0.08 <sup>c</sup>	5.46±0.25 <sup>c</sup>
	0.5	9.69±0.15	8.65±0.09	7.63±0.21	6.82±0.18 <sup>bc</sup>	6.33±0.26 <sup>bc</sup>	5.83±0.26 <sup>bc</sup>
	1.0	9.53±0.13	8.94±0.16	7.96±0.09	7.34±0.21 <sup>b</sup>	6.79±0.35 <sup>b</sup>	6.29±0.14 <sup>b</sup>
	1.5	9.47±0.28	8.85±0.09	8.13±0.11	7.88±0.11 <sup>a</sup>	7.26±0.13 <sup>ab</sup>	6.76±0.14 <sup>ab</sup>
	2.0	9.26±0.08	8.70±0.18	8.17±0.09	7.85±0.09 <sup>a</sup>	7.34±0.06 <sup>ab</sup>	6.84±0.02 <sup>ab</sup>
	2.5	9.15±0.18	8.62±0.18	7.99±0.26	7.78±0.21 <sup>a</sup>	7.56±0.07 <sup>a</sup>	7.05±0.14 <sup>a</sup>
	3.0	8.84±0.11	8.02±0.15	7.28±0.08	6.78±0.29 <sup>bc</sup>	6.23±0.17 <sup>bc</sup>	5.73±0.15 <sup>bc</sup>
花青素含量/ (mg/g)	0	1.15±0.02	1.04±0.01	1.01±0.02	0.962±0.01 <sup>c</sup>	0.92±0.02 <sup>c</sup>	0.88±0.01 <sup>c</sup>
	0.5	1.15±0.01	1.08±0.02	1.03±0.01	1.01±0.01 <sup>c</sup>	0.96±0.01 <sup>bc</sup>	0.93±0.01 <sup>bc</sup>
	1.0	1.14±0.02	1.12±0.02	1.10±0.01	1.08±0.02 <sup>b</sup>	1.04±0.01 <sup>b</sup>	0.98±0.02 <sup>b</sup>
	1.5	1.13±0.01	1.10±0.02	1.08±0.02	1.06±0.01 <sup>a</sup>	1.02±0.01 <sup>ab</sup>	0.99±0.02 <sup>ab</sup>
	2.0	1.13±0.02	1.12±0.03	1.13±0.02	1.07±0.02 <sup>a</sup>	1.04±0.01 <sup>ab</sup>	1.01±0.01 <sup>ab</sup>
	2.5	1.13±0.02	1.13±0.01	1.09±0.01	1.05±0.03 <sup>ab</sup>	1.02±0.02 <sup>a</sup>	1.02±0.01 <sup>a</sup>
	3.0	1.12±0.02	1.07±0.02	1.05±0.01	1.02±0.02 <sup>c</sup>	0.99±0.02 <sup>bc</sup>	0.88±0.02 <sup>bc</sup>

注: 同一指标同列肩标字母不同表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

如表1所示, 辐照处理后, 贮藏前期各组蓝莓果实的TSS含量和TA含量与对照之间的差异不显著 ( $P>0.05$ ), 说明辐照处理对蓝莓果实的TSS含量和TA含量没有直接影响。随着贮藏时间的延长, 对照蓝莓果实的TSS含量快速下降, 而辐照处理组的先升高(贮藏7 d)后下降, 排除果实的个体差异, 这可能是由于辐照处理刺激了蓝莓果实中的果胶水解酶, 加速了其原果胶的降解。同时, 对照和辐照处理组蓝莓果实TA含量也随着贮藏时间的延长而逐渐下降。贮藏后期, 0.5 kGy和3.0 kGy辐照处理组的TSS含量和TA含量快速下降并与对照接近, 1.0~2.5 kGy辐照处理组的缓慢下降并明显高于对照 ( $P<0.05$ ), 其中2.5 kGy辐照处理的效果最好。因此, 适当的辐照处理能够缓解冷藏后期蓝莓果实的TSS含量和TA含量的下降。

如表1所示, 随贮藏时间延长, 辐照处理后蓝莓果实的VC含量和花青素含量均略有下降(与对照差异不明显 ( $P>0.05$ )), 且与辐照剂量呈负相关, 其中 $y_{VC} = -0.16x + 9.8833$  ( $R^2=0.96069$ ),  $y_{花青素} = -0.00611x + 1.1544$  ( $R^2=0.9293$ )。贮藏前期, 对照和辐照处理组中VC含量和花青素含量之间的差异不明显 ( $P>0.05$ ), 贮藏21 d后, 0.5 kGy和3.0 kGy辐照处理开始快速下降, 并逐渐与对照接近。整个贮藏期内, 1.0~2.5 kGy辐照处理组VC含量和花青素含量的下降幅度相对于对照比较缓慢, 其中2.5 kGy辐照处理的效果最好, 贮藏35 d时蓝莓果实VC含量为7.05%, 花青素含量为1.02 mg/g, 均明显高于对照(5.46%和0.88 mg/g)。所以, 辐照处理虽然能够直接影响蓝莓果实VC含量和花青素含量, 但适当的辐照剂量能够减缓冷藏期间蓝莓果实VC含量和花青素含量的下降。

### 2.4 辐照处理对呼吸强度和乙烯释放量的影响



**图3 辐照处理对冷藏中蓝莓果实呼吸强度和乙烯释放量的影响**

**Fig. 3 Effect of irradiation treatment on the respiration intensity of blueberries during cold storage**

如图3所示, 辐照处理后(贮藏0 d时)蓝莓果实的呼吸强度和乙烯释放量均比对照有所增强, 并且随着辐照剂量的增加而逐渐提高 ( $y_{呼吸强度} = 0.08257x + 1.5782$ ,  $R^2_{呼吸强度} = 0.8311$ ;  $y_{乙烯释放量} = 0.01543x + 2.416$ ,  $R^2_{乙烯释放量} = 0.99184$ ), 但各辐照处理组之间的差异并不明显 ( $P>0.05$ )。出现这种现象的原因可能是由于辐照处理作为一种逆境胁迫, 刺激了蓝莓果实的呼吸系统。整个贮藏期内, 对照蓝莓果实的呼吸强度和乙烯释放量快速上升, 并在后期逐渐趋于平缓, 预示对照蓝莓果实开始走向衰老。然而, 辐照处理组的呼吸强度和乙烯释放量均在贮藏7 d时出现了一个不明显的波谷, 然后再缓慢地上升, 说明辐照刺激引起的呼吸作用增强反应在低温环境中得到了有效的缓解。贮藏后期, 0.5 kGy辐照处理组和3.0 kGy

辐照处理组的呼吸强度和乙烯释放量均与对照接近,而1.0~2.5 kGy辐照处理组的呼吸强度明显低于对照( $P<0.05$ ),其中2.5 kGy辐照处理的效果最好。说明适当剂量的辐照处理对延缓蓝莓果实的衰老进程有积极作用。

## 2.5 辐照处理对细胞膜相对电导率和丙二醛含量的影响

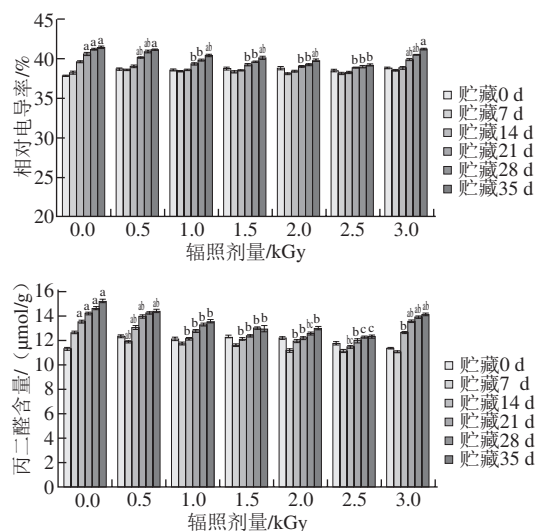


图4 辐照处理对冷藏中蓝莓果实细胞膜相对电导率和丙二醛含量的影响

Fig. 4 Effect of irradiation treatment on the relative electrical conductivity of blueberries during cold storage

如图4所示,辐照处理后(贮藏0 d)蓝莓果实的细胞膜相对电导率和丙二醛含量均略高于对照,但各辐照处理组之间的差异不明显( $P>0.05$ ),这说明辐照处理可能对果实细胞膜结构的影响不大。随着贮藏时间的延长,对照细胞膜相对电导率和丙二醛含量均呈上升的趋势,而辐照处理组的变化趋势并不一致,其中0.5 kGy和3.0 kGy辐照处理组的细胞膜相对电导率和丙二醛含量均在贮藏后期开始升高并逐渐与对照接近,1.0~2.0 kGy辐照处理组在贮藏后期上升相对缓慢,2.5 kGy辐照处理组几乎没有变化。与细胞膜相对电导率不同的是,各辐照处理组的丙二醛含量在贮藏7 d时出现了一个微弱的波谷后缓慢上升,这可能是由于细胞防御系统被启动使脂质过氧化反应逆向合成,丙二醛含量有所下降,但随着这种自我保护作用的逐渐减弱,丙二醛的合成又逐步恢复主导地位。总体来看,辐照处理能够有效缓解冷藏期间蓝莓果实丙二醛含量和细胞膜相对电导率的升高,从延缓蓝莓果实的衰老进程。

## 2.6 辐照处理对LOX活性的影响

由图5所示,辐照处理后(贮藏0 d),蓝莓果实的LOX活性均比对照略有提高,这可能是因为蓝莓果实受到辐照逆境胁迫而产生了一个应激反应所致。随着贮藏时间的延长,这种应激反应在低温环境中得到了有效地缓解,其LOX活性均开始缓慢下降到波谷,贮藏7 d后又

开始逐渐上升,预示蓝莓果实进入一个不可逆的衰老阶段。贮藏后期,0.5 kGy和3.0 kGy辐照处理组的LOX活性快速上升,且逐渐与对照接近,而1.0~2.5 kGy辐照处理组上升相对缓慢,其中贮藏35 d时2.5 kGy辐照处理组的LOX活性最低(93.54 U/mg)。因此,有效的辐照处理能够有效地抑制冷藏期间特别是冷后期LOX活性,从而延缓蓝莓果实的衰老进程。

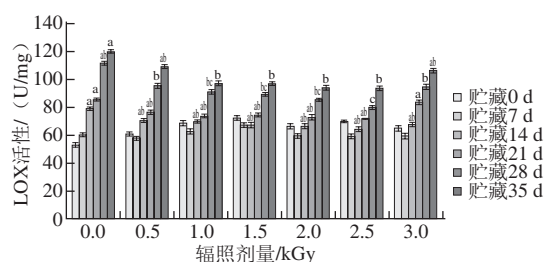


图5 辐照处理对冷藏中蓝莓果实LOX活性的影响

Fig. 5 Effect of irradiation treatment on the LOX activity of blueberries during cold storage

## 3 讨论与结论

蓝莓在贮藏期间由于果实变软,汁液渗出,极其容易遭受微生物的侵袭,导致腐烂变质。 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照技术由于其高强度的穿透性,可以在不拆卸包装和破坏果蔬原形的状态下,达到防腐保鲜的效果。然而,辐照剂量是影响辐照保鲜效果的一个至关重要因素,不同果蔬种类或不同品种,对辐照剂量的耐受程度是不同的。某些研究已经表明辐照处理对降低草莓腐烂率有积极的影响。例如赵永福等<sup>[20]</sup>的研究表明3.0 kGy辐照的草莓在冷藏中果实腐烂率下降了70%,刘超<sup>[10]</sup>也指出草莓的腐烂指数与辐照剂量呈负相关。通常蓝莓在5℃条件下冷藏35 d,果实腐烂率为10%左右,本实验结果表明,较低剂量(0.5 kGy)的辐照处理对贮藏期间蓝莓果实腐烂率的变化没有影响,较高剂量(3.0 kGy)的辐照处理能够加速冷藏后期蓝莓的腐烂变质,适当的辐照剂量(1.0~2.5 kGy)能够减缓冷藏后期蓝莓果实的腐烂变质,同时,1.0~2.5 kGy辐照剂量还能够有效推迟冷藏期间蓝莓果实硬度的下降。傅俊杰等<sup>[21]</sup>采用不同辐照剂量处理猕猴桃果实,结果发现,辐照剂量越大,果实硬度的下降幅度越小。刘超<sup>[10]</sup>的研究结果表明,草莓的硬度虽然经过辐照后有轻微的下降,但在贮藏2 d以后反而大于对照,且下降程度相对对照不明显。相关文献报道,过氧化物酶能催化单体木质素聚合形成木质素,木质素含量的增加能减少蓝莓果实腐烂和软化的发生<sup>[2]</sup>,所以出现上述结论可能是由于辐照处理刺激了过氧化物酶和多酚氧化酶活性,从而催化木质素的合成,减缓了腐烂率的上升和硬度的下降。

采后蓝莓仍然是一个活的有机体,为维持其正常的生理活动,需要进行呼吸作用,这必然消耗营养物质,使其品质下降。 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照是一种电离技术,对果蔬中的营养成分不仅能够产生直接的破坏作用,使其降解或解聚,还能改变某些营养物质的水解酶或合成酶的活性,间接影响其在贮藏期间含量的变化。本实验结果表明,辐照处理对蓝莓果实TSS和TA含量没有直接影响,但1.0~2.5 kGy的辐照处理可以延缓其在冷藏期间的降解过程,其中2.5 kGy辐照剂量表现效果最好,能够很好地保持蓝莓果实原有的品质和风味。通常情况下,果蔬中的VC和花青素对辐照强度敏感,猕猴桃<sup>[21]</sup>、龙眼<sup>[22]</sup>、莱阳梨<sup>[23]</sup>、荔枝<sup>[15]</sup>等水果经不同剂量的辐照后,其果实中VC含量都有不同程度的降低,本实验的结果表明,辐照处理能够直接破坏蓝莓果实VC含量和花青素含量,但这种破坏作用的影响与对照相比并不显著( $P>0.05$ ),且与辐照剂量呈线性负相关。但是,在贮藏期间、特别是贮藏后期,1.0~2.5 kGy辐照处理能够有效缓解蓝莓果实VC和花青素的降解,其中2.5 kGy辐照剂量表现效果最好。因此,适当的辐照处理对蓝莓果实营养成分的影响不大,还能有效缓解其在冷藏期间各营养成分的降解。该结论与刘超<sup>[10]</sup>在辐照处理对草莓冷藏品质的影响基本一致。

$^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照处理可以通过引起果蔬在贮藏过程中的生理生化变化,从而达到延缓果实衰老和提高贮藏品质的目的。目前,某些相关研究已经表明,适当的辐照处理对果蔬生理代谢有积极影响,例如,关学雨等<sup>[23]</sup>认为0.3~1.0 kGy辐照处理能够通过降低莱阳梨的呼吸强度,在一定时期内抑制内源乙烯的生成,叶惠等<sup>[16]</sup>认为0.8 kGy辐照剂量使贮藏后期草莓的丙二醛含量和细胞膜透性下降缓慢。本实验结果表明,辐照处理后蓝莓果实的呼吸强度、乙烯释放量、细胞膜透性、丙二醛含量和LOX活性均略有提高,其中,呼吸强度和乙烯释放量的提高与辐照剂量呈正相关,而1.0~2.5 kGy辐照剂量的处理使这些负作用在贮藏期间得到了有效的缓解,并明显低于对照,说明1.0~2.5 kGy辐照剂量能够延缓冷藏期间蓝莓果实的衰老,其中2.5 kGy辐照剂量表现最好,最大程度地延缓了膜脂过氧化作用,保证了膜的完整性,这可能是因为辐照刺激产生的自由基启动了蓝莓果实的防御系统,导致细胞膜在冷藏期间得以修复,丙二醛含量略微下降。

总之, $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 辐照处理对于采后蓝莓的低温保鲜是一个行之有效的办法。但是,辐照剂量不同,影响效果也不同。1.0~2.5 kGy的辐照处理能够通过抑制贮藏期间蓝莓果实的呼吸作用和膜脂过氧化作用,推迟蓝莓果实的衰老进程,延缓蓝莓果实中营养物质的降解,其中,2.5 kGy辐照剂量对蓝莓果实的保鲜效果最佳,既能有效降低蓝莓果实腐烂率,又能很好地保持蓝莓果实的贮藏品质。

#### 参考文献:

- [1] 朱麟,凌建刚. 国内外蓝莓保鲜技术研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2011, 31(11): 173-176.
- [2] SONG Y S, YAM K L. Improvement of the storage quality of blueberry in modified atmosphere packaging using moisture absorbent[C]//IFT Annual Meeting, Chhicago. Unite States, 1995: 143.
- [3] 孟宪军,姜爱丽,胡文忠,等. 箱式气调贮藏对采后蓝莓生理生化变化的影响[J]. 食品工业科技, 2011, 32(9): 379-383.
- [4] JONGEN W. Fruit and vegetable processing: improving quality[M]. Woodhead Publishing Limited Cambridge, 2002: 145.
- [5] 纪淑娟,周倩,马超,等. 1-MCP处理对蓝莓常温货架品质变化的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 322-327. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201402063.
- [6] HUSSAIN P R, MEENA R S, DAR M A, et al. Studies on enhancing the keeping quality of peach (*Prunus persica* Bausch) Cv. Elberta by gamma-irradiation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2008, 77(4): 473-481. DOI:10.1016/J.RADPHYSCH.2007.08.003.
- [7] WANI A M, HUSSAIN P R, MEENA R S, et al. Effect of gamma-irradiation and refrigerated storage on the improvement of quality and shelf life of pear (*Pyrus communis* L. Cv. Bartlett/William)[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2008, 77(8): 983-989. DOI:10.1016/j.radphyschem.2008.04.005.
- [8] WANI A M, HUSSAIN P R, DAR M A, et al. Shelf-life extension of pear (*Pyrus communis* L.) by gamma-irradiation[J]. Journal of Food Science and Technology, 2007, 44(2): 138-142.
- [9] 祖智波,李文革. 辐照对草莓保鲜的效果研究[J]. 食品科技, 2006, 31(5): 114-116.
- [10] 刘超. 草莓辐照保鲜贮藏及其生理品质变化的研究[J]. 安徽农业科学, 2003, 31(5): 744-745.
- [11] SPALING D H, REEDER W F. Decay and acceptability of mangoes treated with combinations of hot water, immazalel and gamma irradiation[J]. Plant Disease, 1986, 70(12): 1149-1151.
- [12] LACROIX M L, JOBIN M, LATEREILLE B, et al. Hot water immersion and irradiation effect on mangoes keeping quality after air shipment from Thailand and Canada[J]. Microbiologie Aliments Nutrition, 1991, 9(2): 155-160.
- [13] PRAKASH A, MANLEY J, DECOSTA S, et al. The effects of gamma irradiation on the microbiological, physical and sensory qualities of diced tomatoes[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 63(3/4/5/6): 387-390. DOI:10.1016/S0969-806X(01)00529-1.
- [14] ASSI N E, HUBER D J, BRECHT J K. Irradiation induced changes in tomato fruit and pericarp firmness, electrolyte efflux, and cell wall enzyme activity as influenced by ripening stage[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1997, 122(1): 100-106.
- [15] 罗雪梅,余勤,封振梅,等. 辐照荔枝贮藏生理研究[J]. 核农学报, 1996, 10(1): 61-64.
- [16] 叶惠,陈建勋,余让才,等.  $\gamma$ 辐照对草莓保鲜及其生理机制的研究[J]. 核农学报, 2000, 14(1): 24-28.
- [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, 2013: 24-45.
- [18] 陈建勋,王晓峰. 植物生理学实验[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006: 54-55.
- [20] 赵永富,谢宗传,于亚君,等. 草莓辐照保鲜的研究[J]. 食品科学, 1999, 20(2): 54-56.
- [21] 傅俊杰,冯凤琴. 猕猴桃辐照保鲜效果的研究[J]. 核农学报, 2003, 17(5): 367-369.
- [22] 赵云峰,林河通,林娇芬,等. 龙眼果实采后呼吸强度、细胞膜透性和品质的变化[J]. 福建农林大学学报, 2005, 34(2): 263-267.
- [23] 关学雨,孙守义,王守经,等. 辐照莱阳梨贮藏期生理生化指标的研究[J]. 核农学报, 1993, 14(3): 120-123.