

# $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照处理对蓝莓保鲜效果的影响

龙明秀<sup>1</sup> 吴凤玉<sup>2</sup> 田竹希<sup>1</sup> 刘敏<sup>3</sup> 何扬波<sup>1</sup> 李咏富<sup>1,\*</sup> 石彬<sup>1</sup> 梁倩<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>贵州省农业科学院现代农业发展研究所, 贵州 贵阳 550006; <sup>2</sup>北京工商大学食品学院, 北京 100048; <sup>3</sup>贵州大学酿酒与食品工程学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**为延长蓝莓果实的货架期,本试验利用市售保鲜盒和专利保鲜盒包装蓝莓,并结合 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照处理,分析贮藏期间蓝莓果实微观结构、生理生化指标、主要营养成分的变化。结果表明,专利保鲜盒+1.0 kGy 剂量辐照处理可显著降低果实表面的菌落总数,较好地保持果实原有结构、色泽、硬度及抗氧化性,有效减缓了蓝莓花青素、总酚、Vc 等营养成分的消耗,延长了蓝莓保鲜时间;而专利保鲜盒+2.0 kGy 剂量辐照处理加速了果实衰老和品质劣变;专利保鲜盒因具有微气调作用而使其保鲜效果明显优于普通市售保鲜盒。因此,低剂量的辐照处理与微气调保鲜盒结合使用可有效延长蓝莓的货架期。

**关键词:** 蓝莓; 辐照; 贮藏品质; 微观结构

DOI: 10.11869/j.issn.100-8551.2019.11.2165

蓝莓(*Vaccinium uliginosum* L.) 学名越橘,深蓝色浆果,近球形,被白霜,皮薄籽小,富含维生素、花青素等营养成分,具有抗癌、抗氧化、延缓衰老等保健功效<sup>[1]</sup>,被誉为“浆果之王”。蓝莓果实的采收约在6~8月的高温多雨期,采后果实受到田间热及呼吸作用的影响,生理代谢加快,导致果实在常温条件下放置5~7 d即开始变软、腐烂<sup>[2]</sup>,蓝莓品质及营养价值大幅降低,果实的不耐贮性已成为限制蓝莓产业发展的主要障碍。因此,蓝莓采后贮藏保鲜技术研究是当前亟待解决的关键问题之一。

有关蓝莓采后贮藏技术的研究多集中在物理或化学方法,如气调<sup>[3]</sup>、冷藏<sup>[2]</sup>、辐照处理<sup>[4]</sup>及包装材料<sup>[5]</sup>等。其中, $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照是一种操作简便的冷杀菌技术。 $\text{Co}$ 放射源产生高穿透力的 $\gamma$ 射线作用于农产品时,产生化学或生物学效应,从而抑制农产品表面微生物活动,延缓果实呼吸作用和新陈代谢,改善品质,延长果实的贮存期<sup>[6]</sup>。陈梦玉等<sup>[7]</sup>研究 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照处理对蓝莓贮藏效果的影响发现,1.5 kGy 剂量辐照处理可将蓝莓的冷藏期延长30~40 d; Wang 等<sup>[4]</sup>发现0.5 kGy 辐照处理对蓝莓的保鲜效果不明显,3.0 kGy

辐照处理加速了蓝莓果实在贮藏期间的衰老,而1.0、2.5 kGy 辐照处理可降低果实腐烂率,保持果实硬度、色泽和减少营养物质流失。目前,有关蓝莓贮藏保鲜技术研究大多采用单一的技术手段,本试验采用辐照处理与专利包装材料复合处理,旨在研究不同剂量 $^{60}\text{Co}-\gamma$ 辐照处理和新型包装材料对贮藏期间蓝莓果实微观结构、生理生化指标、主要营养成分的影响,以为延长蓝莓采后贮藏期,解决蓝莓采后品质劣变问题提供一定的科学依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料与试剂

供试蓝莓于2017年8月采于贵州省麻江县蓝莓种植基地。选择无病斑、无畸变、大小均匀、颜色鲜亮一致的8~9成熟度蓝莓作为供试材料,采后用保鲜膜包装并立即运送至实验室。

市售保鲜盒(品牌:樊林福祥):PET材质,规格为105 mm×105 mm×40 mm,盒盖、盒底分别有12个1.0 cm×0.5 cm 透气孔(功能:透气);专利保鲜盒(贵州三

收稿日期:2018-06-20 接受日期:2018-08-10

基金项目:特色农产品辐照保鲜技术服务企业行动计划(黔科合平台人才[2016]5712号), $^{60}\text{Co}-\gamma$ 射线辐射蓝莓综合保鲜技术应用及示范(黔科合成转字[2015]5330-1),贵州省特色农产品辐照保鲜与加工工程技术研究中心(2016GZ67305)

作者简介:龙明秀,女,助理研究员,主要从事农产品加工与贮藏保鲜研究。E-mail:692825923@qq.com

\* 通讯作者:李咏富,男,副研究员,主要从事农产品质量与食品安全研究。E-mail:344856786@qq.com

福生物科技有限公司): PET 材质,规格为 105 mm×105 mm×40 mm,盒底有 4 个 1.0 cm×0.5 cm 透气孔(功能:减少失水及细菌侵染)。专利授权号(CN 204896318U)。

主要化学试剂:磷酸、氯化钾、戊二醛、乙醇、浓盐酸、冰乙酸均为分析纯,济宁宏明化学试剂有限公司。

## 1.2 主要仪器与设备

$^{60}\text{Co}-\gamma$  静态辐照源,贵州省农业科学院辐照中心;TMS-Pro 质谱仪,美国 FTC 公司;NH310 色差仪,深圳市三恩时科技有限公司;MB35 卤素水分测定仪,奥豪斯国际贸易有限公司;722 型紫外可见分光光度计,尤尼柯科学仪器有限公司;S-3400 扫描电子显微镜,日本日立公司;PAL-1B1 便携式手持式折光仪,日本 Atago 公司;H1850R 离心机,湘仪离心机仪器有限公司;PEN3 型电子鼻,德国 AIRSENSE 公司。

## 1.3 试验方法

1.3.1 辐照试验 试验设置两组,一组使用市售保鲜盒包装,无辐照处理;另一组使用专利保鲜盒包装,辐照剂量分别为 0、1.0、2.0 kGy。每盒蓝莓的质量为 125 g,送至贵州省农业科学院辐照中心进行  $^{60}\text{Co}-\gamma$  静态辐照源辐照处理。样品辐照前后均贮藏于温度  $4\pm 0.5^\circ\text{C}$ 、湿度 80%~90% 的冰箱中。每 10 d 取样测定相关指标,每个指标至少重复测定 3 次。

1.3.2 蓝莓果实菌落总数的测定 参照国家标准 GB 4789.2-2016<sup>[8]</sup> 的测定方法。

1.3.3 蓝莓好果率的测定 以果实完好、饱满、光泽好和无腐败、霉变、软烂作为好果的判定标准,随机抽取一定数量的蓝莓果实,记录蓝莓总果数和好果数,并按照公式计算好果率:

$$\text{好果率} = (\text{好果数} / \text{总果数}) \times 100\% \quad (1)$$

1.3.4 蓝莓果实超微结构分析 分别于处理后的第 20(前期)、第 45(中期)、第 70 天(末期)取样,进行蓝莓果皮超微结构形态观察。每次取样部位保持一致,用解剖刀切取长约 4 mm、宽约 3 mm 的果皮数块,放入由  $0.2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  磷酸缓冲溶液配制的 2.0% 戊二醛溶液(pH 值 6.8)中,冷藏固定 24 h 后,用磷酸缓冲液清洗 3 次,然后用乙醇(浓度分别为 55%、65%、75%、85%、95%、100%)分 5 次梯度脱水,再放入冷冻干燥机中干燥 6 h。将干燥后的果皮(外表面朝上)用导电胶黏贴在样品台上,放入金属离子溅射仪镀铂膜,最后置于扫描电子显微镜下观察,并选取有代表性视野进行拍照。

1.3.5 蓝莓果实硬度的测定 采用质构仪进行测定。测试条件:选取水果刺穿模式,选择直径为 2 mm 的不

锈钢探头,起始力为 0.038 N,形变量 58%,测试前速度为  $50 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,测试速度为  $30 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ,回程距离为 15 mm。每个处理分别随机选取 7 粒整果带皮测定,结果取平均值。

1.3.6 蓝莓果实色差的测定 采用色差仪测定蓝莓果实的赤道面。色差仪在使用前用黑板和白板进行校准,每个样品平行测定 10 次。 $L^*$  值、 $a^*$  值、 $b^*$  值和  $c^*$  值分别代表明暗度、红度、黄度和色彩饱和度。按照公式计算色彩饱和度  $c^*$  值:

$$c^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

1.3.7 蓝莓营养成分的测定

1.3.7.1 含水量的测定 采用 MB35 卤素水分测定仪测定蓝莓果实的水分含量。

1.3.7.2 可溶性固形物含量的测定 将一定质量的蓝莓打浆后,使用 4 层纱布过滤浆液,吸取 0.3 mL 滤液,采用手持式折光仪测定可溶性固形物含量,每个处理重复测定 3 次,结果取平均值。

1.3.7.3 花青素、总酚含量的测定 蓝莓提取液的制备:准确称取 5 g 蓝莓加入 5 mL 乙醇:蒸馏水:盐酸混合溶液(7:3:1, v/v/v)均质,然后在  $4^\circ\text{C}$  下  $2\ 500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 10 min,取上清液备用。

花青素含量的测定:将蓝莓提取液分别用 pH 值 1.0 的 HCl-KCl 缓冲液和 pH 值 4.5 的醋酸-醋酸钠缓冲液稀释 100 倍后,按照 pH 差示法<sup>[9]</sup>进行测定。

总酚含量的测定:将蓝莓提取液稀释 5 倍后采用 Folin-Ciocalteu 比色法<sup>[10]</sup>进行测定。

1.3.8 蓝莓抗氧化能力的测定 称取 4 g 蓝莓组织,加入一定量生理盐水,冰水浴条件下制备成 5% 的匀浆液,  $4^\circ\text{C}$  下  $2\ 500 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$  离心 10 min,取上清液备用。

1) 维生素 C(Vc) 含量的测定:将浓度为 5% 的组织匀浆稀释 100 倍,取 0.4 mL 按试剂盒(南京建成生物工程研究所)说明书进行测定。

2) 丙二醛(malonic dialdehyde, MDA) 含量的测定:将浓度为 5% 的组织匀浆稀释 10 倍,取 0.1 mL 稀释液按试剂盒说明书进行测定。

3) 抗超氧阴离子自由基(anti-superoxide anion activity, A-SOA) 的测定:取 50  $\mu\text{L}$  浓度为 5% 的组织匀浆按试剂盒说明书进行测定。

4) 总抗氧化能力(total antioxidant capacity, T-AOC) 测定:将浓度为 5% 的组织匀浆稀释 2 倍,取 100  $\mu\text{L}$  稀释液按试剂盒说明书进行测定。

1.3.9 蓝莓挥发性物质的分析鉴定 准确称取 3 g 破碎后的蓝莓果实于 50 mL 顶空瓶中,  $4^\circ\text{C}$  下静置 10 min 使挥发性物质充分平衡,然后采用电子鼻顶空吸

气进行检测,试验开始前先对电子鼻的测定参数进行优化。测试条件为:流速  $300 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  样品检测时间  $50 \text{ s}$  测定结束后清洗时间  $300 \text{ s}$  每个样品平行测定 3 次。

#### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 软件对试验数据进行统计处理,结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。用 SPSS 17.0 进行显著性分析并应用 Origin 8.0 软件绘制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 辐照处理对蓝莓菌落总数的影响

蓝莓含水量和含糖量高,为微生物繁殖提供了良好的条件,因此,要延长蓝莓贮藏时间、保持新鲜品质,必须控制微生物的生长繁殖。由表 1 可知,随着贮藏

时间的延长,对照组(control,CK)蓝莓的初始菌落总数较高(多不可计),贮藏前期有所降低,但从贮藏第 40 天起,蓝莓果实中菌落总数均为多不可计;贮藏前期(0~20 d)0 kGy 辐照处理组的蓝莓果实菌落总数不断下降,贮藏 30~50 d 时蓝莓果实菌落总数呈先上升后下降趋势,从贮藏第 60 天开始多不可计,表明专利保鲜盒只能在短期内抑制微生物活动。与初始菌落总数相比,贮藏第 70 天时,1.0 kGy 辐照处理组蓝莓果实的菌落总数降幅最大;经辐照处理后,2.0 kGy 辐照处理组蓝莓果实的菌落总数始终高于 1.0 kGy 辐照组,这可能是因为高剂量的辐照产生大量自由基,对果实细胞造成了一定程度的损伤,为微生物繁殖提供了良好条件,故造成贮藏后期蓝莓果实中菌落总数增加<sup>[11]</sup>。综上,辐照处理在一定时间内能够起到抑菌、保鲜的效果,且 1.0 kGy 辐照剂量的处理效果最佳。

表 1 辐照处理对蓝莓果实菌落总数的影响

Table 1 Effect of irradiation treatment on the aerobic bacterial count of blueberries /( $\text{cfu}\cdot\text{g}^{-1}$ )

| 辐照剂量<br>Irradiation dose/kGy | 贮藏时间 Storage time/d |          |          |          |          |          |          |          |
|------------------------------|---------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                              | 0                   | 10       | 20       | 30       | 40       | 50       | 60       | 70       |
| CK                           | -                   | 2.70E+05 | 1.70E+03 | 2.90E+04 | -        | -        | -        | -        |
| 0                            | 2.50E+05            | 2.20E+04 | 1.60E+03 | 1.50E+04 | 3.60E+04 | 2.20E+03 | -        | -        |
| 1.0                          | 6.90E+02            | 1.00E+02 | 5.00E+01 | 1.30E+02 | 1.10E+02 | 1.40E+02 | 3.50E+02 | 2.10E+03 |
| 2.0                          | 1.70E+02            | 2.50E+02 | 2.00E+02 | 6.50E+02 | 3.00E+02 | 6.00E+02 | 8.00E+02 | 7.00E+03 |

注“-”表示多不可计。

Note ‘-’ indicates uncountable.

### 2.2 辐照处理对蓝莓果实好果率的影响

好果率是直观反映果实整体感官品质的指标之一,该指标在一定程度上反映了果实的衰老程度,是判断果实耐贮性和衡量果实商品价值的重要指标之一<sup>[12]</sup>。蓝莓贮藏过程中,随着果实成熟度的增加,衰老加速,果肉发生软化、霉变直至腐烂<sup>[13]</sup>。由图 1 可知,随着贮藏时间的延长,蓝莓好果率逐渐降低。CK 蓝莓的好果率下降速度最快,贮藏第 40 天时好果率仅为 57.48%,随后蓝莓好果率均低于 50%(好果率低于 50%后不再统计),基本失去商品价值,表明与普通市售保鲜盒相比,专利保鲜盒对蓝莓的保鲜具有明显效果。贮藏前期,各辐照处理组间蓝莓的好果率无显著性差异( $P>0.05$ );贮藏后期,1.0 kGy 辐照处理组蓝莓的好果率显著高于其他辐照处理组,但 0 kGy 辐照处理组和 2.0 kGy 辐照处理组间差异不显著( $P>0.05$ ),说明高剂量辐照不利于蓝莓的贮藏,表现在蓝莓品质劣变,好果率降低。

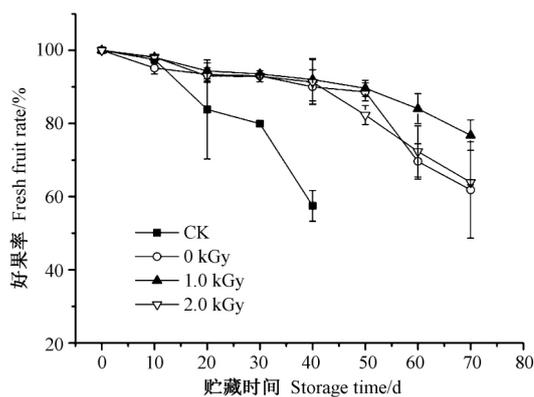


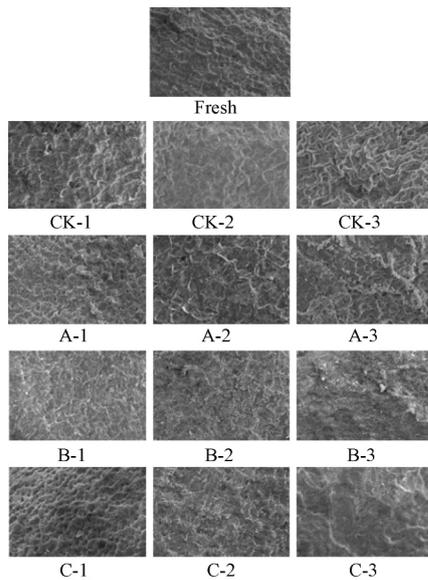
图 1 辐照处理对蓝莓好果率的影响

Fig.1 Effect of irradiation treatment on the fresh fruit rate of blueberries

### 2.3 辐照处理对蓝莓微观结构的影响

由图 2 可知,各处理组蓝莓果皮均随着贮藏时间延长出现明显的波浪型褶皱,且厚度不均匀。郜海燕

等<sup>[14]</sup>研究也观察到相似的结构变化,其中,CK果皮皱缩深度最大,其次为0 kGy辐照处理组,说明在贮藏末期蓝莓果皮皱缩严重,可能是果实成熟衰老或果粉消失导致失水皱缩。1.0 kGy辐照处理组蓝莓果皮的形态变化较小,而2.0 kGy辐照组蓝莓果皮在贮藏初期已经出现了大量的波浪型褶皱,随着贮藏时间的延长,其褶皱减少,结构瓦解坍塌,说明高剂量辐照处理加速了果实衰老<sup>[15]</sup>。综上可知,低剂量辐照处理对保持蓝莓果实的新鲜度,减少失水皱缩,延缓果实衰老具有显著作用。



注: CK-1~3、A-1~3、B-1~3、C-1~3 分别表示对照组、0 kGy、1.0 kGy、2.0 kGy 辐照处理组在贮藏第 20、第 45、第 70 天时蓝莓的结构形态。

Note: CK-1~3, A-1~3, B-1~3 and C-1~3 indicate the microstructure of blueberries of control and the irradiation dose of 0 kGy, 1.0 kGy, 2.0 kGy on 20, 45, 70 days, respectively.

图 2 辐照处理对蓝莓微观结构的影响  
Fig.2 Effect of irradiation treatment on the microstructure of blueberries

## 2.4 辐照处理对蓝莓果实硬度的影响

硬度是衡量果实成熟度和果实品质的一个重要指标。随着贮藏时间的延长,填充在蓝莓果皮细胞壁中的原果胶类物质在果胶酶等一系列酶的作用下发生降解,导致细胞壁中的结构物质减少,壁层变薄,果实软化、硬度下降<sup>[16]</sup>,商品价值随之下降。由表 2 可知,随着贮藏时间的延长,各处理组蓝莓果实的硬度均呈现不断下降趋势,CK 蓝莓的硬度始终低于其他处理组,且硬度下降速率最快,品质劣变最为严重,这可能是因为市售保鲜盒包装的蓝莓在贮藏期间发生失水皱缩,加之后熟衰老作用使蓝莓果实硬度快速下降,品质迅速劣变。整个贮藏期间,1.0 kGy 辐照处理组的蓝莓硬度一直保持最大。0 kGy 辐照处理组的蓝莓硬度稍低于 1.0 kGy 辐照处理组,而 2.0 kGy 辐照处理组蓝莓的硬度显著低于其他辐照处理组,原因可能是高剂量辐照处理导致产生大量自由基,对蓝莓果实细胞造成损伤,增加了果实受到物理伤害或病菌感染的风险<sup>[17]</sup>。因此,低剂量辐照处理能够有效延缓蓝莓后熟衰老进程,对延长蓝莓贮藏期具有十分重要的生理作用。

## 2.5 辐照处理对蓝莓果实色泽的影响

水果表面颜色和光泽度是消费者评判品质好坏的直接感官指标,在一定程度上也反映了果实衰老和花青素降解进程<sup>[18]</sup>。由表 3 可知,随着贮藏时间的延长,各处理组蓝莓的  $L^*$  值呈现不同程度的下降趋势, $a^*$  值均呈上升趋势。贮藏期间,1.0 kGy 辐照处理组蓝莓的  $L^*$  值显著高于其他处理组,2.0 kGy 辐照处理组蓝莓的  $L^*$  值最低,CK 蓝莓果实颜色变红的速度最快,其他处理组间无显著性差异,说明辐照处理抑制了蓝莓转红。贮藏前期,各处理组蓝莓的  $b^*$  值缓慢上升,贮藏后期(40 d)蓝莓  $b^*$  值上升速率增加,说明蓝莓果实颜色随着贮藏时间的延长急剧变差,其中辐照处理组的  $b^*$  值始终低于 CK,但不同剂量辐照处理组间的差异不显著。 $c^*$  值表示颜色的饱和度, $c^*$  值越大

表 2 辐照处理对蓝莓果实硬度的影响

Table 2 Effect of irradiation treatment on the hardness of blueberries

| 辐照剂量<br>Irradiation dose<br>/kGy | 贮藏时间 Storage time/d |             |             |             |            |             |            | /g         |
|----------------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|------------|------------|
|                                  | 0                   | 10          | 20          | 30          | 40         | 50          | 60         |            |
| CK                               | 13.04±0.80a         | 11.26±1.32b | 7.76±1.03b  | 6.70±1.40c  | 6.92±1.93c | 5.84±1.47c  | 4.50±0.60c | 3.50±0.72d |
| 0                                | 14.00±0.79a         | 12.50±0.58a | 10.40±1.79a | 8.46±0.91b  | 7.93±0.82b | 6.57±1.13ab | 6.17±0.69a | 5.00±0.70b |
| 1.0                              | 14.50±0.75a         | 13.10±1.03a | 11.30±0.78a | 10.00±1.07a | 8.50±0.68a | 7.00±0.58a  | 6.20±0.68a | 5.95±0.42a |
| 2.0                              | 12.80±0.81a         | 11.32±0.14b | 8.00±1.14b  | 7.00±0.80c  | 6.60±0.67c | 6.18±0.46bc | 5.40±0.01b | 4.00±0.66c |

注: 同列不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Note: Different lowercase letters in same column indicate significant difference at 0.05 level. The same as following.

表示果实颜色越佳。各处理组蓝莓的  $c^*$  值均随着贮藏时间的延长而不同程度的下降,其中 CK 蓝莓果实的  $c^*$  值下降速度最快,1.0 kGy 辐照处理组的  $c^*$  值一直维持在较高水平,其次为 0、2.0 kGy 辐照处理组,CK 最差。综上说明,辐照处理可在一定程度上较好地保持蓝莓果皮原有色泽和鲜艳度,间接证明了适宜剂

量辐照处理可延缓蓝莓果实的衰老进程。王秋芳等<sup>[19]</sup>发现电子束辐照对葡萄花色苷含量有一定的降解作用,但过量的辐照处理会降低果实表面的光泽度。低剂量的辐照处理可延缓果实颜色变暗的进程,使蓝莓较好地保持原有光泽,但其具体原因尚有待进一步深入研究。

表 3 辐照处理对蓝莓果实表面色泽的影响

Table 3 Effect of irradiation treatment on the color and lustre of blueberries

| 指标<br>Index | 辐照剂量<br>Irradiation<br>dose/kGy | 贮藏时间 Storage time/d |              |             |             |              |              |              |              |
|-------------|---------------------------------|---------------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|             |                                 | 0                   | 10           | 20          | 30          | 40           | 50           | 60           | 70           |
| $L^*$ 值     | CK                              | 32.51±1.41c         | 25.36±0.72c  | 25.14±0.27b | 25.58±0.42b | 24.61±0.41ab | 24.41±0.41bc | 23.66±1.77ab | 22.98±2.35b  |
| $L^*$ value | 0                               | 39.56±3.91b         | 26.25±0.88b  | 25.45±0.44b | 26.22±0.66a | 24.77±0.38a  | 24.78±0.57b  | 24.40±0.31a  | 23.35±1.03ab |
|             | 1.0                             | 43.54±4.06a         | 27.46±1.08a  | 26.88±0.65a | 26.46±0.72a | 25.02±0.52a  | 25.25±0.51a  | 24.82±0.45a  | 24.01±0.88a  |
|             | 2.0                             | 33.91±3.25c         | 25.65±0.88bc | 25.22±0.60b | 24.70±0.44c | 24.24±0.65b  | 23.05±0.41c  | 21.34±0.40b  | 20.12±1.12b  |
| $a^*$ 值     | CK                              | 1.84±0.43a          | 2.33±0.81a   | 2.31±0.46a  | 2.78±0.83a  | 4.50±0.51a   | 7.05±1.39a   | 8.00±1.93a   | 10.45±2.81a  |
| $a^*$ value | 0                               | 1.01±0.29b          | 1.22±0.24b   | 2.21±0.96a  | 2.48±0.46a  | 3.46±0.46ab  | 6.77±1.56ab  | 7.28±0.87a   | 9.38±2.70b   |
|             | 1.0                             | 1.01±0.31b          | 1.33±0.70b   | 1.61±0.28c  | 2.39±0.32a  | 3.03±0.46b   | 3.58±0.97c   | 4.98±1.05b   | 8.32±1.49ab  |
|             | 2.0                             | 1.09±0.15b          | 1.14±0.17b   | 1.98±0.36b  | 2.41±0.70a  | 3.26±0.54ab  | 5.28±0.90b   | 5.63±1.71b   | 8.61±3.57ab  |
| $b^*$ 值     | CK                              | 2.13±0.25a          | 2.96±0.27a   | 3.27±0.85a  | 3.68±1.17a  | 5.66±0.23a   | 8.95±0.13a   | 9.02±0.52a   | 10.35±2.79a  |
| $b^*$ value | 0                               | 1.31±0.15b          | 1.76±0.13bc  | 2.38±0.33b  | 2.17±0.82bc | 4.26±0.25b   | 8.34±0.21ab  | 8.61±0.41a   | 9.36±2.62ab  |
|             | 1.0                             | 1.29±0.13b          | 1.66±0.16bc  | 1.72±0.26c  | 2.06±0.35bc | 3.53±0.18c   | 5.66±0.30c   | 6.24±0.65b   | 7.18±1.28b   |
|             | 2.0                             | 1.58±0.26b          | 1.97±0.27b   | 3.06±0.80ab | 2.77±0.51b  | 4.43±0.19b   | 7.42±0.25b   | 8.77±0.38a   | 9.32±2.36ab  |
| $c^*$ 值     | CK                              | 11.07±0.90b         | 8.78±1.91b   | 6.04±1.88c  | 4.98±0.97bc | 4.04±0.53c   | 3.84±0.35a   | 2.07±0.21c   | 2.03±0.13b   |
| $c^*$ value | 0                               | 12.47±0.95ab        | 9.83±3.76b   | 7.69±1.59b  | 5.79±0.95b  | 4.61±0.50b   | 3.81±0.70a   | 3.64±0.49b   | 2.69±0.35ab  |
|             | 1.0                             | 13.49±0.83a         | 12.96±4.50a  | 8.81±2.24a  | 7.52±1.76a  | 6.10±0.71a   | 4.25±0.81a   | 4.98±0.54a   | 3.07±0.80a   |
|             | 2.0                             | 11.72±0.66ab        | 9.37±3.54b   | 7.79±0.97b  | 5.39±1.09b  | 4.35±0.92c   | 3.97±0.51a   | 2.38±0.35c   | 2.15±0.17b   |

## 2.6 辐照处理对蓝莓营养成分的影响

2.6.1 辐照处理对蓝莓果实含水量的影响 蓝莓含水量的变化主要是由水分散失及果实呼吸作用导致的,含水量降低说明果实发生失水,表现为果皮皱缩、商品价值降低<sup>[20]</sup>。由图 4 可知,CK 和各处理组的蓝莓含水量均随着贮藏时间延长呈下降趋势,但不同剂量的辐照处理极大降低了果实的失水率,且与普通保鲜盒相比,专利保鲜盒能有效缓解果实的失水。贮藏第 70 天时,1.0 kGy 辐照处理组的蓝莓含水量最大(80.48%),高于 0 kGy 辐照处理组和 2.0 kGy 辐照处理组,使用普通市售保鲜盒且未经辐照处理的蓝莓含水量已减少至 72.72%。说明低剂量的辐照处理和专利保鲜盒均可减弱贮藏过程蓝莓果实水分的散失,且二者复合效果更好。

2.6.2 辐照处理对蓝莓果实可溶性固形物含量的影

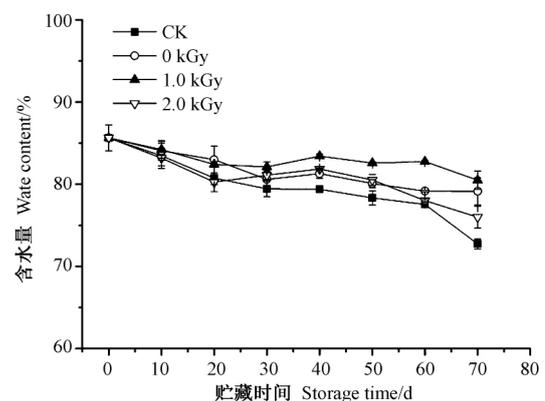


图 3 辐照处理对蓝莓果实含水量的影响

Fig.3 Effect of irradiation treatment on the water content of blueberries

响 由表 4 可知,CK 和各处理组蓝莓的可溶性固形物

含量呈先缓慢下降再升高后下降的趋势。可溶性固形物含量变化主要由以下原因导致:贮藏前期,蓝莓的呼吸速率较高,可溶性固形物作为底物在呼吸作用过程中被消耗,含量下降<sup>[21]</sup>;贮藏中期,蓝莓的生理代谢使原果胶转化为可溶性果胶,淀粉等多糖类大分子物质转化为可溶性碳水化合物,以补充呼吸作用所消耗的能量<sup>[22]</sup>,故含量不断增加;贮藏后期,可溶性固形物不断被消耗,不足以保证果实呼吸代谢作用的进行,故含量有所下降。各处理组蓝莓果实的初始可溶性固形物

含量无明显差异(14.03%~14.80%),随着贮藏时间的延长,CK的可溶性固形物含量下降趋势最明显,其次为2.0 kGy辐照处理和0 kGy辐照处理组,1.0 kGy辐照处理组的蓝莓中可溶性固形物含量变化最小。贮藏50 d后,0 kGy辐照处理组和1.0 kGy辐照处理组的可溶性固形物含量显著大于CK和2.0 kGy辐照处理组,说明低剂量辐照有利于保持蓝莓的可溶性固形物含量。

表4 辐照处理对蓝莓果实可溶性固形物含量的影响

Table 4 Effect of irradiation treatment on the total soluble solids content of blueberries

/%

| 辐照剂量<br>Irradiation dose/kGy | 贮藏时间 Storage time/d |             |             |             |             |             |             |             |  |
|------------------------------|---------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|
|                              | 0                   | 10          | 20          | 30          | 40          | 50          | 60          | 70          |  |
| CK                           | 14.50±1.42ab        | 12.67±0.29b | 12.00±0.31d | 11.40±0.28d | 12.60±0.30d | 13.90±0.98b | 13.70±0.58c | 12.50±0.87c |  |
| 0                            | 14.10±1.15b         | 13.30±0.85b | 12.50±0.53c | 13.27±1.10c | 14.00±0.58b | 15.90±0.42a | 15.20±0.50b | 15.00±0.29a |  |
| 1.0                          | 14.80±2.44a         | 14.50±0.76a | 14.00±0.87a | 14.50±1.00a | 15.20±0.58a | 16.00±0.53a | 15.60±0.29a | 15.30±0.58a |  |
| 2.0                          | 14.03±2.26b         | 13.00±0.84b | 13.30±0.50b | 13.93±0.12b | 13.33±0.58c | 13.20±0.40c | 13.00±0.50d | 12.90±0.29b |  |

### 2.6.3 辐照处理对蓝莓果实花青素、总酚含量的影响

花青素含量是评价蓝莓营养品质的关键指标<sup>[23]</sup>。由图4可知,随着贮藏时间的延长,各处理组蓝莓果实花青素含量均有所下降,其中,1.0 kGy、0 kGy辐照处理组蓝莓果实的花青素含量下降缓慢,并逐渐趋于稳定;CK和2.0 kGy辐照处理组蓝莓果实花青素含量急剧下降,且2.0 kGy辐照处理组蓝莓果实花青素含量低于CK。贮藏末期,1.0 kGy辐照处理组蓝莓果实的花青素含量依然保持最高(28.04 mg·L<sup>-1</sup>),2.0 kGy处理组最低(23.49 mg·L<sup>-1</sup>)。说明高剂量(2.0 kGy)<sup>60</sup>Co- $\gamma$ 辐照处理会显著降低蓝莓果实的花色苷含量,加速花青素的降解,而适量的辐照处理能够缓解果实中花青素的降解速率,减少营养物质的流失。研究表明,适当的辐照处理能够刺激果实花青素合成酶的活性,使花青素被降解的同时有新的花青素合成<sup>[16]</sup>。

酚类化合物是一种广泛存在于水果中、具有多种生物活性的植物次生代谢物,是蓝莓中重要的活性物质<sup>[24]</sup>。由图5可知,随着贮藏时间的延长,蓝莓逐渐进入后熟阶段,总酚含量不断下降。1.0 kGy辐照处理组蓝莓的总酚含量下降幅度最小(降解率为39.69%),CK和2.0 kGy辐照处理组蓝莓的总酚降解率较大(51.44%、61.43%)。酚类物质极不稳定,高剂量辐照处理会加速酚类物质的降解,且普通保鲜盒由于隔氧性差使蓝莓被氧化成醌类,造成总酚含量下降;低剂量辐照处理可在一定程度上延缓酚类化合物的降

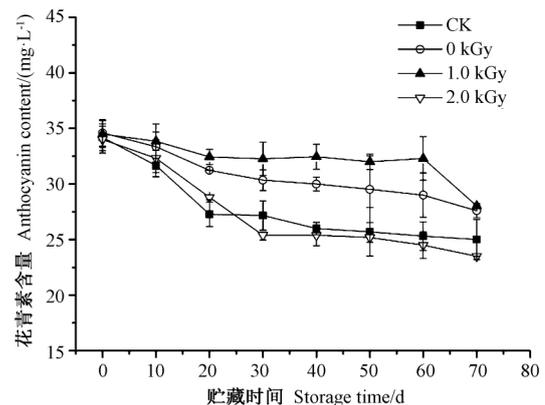


图4 辐照处理对贮藏期间蓝莓果实花青素含量的影响

Fig.4 Effect of irradiation treatment on the anthocyanin content of blueberries during storage

解,使蓝莓果实保持相对较高的生物活性。

### 2.7 辐照处理对蓝莓抗氧化能力的影响

2.7.1 辐照处理对蓝莓果实Vc含量的影响 维生素C(Vc)是衡量水果营养价值的重要指标之一,但Vc稳定性差,极易受温度和氧化作用而被降解,造成果实营养成分的大量流失。由图6可知,贮藏期间,各处理组蓝莓果实的Vc含量均呈下降趋势,1.0 kGy辐照处理组下降较为平缓,2.0 kGy辐照处理组和CK下降速度最快。贮藏初期,各处理组蓝莓中Vc含量的初始值无显著性差异(5.000~5.010  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ) ( $P>0.05$ );

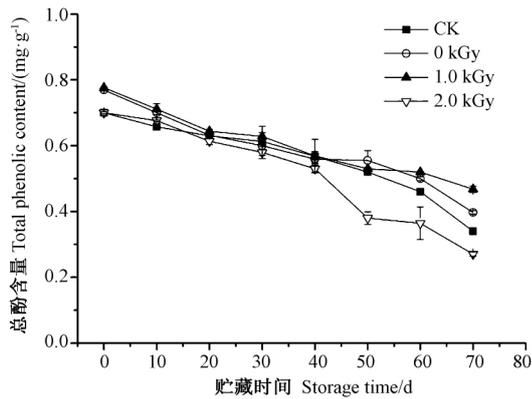


图5 辐照处理对蓝莓果实总酚含量的影响  
Fig.5 Effect of irradiation treatment on the total phenolic content of blueberries

随着贮藏时间的延长,1.0 kGy 辐照处理组蓝莓的 Vc 含量始终保持最高,贮藏至 70 d 时,CK 及 0、1.0、2.0 kGy 辐照处理组蓝莓的 Vc 含量分别为 1 211、1 315、1 800、1 009  $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ ,说明低剂量(1.0 kGy)的辐照处理可延缓 Vc 的降解,高剂量的辐照处理会加速 Vc 降解。对比普通保鲜盒与专利保鲜盒未辐照蓝莓的 Vc 含量变化,发现专利保鲜盒能有效减弱 Vc 降解,这可能是由于专利保鲜盒隔氧性较好,蓝莓接触到的氧气含量较低,减弱了氧气诱导 Vc 氧化作用的发生,故其蓝莓 Vc 降解率低于普通保鲜盒。

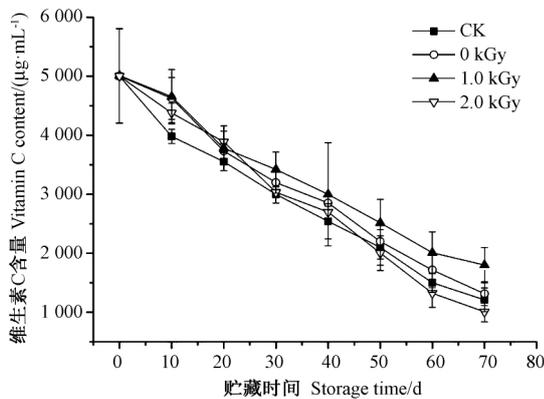


图6 辐照处理对蓝莓果实 Vc 含量的影响  
Fig.6 Effect of irradiation treatment on the vitamin C content of blueberries

### 2.7.2 辐照处理对蓝莓果实 MDA 含量的影响

MDA 是膜脂过氧化的重要产物之一,其对细胞具有毒害作用且会加剧膜的损伤,加速果实衰老<sup>[25]</sup>,因此,MDA 含量可评估细胞膜损伤程度和果实保鲜效果。由图 7 可知,贮藏初期,各处理组蓝莓果实的 MDA 含

量无显著性差异( $P>0.05$ ),随着贮藏时间的延长,蓝莓果实中 MDA 含量呈先上升后下降趋势,到达中期后又缓慢上升,至末期缓慢下降。贮藏第 10 天时,2.0 kGy 辐照处理组的 MDA 含量显著高于其他处理组( $P<0.05$ ),这可能是因为高剂量的辐照处理产生大量自由基导致膜脂发生过氧化,进而使得 MDA 含量增加。贮藏第 30 天时各处理组蓝莓果实 MDA 含量出现波谷,然后缓慢上升,这可能是由于果实细胞的防御系统启动,使脂质过氧化反应逆向进行,蓄积的 MDA 被消耗导致其含量降低,但随着这种自我保护作用的减弱,MDA 的合成又逐步恢复主导地位<sup>[16]</sup>,故其含量又增加。贮藏后期,蓝莓果实失水衰老,脂质过氧化反应强度逐渐减弱,MDA 含量随之缓慢降低;贮藏末期(70 d),CK 及 0、1.0、2.0 kGy 辐照处理的蓝莓果实 MDA 含量分别为 8.33、8.23、8.15、8.90  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 。综上,高剂量辐照处理会加剧蓝莓果实 MDA 的合成和蓄积,低剂量(1.0 kGy)辐照处理可有效抑制贮藏过程中蓝莓膜脂过氧化进程,延迟果实衰老。

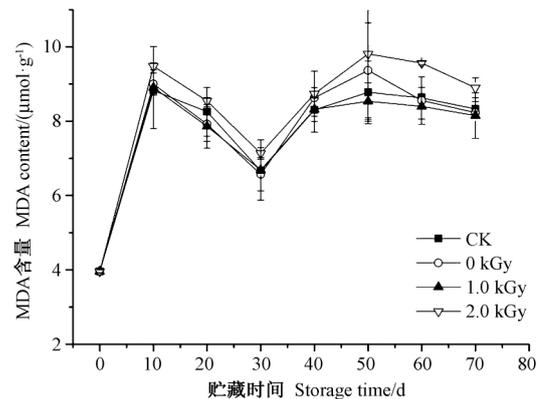


图7 辐照处理对蓝莓果实 MDA 含量的影响  
Fig.7 Effect of irradiation treatment on the MDA content of blueberries

### 2.7.3 辐照处理对蓝莓果实抗超氧阴离子自由基活性的影响

超氧阴离子自由基( $\text{O}_2^-$ )是果实呼吸作用和脂质代谢的中间产物,该自由基积累后会生成一系列衍生物导致氧化反应的发生,生成多余的活性氧自由基,加速果蔬衰老<sup>[12]</sup>,因此抗超氧阴离子自由基活性是评价果蔬抗衰老能力的重要指标。由图 8 可知,各处理组初始 A-SOA 活性无显著性差异( $P>0.05$ ),随着贮藏时间的延长,各处理组均呈先上升后下降趋势。贮藏第 70 天,CK 及 0、1.0、2.0 kGy 辐照处理组蓝莓的 A-SOA 活性分别较最大值下降了 84.15%、82.35%、72.84%、86.21%。综合来看,低剂量(1.0 kGy)辐照处理可有效提高蓝莓的 A-SOA 活性,有效清

除植物体内自由基而减轻伤害,对延缓果实的成熟和衰老有重要作用。

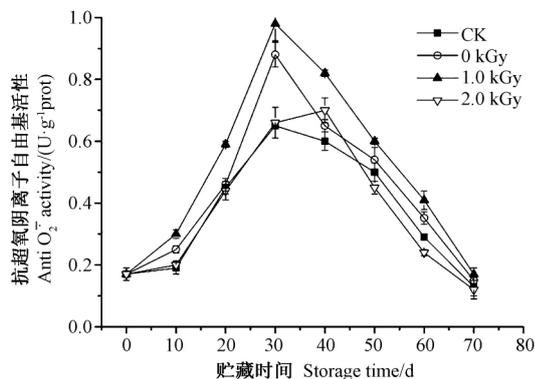


图8 辐照处理对蓝莓果实抗超氧阴离子自由基活性的影响

Fig.8 Effect of irradiation treatment on the anti-superoxide anion activity of blueberries

2.7.4 辐照处理对蓝莓总抗氧化能力的影响 由图9可知随着贮藏时间的延长,总抗氧化能力不断下降,1.0 kGy辐照处理组的总抗氧化能力始终保持最高,其次为0.0 kGy辐照处理组,CK和2.0 kGy辐照处理组最差。贮藏第70天时,CK及0、1.0、2.0 kGy辐照处理组蓝莓果实的总抗氧化能力分别下降了42.49%、40.93%、31.55%、49.09%。综合来看,将具有气调功能的包装材料与低剂量的辐照处理(1.0 kGy)结合使用对保持蓝莓的总抗氧化能力效果最佳。

蓝莓的抗氧化能力使其具备独特的保健功效,其抗氧化能力与其总酚、花色苷含量具有一定的关系。刘小莉等<sup>[26]</sup>对蓝莓果酒的研究也得出了一致结论,蓝莓果酒的抗超氧阴离子自由基活性与花色苷、总酚含量呈极显著正相关,相关系数分别为0.794 3和0.941 4,因此,可通过蓝莓果实的总酚含量来预测其抗氧化能力。

## 2.8 蓝莓果实贮藏品质之间的相关性分析

利用皮尔森相关性分析方法对贮藏30 d的蓝莓各品质指标进行关联性分析。由表5可知,蓝莓果实可溶性固形物含量与含水量呈显著正相关,相关系数为0.971,蓝莓果实含水量越高其可溶性固形物含量越高,但其好果率与硬度、含水量、可溶性固形物含量之间,硬度与含水量、可溶性固形物含量之间的相关性不显著。蓝莓抗超氧阴离子自由基活性与硬度、花青素及Vc含量呈显著正相关,相关系数分别为0.983、0.966、0.971;总抗氧化能力与总酚含量呈显著正相关,相关系数为0.959,说明总酚含量与总抗氧化能力

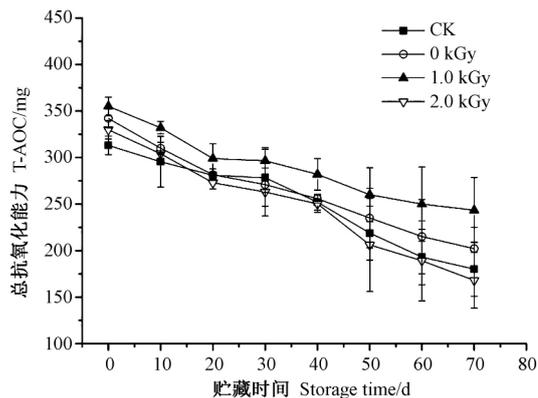


图9 辐照处理对蓝莓果实总抗氧化能力的影响

Fig.9 Effect of irradiation treatment on the T-AOC activity of blueberries

的变化趋势相同。

## 2.9 辐照处理对蓝莓中挥发性物质的影响

根据电子鼻得到的蓝莓果实气味信息,建立蓝莓果实的主成分分析(principal component analysis, PCA)和线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)。蓝莓果实挥发性物质的第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)的贡献率分别为88.52%和8.05%,总贡献率达到96.57%,说明提取信息能较全面的代表样品原有的全部信息(图10)。各处理组蓝莓果实挥发性物质互不交叉重叠,电子鼻基本能根据蓝莓果实香气将同一贮藏期、不同处理的蓝莓区分开。贮藏20 d时各处理组的响应值沿PC1轴移动幅度较小,说明各处理组的果实在20 d贮藏期内的气味变化较小,能与其他样品明显区分。各处理组果实的传感器响应值沿PC1轴向右移动幅度均较大,说明其气味变化较大<sup>[27]</sup>。

通过LDA分析,部分处理组有交叉,LD1和LD2的贡献率分别为77.41%和12.82%,总贡献率为90.23%,区分度稍差于PCA分析(图11)。LDA图可以对样本进行较好的分类,揭示各处理组间差异的远近程度,20 d时各处理组聚集在一起,45 d和70 d时各处理组聚集在一起,说明贮藏期间蓝莓果实气味发生一定变化,但贮藏中后期变化较小<sup>[28]</sup>。

## 3 讨论

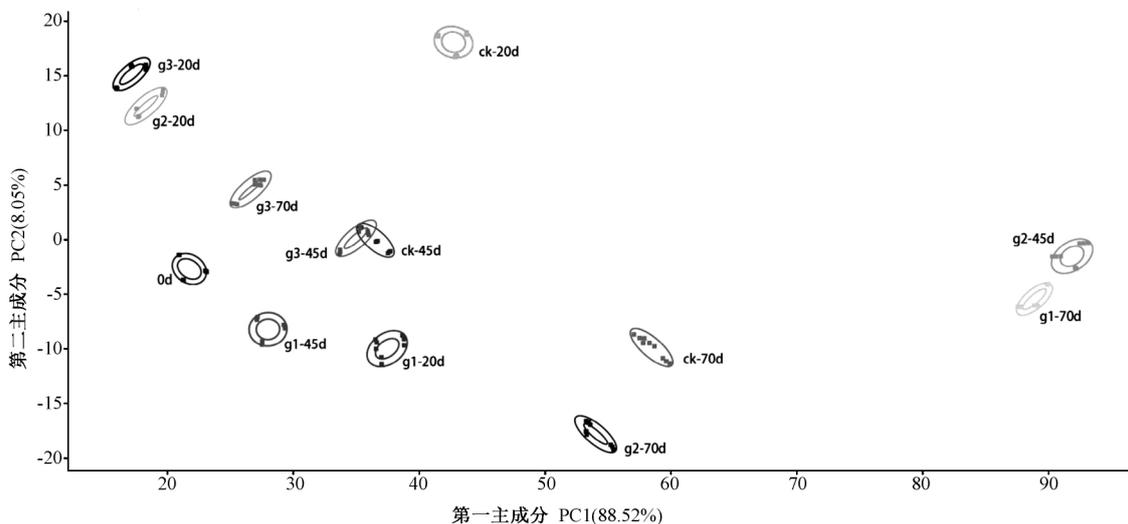
好果率、含水量、菌落总数等是衡量果蔬采后贮藏保鲜品质的关键指标,可溶性固形物、花青素、总酚和Vc等含量是评价蓝莓营养品质和感官品质的主要指标,也是确定最佳贮藏保鲜技术的理论依据<sup>[11]</sup>。本试

表 5 蓝莓贮藏品质之间的相关性分析  
Table 5 Pearson correlation analysis among storage qualities of blueberries

|                                   | 好果率<br>Rate of intact fruit | 硬度<br>Hardness | 含水量<br>Water content | 可溶性固形物含量<br>Soluble solid content | 花青素含量<br>Anthocyanin content | 总酚含量<br>Total phenols content | 抗超氧阴离子自由基活性<br>A-SOA activity | 总抗氧化能力<br>T-AOC | Vc 含量<br>Vc content | 丙二醛含量<br>MDA content |
|-----------------------------------|-----------------------------|----------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------|---------------------|----------------------|
| 好果率<br>Rate of intact fruit       | 1                           | 0.619          | 0.845                | 0.938                             | 0.380                        | -0.215                        | 0.606                         | -0.014          | 0.601               | 0.243                |
| 硬度<br>Hardness                    |                             | 1              | 0.790                | 0.689                             | 0.936                        | 0.631                         | 0.983*                        | 0.744           | 0.998**             | -0.422               |
| 含水量<br>Water content              |                             |                | 1                    | 0.971*                            | 0.524                        | 0.185                         | 0.698                         | 0.433           | 0.802               | 0.222                |
| 可溶性固形物含量<br>Soluble solid content |                             |                |                      | 1                                 | 0.403                        | -0.039                        | 0.617                         | 0.211           | 0.692               | 0.331                |
| 花青素含量<br>Anthocyanin content      |                             |                |                      |                                   | 1                            | 0.766                         | 0.966*                        | 0.780           | 0.927               | -0.713               |
| 总酚含量<br>Total phenols content     |                             |                |                      |                                   |                              | 1                             | 0.606                         | 0.959*          | 0.651               | -0.705               |
| 抗超氧阴离子自由基活性<br>A-SOA activity     |                             |                |                      |                                   |                              |                               | 1                             | 0.679           | 0.971*              | -0.535               |
| 总抗氧化能力<br>T-AOC                   |                             |                |                      |                                   |                              |                               |                               | 1               | 0.771               | -0.516               |
| Vc 含量<br>Vc content               |                             |                |                      |                                   |                              |                               |                               |                 | 1                   | -0.400               |
| 丙二醛含量<br>MDA content              |                             |                |                      |                                   |                              |                               |                               |                 |                     | 1                    |

注: \*、\*\* 分别表示在 0.01 和 0.05 水平上显著相关 “-” 表示负相关。

Note: \* and \*\* indicate significant difference at 0.05 and 0.01 Level, respectively. “-” indicates negative correlation.



注: CK: 对照; g1: 0 kGy 辐照处理组; g2: 1.0 kGy 辐照处理组; g3: 2.0 kGy 辐照处理组。下同。

Note: CK: Control. g1: 0 kGy. g2: 1.0 kGy. g3: 2.0 kGy. The same as following.

图 10 电子鼻对蓝莓果实挥发性物质的 PCA 分析

Fig.10 PCA analysis of volatile matter of blueberries by electronic nose

验研究 4 种不同处理对贮藏期间蓝莓的保鲜效果,探讨了不同剂量的辐照处理和包装材料对果实贮藏品质

指标及挥发性气味成分判别之间的差异。

本研究中,专利保鲜盒由于具有微气调作用,其保

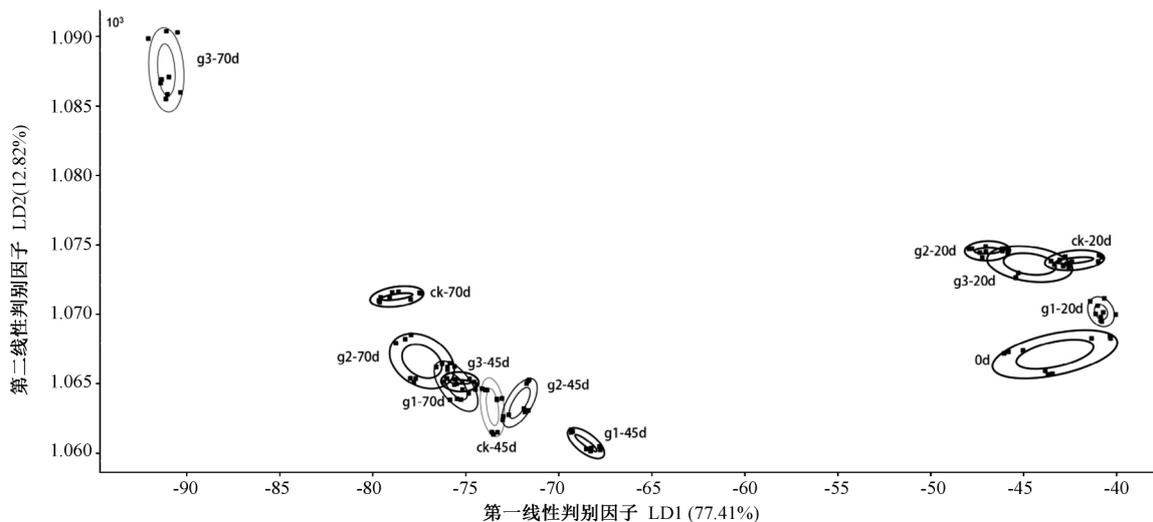


图 11 电子鼻对蓝莓果实挥发性物质的 LDA 分析

Fig.11 LDA analysis of volatile matter of blueberries electronic nose

鲜效果优于普通市售保鲜盒。1.0 kGy 辐照处理可有效减少微生物生长繁殖,较好地保持蓝莓果实的原有色泽、结构、硬度、抗氧化性及 Vc、花青素等营养成分,有效延长蓝莓的货架期。贮藏至 70 d 时好果率仍大于 75%,说明低剂量辐照可杀灭果实表面微生物、降低果实后熟及呼吸作用、延缓果实失水皱缩,与 Golding 等<sup>[29]</sup>的结论一致。但高剂量(2.0 kGy)辐照处理的效果最差,原因可能是高剂量辐照产生大量自由基对果实组织结构造成一定损伤而加速了果实的衰老和品质劣变,这与周慧娟等<sup>[30]</sup>的研究结果一致。王琛<sup>[16]</sup>发现 0.5 kGy 辐照处理对贮藏期间蓝莓果实腐烂率没有影响,3.0 kGy 辐照处理加速了蓝莓的腐烂变质,而适当剂量的辐照处理(1.0~2.5 kGy)能够有效降低蓝莓腐烂率,并有效延缓果实硬度和色泽的下降。蓝莓品质间相关性分析结果显示,可溶性固形物含量与含水量间呈显著正相关,抗超氧阴离子自由基活性与硬度、花青素及 Vc 含量呈显著正相关。蓝莓果实挥发性物质的 PCA 分析结果表明,贮藏前期各处理组间气味变化较大,能够明显区分不同处理;而 LDA 分析所得结果表明各组间区分度稍差,与 PCA 分析略有差异。综上所述,选择适宜低剂量(1.0 kGy)的辐照处理结合具有气调功能的保鲜盒既能够延长蓝莓果实的贮藏期,又能够较好地保持其营养成分及食用品质,为蓝莓果实的保鲜探索出了一条新的途径。

本课题仍有待进一步深入研究,增加对比试验,探究辐照处理分别对市售保鲜盒与专利保鲜盒包装的蓝莓品质的影响及其机理探索,明晰辐照处理与包装材料对蓝莓品质变化的贡献,以期延长蓝莓货架期提

供新思路。

## 4 结论

辐照处理是延长蓝莓贮藏期、保持果实品质及营养成分的一种可靠、安全的方法。1.0 kGy 辐照剂量可有效延长蓝莓的货架期,对采后蓝莓的保鲜具有明显作用。2.0 kGy 辐照处理加速果实的衰老和品质劣变,原因可能是高剂量辐照产生的自由基对果实组织造成了一定损伤。专利保鲜盒由于具有微气调作用,其保鲜效果优于普通市售保鲜盒。因此,将专利保鲜盒与低剂量辐照处理结合可有效延长蓝莓贮藏期并达到保持果实品质的目的。

## 参考文献:

- [1] Grozoff G E G, Alegre M L, Senn M E, Chaves A R, Simontacchi M, Bartoli C G. Combination of nitric oxide and 1-MCP on postharvest life of the blueberry (*Vaccinium* spp.) fruit [J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2017, 133: 72-80
- [2] 纪淑娟,马超,周倩,程顺昌,魏宝东. 蓝莓果实贮藏期间软化及相关指标的变化[J]. *食品科学*, 2013, 34(12): 341-345
- [3] 纪淑娟,周倩,马超,程顺昌. 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
- [4] Wang C, Meng X J. Effect of <sup>60</sup>Co- $\gamma$  irradiation on storage quality and cell wall ultra-structure of blueberry fruit during cold storage [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2016, 38: 91-97
- [5] 刘萌,范新光,王美兰,周志才,张长峰,张玉华. 不同包装方法对蓝莓采后生理及贮藏效果的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(14): 346-350

- [6] Desrosiers M F, McLaughlin W L. Examination of gamma-irradiated fruits and vegetables by electron spin resonance spectroscopy [J]. International Journal of Radiation Applications & Instrumentation. part C. radiation Physics & Chemistry, 1989, 34( 6) : 895-898
- [7] 陈梦玉, 林平, 程转红, 杨建勇.  $^{60}\text{Co}-\gamma$  辐照技术在蓝莓贮藏保鲜上的应用[J]. 西南农业学报, 2014, 27( 1) : 285-290
- [8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 4789. 2-2016 食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016
- [9] Giusti M M, Wrolstad R E. Characterization and Measurement of Anthocyanins by UV-visible Spectroscopy [M]//Current Protocol in Food Analytical Chemistry. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2001: 63-69
- [10] 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
- [11] Wang C, Ya G, Tao Y, Wu X Z, Cui Z B. Influence of  $\gamma$ -irradiation on the reactive-oxygen metabolism of blueberry fruit during cold storage [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 41: 397-403
- [12] 陈杭君, 王翠红, 郗海燕, 毛金林, 周拥军. 不同包装方法对蓝莓采后贮藏品质和抗氧化活性的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46( 6) : 1230-1236
- [13] 吴欣, 徐俐, 李莉莉, 孙丽雯, 方品武. 贵州 8 个引种蓝莓果实贮藏性比较 [J]. 食品科学, 2013, 34( 10) : 308-312
- [14] 郗海燕, 杨帅, 陈杭君, 楚文靖, 穆宏磊, 葛林梅. 蓝莓外表皮蜡质及其对果实软化的影响 [J]. 中国食品学报, 2014, 14( 2) : 102-108
- [15] Angeletti P, Castagnasso H, Miceli E, Terminiello L, Concellon A, Chaves A, Vicente A R. Effect of preharvest calcium applications on postharvest quality, softening and cell wall degradation of two blueberry (*Vaccinium corymbosum*) varieties [J]. Postharvest Biology & Technology, 2010, 58( 2) : 98-103
- [16] 王琛.  $^{60}\text{Co}-\gamma$  辐照处理对蓝莓保鲜效应及其细胞壁降解机理的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016
- [17] Hallman G J, Thomas D B. Irradiation quarantine treatment doses for apple maggot, blueberry maggot, and plum curculio [J]. Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions, 1997, 78: 1-2
- [18] 许晴晴, 陈杭君, 郗海燕, 宋丽丽, 穆宏磊. 真空冷冻和热风干燥对蓝莓品质的影响[J]. 食品科学, 2014, 35( 5) : 64-68
- [19] 王秋芳, 乔勇进, 陈召亮, 王海宏. 臭氧处理对巨峰葡萄微生物及贮藏品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38( 9) : 4784-4787
- [20] Paniagua A C, East A R, Hindmarsh J P, Heyes J A. Moisture loss is the major cause of firmness change during postharvest storage of blueberry [J]. Postharvest Biology & Technology, 2013, 79( 1) : 13-19
- [21] 吴欣, 徐俐, 李莉莉, 孙丽雯, 方品武. 保鲜剂对蓝莓贮藏效果及相关酶活性的影响[J]. 食品科技, 2013, 38( 2) : 26-31
- [22] 张海伟, 张晓晴, 张雨露, 高学玲. 前处理方式对蓝莓贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32( 9) : 105-108
- [23] 胡雅馨, 李京, 惠伯棣. 蓝莓果实中主要营养及花青素成分的研究[J]. 食品科学, 2006, 27( 10) : 600-603
- [24] Barnes J S, Nguyen H P, Shen S, Schug K A. General method for extraction of blueberry anthocyanins and identification using high performance liquid chromatography-electrospray ionization-ion trap-time of flight-mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2009, 1216( 23) : 4728-4735
- [25] 田维娜, 曾凯芳. 热处理对果蔬采后贮藏特性的影响[J]. 食品工业科技, 2007( 12) : 190-192
- [26] 刘小莉, 仇小妹, 王英, 张丽霞, 李莹, 周剑忠. 蓝莓果酒发酵工艺条件及品质研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37( 11) : 85-89
- [27] 马婷, 任亚梅, 张艳宜, 王涛, 张爽, 樊明涛. 1-MCP 处理对‘亚特’猕猴桃果实香气的影响[J]. 食品科学, 2016, 37( 2) : 276-281
- [28] 潘雁红, 何秋中, 叶晓丹, 吴志庄. 电子鼻在竹笋种类识别中的应用[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33( 3) : 495-499
- [29] Golding J B, Blades B L, Satyan S, Jessup A J, Spohr L J, Harris, A M, Banos C, Davies J B. Low dose gamma irradiation does not affect the quality, proximate or nutritional profile of ‘brigitta’ blueberry and ‘maravilla’ raspberry fruit [J]. Postharvest Biology & Technology, 2014, 96: 49-52
- [30] 周慧娟, 叶正文, 张学英, 苏明申, 杜纪红, 张旻倩. 电子束辐照对蓝莓品质及生理代谢的影响 [J]. 核农学报, 2013, 27( 9) : 1308-1316

## Effect of $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ Irradiation Treatment on Preservation Effects of Blueberry

LONG Mingxiu<sup>1</sup> WU Fengyu<sup>2</sup> TIAN Zhuxi<sup>1</sup> LIU Min<sup>3</sup> HE Yangbo<sup>1</sup>  
LI Yongfu<sup>1,\*</sup> SHI Bin<sup>1</sup> LIANG Qian<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Integrated Agricultural Development, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang, Guizhou 550006;

<sup>2</sup> School of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048;

<sup>3</sup> School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025)

**Abstract:** To extend the shelf-life of blueberry, the blueberry was packed with general crisper and patented crisper, combined with  $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$  irradiation to analyze the effect of irradiation on the microstructure, physiological and biochemical indexes, essential nutrient content. The results indicated that 1.0 kGy irradiation decreased the aerobic bacterial count, maintained the microstructure, color, hardness and antioxidant properties of the blueberry, reduced the consumption of nutrients such as anthocyanins, total phenols and Vc effectively, thus, extended the storage time of blueberry. Radiation treatment with the dose of 2.0 kGy accelerated the senescence and quality deterioration of blueberry due to the damage to the fruit. The patented crisper has the advantages over ordinary commercial crisper in keeping fresh with the modified-atmosphere. Therefore, the combination of low-dose gamma irradiation treatment and patented crisper is the best for extending the shelf-life of blueberry.

**Keywords:** blueberry, irradiation, storage quality, microstructure