DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250925003
引用格式: 王珏莹, 王琛, 宋建宇, 等. 不同辐照剂量处理对软枣猕猴桃冷藏后货架期品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(3): 58–67.
WANG JY, WANG C, SONG JY, *et al*. Effects of different irradiation doses treatments on the shelf life quality of *Actinidia arguta* after refrigerated storage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(3): 58–67. (in Chinese with English abstract).

不同辐照剂量处理对软枣猕猴桃冷藏后货架期品质的影响

王珏莹[1], 王　琛[1,2], 宋建宇[3], 刘　钊[3], 程顺昌[1*], 孙　阳[3*]

(1. 沈阳农业大学食品学院, 沈阳　110866; 2. 辽宁省农业科学院食品与加工研究所, 沈阳　110866;
3. 辽宁省经济林研究所, 大连　116091)

摘　要: 目的　探究不同辐照剂量处理对软枣猕猴桃在冷藏结束后于货架期期间品质变化的影响。**方法**　本研究采用不同辐照剂量对软枣猕猴桃进行辐照处理, 通过比较果实外观、腐烂率、硬度、色泽、可溶性固形物、可滴定酸、总酚含量, 确定不同辐照剂量对冷藏后货架期软枣猕猴桃贮藏效果的影响。**结果**　在延缓软枣猕猴桃成熟软化和维持果实综合品质上, 1.5 kGy 辐照处理展现出显著效果。该处理使果实经 50 d 冷藏后, 货架期仍能达到 8 d, 并保持了 0.52 N 的硬度, 同时将腐烂率控制在 49.2%。果实的色泽也得到较好维持。此外, 果实内部风味与营养物质的损失速率也显著降低(P<0.05)。**结论**　对于软枣猕猴桃而言, 1.5 kGy 的辐照处理通过有效抑制采后生理成熟引发的软化、控制腐烂率以及减缓营养成分降解, 同时确保其感官与生理品质不受负面影响, 成为一种能够显著提高果实贮藏品质、延长冷藏后货架期的可行保鲜方案。

关键词: 软枣猕猴桃; 辐照处理; 冷藏后货架期; 腐烂率; 果实硬度

Effects of different irradiation doses treatments on the shelf life quality of *Actinidia arguta* after refrigerated storage

WANG Jue-Ying[1], WANG Chen[1,2], SONG Jian-Yu[3], LIU Zhao[3],
CHENG Shun-Chang[1*], SUN Yang[3*]

(1. *Food Science College*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*;
2. *Institute of Food and Processing*, *Liaoning Academy of Agricultural Sciences*, *Shenyang* 110866, *China*;
3. *Liaoning Provincial Economic Forest Research Institute*, *Dalian* 116091, *China*)

ABSTRACT: Objective　To explore the effects of different irradiation doses treatments on the quality changes of *Actinidia arguta* during the shelf life after the end of cold storage. **Methods**　In this study, *Actinidia arguta* were treated with different irradiation doses. By comparing the fruit's appearance, decay rate, firmness, color, soluble solids content, titratable acid and total phenol content, the effects of different irradiation doses on the storage

收稿日期: 2025-09-25
第一作者: 王珏莹(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬采后贮藏与品质控制。E-mail: 1808298558@qq.com
***通信作者:** 程顺昌(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为果蔬采后生物学与贮藏保鲜。E-mail: chengsc@syau.edu.cn
孙阳(1981—), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为经济林遗传育种, 丰产栽培技术及加工利用研究。E-mail: sy81@163.com

performance of *Actinidia arguta* during the shelf life after refrigerated storage were determined. **Results** The 1.5 kGy irradiation treatment showed a significant effect in delaying the ripening and softening of *Actinidia arguta* and maintaining the comprehensive quality of the fruit. After 50 d of refrigerated storage, the fruit treated with this dose still had a shelf life of 8 d, maintained a firmness of 0.52 N, and had a decay rate controlled at 49.2%. The fruit color was also well preserved. In addition, the loss rate of flavor and nutrient substances inside the fruit was significantly reduced (P<0.05). **Conclusion** For *Actinidia arguta*, the 1.5 kGy irradiation treatment effectively inhibits softening caused by postharvest physiological ripening, controls the decay rate, and slows down the degradation of nutrients. Meanwhile, it ensures that the sensory and physiological quality of the fruit is not negatively affected. Thus, it is a feasible fresh-keeping method that can significantly improve the storage quality of *Actinidia arguta* and extend their shelf life after refrigerated storage.

KEY WORDS: *Actinidia arguta*; irradiation treatment; shelf life after refrigeration; decay rate; fruit firmness

0　引　言

软枣猕猴桃别名软枣子、猕猴梨等, 是猕猴桃科猕猴桃属大型落叶藤本植物[1]。其果实呈亮绿色, 成熟后逐渐转为浅绿色至粉红色, 果皮光滑无毛可直接带皮食用[2]。软枣猕猴桃果实维生素 C 含量较高, 是其他水果的几十倍, 有增强免疫力、抗氧化、抗病毒等功效, 并含有丰富的生物活性成分和低卡路里特征[3–4]。但是, 软枣猕猴桃是呼吸跃变型果实, 采后处理不及时容易造成失水、软化, 进而遭受微生物的侵染而腐烂变质[5]。通常, 常温贮藏 10 d 内, 软枣猕猴桃果实硬度可从 6.60 kg/cm^2 骤降至 0.95 kg/cm^2, 降幅高达 85.6%, 且风味和营养也随之明显下降[6]。同时, 软化后货架期缩短至 3~5 d, 且常温运输的损耗率高达 30%~50%[7], 由此导致的直接经济损失约占产值的 40%[8], 严重限制了销售半径和市场拓展。因采后软化造成的迫使种植户提前采收, 导致风味和营养品质显著降低。因此, 采取必要的手段提高软枣猕猴桃的保鲜效果已经迫在眉睫。

目前, 软枣猕猴桃保鲜多采用物理保鲜和化学保鲜, 如低温冷藏、气调贮藏及化学保鲜剂涂膜等[9–10]。物理保鲜技术可以有效抑制果实呼吸作用, 减少营养物质的消耗[11], 且具有安全性高、无化学残留等优势, 但其设备投入大、技术门槛高、能耗较高, 稳定性较低, 特别是冷藏后货架的效果并不乐观[12]。化学保鲜是采用保鲜剂延长果蔬贮藏期与货架期的处理方式, 具有成本低、操作简便、见效快等优势, 能有效抑制微生物生长和延缓食品腐败[13], 但存在化学残留风险, 长期使用可能导致微生物产生耐药性, 并影响食品原有风味和营养价值[14]。研究表明, 气调包装因湿度控制不佳易导致结露, 使冷藏后果实软化和腐烂率增加 15%~20%[15]。1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)处理可能干扰正常成熟代谢, 导致硬度下降 30%~40%和维生素 C 损失 25%以上[16]。冷链流通的温度波动使果实的软化速度提高 2~3 倍, 严重制约了产品价值和市场扩展。

果实硬度的下降主要与温度波动诱导的细胞壁降解酶活性骤增及果实呼吸作用增强相关[17]。辐照保鲜技术是利用 γ 射线辐射能量, 通过杀灭有害微生物、抑制酶活性以及延缓生理生化进程达到保鲜的目的[18]。该技术穿透力强, 安全性高, 保鲜效果显著, 且能够有效避免有毒物质的产生, 展现出良好的应用前景[19]。研究表明, 辐照技术能够抑制细胞壁降解酶活性及基因表达, 减少原果胶和纤维素分解, 从而减少果实软化的可能[20], 其类似机制在蓝莓[21]、徐香猕猴桃[22]、草莓[23]、哈密瓜[24]及软枣猕猴桃[25]中均得到验证。因此, 本研究采用不同辐照剂量处理软枣猕猴桃, 通过比较果实的感官品质及营养品质, 确定不同辐照剂量对冷藏后货架期软枣猕猴桃贮藏效果的影响, 为软枣猕猴桃的采后保鲜提供理论依据和技术支持。

1　材料与方法

1.1　材料、试剂与仪器

试验所用软枣猕猴桃为“龙城 2 号”, 采收于大连的商业种植园。果实采收时的总可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量为 7.2%, 挑选无机械损伤和病虫害的果实, 分装到带有透气孔的塑料保鲜盒中, 每盒中放置 4 个果实, 约 60~65 g, 每 30 盒放入一个带有透气孔的泡沫保鲜箱中, 共 10 箱。采收当日冷链运到辽宁省农业科学院辐照中心。

草酸、磷酸、酚酞、氢氧化钠、甲醇、氯化钾、酒石酸、氢氧化钾(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 2,6-二氯酚靛酚、抗坏血酸(纯度 99%, 上海麦克林生化科技有限公司); 浓盐酸(HCl)(色谱纯, 天津科密化学试剂有限公司)。

SANOTO 摄影箱(中国东莞市川华手袋有限公司); CR-400 色差仪(日本 Konica Minolta Sensing 公司); BSA-224 电子天平(精度 0.01 mg, 上海精科天平有限公司); Brookfield 质构仪(美国 Brookfield 公司); PAL-1 便携式手

持折光仪(日本 ATAGO 公司); UV5100 紫外可见分光光度计(美国 METASH 公司)。

1.2 辐照保鲜处理

辐照处理在辽宁省农业科学院钴源辐照中心进行, 其源强为 7.51×10^{15} Bq, 静态辐照剂量为 0、0.8、1.0、1.2、1.5、1.8、2.0 kGy, 硫酸亚铁剂量计测得的辐照剂量率分别为 0、0.87、1.13、1.26、1.59、1.89、2.11 kGy/h。辐照时间为 120 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。

辐照处理后的软枣猕猴桃放入温度为(4.0±0.5) ℃、相对湿度为 85%~95%的冷库中贮藏, 每组样品每隔 10 d 定期随机抽取软枣猕猴桃 3 盒。经 10、20、30、40、50 d 冷藏后的软枣猕猴桃果实转入(20.0±0.5) ℃常温货架中, 每隔 2 d 进行各指标的测定; 每个指标重复 3 次, 取平均值。

1.3 果实外观

使用 SANOTO 摄影箱对不同失水程度的软枣猕猴桃进行拍摄。

1.4 色 差

测定参照宋梦婷[26]的方法, 采用色差仪在软枣猕猴桃赤道地区 3 个点进行测定, 结果取其平均值, 并记录其 L^*、a^*、b^*。在测量数据中, a^*代表红绿色差指标, 范围从绿(–)到红(+), a^*代表果实颜色的红绿程度, a^*越正, 果实颜色越红; 值越负, 果实颜色越绿; b^*代表黄蓝色差指标, 范围从蓝(–)到黄(+), b^*代表黄蓝色, b^*越低, 果实越蓝; b^*越高, 果实越黄; L^*代表光泽明亮度, 范围从 0(黑)到 100(白)。

1.5 果实硬度

测定参照周丽萍等[27]的方法, 采用质构仪测定软枣猕猴桃果实硬度。在围绕果实赤道部位, 同一个果实选择两个点进行测量。探头直径为圆形 3 mm, 运行速度为 2 mm/s、触发点负载为 0.07 N、循环 2 次然后选取平均值来得到软枣猕猴桃硬度。

1.6 腐烂率

测定参照周倩[28]的方法, 软枣猕猴桃果实出现腐烂, 表面有霉菌和细菌生长时, 被认为是一种不受欢迎的腐烂现象。腐烂果实被记数, 并按公式(1)进行计算。

$$\text{果实腐烂率}/\%=\text{烂果数}/\text{总果数}\times100\% \quad (1)$$

1.7 总可溶性固形物

测定参照 REWB 等[29]的方法, 将待测软枣猕猴桃洗净、擦干, 取可食用部分切碎、混匀, 称取适量试样用 2 层擦镜纸或 4 层纱布挤出匀浆汁液测定。在 20 ℃条件下, 用蒸馏水校准折射仪, 将可溶性固形物含量读数调整至 0。滴加 2~3 滴待测样液, 使样液均匀分布于整个棱镜表面, 对准光源, 记录折射仪读数。

1.8 可滴定酸

测定参照 WANG 等[30]的方法, 称取混合均匀的果蔬样品 10.0 g 或吸取汁液 10.0 mL, 置于研钵中磨碎, 转移到 100 mL 容量瓶中, 再用蒸馏水冲洗研钵定容至刻度, 摇匀。静置 10 min 后过滤。吸取 20.0 mL 滤液, 转入三角瓶中, 加入 2 滴 1%酚酞指示剂, 用已标定的氢氧化钠溶液进行滴定。滴定至溶液初显粉色并在 0.5 min 内不褪色时为终点(pH=8.1~8.3), 记录氢氧化钠滴定液的用量, 重复 3 次。再以蒸馏水代替滤液进行滴定, 作为空白对照。

根据氢氧化钠滴定液消耗量, 计算果蔬组织中可滴定酸(titratable acidity, TA)含量, 以质量分数(%)表示。按照公式(2)进行计算。

$$\text{TA 含量}/\%=\frac{V\times(V_1-V_0)\times C\times f}{V_s\times m}\times100\% \quad (2)$$

式中: V_1为滴定滤液消耗的氢氧化钠体积, mL; V_0为滴定蒸馏水消耗的氢氧化钠溶液体积, mL; C 为氢氧化钠滴定液浓度, mol/L; V_s滴定时所取滤液体积, mL; V 样品提取液总体积, mL; m 为样品重量, g; f为折算系数, g/mmol。

1.9 总酚、类黄酮

测定参照 MOUHCINE 等[31]的方法, 称取 2.0 g 果蔬果肉组织或 0.5 g 果皮组织, 加入少许经预冷的 1% HCl-甲醇溶液, 在冰浴条件下研磨匀浆后, 转入 20 mL 刻度试管中。用 1% HCl-甲醇溶液冲洗研钵, 一并转移到试管中, 定容至刻度, 混匀, 于 4 ℃避光提取 20 min, 期间摇动数次。然后过滤液待用。以 1% HCl-甲醇溶液作空白参比调零, 取滤液分别于波长 280、325、600、530 nm 处测定溶液的吸光度值, 重复 3 次。以每克鲜重果蔬组织在波长 280 nm 处吸光度值表示总酚含量, 即 OD_{280} g/FW; 在波长 325 nm 处吸光度值表示黄酮物质含量, 即 OD_{325} g/FW。

1.10 数据处理

数据均重复测试 3 次。所有处理均重复测定 3 次, 使用 Microsoft Excel 2023 软件计算平均值±标准误差, 并使用 SPSS 27.0 进行邓肯氏多重差异分析(P<0.05)。低于概率水平 0.05 的差异被认为具有统计学意义。图表使用 Origin 2024 制作。

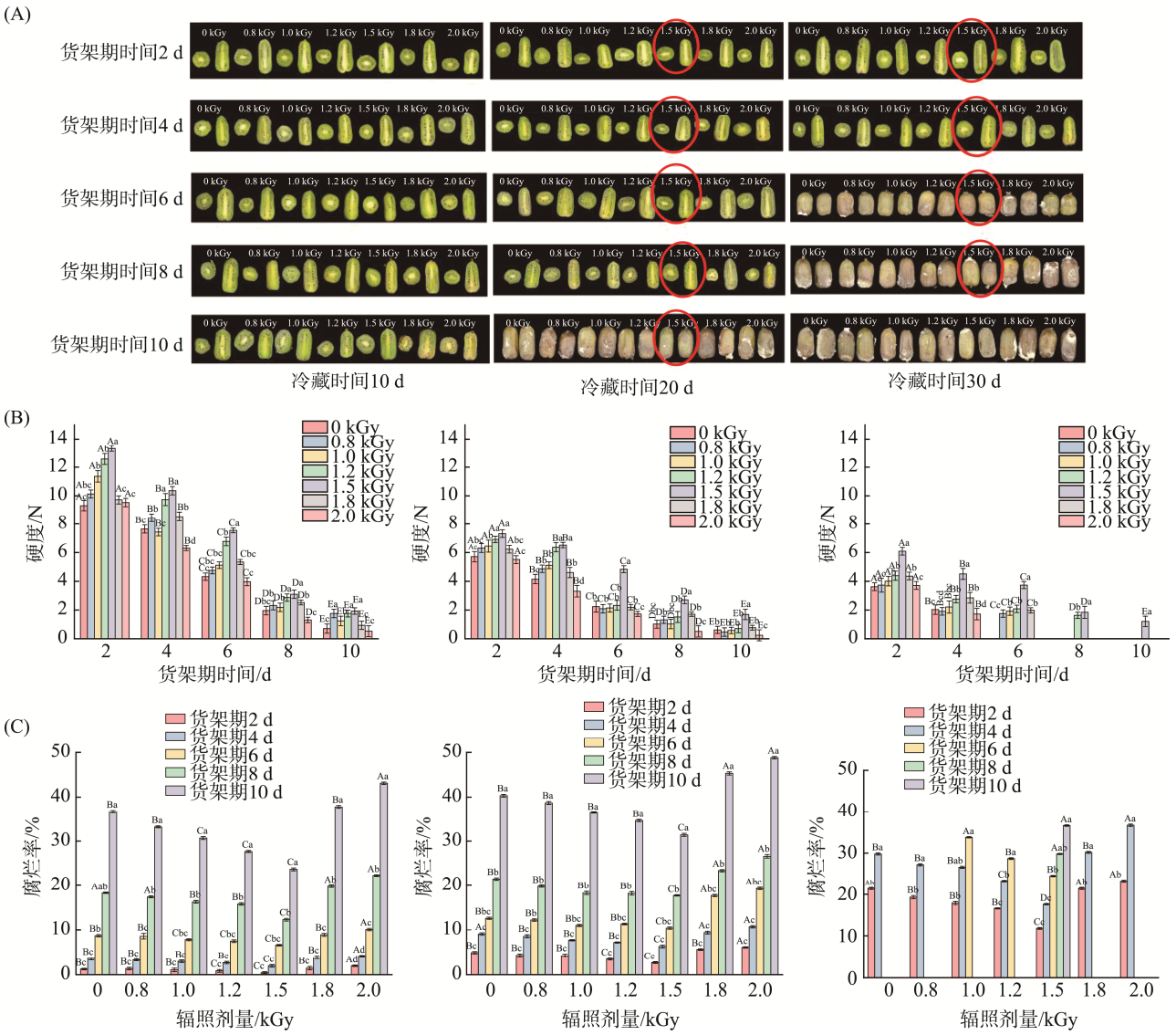
2 结果与分析

2.1 辐照剂量的筛选

果实硬度和腐烂率作为果实品质的重要指标, 直接反映了贮藏品质变化和损耗程度, 经常用来衡量果实的保鲜效果[32]。图 1 展示了不同辐照剂量处理对采后软枣猕猴桃果实外观品质、硬度及腐烂率的影响。随着冷藏时间的延长, 软枣猕猴桃的货架期逐渐缩短, 从果实外观看, 1.5 kGy

处理组的冷藏后货架表现最好，果实完整，果肉饱满，籽粒被紧紧包围，具有果实该有的新鲜度，而对其他辐照处理组在冷藏 30 d 后果实膨胀，果肉溶解，籽粒析出，其货架品质几乎消失，劣变程度与对照相似。结合果实硬度和腐烂率，2.0 kGy 处理组的冷藏后货架时间最短，表现为冷藏 30 d 后的货架时间仅为 4 d，其硬度是 1.72 N，腐烂率是 36.7%，冷藏 50 d 已经完全失去商品价值，腐烂变质的程度与对照组接近。1.0 kGy 处理组次之，冷藏 30 d 后的货架时间为 6 d，其硬度是 1.92 N，腐烂率是 33.85%，冷藏 50 d 的货架时间为 4 d。但是，1.5 kGy 处理组在冷藏 50 d 后的货架时间可以延长至 8 d，其硬度是 0.52 N，腐烂率是 49.2%。不同冷藏期后，1.5 kGy 处理组的货架果实硬度均高于同期的对照组和其他辐照处理组，说明 1.5 kGy 能够抑制软枣猕猴桃冷藏后货架硬度下降。因此，辐照剂量的选择对软枣猕猴桃的保鲜效果至关重要，认为 1.5 kGy 处理在延缓果实外观品质劣变、硬度损失及降低腐烂率方面表现最佳，并对延长冷藏后货架时间有积极影响。

最低有效剂量(minimum effective dose, MED)是指能够实现既定贮藏效果所需的最小使用剂量，其核心在于通过精准的剂量控制达到最优化的处理效果，同时避免因剂量不足或过高导致的贮藏效能下降。在本研究中，将辐照处理后果实贮藏有效期延长至 40 d 以上作为判定 MED 的核心标准。



注：(A)为软枣猕猴桃的果实外观；(B)为软枣猕猴桃的硬度；(C)为软枣猕猴桃的腐烂率；其中图(B)中不同大写字母表示同一辐照剂量不同货架期时间差异显著(P<0.05)，不同小写字母表示同一货架期时间不同辐照剂量差异显著(P<0.05)；其中图(C)中不同大写字母表示同一货架期时间不同辐照剂量差异显著(P<0.05)，不同小写字母表示同一辐照剂量不同货架期时间差异显著(P<0.05)。(B)和(C)中 3 个图片依次为冷藏 10、20、30 d 货架期，图 3~4 同。

图 1　软枣猕猴桃的果实外观、硬度及腐烂率

Fig.1　Fruit appearance, firmness and rot rate of *Actinidia arguta*

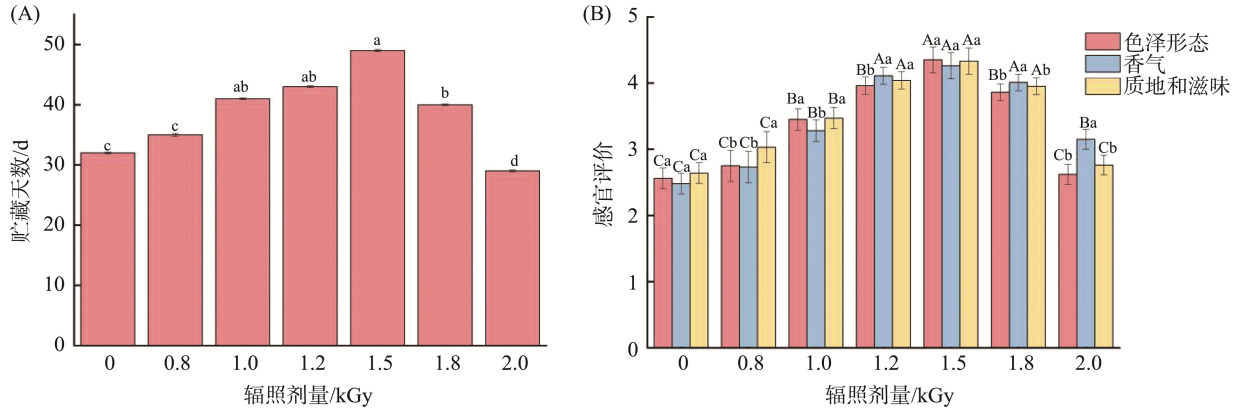
如图 2 所示，未经辐照处理的对照组果实由于微生物侵染和生理衰变加速，其贮藏有效期仅为 32 d。相比之下，0.8、1.0、1.2、1.5、1.8 kGy 辐照处理组均表现出不同程度的保鲜效果提升，但不同剂量组间存在显著差异：其中 1.5 kGy 剂量组表现最为突出，通过有效抑制致病菌增殖和延缓果实成熟衰老，使贮藏有效期延长至 49 d，较对照组提升 53.1%；1.0、1.2、1.8 kGy 剂量区间的处理组(1.2 kGy 组有效期 45 d，1.8 kGy 组 42 d)虽略逊于 1.5 kGy 组，但仍保持较好的保鲜效果。值得注意的是，0.8 kGy 剂量因灭菌不彻底导致贮藏期仅 38 d，而 2.0 kGy 高剂量可能诱发果实组织损伤，反而使有效期缩短至 27 d，二者均未达到 40 d 的基准要求。当剂量低于 1.0 kGy 时，抗菌效果随剂量增加而增强；在 1.0~1.8 kGy 区间达到平台期；超过 1.8 kGy 后则因辐射损伤效应导致保鲜效能下降。基于此，研究确定 1.0 kGy 为软枣猕猴桃辐照处理的 MED，该剂量既能确保贮藏期突破 40 d 关键节点(1.0 kGy 组实际达 41 d)，又符合“最小足够剂量”的原则，在保证食品安全性的同时实现能源利用效率最大化。

最高耐受剂量(maximum tolerable dose, MTD)作为辐照保鲜工艺的关键参数，其确定主要基于软枣猕猴桃果实在特定辐照剂量下能否维持良好的感官品质(包括色泽、质地、风味等)和食用特性(如口感、汁液含量等)。本研究以贮藏后果实感官评价得分均超过 3 分作为可接受范围的判定标准，系统评估了不同辐照剂量对果实品质的影响。结果表明，辐照处理整体上对软枣猕猴桃的感官品质具有积极影响，1.5 kGy 辐照处理组得分显著高于对照组(未辐照)。具体来看，0.8 kGy 和 2.0 kGy 剂量组的感官评分相对较低，表明这两个剂量对果实品质的维持效果欠佳：0.8 kGy 可能因剂量不足导致保鲜效果有限，而 2.0 kGy 则可能因剂量过高引发果实组织损伤。相比之下，1.2 kGy 和 1.5 kGy 剂量组的表现最为突出，各项感官指标评分均保持在 4 分以上，说明这两个剂量既能有效抑制果实劣变，又不会对其色泽、质地和风味等关键品质指标造成负面影响。综合考虑感官评价结果和剂量效应关系，本研究最终确定 1.5 kGy 为软枣猕猴桃辐照保鲜的 MTD，该剂量在确保延长贮藏期的同时，能够最大限度地维持果实的商品价值和食用品质。

2.2 不同辐照剂量对冷藏后货架果实表面色泽的影响

果实表面色泽及颜色可以体现新鲜度，在一定程度上反映果实的衰老进程[33]。表 1 展示了不同辐照剂量处理对采后软枣猕猴桃外观色泽的影响。随着冷藏时间的延长，软枣猕猴桃的冷藏后货架期逐渐缩短，同时果实的表面色泽及亮度出现不同程度的变化。

在贮藏过程中，软枣猕猴桃果实的色泽变化呈现出明显的规律性。随着贮藏时间的延长，a^*整体呈上升的趋势，表明果实绿色色调逐渐减弱，果实逐渐趋于红色，出现褐变；同时 b^*整体呈下降的趋势，表明蓝色色调增强而黄色色调减弱。这种颜色参数的变化共同导致果实整体色泽从黄绿色转变成棕褐色，呈现出典型的衰老特征。不同剂量辐照处理对果实色泽保持效果差异显著，其中，2.0 kGy 处理组表现出最严重的色泽劣变，其颜色变化趋势与未处理对照组最为接近，a^*和 b^*的剧烈波动使果实迅速呈现暗沉蓝绿色，表明该处理不仅未能有效延缓衰老，反而加速了果实品质的下降。1.0 kGy 处理组虽然也出现色泽劣变，但程度相对较轻，表现出一定的保鲜效果。1.5 kGy 处理组展现出最佳的色泽保持效果。该处理组的颜色参数变化最为平缓，果实能够较长时间保持接近新鲜状态的亮绿色调，a^*和 b^*的稳定变化表明其代谢活动受到适度调控，既有效延缓了衰老过程，又避免了处理损伤，能够保持更持久的视觉新鲜感和更好的商品品质。因此，认为 1.5 kGy 处理在延缓冷藏后货架期果实外观色泽及亮度变化方面表现最佳，有积极影响。



注：图(A)中不同小写字母表示差异显著(P<0.05)；图(B)中不同大写字母表示同一感官评价项目不同辐照剂量差异显著(P<0.05)，不同小写字母表示同一辐照剂量不同感官评价项目差异显著(P<0.05)。

图 2 软枣猕猴桃的贮藏有效期及感官评价得分

Fig.2 Storage life and sensory evaluation score of *Actinidia arguta*

表 1　辐照剂量对冷藏后货架期软枣猕猴桃色泽的影响

Table 1　Effects of irradiation doses on hardy *Actinidia arguta* color during shelf life after refrigeration

指标	贮藏时间/d	0 kGy	1.0 kGy	1.5 kGy	2.0 kGy
L^*	10+2	44.90 ± 0.36^{Ab}	45.13 ± 0.26^{Ab}	47.18 ± 0.20^{Aa}	43.63 ± 0.29^{Ab}
	10+4	42.33 ± 0.29^{Bb}	43.89 ± 0.26^{Bb}	45.21 ± 0.29^{Ba}	40.18 ± 0.17^{Bb}
	10+6	40.76 ± 0.26^{Cb}	41.78 ± 0.29^{Cb}	43.87 ± 0.17^{Ca}	38.72 ± 0.27^{Cb}
	10+8	38.89 ± 0.30^{Db}	39.14 ± 0.26^{Db}	41.91 ± 0.18^{Da}	35.23 ± 0.19^{Db}
	10+10	36.24 ± 0.32^{Eb}	37.43 ± 0.33^{Eb}	39.01 ± 0.22^{Ea}	33.15 ± 0.17^{Eb}
	20+2	43.17 ± 0.24^{Ab}	43.62 ± 0.32^{Ab}	46.94 ± 0.28^{Aa}	43.21 ± 0.29^{Ab}
	20+4	40.89 ± 0.26^{Bb}	41.73 ± 0.24^{Bb}	44.17 ± 0.29^{Ba}	39.76 ± 0.32^{Bb}
	20+6	37.51 ± 0.28^{Cb}	38.71 ± 0.29^{Cb}	41.78 ± 0.27^{Ca}	37.51 ± 0.27^{Cb}
	20+8	35.69 ± 0.22^{Db}	36.29 ± 0.23^{Db}	39.64 ± 0.26^{Da}	34.83 ± 0.35^{Db}
	20+10	33.88 ± 0.31^{Eb}	34.83 ± 0.33^{Eb}	37.84 ± 0.25^{Ea}	31.52 ± 0.27^{Eb}
	30+2	41.84 ± 0.42^{Ab}	41.83 ± 0.35^{Ab}	45.85 ± 0.28^{Aa}	41.77 ± 0.26^{Ab}
	30+4	38.17 ± 0.37^{Bb}	39.18 ± 0.31^{Bb}	43.21 ± 0.29^{Ba}	39.69 ± 0.22^{Bb}
	30+6	-	38.62 ± 0.24^{Cb}	40.83 ± 0.27^{Ca}	-
	30+8	-	-	38.02 ± 0.42^{Da}	-
	30+10	-	-	36.62 ± 0.25^{Ea}	-
a^*	10+2	-15.50 ± 0.29^{Da}	-15.33 ± 0.16^{Da}	-17.13 ± 0.28^{Db}	-15.23 ± 0.19^{Da}
	10+4	-14.13 ± 0.28^{Ca}	-13.96 ± 0.20^{Ca}	-16.83 ± 0.17^{Cb}	-13.86 ± 0.29^{Ca}
	10+6	-12.56 ± 0.28^{Ba}	-12.59 ± 0.16^{Ba}	-15.97 ± 0.30^{Bb}	-12.49 ± 0.18^{Ba}
	10+8	-11.19 ± 0.17^{Aa}	-11.22 ± 0.19^{Aa}	-14.52 ± 0.18^{Ab}	-11.12 ± 0.30^{Aa}
	10+10	-10.63 ± 0.19^{Aa}	-10.86 ± 0.23^{Aa}	-13.05 ± 0.24^{Ab}	-9.47 ± 0.28^{Aa}
	20+2	-12.84 ± 0.18^{Ca}	-13.12 ± 0.26^{Ca}	-15.45 ± 0.29^{Cb}	-12.64 ± 0.25^{Ca}
	20+4	-11.57 ± 0.26^{Ca}	-12.72 ± 0.24^{Ca}	-14.91 ± 0.19^{Cb}	-11.36 ± 0.15^{Ca}
	20+6	-10.12 ± 0.16^{Ba}	-11.39 ± 0.18^{Ba}	-13.58 ± 0.20^{Bb}	-10.95 ± 0.19^{Ba}
	20+8	-9.88 ± 0.23^{Aa}	-10.23 ± 0.15^{Aa}	-12.29 ± 0.28^{Ab}	-9.63 ± 0.27^{Aa}
	20+10	-8.47 ± 0.16^{Aa}	-9.68 ± 0.23^{Aa}	-11.95 ± 0.16^{Ab}	-8.25 ± 0.29^{Aa}
	30+2	-10.75 ± 0.29^{Ba}	-10.93 ± 0.26^{Ba}	-12.17 ± 0.29^{Bb}	-10.52 ± 0.25^{Ba}
	30+4	-9.43 ± 0.26^{Aa}	-9.67 ± 0.24^{Aa}	-11.82 ± 0.28^{Bb}	-9.22 ± 0.28^{Aa}
	30+6	-	-9.23 ± 0.29^{Aa}	-10.48 ± 0.20^{Ab}	-
	30+8	-	-	-9.15 ± 0.27^{Aa}	-
	30+10	-	-	-8.77 ± 0.19^{Aa}	-
b^*	10+2	25.85 ± 0.15^{Ab}	26.48 ± 0.18^{Ab}	29.34 ± 0.20^{Aa}	25.79 ± 0.29^{Ab}
	10+4	23.47 ± 0.18^{Bb}	25.10 ± 0.26^{Bb}	28.96 ± 0.38^{Ba}	23.41 ± 0.17^{Bb}
	10+6	22.09 ± 0.23^{Cb}	24.72 ± 0.17^{Cb}	27.58 ± 0.17^{Ca}	22.03 ± 0.39^{Cb}
	10+8	21.71 ± 0.14^{Db}	23.34 ± 0.26^{Db}	27.20 ± 0.18^{Da}	21.65 ± 0.19^{Db}
	10+10	20.33 ± 0.16^{Eb}	22.96 ± 0.33^{Eb}	26.82 ± 0.19^{Ea}	20.27 ± 0.24^{Eb}
	20+2	21.86 ± 0.16^{Ab}	22.68 ± 0.18^{Ab}	26.78 ± 0.20^{Aa}	21.63 ± 0.33^{Ab}
	20+4	20.47 ± 0.27^{Bb}	21.38 ± 0.15^{Bb}	25.44 ± 0.22^{Ba}	19.29 ± 0.25^{Bb}
	20+6	19.13 ± 0.14^{Cb}	20.92 ± 0.17^{Ca}	25.02 ± 0.17^{Ca}	18.87 ± 0.32^{Cb}
	20+8	18.77 ± 0.17^{Db}	20.53 ± 0.17^{Da}	24.65 ± 0.15^{Da}	17.48 ± 0.26^{Db}
	20+10	17.34 ± 0.17^{Eb}	19.16 ± 0.18^{Eb}	23.26 ± 0.19^{Ea}	16.12 ± 0.22^{Eb}
	30+2	19.67 ± 0.14^{Ab}	20.56 ± 0.134^{Ab}	25.78 ± 0.29^{Aa}	18.63 ± 0.14^{Ab}
	30+4	18.47 ± 0.22^{Bb}	19.33 ± 0.30^{Bb}	23.44 ± 0.27^{Ba}	17.11 ± 0.26^{Bb}
	30+6	-	18.92 ± 0.34^{Cb}	22.02 ± 0.27^{Ca}	-
	30+8	-	-	21.65 ± 0.24^{Da}	-
	30+10	-	-	20.26 ± 0.21^{Ea}	-

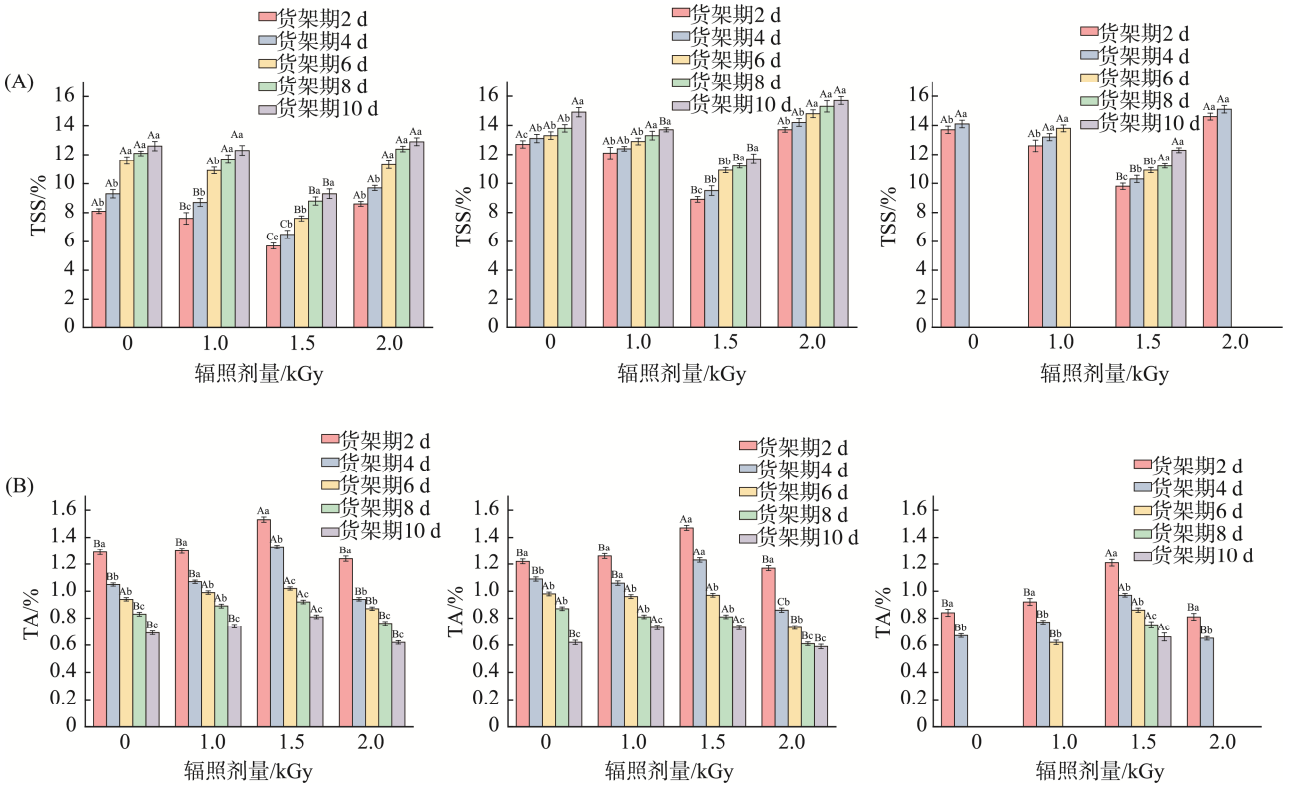
注: 贮藏时间如 10+2 代表冷藏 10 d 货架期 2 d; 显著性标记周期为 10 d 货架期, 如 10+2、10+4、10+6、10+8、10+10; 不同小写字母表示同一贮藏时间不同辐照剂量差异显著(P<0.05); 不同大写字母表示同一辐照剂量不同贮藏时间差异显著(P<0.05); -表示无此项。

2.3 不同辐照剂量对冷藏后货架果实 TSS 和 TA 含量的影响

TSS、TA 是衡量果实风味品质的重要指标，其动态变化能够有效反映产品的风味特征和成熟度[34]。图 3 展示了不同辐照剂量处理对采后软枣猕猴桃果实 TSS 和 TA 的影响。随着冷藏时间的延长，各处理组的 TSS 含量总体上呈现逐渐上升的趋势，TA 含量呈现逐渐下降的趋势。在 0、1.0、1.5、2.0 kGy 4 种辐照剂量处理中，2.0 kGy 组软枣猕猴桃果实的 TSS 上升与 TA 下降最为明显，表明其生理代谢活跃，品质劣变较快。该组果实在冷藏 30 d 后的货架期仅为 4 d，此时 TSS 含量已达 15.1%，TA 降至 0.65%；至冷藏 50 d 时，果实完全丧失商品价值，风味物质代谢趋势与未处理对照组相近，说明高剂量辐照未产生有效的保鲜效应。1.0 kGy 处理组各项指标变化幅度居中，冷藏 30 d 后货架期为 6 d，相应 TSS、TA 分别为 13.8%、0.62%。综合品质维持效果最优的为 1.5 kGy 处理组，其在冷藏 50 d 后仍可保持 8 d 的货架期，最终 TSS 为 13.3%，TA 为 0.82%。TSS 的快速上升主要是由于细胞壁多糖的降解以及淀粉的转化，促使可溶性糖含量增加。这一变化虽提升了果实的甜味，但也往往导致硬度降低和质地软化。与此同时，TA 的下降反映出有机酸在呼吸代谢过程中被大量消耗，造成酸味减弱与风味趋于平淡。1.5 kGy 处理能够有效抑制多糖降解和酸类代谢，延缓后熟软化和风味失衡，维持较完整的原始风味，表明该剂量在处理效应与果实耐贮性之间达到最佳平衡，更适于软枣猕猴桃采后保鲜的实际应用。

2.4 不同辐照剂量对冷藏后货架果实总酚和类黄酮含量的影响

总酚、类黄酮是果蔬中重要的生物活性物质，具有显著的抗氧化、抗炎和抗菌等生理功能，作为果蔬中的重要功能性成分，其含量变化与果实品质和营养价值密切相关[35]。图 4 展示了不同辐照剂量处理对采后软枣猕猴桃果实中总酚、类黄酮的影响。在 0、1.0、1.5、2.0 kGy 4 种辐照剂量处理下，软枣猕猴桃果实的营养物质保存效果与货架期表现出显著差异。2.0 kGy 处理组果实代谢活动最为旺盛，品质劣变迅速，冷藏 30 d 后货架期仅为 4 d，其总酚、类黄酮含量分别为 2.815 μmol/g、0.753 μmol/g；至冷藏 50 d 时，果实已完全丧失商品价值，营养物质降解程度与未处理对照组相近，表明高剂量辐照未能有效抑制营养损耗。1.0 kGy 处理组的表现居于中间，冷藏 30 d 后货架期为 6 d，总酚、类黄酮含量分别为 2.340 μmol/g、0.665 μmol/g。



注：不同大写字母表示同一货架期时间不同辐照剂量差异显著(P<0.05)，不同小写字母表示同一辐照剂量不同货架期时间差异显著(P<0.05)。下同。

图 3 软枣猕猴桃果实的 TSS 和 TA

Fig.3 TSS and TA of *Actinidia arguta* fruits

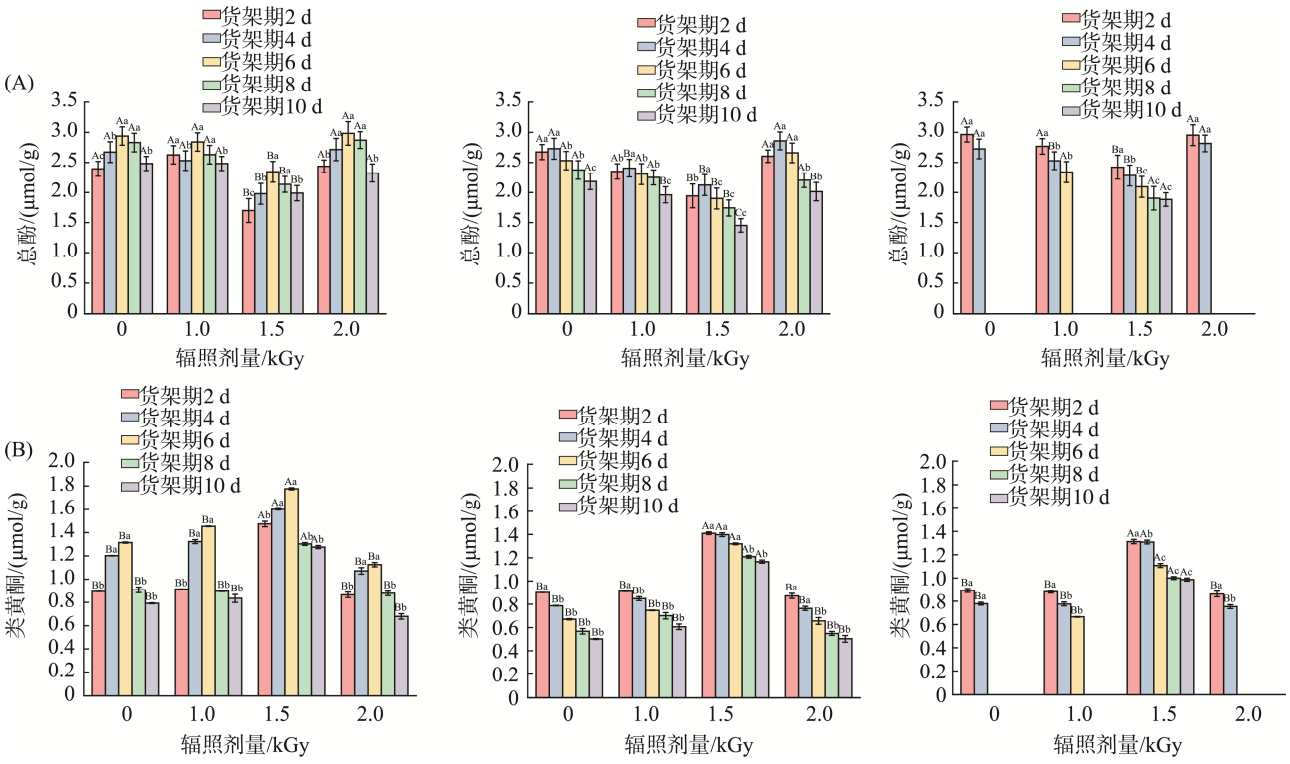


图 4　软枣猕猴桃果实的总酚、类黄酮

Fig.4　Total phenols and flavonoids in *Actinidia arguta* fruits

1.5 kGy 处理组保鲜效果最为显著(P<0.05)，在冷藏 50 d 后仍可维持 8 d 货架期，最终总酚、类黄酮分别为 1.474 μmol/g、0.844 μmol/g。从作用机制来看，总酚和类黄酮含量的下降主要与多酚氧化酶(polyphenol oxidase，PPO)和过氧化物酶(peroxidase，POD)的活性增强有关，这一过程削弱了果实的抗氧化能力；1.5 kGy 处理有效抑制了相关酶活性和氧化反应，延缓了营养物质的降解速率，较好地维持了果实的功能性成分和商品品质。因此，认为 1.5 kGy 处理可以有效维持冷藏后货架期软枣猕猴桃果实中总酚和类黄酮含量，保持良好的果实品质，并延缓抑制软枣猕猴桃中营养成分含量的降解。

3　讨　论

软枣猕猴桃是呼吸跃变型果实，在采后贮藏期间极易发生软化，导致其发生腐烂变质，影响商品价值，而 ^{60}Coγ 辐照技术可以在不破坏果蔬原有的形态外表的基础上，达到延缓其成熟软化的过程，从而使果实保持良好的状态[36]。在硬度保持方面，辐照处理能够减少果胶酶的活性，延缓细胞壁的降解，从而维持果实的质地和口感。本研究中，经 1.5 kGy 辐照处理的果实，在冷藏及后续货架期间软化现象明显减缓，硬度较高，腐烂率较低，表明该剂量对软枣猕猴桃具有较佳的保鲜效果。陶烨等[37]在蓝莓研究中发现，2.5 kGy 辐照可有效抑制微生物增殖，延缓硬度下降。石彬等[38]在研究中发现 2~4 kGy 的辐照处理有助于维持猕猴桃硬度并延缓软化进程，与本研究结论相同。在营养品质及口味方面，1.5 kGy 辐照处理明显延缓了软枣猕猴桃中总酚及黄酮等营养成分的下降，有助于果实保持较高的抗氧化活性。总酚等营养品质的保存，可能与辐照降低 PPO 和 POD 活性，从而抑制酚类物质的氧化分解有关。陈曦等[39]对蓝莓的研究表明，适宜剂量辐照可延缓花青素降解及糖酸比升高，有利于保持贮藏营养品质，辐照处理组果实具有更好的糖酸平衡和风味特性，与 PENG 等[40]采用褪黑素处理结合低温贮藏调控猕猴桃糖代谢的研究结果相似。然而过高剂量的辐照处理可能导致异味生成或氧化加剧，如某些小浆果在高剂量下易发生香气流失或褐变。不同辐照剂量对软枣猕猴桃果实冷藏期间外观品质、硬度、腐烂率、色泽、风味成分及功能性物质含量的影响，结果表明，1.5 kGy 处理在多个品质维度上均表现出最优的保鲜效果。该剂量不仅显著延缓了果实硬度的下降，抑制了腐烂率的增加，还在维持果实外观色泽、减缓 TSS 上升和 TA 下降方面表现突出，同时有效延缓了总酚和类黄酮等活性成分的降解。1.5 kGy 处理可能通过适度调控果实采后代谢，抑制与成熟衰老相关的酶活性(如 PPO 和 POD)，延缓细胞壁降解和有机酸消耗，从而减缓硬度下降和风味失衡。同时，该剂量在抑制微生物侵染的同时，未对果实组织造成显著损伤，有利于维持较高的抗氧化物质含量和感官品质。1.5 kGy 辐照处理通过抑制微生物和调控生理代谢，延缓了硬度的下降和腐烂率的升高，这两者共同保障了果实的外观品质和商品价值；而硬度的维持和微生物活动的

抑制，又进一步减缓了色泽的劣变和风味的失衡，最终共同作用，延缓了总酚和类黄酮等营养成分的降解，从而实现了货架期的整体延长。本研究所用 1.5 kGy 剂量未引起明显不良变化，说明该剂量对软枣猕猴桃兼具保鲜效果与安全性。本研究证实了 1.5 kGy 辐照对软枣猕猴桃采后品质的积极影响，为技术应用提供了理论支持，至于相关机制还有待进一步探索。

4 结 论

本研究采用 1.5 kGy ^{60}Coγ 辐照处理软枣猕猴桃，发现该技术可明显延缓果实在贮藏过程中的品质下降。处理后果实硬度保持更好，腐烂减少，同时有效控制了 TSS 含量上升和 TA 的下降，有利于保持风味平衡。此外，总酚及类黄酮的损失速度放缓，果实抗氧化性能增强，营养价值维持时间更长。在冷藏 50 d 后，1.5 kGy 处理组货架期还可延长 8 d。以上结果说明，1.5 kGy ^{60}Coγ 辐照处理是一种可行的保鲜方法，对软枣猕猴桃采后贮运具有实际应用意义，也为其他果蔬的辐照保鲜研究提供了参考。

参考文献

[1] 黄晓霞, 游云, 刘巧瑜, 等. 不同剂量 ^{60}Co-γ 射线辐照对烟鸡胸肉贮藏过程中滋味的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(7): 56–64.
HUANG XX, YOU Y, LIU QY, *et al*. Effects of different doses of ^{60}Co-γ irradiation on the taste of smoked chicken breast during storage [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(7): 56–64.

[2] 王冠. ^{60}Co-γ 射线辐照对榛子鲜果的保鲜效果研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
WANG G. Study on the fresh-keeping effect of ^{60}Co-γ ray irradiation on fresh hazelnuts [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.

[3] WANG Y, ZHANG Y, MA Y, *et al*. Preparation and application of chitosan/nano-TiO_2/daisy essential oil composite films in the preservation of *Actinidia arguta* [J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102303.

[4] ZHONG Y, CUI Y, YU J, *et al.* Electron-beam generated X-ray irradiation treatment alleviates fruit-body softening of harvested *Hericium erinaceus* by regulating metabolisms of membrane lipid and cell wall [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 220: 113317.

[5] WANG T, DU X, SUI Y, *et al.* Preparation, characterization and evaluation properties of a high-methoxyl pectin-iron (III) from Actinidia arguta fruits [J]. Process Biochemistry, 2025, 156: 339–349.

[6] 张慈, 岳玲, 颜伟强, 等. 高能电子束辐照结合乙烯抑制剂对软枣猕猴桃保鲜效果的研究[J]. 上海农业学报, 2025, 41(1): 96–101.
ZHANG C, YUE L, YAN WQ, *et al*. Study on the fresh-keeping effect of high-energy electron beam irradiation combined with ethylene inhibitors on kiwiberry (*Actinidia arguta*) [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2025, 41(1): 96–101.

[7] TOMASZ K, KAZIMREIZ T, EWA Z. Evaluation of storage quality of hardy kiwifruit (*Actinidia arguta*): Effect of 1-MCP and maturity stage [J]. Agriculture, 2022, 12(12): 2062.

[8] EWA S, EWA Z, TOMASZ K. Storage quality characteristic of two minikiwi fruit [*Actinidia arguta* (Siebold & Zucc.) planch. ex Miq.] cultivars: ‘Ananasnaya’ and ‘Bingo’—a new one selected in Poland [J]. Agronomy, 2021, 11(1): 134.

[9] WANG Y, ZHANG Y, MA Y, *et al.* Application of chitosan/Nano-TiO_2/Daisy essential oil composite film for the preservation of *Actinidia arguta*: Inhibition of spoilage microorganisms and induction of resistance [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 304(P1): 140893.

[10] 左小霞. DREBs 转录因子在高湿贮藏减轻西葫芦采后冷害中的作用机理解析[D]. 南京: 南京农业大学, 2023.
ZUO XX. Analysis of themechanism of DREBs transcription gactors in alleviating postharvest chilling injury of zucchini under high-humidity storage [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2023.

[11] 姜丹, 张博, 李书倩, 等. 采后适当失水处理对软枣猕猴桃 20 ℃下生理生化变化的影响[J]. 果树学报, 2013, 30(2): 299–303.
JIANG D, ZHANG B, LI SQ, *et al.* Effect of appropriate postharvest dehydration treatment on the physiological and biochemical changes of kiwiberry (*Actinidia arguta*) at 20 ℃ [J]. Journal of Fruit Science, 2013, 30(2): 299–303.

[12] 马俊, 吴祖河, 唐劲天. 物理方法处理果蔬技术的应用[J]. 北方园艺, 2013(16): 210–213.
MA J, WU ZH, TANG JT. Application of physical treatment technologies for fruits and vegetables [J]. Northern Horticulture, 2013(16): 210–213.

[13] ZHANG Y, ZHANG W, WU W, *et al.* Critical assessment of the delivery methods of chemical and natural postharvest preservatives for fruits and vegetables: A review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2025, 65(6): 1070–1092.

[14] IBRAHIM K, VOLAKN O, CHUNPENG W. Biochemical composition of propolis and its efficacy in maintaining postharvest storability of fresh fruits and vegetables [J]. Journal of Food Quality, 2020. DOI: 10.1155/2020/8869624

[15] ZDULSKI AJ, RUTKOWSKI PK, KONOPACKA D. Strategies to extend the shelf life of fresh and minimally processed fruit and vegetables with edible coatings and modified atmosphere packaging [J]. Applied Sciences, 2024, 14(23): 11074.

[16] BHAN C, CHAWLA S, BHATI D, *et al.* Effect on shelf life and quality of fruit and vegetables by postharvest treatment with 1-MCP: A review [J]. Journal of Progressive Agriculture, 2018, 9(1): 64–67.

[17] SNEH BP, MONICA T, FATIH O, *et al*. Recent developments in cold plasma-based enzyme activity (browning, cell wall degradation, and antioxidant) in fruits and vegetables [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2022, 21(2): 1958–1978.

[18] 张凤璇. 鲜腐竹的贮藏保鲜技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2024.
ZHANG FX. Study on storage and preservation technology of fresh yuba [D]. Tai’an: Shandong Agricultural University, 2024.

[19] 曾照旭, 朴一龙, 金东淳, 等. 1-甲基环丙烯处理对软枣猕猴桃果实软化的影响[J]. 北方园艺, 2014(1): 123–126.
ZENG ZX, PIAO YL, JIN DC, *et al.* Effect of 1-methylcyclopropene treatment on softening of kiwiberry (*Actinidia arguta*) fruits [J]. Northern Horticulture, 2014(1): 123–126.

[20] YANG H, KIM Y, BAE Y, *et al.* Acclimation and hardness enhancement through ultraviolet-B irradiation of fruit vegetable seedlings grown in a plant factory with artificial light [J]. Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2024, 65(5): 771–783.

[21] 胡丽娜. 采后 UV-C 处理对水果营养品质和抗氧化活性的影响及相关机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
HU LN. Study on the effect of postharvest UV-C treatment on fruit nutritional quality and antioxidant activity and its related mechanisms [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.

[22] 叶力瑕, 牛耀星, 王燕, 等. 低剂量电子束辐照对徐香猕猴桃生理品质与氧化酶的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 355–362.
YE LX, NIU YX, WANG Y, *et al.* Effects of low-dose electron beam irradiation on physiological quality and oxidative enzymes of Xuxiang kiwifruit [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 355–362

[23] RASOULI M, SABA KM. Prolonging shelf-life and preserving quality of strawberry fruit through nano-biodegradable polyethylene films packaging and ultraviolet-C irradiation [J]. Scientia Horticulturae, 2025, 352: 114441.

[24] 宋昕昕. UV-C 辐照-壳聚糖涂膜对哈密瓜贮藏效果的影响[D]. 石河子: 石河子大学, 2023.
SONG XX. Effect of UV-C irradiation-chitosan coating on the storage performance of Hami melons [D]. Shihezi: Shihezi University, 2023.

[25] ZHENG Q, TIAN W, WANG S, *et al.* Electron beam irradiation maintains postharvest quality of *Actinidia arguta* by regulating the cell wall, starch degradation, and antioxidant capacity [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 223: 113442.

[26] 宋梦婷. 不同软枣猕猴桃种质资源营养、风味和贮藏品质的评价[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2022.
SONG MT. Evaluation of nutrition, flavor and storage quality of dfferent germplasm resources of *Actinidia arguta* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2022.

[27] 周丽萍, 王化, 李梦莎, 等. 野生软枣猕猴桃的多酚含量及抗氧化能力研究[J]. 黑龙江科学, 2016, 7(12): 14–15.
ZHOU LP, WANG H, LI MS, *et al.* Study on polyphenol content and antioxidant capacity of wild *Actinidia arguta* [J]. Heilongjiang Science, 2016, 7(12): 14–15.

[28] 周倩. 冷藏蓝莓果蒂凹陷的发生机理及控制技术研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
ZHOU Q. Study on the occurrence mechanism and control technology of calyx depression in refrigerated blueberries [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2014.

[29] REWB H, WAANG J, QIAN G, *et al.* Effects of simulated transport vibration on storage quality and cell wall metabolism of *Actinidia arguta* [J]. Journal of Stored Products Research, 2025, 114: 102738.

[30] WANG T, SUI Y, DU X, *et al*. A comprehensive review of post-harvest ripening, preservation and processing for *Actinidia arguta* (mini kiwi) [J]. Journal of Stored Products Research, 2025, 111: 102582.

[31] MOUHCINE F, SARA L, ABDERRAZAK A, *et al*. Multi-response optimization of extraction yield, total phenols-flavonoids contents, and antioxidant activity of extracts from moroccan *Lavandula stoechas* leaves: Predictive modeling using simplex-centroid design [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2022, 43: 102430.

[32] NASSARAWA SS, RABIU A, RAHMAN UF, *et al.* Glycine betaine: A non-toxic approach to enhancing postharvest quality and physiology of fruits and vegetables [J]. Journal of Stored Products Research, 2025, 114: 102726.

[33] LI NX, HU J, ZHENG J, *et al*. Gas metabolite-based biosensors for detection of ripeness and spoilage of fruits and vegetables [J]. Food Control, 2025, 178: 111506.

[34] 刘泽松, 史君彦, 王清, 等. 辐照技术在果蔬贮藏保鲜中的应用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(4): 236–242.
LIU ZS, SHI JY, WANG Q, *et al.* Research progress on the application of irradiation technology in the storage and preservation of fruits and vegetables [J]. Storage and Process, 2020, 20(4): 236–242.

[35] ZHANG Y, TANG H, LEI D, *et al*. Exogenous melatonin maintains postharvest quality in kiwiberry fruit by regulating sugar metabolism during cold storage [J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 174: 114385.

[36] LI Y, GUO L, WEI J, *et al.* Effect of polyethoxylated flavonoids (PMFs)-loaded citral and chitosan composite coatings on citrus preservation: From the perspective of fruit resistance [J]. Food Chemistry: X, 2024. https://doi.org/10.1016/J.FOCHX.2024.101417

[37] 陶烨, 王琛, 高雅, 等. 不同剂量 ^{60}Coγ 辐照对蓝莓果实贮藏品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(7): 2779–2786.
TAO Y, WANG C, GAO Y, *et al.* Effects of different doses of ^{60}Coγ irradiation on the storage quality of blueberry fruits [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(7): 2779–2786.

[38] 石彬, 李咏富, 何扬波, 等. 几种天然植物复合精油与高能电子辐照对‘红阳’猕猴桃采后保鲜的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(10): 42–47.
SHI B, LI YF, LIN YB, *et al*. Effects of a composite essential oil from several natural plants combined with high-energy electron irradiation on the postharvest preservation of ‘Hongyang’ kiwifruit [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(10): 42–47.

[39] 陈曦, 黄道梅, 林茂, 等. 60Coγ 辐照处理对蓝莓果醋陈化的影响[J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 64–68.
CHEN X, HUANG DM, LIN M, *et al*. Effect of 60Coγ irradiation treatment on aging of blueberry vinegar [J]. China Condiment, 2020, 45(4): 64–68.

[40] PENG J, DU S, FAN R, *et al.* Preharvest melatonin application enhances soft rot resistance in kiwifruit through the jasmonic acid signaling pathway [J]. Postharvest Biology and Technology, 2025, 231: 113880.

(责任编辑: 安香玉　蔡世佳)