

电子束和⁶⁰Co γ-射线辐照 对冬枣的保鲜效果

郭一丹¹, 李奎^{2, +}, 蔚江涛^{2, 3, *}, 白俊青³, 张鹏^{2, 3}, 龚鑫髯¹, 马思远¹, 孙清怡¹, 寇莉萍^{1, *}

(1.西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西咸阳 712100;

2.中陕核核盛科技有限公司, 陕西西安 710100;

3.杨凌核盛辐照技术有限公司, 陕西咸阳 712100)

摘要:为延长采后冬枣果实的货架期, 采用不同剂量(500、800 Gy)的电子束和⁶⁰Co γ-射线对冬枣进行辐照处理, 辐照后置于冷库(温度0±1℃, 相对湿度80%~85%)中贮藏54 d, 研究了不同辐照处理对贮藏期间冬枣的微生物数量与品质变化的影响。结果表明:两种辐照处理均能有效抑制冬枣腐烂率的增加和微生物的生长, 贮藏结束时, 对照组冬枣果实的腐烂率已达47.87%, 而辐照组冬枣果实的腐烂率在20.97%~25.95%之间, 显著低于未辐照组。贮藏前24 d, 辐照处理对冬枣的可溶性固形物含量和可滴定酸含量无显著影响, 但辐照处理使冬枣的硬度降低, 促进了冬枣果皮的转红。贮藏44 d后, 辐照处理可以降低果实的呼吸强度。在以上处理中, 低剂量500 Gy的两种处理能够维持冬枣较好的贮藏品质。

关键词:冬枣, ⁶⁰Co γ-射线, 电子束, 辐照, 保鲜效果

Effects of Electron Beam and ⁶⁰Co γ-ray Irradiations on the Fresh-keeping of Winter Jujube

GUO Yidan¹, LI Kui^{2, +}, YU Jiangtao^{2, 3, *}, BAI Junqing³, ZHANG Peng^{2, 3},
GONG Xinran¹, MA Siyuan¹, SUN Qingyi¹, KOU Liping^{1, *}

(1.College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Xianyang 712100, China;

2.Sino Shaanxi Hesheng Nuclear Technology Co., Ltd., Xi'an 710100, China;

3.Yangling Hesheng Irradiation Technology Co., Ltd., Xianyang 712100, China)

Abstract: In order to prolong the shelf life of post-harvest winter jujube, the fruits were treated with different doses (500, 800 Gy) of electron beams and ⁶⁰Co γ-rays and then stored at 0±1℃ and 80%~85% relative humidity for 54 d. The effects of different irradiation treatments on the microbial quantity and the quality of winter jujube were investigated during cold storage. The results indicated that both irradiation treatments could effectively inhibit the increase of decay rate of winter jujube and the growth of microorganism. At the end of storage, the decay rate of the winter jujube in the control group had reached 47.87%, while that of the irradiated groups was between 20.97% and 25.95%, significantly lower than that of the control group. In the early 24 days of storage, irradiation treatment had no significant effect on the total soluble solid and titratable acid content of winter jujube, however irradiation treatment reduced the firmness of winter jujube and promoted the redness of pericarp. In the later 44 days of storage, irradiation treatment could restrain the respiration intensity of the fruits. In the above processing, two treatments of low dose 500 Gy could maintain good storage qualities of winter jujube.

Key words: winter jujube; ⁶⁰Co γ-ray; electron beam; irradiation; fresh-keeping

中图分类号: TS255.36

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2021)06-0276-06

doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020040309

引文格式: 郭一丹, 李奎, 蔚江涛, 等. 电子束和⁶⁰Co γ-射线辐照对冬枣的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2021, 42(6): 276-281.

GUO Yidan, LI Kui, YU Jiangtao, et al. Effects of Electron Beam and ⁶⁰Co γ-ray Irradiations on the Fresh-keeping of Winter Jujube[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(6): 276-281. (in Chinese with English abstract) <http://www.spgykj.com>

收稿日期: 2020-04-28

+ 并列第一作者

作者简介: 郭一丹(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: gydyeah@163.com。

李奎(1987-), 男, 博士, 工程师, 研究方向: 核技术应用, E-mail: likui@ssn-hs.com。

* 通信作者: 寇莉萍(1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: kouliping@nwsuaf.edu.cn。

蔚江涛(1989-), 男, 博士, 工程师, 研究方向: 核技术应用, E-mail: yujiangtao@ssn-hs.com。

冬枣 (*Zizyphus jujuba* Mill.), 是我国培育的一种品质优良的鲜食枣果, 其果形整洁美观, 口感脆甜多汁, 营养价值较高, 特别是 V_c 含量丰富, 有“活维生素片”之称。此外, 枣还含有环磷酸腺苷 (cAMP) 和环磷酸鸟苷 (cGMP) 等活性物质, 被认为具有一定的药用价值和保健功效, 从而具有广阔的国内外市场前景。近年来, 在土壤肥沃的黄河沙域, 已经形成几大著名的冬枣规模化种植基地^[1-2]。然而新鲜冬枣含水量高、皮薄质嫩, 在采后的运输和贮藏环节中易受机械损伤和微生物侵染, 致其皱缩、酒软甚至腐败变质, 失去商业价值, 使冬枣产业发展受到严重制约。冬枣保鲜时一般选择耐贮的白熟期果实, 主要技术包括物理和化学手段如低温、气调以及保鲜剂浸泡、熏蒸处理等, 从安全和成本的角度考虑, 更趋向于寻求一种操作便捷、无化学残留且效果良好的保鲜方法^[3]。

辐照作为一种可靠、高效的冷杀菌技术, 在保障食品卫生、安全的同时, 对其感官和营养品质的损伤较小, 已被广泛应用于食品贮藏加工^[4-5]。可用于辐照的射线主要有⁶⁰Co 产生的 γ -射线和加速器产生的电子束 (electron beam)、X 射线等, 除了产生原理不同外, 它们各自的作用机制如射线利用率、穿透力和辐照速率等也不尽相同。⁶⁰Co 作为传统的辐照源, 其研究开发已经较为成熟, 杨伟等^[6]使用⁶⁰Co γ -射线辐照金丝小枣, 结果表明枣果经辐照后再冷藏, 微生物的数量降低, 还原糖的含量增加, V_c 、可滴定酸、总糖等含量无明显变化。与钴源相比, 电子束辐照装置安全、易于操控, 辐照快速, 自动化程度较高, 投资费用低, 经济效益高, 且随着加速器设备的日益完善, 该技术在食品保鲜领域的应用日益扩大^[7]。周任佳等^[8]使用电子束辐照鲜切哈密瓜, 发现1500 Gy 电子束对哈密瓜的抑菌效果明显, 且能显著降低鲜切瓜块的呼吸速率, 减缓 V_c 、可溶性固形物的下降, 保持其良好的感官品质。目前, 还未有研究将⁶⁰Co γ -射线和电子束辐照应用于冬枣的贮藏保鲜, 本试验分别采用不同剂量的⁶⁰Co γ -射线和电子束对冬枣进行辐照处理, 旨在研究辐照对贮藏期间冬枣的生理、生化品质变化及微生物控制效果的影响, 以期对冬枣的采后贮运保鲜技术提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冬枣 于2019年9月下旬采自陕西大荔冬枣种植基地, 选择大小一致、色泽均一、无病虫害、无机械损伤的白熟期冬枣果实进行试验, 分级后用内衬聚乙烯塑料薄膜袋的塑料筐包装后立即运送至河南郑州宏源辐照中心进行辐照处理; 平板计数琼脂培养基、马铃薯葡萄糖琼脂培养基 生物试剂北京奥博星生物技术有限公司; 其余试剂 均为分析纯。

10 MeV-20 kW 型电子加速器 中广核中科海维科技发展有限公司; Ci7600 型色度仪 爱色丽 (上海) 色彩科技有限公司; TEL-7001 型红外二氧化碳分析仪 美国 Telaire 公司; GY-4 型果实硬度计 乐清市艾德堡仪器有限公司; DDS-307A 型电导率

仪 上海仪电科学仪器有限公司; PAL-1 (NFC) 型迷你数显折射仪 广州市爱宕科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 辐照试验 电子束辐照处理组: 将内装冬枣的塑料薄膜袋整体从筐中提出, 单层平铺于加速器束下传输装置上的不锈钢托盘中, 传动通过加速器的辐照窗进行辐照。处理剂量分次设定为 500、800 Gy, 记为 EB-500 Gy、EB-800 Gy, 每次以 4 kg 冬枣为一组进行处理, 在每组试验样品的首、中、尾不锈钢托盘中央均放置重铬酸银 ($Ag_2Cr_2O_7$) 剂量计进行跟踪比对, 两组样品的实际平均吸收剂量分别为 489、804 Gy。

钴源 (⁶⁰Co γ -射线) 处理组: 因⁶⁰Co γ -射线的穿透能力极强, 冬枣样品不需要开筐单层辐照, 直接将冬枣样品以筐为单位置于装载钴源辐照货物的特定吊栏中进行处理, 放置位置依据设计所受的辐照剂量分别为 500、800 Gy, 记为 γ -500 Gy、 γ -800 Gy, 以 4 kg 冬枣为一筐进行处理, 在每个冬枣样品筐的中心位置与表层布置重铬酸银 ($Ag_2Cr_2O_7$) 剂量计进行跟踪比对, 两组样品的实际平均吸收剂量分别为 493~519、795~819 Gy。

以不经辐照处理的果实为对照, 辐照后的冬枣以及对照果实均用聚氯乙烯微孔薄膜袋包装, 每袋装 1 kg, 置于温度为 0 ± 1 °C、相对湿度 80%~85% 的冷库中贮藏, 分别在第 0、7、14、24、34、44、54 d 取样测定相关指标, 每个处理重复三次。

1.2.2 腐烂率测定 每个处理随机统计 150 个果实, 将表面霉变、软烂的冬枣记为腐烂果^[9], 根据公式计算腐烂率:

$$\text{腐烂率}(\%) = (\text{腐烂果} / \text{总果数}) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.3 微生物测定 每个处理随机挑选 10 颗冬枣果实, 使用灭菌后的小刀从不同果实上切取果皮和果肉共 10.0 g, 置于盛有 90 mL 磷酸盐缓冲液的无菌均质袋内, 每个处理设置三个重复。细菌总数参考 GB 4789.2-2016 的测定方法, 霉菌和酵母计数参考 GB 4789.15-2016 的测定方法。

1.2.4 呼吸强度测定 参照周冉冉等^[10]的方法, 使用红外线 CO_2 分析仪进行测定, 将 0.5 kg 左右的冬枣果实放入 5 L 的干燥器中, 将红外线 CO_2 分析仪置于干燥器内, 密闭平衡 30 min 后, 读取红外线 CO_2 分析仪的数值, 记为 W_1 ; 1 h 后再读一次, 记为 W_2 。按下式计算冬枣呼吸强度:

$$R = \frac{(W_2 - W_1) \times V \times M}{V_0 \times m \times t} \quad \text{式(2)}$$

式中, R: 呼吸强度, $mg \cdot kg^{-1} \cdot h^{-1}$; W_1 、 W_2 : CO_2 气体分析仪的读数, 百万分率; V: 干燥器的总体积, L; M: CO_2 的摩尔质量, $g \cdot mol^{-1}$; V_0 : 测定温度下 CO_2 的摩尔体积, $L \cdot mol^{-1}$; m: 样品的质量, g; t: 测定时间, h。

1.2.5 硬度测定 在果实赤道部均匀选择三个点, 去皮后使用数显型硬度计测定果实硬度, 测头刺入深度为 6 mm, 每个处理测定 30 个果实。

1.2.6 果皮色泽测定 将色差仪校准后测定均匀分布在果实赤道面的三个点, 记录样品的 L^* 、 a^* 、 b^*

值,每个处理测定 30 个果实。

1.2.7 相对电导率的测定 参照于广伟^[11]的方法,并稍加改进,用打孔器从冬枣果实上取下一圆柱体,然后用小刀去皮,制成厚度均一的组织切片。取 10 个来自不同冬枣的完整圆片,加 50 mL 蒸馏水,放置 30 min 后测定活组织的电导率 L_1 ,在电炉上加热,保持沸腾 10 min,冷却至室温后测定死组织的电导率 L_2 ,按照下式计算相对电导率 L :

$$L(\%) = L_1/L_2 \times 100$$
式(3)

1.2.8 可溶性固形物测定 使用便携式数显折射仪测定可溶性固形物。

1.2.9 可滴定酸含量测定 可滴定酸的测定参考 GB/T 12456-2008 的方法,略作改进。

1.3 数据处理

运用 Excel 软件对所得数据进行统计分析,结果以平均值 ± 标准差表示,使用 SPSS 18 软件进行差异显著性检验并运用 Origin 2018 软件制图。

2 结果与分析

2.1 辐照处理对冬枣果实腐烂率的影响

图 1 是不同辐照处理对冬枣腐烂率的影响,由图 1 可以看出,贮藏 0~34 d,所有处理均未发现任何腐烂果粒;贮藏第 44 d 时,EB-500 Gy 处理冬枣的腐烂率在所有处理中最低,小于 5%,对照和 EB-800 Gy 处理组的腐烂率最高,均大于 15%;贮藏第 54 d,未辐照果实的腐烂率已经高达 47.87%,而辐照组果实的腐烂率仅为对照的一半(20.97%~25.95%),表明辐照处理在一定时间内能够起到抑菌、保鲜的效果。雷庆等^[12]辐照草莓的研究结果也发现辐照后草莓的腐烂指数增长缓慢,使草莓的保鲜期限延长了 4 d。

2.2 辐照处理对冬枣果实微生物数量的影响

控制微生物的生长繁殖对冬枣的贮藏保鲜具有重要意义。由表 1 和表 2 可知,辐照处理可以有效抑

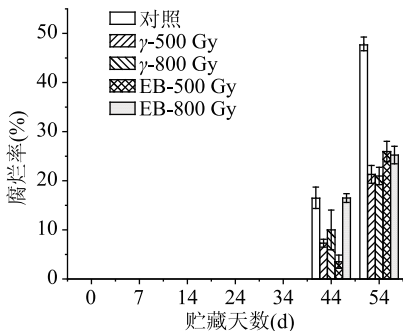


图 1 辐照处理对冬枣果实腐烂率的影响

Fig.1 Effect of irradiation treatment on decay rate of winter jujube

制冬枣菌落总数、霉菌和酵母菌数量的增加。贮藏第 0 d,各处理组的菌落总数、霉菌和酵母菌数量较对照均有所下降,特别是 γ -500 Gy 以及 EB-500 Gy、EB-800 Gy 三个处理的菌落总数未检出,说明辐照对细菌的抑制效果明显,可能是因为不同微生物对射线的敏感度不同,陈召亮等^[13]对辐照加工鲜切西洋芹的研究也有类似的现象,发现辐照对细菌总数的控制效果最好。采用 γ 射线和电子束辐照处理均能较好地控制冬枣菌落总数、霉菌和酵母菌数量的增长,但是各辐照处理之间没有显著差异($P>0.05$)。

2.3 辐照处理对冬枣果实呼吸强度的影响

呼吸作用是果实在采后进行的主要生理活动之一,呼吸强度过高,会导致果实营养物质的快速损耗,失重增加,同时水分的生成又会使湿度增加,果实易受微生物侵染;呼吸强度过低,则容易诱发无氧呼吸产生乙醇,使枣果出现酒软现象^[14-15]。由图 2 可知,贮藏第 0 d 时,各处理果实的呼吸强度均保持较高,而且不同处理之间差别较大,这可能是冬枣在辐照中心处理后长途运输回冷库,受辐照、颠簸和温度等因素的影响所致。贮藏第 7 d 时,各处理组的呼吸强度

表 1 辐照处理对冬枣果实菌落总数的影响(lg cfu/g)

Table 1 Effect of irradiation treatment on the aerobic bacterial count of winter jujube(lg cfu/g)

处理组	贮藏天数(d)						
	0	7	14	24	34	44	54
对照	3.10 ± 0.28 ^a	2.62 ± 0.21 ^a	2.46 ± 1.39 ^a	2.30 ± 0.00 ^a	2.65 ± 0.06 ^a	3.00 ± 0.14 ^a	2.88 ± 0.26 ^a
γ -500 Gy	-	-	2.19 ± 1.00 ^a	1.73 ± 0.36 ^a	1.73 ± 0.36 ^b	2.03 ± 0.79 ^a	2.62 ± 0.21 ^a
γ -800 Gy	2.15 ± 0.21 ^b	-	1.73 ± 0.36 ^a	1.97 ± 0.70 ^a	1.73 ± 0.36 ^b	2.12 ± 0.91 ^a	2.00 ± 0.00 ^a
EB-500 Gy	-	1.73 ± 0.36 ^b	-	2.00 ± 0.00 ^a	-	2.19 ± 1.00 ^a	2.69 ± 0.30 ^a
EB-800 Gy	-	-	1.73 ± 0.36 ^a	-	1.88 ± 0.58 ^b	2.15 ± 0.21 ^a	1.97 ± 0.70 ^a

注:“-”表示未检出。同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$);表 2~表 5 同。

表 2 辐照处理对冬枣果实霉菌和酵母的影响(lg cfu/g)

Table 2 Effect of irradiation treatment on the yeasts and molds of winter jujube(lg cfu/g)

处理组	贮藏天数(d)						
	0	7	14	24	34	44	54
对照	4.04 ± 0.40 ^a	3.24 ± 0.08 ^a	3.68 ± 0.19 ^a	3.37 ± 0.24 ^a	3.67 ± 0.03 ^a	4.03 ± 0.07 ^a	3.81 ± 0.06 ^a
γ -500 Gy	3.10 ± 0.70 ^a	2.16 ± 0.96 ^b	2.80 ± 0.28 ^b	3.19 ± 0.11 ^{ab}	3.07 ± 0.85 ^a	3.66 ± 0.26 ^b	3.30 ± 0.00 ^b
γ -800 Gy	3.46 ± 0.19 ^a	2.45 ± 0.21 ^b	3.27 ± 0.00 ^b	3.24 ± 0.05 ^{ab}	3.25 ± 0.00 ^a	3.07 ± 0.05 ^b	3.44 ± 0.19 ^b
EB-500 Gy	3.24 ± 0.05 ^a	2.82 ± 0.49 ^{ab}	2.89 ± 0.07 ^b	2.96 ± 0.16 ^{ab}	3.37 ± 0.02 ^a	3.32 ± 0.00 ^b	3.32 ± 0.13 ^b
EB-800 Gy	3.73 ± 0.28 ^a	2.45 ± 0.21 ^b	2.84 ± 0.21 ^b	2.60 ± 0.42 ^b	3.42 ± 0.13 ^a	3.35 ± 0.34 ^b	3.17 ± 0.38 ^b

表3 辐照处理对冬枣果实硬度的影响(kg/cm³)
Table 3 Effect of irradiation treatment on the firmness of winter jujube(kg/cm³)

处理组	贮藏天数(d)						
	0	7	14	24	34	44	54
对照	9.01 ± 0.33 ^a	8.88 ± 0.46 ^a	8.29 ± 0.32 ^a	9.40 ± 0.47 ^a	7.98 ± 0.21 ^a	8.17 ± 0.67 ^a	8.21 ± 0.09 ^{ab}
γ-500 Gy	8.83 ± 0.38 ^a	7.00 ± 0.29 ^c	7.11 ± 0.07 ^b	8.06 ± 0.38 ^b	7.37 ± 0.15 ^a	7.49 ± 0.59 ^b	8.56 ± 1.03 ^a
γ-800 Gy	8.26 ± 0.20 ^b	7.49 ± 0.85 ^b	7.35 ± 0.33 ^b	7.50 ± 0.41 ^b	7.14 ± 0.36 ^a	7.14 ± 0.36 ^{bc}	7.42 ± 0.43 ^{ab}
EB-500 Gy	8.69 ± 0.56 ^a	6.90 ± 0.37 ^c	8.38 ± 0.57 ^a	8.23 ± 1.11 ^b	7.83 ± 0.65 ^a	7.90 ± 0.75 ^a	7.53 ± 0.29 ^{ab}
EB-800 Gy	8.34 ± 0.48 ^b	6.65 ± 0.03 ^c	7.42 ± 0.13 ^b	7.40 ± 0.36 ^b	7.65 ± 1.39 ^a	6.78 ± 0.22 ^c	7.24 ± 0.38 ^b

均有一个明显的下降,可能受到低温贮藏条件的影响。此后直到贮藏结束,冬枣果实呼吸强度呈波动式缓慢增加的趋势,强度变化范围为2~11 mg CO₂·kg⁻¹·h⁻¹,无明显呼吸跃变的出现。一般认为,枣属于非呼吸跃变型果实,本研究也得出同样的结论,也有研究^[16]从基因水平阐明冬枣是非呼吸跃变型果实。在贮藏后期(44~54 d),对照的呼吸强度高于各辐照组,可能是对照组所受微生物的侵染程度更加严重所致。整个贮藏期间,EB-500 Gy处理组的呼吸强度始终维持在较低的水平,抑制效果较其他组更好。

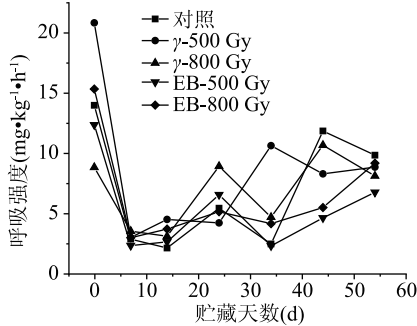


图2 辐照处理对冬枣果实呼吸速率的影响
Fig.2 Effect of irradiation treatment on respiration rate of winter jujube

2.4 辐照处理对冬枣果实硬度的影响

硬度可以在一定程度上反映冬枣的新鲜程度,随着果实衰老进程的加剧,构成植物细胞壁的纤维素和原果胶等物质在各种酶的作用下分解,从不溶性果胶转化为可溶性果胶,细胞间失去支撑,果肉组织变得松软,果实硬度下降^[17-18]。从表3可以看出,两种辐照处理均对果实硬度产生了一定的影响,辐照第0 d,冬枣果实的硬度较未辐照组有所下降,其中高剂量处理组显著低于低剂量和对照组($P < 0.05$),并在贮藏期间一直处于较低的水平,可见辐照会导致果实硬度的下降,且剂量越大,下降的幅度越大,这与戚蓉迪等^[19]用电子束辐照进口樱桃的研究结果相一致,原因可能是辐照会直接导致胞间物质的分解,破坏细胞的骨架结构,且破坏程度与剂量呈一定正相关性^[20]。贮藏第34 d,各处理组果实的硬度均较初始值有所下降,但各处理与对照之间均未达到显著差异水平($P > 0.05$),可能是因为衰老腐败会加速果实的软化,而辐照又可在一定程度上延缓果实的衰老进程,因而辐照对果实硬度的不利影响会随着时间延长有所减弱。

2.5 辐照处理对冬枣果实色泽的影响

随着贮期的延长,冬枣果实表面颜色会逐渐转红,因而可以将果实色泽的变化作为评价冬枣保鲜效果的一个直观指标。 L^* 值代表果实明暗度, L^* 越大,果实越具有亮泽,反之,颜色越暗淡; a^* 值从负到正,果实颜色从绿变红; b^* 值从负到正,果实颜色从蓝变黄; a^*/b^* 值的变化与枣面转红的进程密切相关, a^*/b^* 值由负转正并逐渐增加,说明冬枣果面在逐渐向红色发展^[21-22]。由图3A可知,各组果实 L^* 值的变化趋势一致,贮藏前期(0~7 d),果实 L^* 值极速下降,与初始 L^* 值相比,降幅达35%,随后(7~54 d) L^* 值以较缓的速度持续下降,其中EB-800 Gy处理组的 L^* 值始终最低。说明冬枣随着贮藏时间的延长,颜色越来越暗,各处理之间以及各处理与对照之间无显著差异。从图3B可以看出,整个贮藏期间,各组果实的 a^*/b^* 值总体呈上升趋势,前期 a^*/b^* 值的变化较为缓慢,从第14 d开始, a^*/b^* 值的生长速度明显加快,贮藏第34 d时,对照和EB-500 Gy组冬枣 a^*/b^* 值小幅下降,其余三组则以不同速率增长,且高剂量组的增速相对较快,这说明高剂量处理的冬枣颜色红于低剂量组。贮藏结束时,以对照和

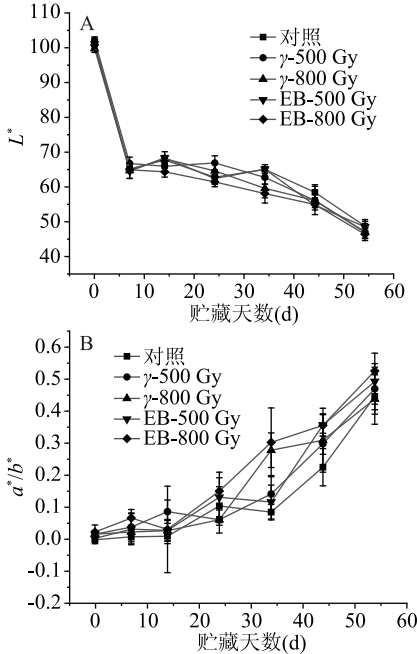


图3 辐照处理对冬枣果实 L^* 值(A)和 a^*/b^* (B)值的影响
Fig.3 Effect of irradiation treatment on L^* value(A) and a^*/b^* value(B) of winter jujube

表4 辐照处理对冬枣果实可溶性固形物含量的影响(%)

Table 4 Effect of irradiation treatment on the total soluble solid content of winter jujube(%)

处理组	贮藏天数(d)						
	0	7	14	24	34	44	54
对照	16.73 ± 0.69 ^a	17.43 ± 0.41 ^a	17.63 ± 2.2 ^a	16.43 ± 0.52 ^b	18.77 ± 0.48 ^a	17.70 ± 0.46 ^a	16.60 ± 0.20 ^b
γ-500 Gy	17.03 ± 0.57 ^a	17.20 ± 0.96 ^a	17.30 ± 0.35 ^a	17.40 ± 0.44 ^a	16.73 ± 0.41 ^c	16.40 ± 0.44 ^b	16.87 ± 0.46 ^b
γ-800 Gy	17.43 ± 0.41 ^a	17.27 ± 0.67 ^a	17.53 ± 0.16 ^a	17.50 ± 0.60 ^a	17.33 ± 0.16 ^{bc}	17.47 ± 0.33 ^a	16.70 ± 0.76 ^b
EB-500 Gy	16.53 ± 0.48 ^a	17.70 ± 2.00 ^a	16.97 ± 0.33 ^a	17.60 ± 0.18 ^a	16.90 ± 0.53 ^c	17.20 ± 0.52 ^a	18.27 ± 0.71 ^a
EB-800 Gy	16.53 ± 0.21 ^a	15.73 ± 0.77 ^a	16.97 ± 0.71 ^a	17.20 ± 0.27 ^{ab}	18.07 ± 0.42 ^{ab}	17.33 ± 0.06 ^a	16.00 ± 0.37 ^b

表5 辐照处理对冬枣果实可滴定酸含量的影响(%)

Table 5 Effect of irradiation treatment on the titratable acidity content of winter jujube(%)

处理组	贮藏天数(d)						
	0	7	14	24	34	44	54
对照	0.35 ± 0.01 ^b	0.38 ± 0.03 ^a	0.34 ± 0.03 ^a	0.29 ± 0.03 ^a	0.33 ± 0.01 ^a	0.31 ± 0.02 ^c	0.26 ± 0.01 ^a
γ-500 Gy	0.35 ± 0.01 ^b	0.32 ± 0.02 ^b	0.33 ± 0.04 ^a	0.30 ± 0.02 ^a	0.30 ± 0.01 ^b	0.31 ± 0.01 ^c	0.27 ± 0.01 ^a
γ-800 Gy	0.41 ± 0.01 ^a	0.40 ± 0.04 ^a	0.32 ± 0.01 ^a	0.29 ± 0.01 ^a	0.31 ± 0.02 ^{ab}	0.31 ± 0.01 ^c	0.27 ± 0.01 ^a
EB-500 Gy	0.36 ± 0.01 ^b	0.35 ± 0.05 ^{ab}	0.31 ± 0.02 ^a	0.29 ± 0.02 ^a	0.31 ± 0.03 ^{ab}	0.33 ± 0.01 ^b	0.26 ± 0.01 ^a
EB-800 Gy	0.35 ± 0.02 ^b	0.39 ± 0.02 ^a	0.31 ± 0.02 ^a	0.28 ± 0.02 ^a	0.32 ± 0.01 ^a	0.35 ± 0.01 ^a	0.25 ± 0.01 ^b

EB-500 Gy 的 a^*/b^* 值最低,但各处理与对照之间以及各处理之间无明显差异。

2.6 辐照处理对冬枣果实电导率的影响

植物组织相对电导率的高低可以反映出细胞膜体系的完整程度,细胞膜系统遭到破坏时,细胞内容物质渗出,相对电导率也随之升高,反之则说明膜系统受到的破坏较小,因而果实电导率也可以表示为细胞膜渗透率^[23]。如图4所示,贮藏第0 d,除EB-500 Gy辐照处理果实电导率与对照组无明显差异外,其余三种处理均显著高于对照组($P < 0.05$);贮藏第24 d,所有处理组冬枣果实的电导率降低,可能是果实组织内具有防御作用的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)等发挥作用,清除体内过量自由基,从而降低一系列膜脂过氧化链式反应的发生,保护细胞免受伤害^[24-25]。Zhao等^[26]的研究也认为维持自由基清除相关酶的活性在一个较高水平,有助于保持膜生物结构功能,进而延缓果实的衰老。随后电导率又迅速升高,贮藏结束时,800 Gy的两种辐照电导率高于对照,500 Gy的两种辐照处理则低于对照。纵观整个贮期,EB-500 Gy组冬枣的电导率相对比较稳定,低于对照或与之最接近。

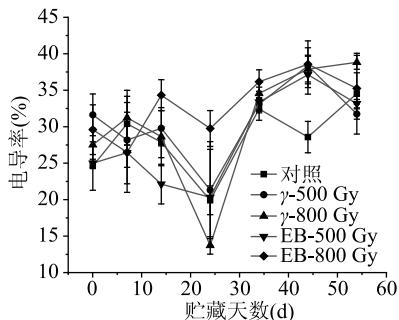


图4 辐照处理对冬枣果实电导率的影响

Fig.4 Effect of irradiation treatment on conductivity of winter jujube

2.7 辐照处理对冬枣果实可溶性固形物、可滴定酸的影响

可溶性固形物主要是指果实中的可溶性糖类,与可滴定酸一起可以作为判断果实成熟度以及口感是否令人愉悦的依据^[27]。表4显示,贮藏期间可溶性固形物值的变化范围为15.73%~18.77%,浮动的原因是可溶性固形物可以作为底物在呼吸作用中被消耗,也可以通过非糖物质的转化而得到补充^[28]。贮藏34 d,对照的可溶性固形物达到最高,之后持续下降。贮藏结束时,EB-500 Gy组冬枣可溶性固形物含量显著($P < 0.05$)高于对照和其他处理。从表5可以看出,随着贮藏时间的延长,果实的可滴定酸含量逐渐降低,辐照处理果实的可滴定酸含量和对照之间无明显差异。综合来看,本试验所选择的辐照剂量,不会对冬枣的糖、酸含量产生明显不利的影响,辐照后冬枣的风味品质仍在消费者的可接受范围内。

3 结论

辐照处理可有效降低冬枣的腐烂率,减少细菌总数、霉菌和酵母菌的数量。其中,EB-500 Gy处理组冬枣果实在整个贮藏期间维持较低的呼吸强度,与其余处理相比,对果实品质变化的影响较小,能够保证其商品价值,可以作为辐照保鲜冬枣的技术参数。相反,高剂量辐照特别是EB-800 Gy辐照处理对冬枣果实造成了一定损伤,与对照相比品质下降,说明高剂量辐照不利于冬枣的保藏。

参考文献

- [1]唐艳.采后处理对枣贮藏品质的影响研究[D].长沙:中南林业科技大学,2019.
- [2]庄青.冬枣采后生理及保鲜技术研究[D].青岛:山东农业大学,2007.
- [3]张惠然,张军.冬枣采后生理及保鲜技术研究进展[J].保鲜与加工,2017,17(1):134-138.
- [4]Fernandes A, Antonio A L, Oliveira M B P, et al. Effect of

gamma and electron beam irradiation on the physicochemical and nutritional properties of mushrooms: A review [J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 641–650.

[5] Cardoso R V C, Fernandes Â, Barreira J C M, et al. Effectiveness of gamma and electron beam irradiation as preserving technologies of fresh *Agaricus bisporus* Portobello: A comparative study. Food Chemistry, 2019, 278(11): 760–766.

[6] 杨伟, 徐莹, 樊燕, 等. 海藻酸钠涂膜及⁶⁰Co-γ 辐照处理对小枣的保鲜作用[J]. 食品工业科技, 2012, 33(3): 343–347.

[7] 杨俊丽, 乔勇进, 王海宏, 等. 高能电子束与⁶⁰Co-γ 射线对大蒜辐照保鲜效果的比较研究[J]. 食品科学, 2010, 31(12): 260–265.

[8] 周任佳, 乔勇进, 王海宏, 等. 高能电子束辐照对鲜切哈密瓜生理生化品质的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(2): 300–305, 323.

[9] 龙明秀, 吴凤玉, 田竹希, 等. ⁶⁰Co-γ 辐照处理对蓝莓保鲜效果的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(11): 2165–2176.

[10] 周冉冉, 高虹, 范秀芝, 等. ⁶⁰Co-γ 射线和电子束辐照对鲜香菇保鲜效果的初步研究[J]. 核农学报, 2019, 33(3): 490–497.

[11] 于广伟. 氧化淀粉涂膜对草莓、甜樱桃和巴黎的保鲜效果影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.

[12] 雷庆, 黄敏, 康菊, 等. 电子束辐照草莓保鲜效果研究[J]. 核农学报, 2011, 25(3): 510–513.

[13] 陈召亮, 方强, 王海宏, 等. 电子束辐照对鲜切西洋芹的保鲜效应[J]. 上海农业学报, 2010, 26(2): 9–13.

[14] 张小康. 早中熟鲜食红枣保鲜措施及其生理机制研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2017.

[15] Li H, Xiong Z, Gui D, et al. Effect of aqueous ozone on quality and shelf life of Chinese winter jujube[J]. Journal of Food Processing & Preservation, 2019, 43(9): 142–145.

[16] 康晨煜. 设施条件下冬枣品质特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.

[17] 陈召亮, 王海宏, 乔勇进. 电子束辐照对草莓灰霉病菌致病力及致病相关酶活性的影响[J]. 核农学报, 2013, 27(8): 1156–1161.

(上接第 264 页)

real-time PCR assays[J]. Journal of Food Science, 2012, 77(2): C167–C173.

[11] Rene Koppel, Ju g Ruf, Jurg Rentsch. Multiplex real-time PCR for the detection and quantification of DNA from beef, pork, horse and sheep[J]. Eur Food Res Technol, 2011, 232(1): 151–155.

[12] Ergün Şakalar, Mustafa Fatih Abasiyanik. Qualitative analysis of meat and meat products by multiplex polymerase chain reaction (PCR) technique[J]. African Journal of Biotechnology, 2011, 10(46): 9379–9386.

[13] 纪艺, 徐晓丽, 姜媛媛, 等. 基于数字 PCR 的不同品种鸭组织中线粒体与核 DNA 拷贝数差异研究[J]. 生物技术通报, 2020, 36(5): 7–13.

[14] Hu L, Yang Y J, Zhao Y, et al. DNA barcoding for molecular identification of *Demodex* based on mitochondrial genes[J]. Parasitology Research, 2017, 116(12): 3285–3290.

[15] 刘娜, 赵新, 陈锐, 等. 动物肌肉组织 DNA 的提取方法及实时荧光定量 PCR 检测[J]. 食品工业科技, 2016, 37(18): 74–80.

[18] Zhao Y, Zhu X, Hou Y, et al. Effects of nitric oxide fumigation treatment on retarding cell wall degradation and delaying softening of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during storage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2019, 156(7): 987–993.

[19] 戚蓉迪, 颜伟强, 岳玲, 等. 电子束辐照对进口甜樱桃保鲜效果的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(5): 839–844.

[20] 杨俊丽, 陈召亮, 王海宏, 等. 高能电子束辐照对草莓保鲜效果的影响[J]. 上海农业学报, 2010, 26(3): 8–12.

[21] 周慧娟, 叶正文, 张学英, 等. 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.

[22] Kou X, He Y, Li Y, et al. Effect of abscisic acid (ABA) and chitosan/nano-silica/sodium alginate composite film on the color development and quality of postharvest Chinese winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao)[J]. Food Chemistry, 2019, 270(7): 385–394.

[23] 武继芸. 不同涂膜处理对冬枣贮藏品质和抗氧化活性的影响[D]. 天津: 天津大学, 2016.

[24] 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, 43(3): 571–577.

[25] Deng W, Zhao X H. Calcium maintained higher quality and enhanced resistance against chilling stress by regulating enzymes in reactive oxygen and biofilm metabolism of Chinese winter jujube fruit[J]. Journal of Food Biochemistry, 2020, 44(4): 1–8.

[26] Zhao Y T, Zhu X, Hou Y Y, et al. Postharvest nitric oxide treatment delays the senescence of winter jujube (*Zizyphus jujuba* Mill. cv. Dongzao) fruit during cold storage by regulating reactive oxygen species metabolism[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 261(2): 1–9.

[27] 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(4): 338–345.

[28] 魏征, 张政, 魏佳, 等. 茉莉酸甲酯雾化熏蒸对冬枣采后贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(1): 43–48.

[16] 陈传君, 金鹭, 林华, 等. 食品中羊肉源性成分微滴数字 PCR 定量方法的建立[J]. 食品与发酵工业, 2019, 10(21): 1–13.

[17] Spychaj A, Szalata M S, Omski R, et al. Identification of bovine, pig and duck meat species in mixtures and in meat products on the basis of the mt DNA cytochrome oxidase subunit I (COI) gene sequence[J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2016, 66(1): 31–36.

[18] 赵永才, 高炳宏. 线粒体动力学与细胞能量代谢的关系及运动干预研究进展[J]. 生理学报, 2019, 71(4): 625–636.

[19] 戴纪刚, 肖颖彬, 闵家新, 等. 精确定量肺组织细胞线粒体 DNA 拷贝数方法的建立[J]. 第三军医大学学报, 2010, 32(18): 2033–2034.

[20] 王强, 蔡一村, 张扬, 等. 食品和饲料中鹅源性成分微滴式数字 PCR 检测与定量分析[J]. 现代食品科技, 2018, 34(10): 258–263.

[21] 任君安, 邓婷婷, 黄文胜, 等. 微滴式数字聚合酶链式反应精准定量检测羊肉中掺杂猪肉[J]. 食品科学, 2017, 38(2): 311–316.