

^{60}Co - γ 辐照对冷藏蓝莓果实软化相关指标的影响

王 琛*, 高 雅, 陶 烨, 崔智博, 吴兴壮

(辽宁省农业科学院食品加工研究所, 沈阳 110161)

摘 要: **目的** 探讨 ^{60}Co - γ 辐照对蓝莓果实软化相关指标的影响。**方法** 采用 0.5、2.5、3.0 kGy 辐照剂量处理蓝莓果实, 测定其在冷藏期间腐烂率、失重率、果实硬度、细胞壁物质、细胞壁多糖含量以及细胞壁水解酶活性的变化差异。**结果** 0.5 kGy 辐照对蓝莓冷藏效果不显著, 3.0 kGy 辐照加速了冷藏后期果实的变软, 而 2.5 kGy 辐照通过降低果胶甲酯酶(pectinesterase, PE)、多聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、纤维素酶(cellulase, Cx)活性, 有效抑制了水溶性果胶(water soluble pectin, WSP)升高, 延缓了离子型果胶(EDTA-soluble pectin, ESP)、共价结合型果胶(covalent soluble pectin, SCSP)、连接松散半纤维素、连接紧密半纤维素的下降, 贮藏 35 d 时蓝莓果实的硬度最高(1.08 N), 腐烂率和失重率最低, 明显推迟了果实的软化进程。**结论** 2.5 kGy ^{60}Co - γ 辐照对冷藏蓝莓果实硬度品质有积极影响。

关键词: ^{60}Co - γ 辐照; 冷藏; “蓝丰”蓝莓; 果实软化; 细胞壁多糖; 水解酶

Effect of ^{60}Co - γ irradiation on softening indices of blueberry fruit during cold storage

WANG Chen*, GAO Ya, TAO Ye, CUI Zhi-Bo, WU Xing-Zhuang

(Food and Processing Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

ABSTRACT: Objective To investigate the effect of ^{60}Co - γ irradiation on the softening indices of blueberry fruit. **Methods** Blueberry fruits were treated by 0.5, 2.5 and 3.0 kGy radiation doses, and the changes of rotting rate, weight loss rate, fruit hardness, cell wall material, cell wall polysaccharide content and cell wall hydrolase activity were measured during cold storage. **Results** The 0.5 kGy irradiation had no significant effect on blueberry preservation, 3.0 kGy irradiation accelerated the softening process of blueberry fruits in the later stages of refrigeration, and 2.5 kGy irradiation effectively restrained the water soluble pectin (WSP), delayed the EDTA-soluble pectin (ESP), covalent soluble pectin (SCSP), connected loosely hemicellulose, compact connection hemicellulose by lowering the activities of pectinesterase (PE), polygalacturonase (PG), cellulase (Cx). The firmness of blueberry fruit was the highest (1.08 N), and the decay rate and weight loss rate were the lowest when stored at 35 d, which obviously delayed the fruit softening process. **Conclusion** The 2.5 kGy ^{60}Co - γ irradiation had a positive effect on the firmness quality of blueberry fruit during cold storage.

KEY WORDS: ^{60}Co - γ irradiation; cold storage; “Blue crop” blueberry; fruit softening; cell wall polysaccharide; hydrolytic enzymes

基金项目: 辽宁省科学事业公益研究基金项目(GY-2018-0042)

Fund: Supported by Public Welfare Research Fund project for Scientific Undertakings of Liaoning Province (GY-2018-0042)

*通讯作者: 王琛, 副研究员, 主要从事果蔬保鲜技术应用研究。E-mail: wangchen0913@163.com

*Corresponding author: WANG Chen, Associate Professor, Food and Processing Institute of Liaoning Academy of Agricultural Sciences, No.84, Dongling Road, Shenhe District, Shenyang 110161, China. E-mail: wangchen0913@163.com

1 引 言

蓝莓是一种小浆果, 因其独特的风味、丰富的营养物质和多种健康功效成分被联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)列为世界五大健康食品之一^[1]。蓝莓果实成熟于炎热多雨的季节, 较高的田间热和旺盛的呼吸作用会加速果实软化的过程, 导致细胞内汁液外渗, 极易受到微生物的感染^[2]。最近, Tong 等^[3]报道, 植物检疫辐照可以有效地保持蓝莓在长途运输和长期贮藏过程中的果实硬度^[3]。同时, Wang 等^[4]在前期的研究中发现适当的 γ 辐照处理可以延缓冷藏期间蓝莓果实的软化, 但是关于其对蓝莓果实硬度的调控机制尚不清楚。

果实软化是由于细胞壁多糖在多种水解酶的作用下降解和解聚, 从而导致细胞壁结构的改变^[5]。果胶作为一种高分子量聚合物, 主要存在于细胞壁的中胶层和初生壁中, 具有粘结的性能, 可以连接 2 个相邻的细胞, 在维持水果细胞之间的结合和有序排列方面发挥着重要作用^[6]。细胞壁多糖的降解或解聚的加剧是果实软化的显著特征之一, 且与细胞壁水解酶活性增强密切相关, 涉及的主要水解酶包括聚半乳糖醛酸酶(polygalacturonase, PG)、果胶甲酯酶(pectinesterase, PE)和纤维素酶(cellulase, Cx)^[7]。

本研究围绕不同 ^{60}Co - γ 辐照剂量对冷藏蓝莓腐烂率、失重率、果实硬度、细胞壁物质、细胞壁多糖含量以及细胞壁水解酶活性的影响展开系统的研究, 以明确辐照处理后蓝莓果实软化与细胞壁降解的关系, 为探讨辐照抑制蓝莓果实软化机制提供理论支持, 为蓝莓辐照保鲜技术的应用提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 实验材料

2.1.1 样品来源

蓝莓品种为“蓝丰”, 采摘于沈阳时圣蓝莓基地, 果实成熟饱满, 大小色泽一致, 且无病虫害与机械损伤。采后蓝莓分装于带气孔的聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)保鲜盒中(净重: 125.0 g/盒), 并于当日运回辽宁钴源辐照中心。

2.1.2 实验试剂

无水乙醇、丙酮、 Na_2CO_3 、KOH、浓 H_2SO_4 (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 去离子水(分析纯, 北京鼎国生物技术有限公司); 葡萄糖、半乳糖醛酸(色谱纯, 美国 Sigma 公司)。

2.1.3 实验仪器

CT3-10K 质构仪(美国 Brookfield 公司); TU-1810 紫

外分光光度计(北京善析通用有限公司); 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); HH-6 数显恒温水浴锅(常州国华仪器厂)。

2.2 实验方法

2.2.1 辐照处理

采用静态辐照方式, 源强为 7.51×10^{15} Bq。设定的辐照剂量为 0、0.5、2.5、3.0 kGy, 辐照均一度在 1.03~1.07 之间。辐照时间统一为 72 min, 辐照中途需 360°翻转。每组样品重复辐照 3 次, 然后置于 $(5 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 冷库贮藏。每隔 7 d 随机抽取样品, 测定各指标。

2.2.2 果实腐烂率

腐烂率以腐烂果占总果数的百分率表示。腐烂果是指果实表面至少有 1 处发生汁液外渗、严重软化或腐烂现象。

2.2.3 果实失重率

采用称量法测定, 果实失重率=(贮藏前质量-贮藏后质量)/贮藏前质量 $\times 100\%$ ^[8]。

2.2.4 果实硬度

采用质构仪进行测量。每组样品随机挑选 10 粒蓝莓, 在果实轴中心位置, 用直径为 2 mm 的测试仪探头, 以 1.0 mm/s 测试速度压入 5.0 mm。记录数据, 取平均值^[9]。

2.2.5 细胞壁物质提取

随机挑选 20 粒蓝莓, 与 30 mL 95% (V/V)乙醇研磨成浆, 沸水浸提 20 min 后离心过滤, 再依次用氯仿-甲醇混合液、80%丙酮冲洗 2 遍, 得到白色粉末固体, 烘干称重^[10]。

2.2.6 细胞壁多糖

称取 500 mg 细胞壁物质(cell wall materials, CWM), 依次用去离子水、50 mmol/L EDTA、50 mmol/L Na_2CO_3 、4% KOH、24% KOH、98% H_2SO_4 分别获得水溶性果胶(water soluble pectin, WSP)、离子型果胶(EDTA-soluble pectin, ESP)、共价型果胶(covalent soluble pectin, SCSP)、松散型半纤维素(4% KOH-soluble fiber, 4KSF)、紧密型半纤维素(24% KOH-soluble fiber, 24KSF)。果胶含量按咔唑法测定, 半纤维素按蒽酮法测定^[11,12]。

2.2.7 多糖水解酶活性

称取 20 g 蓝莓果实, 研磨成浆液。用 50 mmol/L Tris-HCl 溶液(pH 7.0)冰温提取 4 h, 离心过滤, 取上清液。PE 活性的测定采用 NaOH 滴定法, PG 和 Cx 活性的测定采用比色法^[11,13]。

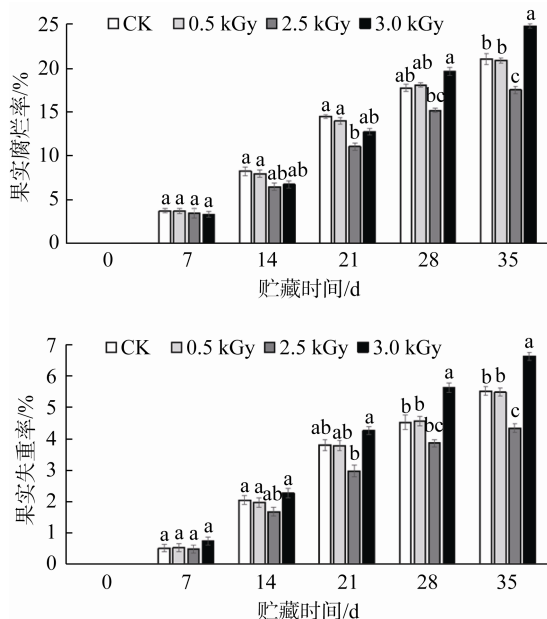
2.3 数据统计与分析

各指标重复测试 3 次, 采用 Excel 软件统计数据, 计算平均值和标准误差。采用 SPSS17.0 软件对单因素方差分析(analysis of variance, ANOVA)进行显著性分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。

3 结果与分析

3.1 辐照对果实腐烂率和失重率的影响

辐照处理对贮藏期间蓝莓果实腐烂率和失重率的影响如图 1 所示。辐照处理后(贮藏 0 d), 各组蓝莓果实的腐烂率和失重率均随贮藏时间的延长而逐渐上升, 其中 0.5 kGy 辐照处理组上升的幅度与对照组的相一致, 说明较低剂量的辐照处理对蓝莓果实腐烂率和失重率的影响不大, 这可能是因为较低剂量的辐照处理对微生物的致死效果较差, 导致微生物可以在蓝莓表面继续生长。但是贮藏 35 d 时, 3.0 kGy 辐照处理组蓝莓果实的腐烂率和失重率快速上升, 分别达到 24.8% 和 6.64%, 明显高于对照组($P<0.05$), 说明较高剂量的辐照处理对贮藏后期蓝莓果实的腐烂率和失重率有不良影响, 导致果实汁液外渗, 易于遭受环境微生物的侵染。相反, 2.5 kGy 辐照处理组蓝莓果实腐烂率和失重率的上升幅度相对缓慢, 且始终处于最低的水平, 说明 2.5 kGy 辐照处理对贮藏期间蓝莓果实腐烂率和失重率有积极影响。所以, 2.5 kGy 辐照处理是抑制冷藏蓝莓果实腐烂和失重的有效措施。



注: $n=3$; a、b、c, 表示样本间差异显著, $P<0.05$, 下文同。

图 1 不同辐照剂量对贮藏期间蓝莓果实腐烂率和失重率的影响

Fig.1 Effects of different radiation doses on rotting rate and weightless rate of blueberry fruits during storage

3.2 辐照对果实硬度和 CWM 的影响

果实硬度是蓝莓的重要品质, 也是衡量蓝莓保鲜效果的关键^[4]。果实细胞壁物质组成是决定果实硬度的关键因素^[14]。如图 2 所示, 辐照处理后(贮藏 0 d)各处理组蓝莓果实的硬度和 CWM 含量没有发生明显变化, 说明辐照处

理对蓝莓果实的硬度品质没有直接影响。贮藏 7 d 时, 辐照处理的蓝莓果实硬度均有一个不明显的小幅上升, 这可能是辐照刺激诱导木质素的聚合形成所致^[15]。整个贮藏期间, 各组蓝莓果实硬度和 CWM 含量均开始下降的趋势, 其中 0.5 kGy 辐照处理组下降的幅度与对照相似, 3.0 kGy 辐照处理组下降得相对较快, 而 2.5 kGy 辐照处理组下降得最慢。这说明较低剂量的辐照处理对冷藏蓝莓果实硬度没有影响, 而较高的辐照剂量能够促进冷藏蓝莓果实变软。贮藏 30 d 时, 2.5 kGy 辐照处理组蓝莓果实硬度和 CWM 含量分别为 1.08 N 和 0.85%, 明显高于其他处理组($P<0.05$)。因此, 2.5 kGy 辐照处理对抑制冷藏蓝莓果实硬度品质下降有积极影响。

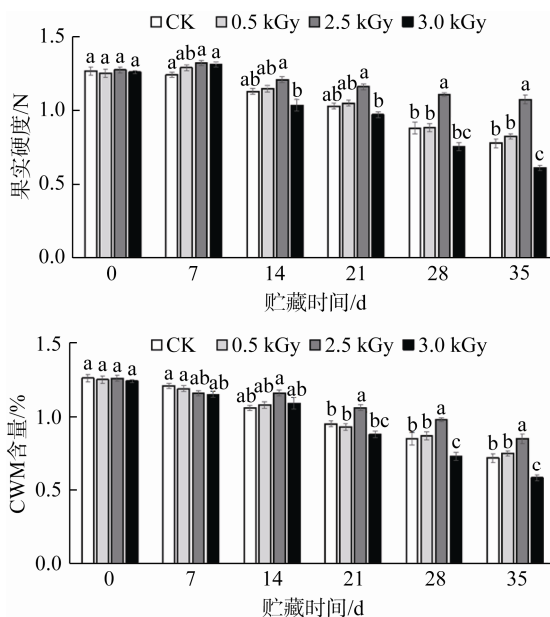


图 2 不同辐照剂量对贮藏期间蓝莓果实硬度和 CWM 的影响

Fig.2 Effects of different radiation doses on fruit firmness and CWM of blueberry fruits during storage

3.3 辐照对果胶含量的影响

各组蓝莓果实中 WSP 含量在贮藏期间的变化如图 3 所示, 辐照处理当天(贮藏 0 d), 蓝莓果实的 WSP 含量略有下降, 但与对照的差异不明显。整个贮藏期间, 各组蓝莓果实中 WSP 含量均呈上升趋势, 其中 0.5 kGy 辐照处理组 WSP 含量上升幅度与对照始终一致, 而 3.0 kGy 辐照处理组的 WSP 含量上升得最快, 在贮藏 28 d 时明显超过了对照, 这说明 0.5 kGy 辐照处理对果胶的水溶性变化没有影响, 3.0 kGy 辐照处理能够促进果胶水溶性的增加。但是, 2.5 kGy 辐照处理组的 WSP 含量却缓慢上升, 且始终处于最低水平。因此, 2.5 kGy 辐照处理能够有效降低冷藏期间蓝莓果胶水溶性增加的可能, 延缓果实的软化。

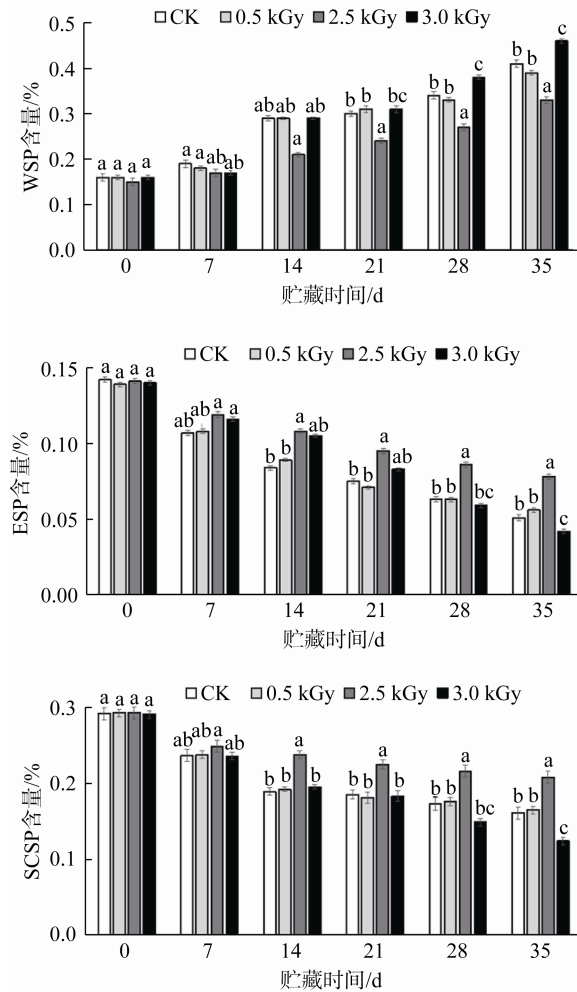


图 3 不同辐照剂量对贮藏期间蓝莓果实 WSP、ESP 和 SCSP 含量的影响

Fig.3 Effects of different radiation doses on contents of WSP, ESP and SCSP in blueberry fruits during storage

ESP 主要为离子键结合的可溶性果胶, 如 Ca^{2+} 桥结合的果胶^[16]。如图 3 所示, 辐照处理当天(贮藏 0 d), 蓝莓果实 ESP 含量没有明显变化, 说明辐照对 ESP 含量没有直接的影响。随着贮藏时间的延长, 各组蓝莓果实中 ESP 含量均逐渐下降, 其中 0.5 kGy 辐照处理组下降的相对较快, 且始终与对照相一致。贮藏前 21 d, 3.0 kGy 辐照处理组的 ESP 含量与 2.5 kGy 辐照处理组的变化一致, 且比对照下降相对缓慢, 但是贮藏 28 d 后, 3.0 kGy 辐照处理组的 ESP 含量快速下降, 而 2.5 kGy 辐照处理组始终处于一个较高的水平。贮藏 30 d, 3.0 kGy 辐照处理组 ESP 含量降到最低, 0.5 kGy 辐照处理组和对照组次之, 而 2.5 kGy 辐照处理组的最高。因此, 2.5 kGy 辐照处理能够很好地抑制冷藏期间蓝莓果实中 ESP 含量的下降, 保持果胶的粘弹性。

SCSP 是以共价键连接的小分子果胶, 其含量的多少表明果实中原果胶去酯化的程度^[17]。如图 3 所示, 辐照处

理后(贮藏 0 d), 蓝莓果实的 SCSP 含量没有变化, 说明辐照处理对 SCSP 含量没有直接影响。整个贮藏期间, 各组蓝莓果实 SCSP 含量均呈下降趋势, 其中 0.5 kGy 辐照处理组和对照组的 SCSP 含量在贮藏 14 d 前快速下降后再趋于平缓下降, 而 2.5 kGy 辐照处理组在贮藏 7 d 前快速下降后就趋于平缓下降了, 且始终处于较高的水平, 说明 2.5 kGy 辐照处理延缓了蓝莓果实 SCSP 含量的下降进程。贮藏 14 d 时与其他各组差异显著($P < 0.05$)。贮藏 35 d 时, 0.5 kGy 辐照处理组的 SCSP 含量与对照组的相一致, 3.0 kGy 辐照处理组的明显低于对照组($P < 0.05$)。因此, 2.5 kGy 辐照处理能够有效减缓冷藏期间蓝莓果实中 SCSP 含量的下降, 保持果胶的酯化度。

3.4 辐照对半纤维素含量的影响

4KSF 是连接比较松散的半纤维素, 24KSF 是连接比较紧实的半纤维素, 它们与果实的软有着密切的关系^[14]。如图 4 所示, 辐照处理后(贮藏 0 d), 蓝莓果实的 4KSF 和 24KSF 含量均没有明显变化($P > 0.05$), 所以辐照处理对蓝莓果实的 4KSF 和 24KSF 没有直接影响。随着贮藏时间的延长, 各组蓝莓果实的 4KSF 和 24KSF 含量均呈下降趋势。其中 0.5 kGy 辐照处理组和对照组下降的幅度相一致, 说明低剂量的辐照对蓝莓果实 4KSF 和 24KSF 含量的影响不大。而 3.0 kGy 辐照处理组下降的相对较快, 在贮藏 35 d 时其 4KSF 和 24KSF 含量均最低, 说明高剂量的辐照能够

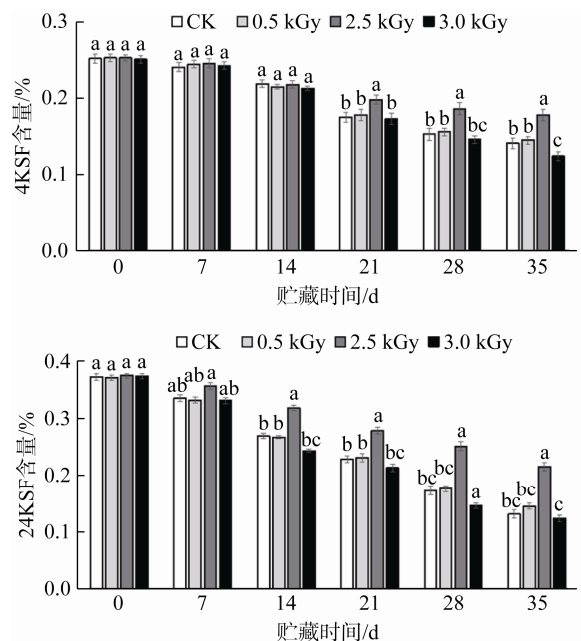


图 4 不同辐照剂量对贮藏期间蓝莓果实 4KSF 和 24KSF 含量的影响

Fig.4 Effects of different radiation doses on contents of 4KSF and 24KSF in blueberry fruits during storage

促进贮藏期间蓝莓果实中 4KSF 和 24KSF 含量的下降。然而, 2.5 kGy 辐照处理组中 4KSF 和 24KSF 含量下降得相对缓慢, 分别在贮藏 21 和 14 d 以后明显高于其他 3 个处理组($P<0.05$)。这说明 2.5 kGy 辐照处理组能够有效抑制贮藏后期蓝莓果实中 4KSF 含量的下降, 从而延缓果实变软。

3.5 辐照对多糖水解酶活性的影响

PE 可以引起细胞壁多聚半乳糖醛酸的去酯化作用, PG 的水解提供必要的底物, 对果胶的降解起调节作用^[18]。如图 5 所示, 辐照处理后(贮藏 0 d), 蓝莓果实 PE 活性的变化不明显($P>0.05$), 说明辐照处理对 PE 没有直接影响。随着贮藏时间的延长, 2 组蓝莓果实 PE 活性先快速上升后趋于平缓, 其中 0.5 kGy 处理组和对照组上升幅度相一致, 而 3.0 kGy 辐照处理组上升得相对较快, 在贮藏 14 d 时超过了对照组。这说明低剂量的辐照处理对贮藏期间蓝莓果实 PE 活性影响不大, 较高的辐照处理可以促进贮藏后期 PE 活性的升高。整个贮藏期间, 2.5 kGy 辐照处理组中 PE

活性始终保持最低, 说明 2.5 kGy 辐照处理能够抑制贮藏期间蓝莓果实 PE 活性, 降低其对多聚半乳糖醛酸的去酯化作用。

PG 可以水解细胞壁中果胶酸的 α -1,4-*D*-半乳糖苷键, 生成低聚半乳糖醛酸或半乳糖醛酸, 使细胞壁结构解体, 导致果实软化^[7]。如图 5 所示, 辐照处理后(贮藏 0 d), 蓝莓果实的 PG 活性略有上升, 但上升幅度并不明显($P>0.05$), 说明辐照刺激可以引起 PG 活性升高。随着贮藏时间的延长, 各组蓝莓果实 PG 活性均逐渐升高, 其中 3.0 kGy 辐照处理组上升得最快, 0.5 kGy 辐照处理组和对照组的次之, 而 2.5 kGy 辐照处理组上升得最慢。贮藏 35 d 时, 3.0 kGy 辐照处理组的 PG 活性达到 189.2 U, 是贮藏 0 d 时的 2 倍, 而 2.5 kGy 辐照处理组的仅为 142.21 U, 明显低于对照 (175.15 U)。因此, 2.5 kGy 辐照处理能够抑制贮藏期间蓝莓果实 PG 活性的升高, 降低果胶酸水解的可能, 从而抑制果实软化。

Cx 是能够降解羧甲基纤维素的酶, 在果实软化过程中可能是 PG 和 PE 作用的补充^[19]。如图 5 所示, 辐照处理后(贮藏 0 d), 蓝莓果实中 Cx 活性没有明显变化, 说明辐照刺激对 Cx 活性没有直接影响。贮藏 0~14 d, 各组蓝莓果实 Cx 活性上升均相对缓慢, 且彼此差异并不明显($P>0.05$), 说明辐照处理对贮藏前期蓝莓果实中 Cx 活性影响不大。贮藏 21 d 后, 各组蓝莓果实的 Cx 活性开始快速上升, 其中 3.0 kGy 辐照处理组快速超过了对照和 0.5 kGy 辐照处理组, 而 2.5 kGy 辐照处理组却保持在较低的水平。贮藏 35 d 时, 3.0 kGy 辐照处理组的 Cx 活性上升到 9.2 U, 2.5 kGy 辐照处理组的仅为 6.21 U, 彼此差异显著($P<0.05$)。因此, 2.5 kGy 辐照处理能够抑制冷藏后期蓝莓果实的 Cx 活性, 降低果实软化的可能。

4 结论与讨论

^{60}Co - γ 辐照技术具有高强度的穿透性, 可不拆卸包装直接达到防腐保鲜的效果。辐照剂量是影响保鲜效果的一个重要因素, 不同种类或品种果蔬对辐照剂量的耐受程度是不同的。比如, 草莓保鲜的最佳辐照剂量是 3.0 kGy, 但该剂量却能够导致猕猴桃软化崩塌^[20,21]。本研究发现, 较低的辐照剂量(0.5 kGy)对冷藏蓝莓果实细胞壁各多糖组分含量和水解酶活性的影响不大, 而较高的辐照剂量(3.0 kGy)却可以提高冷藏后期蓝莓果实的细胞壁水解酶活性, 进而加速细胞壁各多糖组分的降解。水果软化是一个复杂的过程, 果胶含量的变化在这个过程中起着重要的作用^[22], 其在细胞壁水解酶的作用下逐渐降解和解聚, 由不溶性转变为可溶性果胶和果胶酸, 使相邻细胞间黏附力的减少, 导致细胞壁结构的破坏^[23]。蓝莓果实硬度的下降表现为细胞壁结构的广泛断裂和细胞壁各组分含量的减少^[24]。Deng

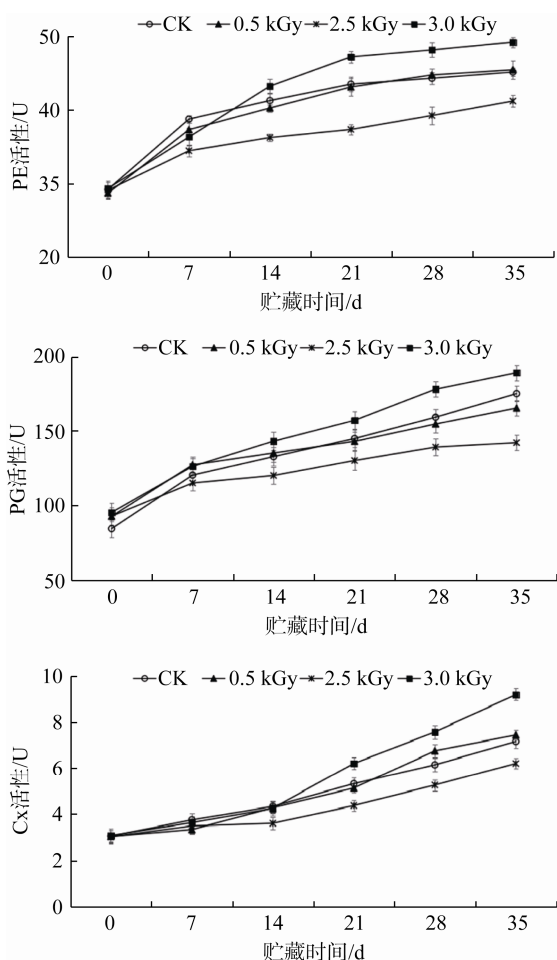


图 5 不同辐照剂量对蓝莓果实 PE、PG 和 Cx 活性的影响($n=9$)

Fig.5 Effects of different radiation doses on activities of PE, PG and Cx in blueberry fruits during storage ($n=9$)

等^[25]首先确定了细胞壁多糖主要由聚半乳糖醛酸为主的果胶组成, Vicente 等^[23]发现在蓝莓果实的成熟软化过程中果胶多糖由水不溶性向可溶性转变。本研究发现 2.5 kGy 辐照处理能够通过抑制蓝莓果实中 WSP 含量的增加和 ESP、SCSP 含量的降低, 来改变果胶的溶解度, 使细胞壁物质含量保持在较高水平。ESP 和 SCSP 分别存在于细胞壁和初生壁的间充质层中, 它们对维持果实细胞壁的厚度和光滑性有积极的作用^[26]。伴随果胶的降解, 纤维素和半纤维素也在不断地发生变化, 主要表现为其含量、分子量、侧链取代的变化。半纤维素主要位于初生壁, 与纤维素微纤维以氢键相交联形成纤维素-半纤维素网格, 或以共价键与果胶相连, 对于保持细胞形状和组织机械强度具有十分重要的作用^[27]。本研究发现 2.5 kGy 辐照处理能够抑制冷藏后期蓝莓果实中紧密型和松散型 2 种半纤维素的含量, 对延缓果实软化有积极影响。纪淑娟等^[28]发现随着蓝莓果实硬度的下降, Cx 活性逐渐上升。王秀^[29]发现 Cx 是导致蓝莓果实软化的关键酶, 对其贮藏后期的软化有促进作用, 但 PG 能够加速贮藏前期和中期的果实软化。本研究发现, 2.5 kGy 辐照能抑制了细胞壁水解酶的活性, 从而降低了蓝莓果实中不同可溶性果胶的降解, 主要表现在对 PE、PG、Cx3 种水解酶活性的影响上, 其活性的变化与果胶和纤维素含量的变化相一致。

综上所述, 较低的辐照处理(0.5 kGy)对蓝莓冷藏保鲜的效果不显著, 较高的辐照剂量(3.0 kGy)促进了冷藏后期蓝莓果实的软化, 2.5 kGy 辐照处理能够降低冷藏期间蓝莓果实中 PE、PG、Cx 3 种水解酶的活性, 抑制 WSP 含量升高和 ESP、SCSP、4KSF、24KSF 含量的下降, 从而降低不溶性果胶向可溶性转变, 保证半纤维素链接作用, 最终有效延缓冷藏蓝莓果实软化进程。

参考文献

- [1] 王磊明, 李洋, 张茜, 等. 蓝莓采后衰老机理和贮藏保鲜技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(21): 200–206.
- [2] Wang LM, Li Y, Zhang Q, *et al.* Senescence mechanism and recent advances in storage technology of blueberries [J]. Food Res Dev, 2017, 38(21): 200–206.
- [3] Zhou Q, Ma C, Cheng S, *et al.* Changes in antioxidative metabolism accompanying pitting development in stored blueberry fruit [J]. Postharvest Biol Technol, 2014, (88): 88–95.
- [4] Tong J, Rakovski C, Prakash A. Phytosanitary irradiation preserves the quality of fresh blueberries and grapes during storage [J]. Hortsci A Publ Am Soc Hortic Sci, 2015, 50(11): 1666–1670.
- [5] Wang C, Meng X. Effect of ^{60}Co γ -irradiation on storage quality and cell wall ultra-structure of blueberry fruit during cold storage [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2016, 38(12): 91–97.
- [6] Wang S, Zhou Q, Zhou X, *et al.* The effect of ethylene absorbent treatment on the softening of blueberry fruit [J]. Food Chem, 2018, 246(25): 286–294.
- [7] Wakabayashi K. Changes in cell wall polysaccharides during fruit ripening [J]. J Plant Res, 2000, 113(3): 231–237.
- [8] Brummell DA, Valeriano DC, Crisosto CH, *et al.* Cell wall metabolism during maturation, ripening and senescence of peach fruit [J]. J Exp Bot, 2004, 55(405): 2029–2039.
- [9] 邵海燕, 杨树, 陈杭君, 等. 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.
- [10] Gao HY, Yang S, Chen HJ, *et al.* Epicuticular wax's effect on fruit softening of blueberry [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2014, 14(2): 102–108.
- [11] 王琛, 李雪涛, 陶烨, 等. ^{60}Co 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, 137(22): 318–323.
- [12] Wang C, Li XT, Tao Y, *et al.* Effect of ^{60}Co γ -irradiation on storage quality and membrane lipid peroxidation of blueberry fruits during cold storage [J]. Food Sci, 2016, 137(22): 318–323.
- [13] Holland N, Nunes FL, de Medeiros IU, *et al.* High-temperature conditioning induces chilling tolerance in mandarin fruit: A cell wall approach [J]. J Sci Food Agric, 2012, 92(15): 3039–3045.
- [14] 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.
- [15] Cao JK, Jiang WB, Zhao YM. Experimental guidance of postharvest physiology and biochemistry of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press.
- [16] Lohani S, Trivedi PK, Nath P. Changes in activities of cell wall hydrolases during ethylene-induced ripening in banana: Effect of 1-MCP, ABA and IAA [J]. Postharvest Biol Technol, 2004, 31(2): 119–126.
- [17] Wei J, Ma F, Shi S, *et al.* Changes and postharvest regulation of activity and gene expression of enzymes related to cell wall degradation in ripening apple fruit [J]. Postharvest Biol Technol, 2010, 56(2): 147–154.
- [18] Wang LM, Li Y, Zhang X, *et al.* Senescence mechanism and recent advances in storage technology of blueberries [J]. Food Res Dev, 2017, 38(21): 200–206.
- [19] 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.
- [20] Meng XJ, Jiang AL, Hu WZ, *et al.* Effects of plastic box modified atmosphere storage on the physiological and biochemical changes of postharvest blueberry fruits [J]. Sci Technol Food Ind, 2011, 32(9): 379–383.
- [21] 李倩倩, 付佳璇, 赵玉梅, 等. 果胶降解与采后果实质地变化研究进展[J]. 中国食品学报, 2019, 19(9): 298–307.
- [22] Li QQ, Fu JX, Zhao YM, *et al.* Progress on pectin and texture change of postharvest fruits [J]. Chin Inst Food Sci Technol, 2019, 19(9): 298–307.
- [23] Bank AD. Cell wall disassembly in ripening fruit [J]. Funct Plant Biol, 2006, 33(2): 103–119.
- [24] Thumdee S, Manenoi A, Chen NJ, *et al.* Papaya fruit softening: Role of hydrolases [J]. Trop Plant Biol, 2010, 3(2): 98–109.
- [25] 徐晓波. 李果实成熟过程中细胞壁多糖的降解和相关酶的研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2008.

- Xu XB. Study on the degradation of cell wall polysaccharides and related enzymes during plum fruit ripening [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2008.
- [20] 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.
- Liu C. Study on the strawberry fresh-keeping and storage and quality variation with the treatment of irradiation [J]. J Anhui Agric Sci, 2003, 31(5): 744–745.
- [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.
- Fu JJ, Feng FQ. Effect of irradiation on the preservation of kivi fruit [J]. Acta Agric Nucl Sin, 2003, 17(5): 367–369.
- [22] Wang D, Yeats TH, Uluisik S. Fruit softening: revisiting the role of pectin [J]. Trend Plant Sci, 2018, 23(4): 302–310.
- [23] Vicente AR, Powell A, Greve LC, *et al.* Cell wall disassembly events in boysenberry (*Rubus idaeus* L. *Rubus-ursinus* Cham. & Schldl.) fruit development [J]. Funct Plant Biol, 2007, 34(7): 614–623.
- [24] Chea S, Yu DJ, Park J, *et al.* Preharvest β -aminobutyric acid treatment alleviates postharvest deterioration of ‘Blue crop’ highbush blueberry fruit during refrigerated storage [J]. Sci Hortic, 2019, (246): 95–103.
- [25] Deng J, Shi Z, Li, X. Soluble polysaccharides isolation and characterization from rabbiteye blueberry (*Vaccinium ashei*) fruit [J]. Bioresources, 2012, 8(1): 405–419.
- [26] Murayama H, Katsumata T, Endou H, *et al.* Effect of storage period on the molecular mass distribution profile of pectic and hemicellulosic polysaccharides in pears [J]. Postharvest Biol Technol, 2006, (40): 141–148.
- [27] Prasanna V, Prabha TN, Tharanatha RN. Fruit ripening phenomena-An overview [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2007, (47): 1–19.
- [28] 纪淑娟, 卜凤雅, 周倩, 等. 冷藏对蓝莓果实细胞壁组分及其降解酶活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(6): 199–204.
- Ji SJ, Bu FY, Zhou Q, *et al.* Effects of refrigeration on cell wall components and cell wall-degrading enzyme activities of blueberries [J]. Food Ferment Ind, 2014, 40(6): 199–204.
- [29] 王秀. 蓝莓果实采后软化与细胞壁代谢关系研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- Wang X. Relationship between postharvest softening and cell wall metabolism of blueberry [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014.

(责任编辑: 李磅礴)

作者简介



王琛, 副研究员, 主要研究方向为果蔬保鲜技术应用研究。

E-mail: wangchen0913@163.com