

电子束辐照与超高温瞬时杀菌对猕猴桃 NFC 果汁贮藏品质的对比评价

蔚江涛¹, 白俊青¹, 王子明¹, 阙雪雁¹, 李奎¹, 牛伟¹, 孙胜铭², 寇莉萍^{2*}

(1. 杨凌核盛辐照技术有限公司, 陕西杨凌 712100)

(2. 西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 猕猴桃非浓缩还原 (Not From Concentrate, NFC) 果汁营养丰富, 但传统热杀菌易导致其品质劣变。为了对比评价电子束辐照 (Electron Beam Irradiation, EBI) 与超高温瞬时杀菌 (Ultra-High Temperature, UHT) 对猕猴桃 NFC 果汁贮藏品质的影响, 并筛选适宜辐照剂量, 本研究采用 3、5、7 kGy 的电子束辐照以及 UHT (115 °C, 6~10 s) 分别处理果汁, 于 4 °C 下贮藏 28 天, 考察各处理对果汁微生物安全性、感官理化品质、营养品质及香气品质的影响。结果表明, 电子束辐照在 5 kGy 及以上剂量时即可达到与 UHT 同等的商业无菌效果, 且能更好地维持其 pH 值、可溶性固形物含量及色泽稳定性。其中, 5 kGy 电子束辐照对总酚、还原糖及关键香气物质的保留效果最佳, 贮藏结束时 UHT 组总酚降解率达 15.29%, 而 5 kGy 组仅 4.73%; UHT 还会导致果香风味损失, 7 kGy 辐照则会引起一定风味劣变。综上, 5 kGy 的电子束辐照能够在有效杀菌的同时, 最大限度地保持猕猴桃 NFC 果汁的感官营养与风味品质, 是替代传统 UHT 的优选非热加工技术, 为高端果汁非热加工工艺的产业化提供了理论基础。

关键词: 电子束辐照; 猕猴桃; NFC 果汁; 超高温瞬时杀菌; 贮藏品质

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0820

Comparison of Electron Beam Irradiation and Ultra-High Temperature Sterilization on Storage Quality of Kiwifruit NFC Juice

YU Jiangtao¹, BAI Junqing¹, WANG Ziming¹, QUE Xueyan¹, LI Kui¹, NIU Wei¹, SUN Shengming²,
KOU Liping^{2*}

(1. Yangling Hesheng Irradiation Technology Co. Ltd., Yangling 712100, China)

(2. College of Food Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Kiwifruit NFC juice is characterized by high nutritional value; however, quality deterioration is readily induced by conventional thermal sterilization. To compare the effects of EBI and UHT sterilization on the storage quality of kiwifruit NFC juice and to identify the optimal irradiation dose, the juice was treated with EBI at doses of 3, 5, and 7 kGy or with UHT at 115 °C for 6~10 s, and subsequently stored at 4 °C for 28 days. The microbial safety, sensory and physicochemical characteristics, bioactive components, and aroma quality were systematically evaluated. It was shown that commercial sterility equivalent to that achieved by UHT was obtained by EBI at doses of 5 kGy and above, while pH value, total soluble solids content, and color stability were better maintained. Among all treatments, the highest retention of total phenolics, reducing sugars, and key aroma compounds was observed in the 5 kGy EBI group; specifically, the total phenolic content was decreased by 15.29% in the UHT group and by only 4.73% in the 5 kGy group at the end of storage. Severe loss of fruity aroma was caused by UHT, whereas slight flavor deterioration was induced by the 7 kGy treatment. In conclusion, microorganisms are effectively inactivated by EBI at 5 kGy, and the sensory, nutritional, and flavor quality of kiwifruit NFC juice are maximally maintained; therefore, EBI at 5 kGy is regarded as a preferred non-thermal processing alternative to conventional UHT. A theoretical basis for the industrialization of non-thermal processing technologies in high-end fruit juice production is provided by this study.

Key words: electron beam irradiation; kiwifruit; NFC juice; ultra-high temperature sterilization; storage quality

收稿日期: 2026-05-28; 修回日期: 2026-07-21; 接受日期: 2026-07-22

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2024YFD2100602); 陕西省科技厅重点项目-秦创原产业创新聚集区“四链”融合项目 (2025CY-JJQ-76)

作者简介: 蔚江涛 (1989-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向: 辐照技术应用研究, E-mail: yujiangtao@ssnhsit.com

通讯作者: 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

猕猴桃 (*Actinidia chinensis* Planch) 营养丰富, 被喻为“果中之王”, 其中陕西省主栽品种“徐香”深受消费者喜爱^[1]。然而猕猴桃属呼吸跃变型水果, 采后软化快、褐变明显, 货架期短, 因此大力发展深加工尤其是非浓缩还原 (Not From Concentrate, NFC) 果汁是延长产业链的有效途径^[2]。猕猴桃富含多酚、黄酮、维生素等活性物质, 是 NFC 果汁的理想原料, 因其可最大限度保留原料风味、色泽及营养成分, 近年来成为健康饮品的研究热点^[3]。而目前 NFC 果汁的杀菌方式主要分为热杀菌和非热杀菌两大类, 传统 UHT 虽可实现商业无菌, 但会导致热敏性营养成分及天然风味严重劣变, 而低强度巴氏杀菌则难以满足长期贮藏需求^[4]。

近年来, 非热杀菌技术是 NFC 果汁品质保持领域的研究热点。其中超高压处理 (High Pressure Processing, HPP) 商业化应用最为成熟, 其可通过 400~600 MPa 的静水压力实现非热杀菌, 但存在设备投资高、间歇式操作难以连续生产等产业化瓶颈^[5]。相比之下, EBI 作为一种高效冷杀菌技术, 具有杀菌彻底、能耗低、可连续化生产等优点。已有研究表明, 适宜剂量的 EBI 能有效延长 NFC 苹果汁货架期^[6]。此外, EBI 也被成功应用于红枣^[7]、黑果腺肋花楸果^[8]、西兰花^[9]等果汁的杀菌处理, 能有效保持其营养成分和风味品质。目前关于 EBI 对猕猴桃 NFC 果汁贮藏品质的系统研究鲜见报道, 尤其缺乏与传统 UHT 的全面对比以及优选剂量的确定。本研究以“徐香”猕猴桃 NFC 果汁为原料, 设置 3、5、7 kGy 三个辐照剂量, 以 UHT 处理为对照, 系统考察不同处理在 4 ℃贮藏 0~28 d 内对微生物指标、理化性质、营养活性物质及风味品质的影响, 旨在筛选适宜辐照剂量, 评估 EBI 替代 UHT 的可行性, 为猕猴桃 NFC 果汁的非热加工技术创新提供理论依据和技术支撑, 对提升我国猕猴桃深加工附加值、助力乡村振兴、健康中国战略实施具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

“徐香”猕猴桃果实进厂后经浮洗、滚刷清洗, 采用沸水热烫处理 (95~98 ℃, 2~3 min), 再经冷水喷淋迅速冷却至室温, 随后去皮、破碎、榨汁, 再经均质处理, 得到猕猴桃 NFC 果汁原浆。该原浆由陕西千裕酒业有限公司提供。没食子酸、芦丁、Folin-Ciocalteu 试剂等标准品购自北京索莱宝科技有限公司; 氯化钠、柠檬酸铁、磷酸氢二钾、七水硫酸镁、碳酸钠、柠檬酸、磷酸氢二钠、无水乙醇等均为分析纯, 购自西陇科学股份有限公司; 果胶酶购自烟台帝伯仕商贸有限公司。

1.2 仪器与设备

电子束辐照处理在杨凌核盛辐照技术有限公司完成, 使用 DZ-10MeV/20 kW 电子加速器 (中广核达胜加速器技术有限公司)。其他主要仪器如下: TG18K-II 离心机, 长沙东旺试验仪器有限公司; UX8200S/AUY220 分析天平, 日本岛津公司; HH-1 恒温水浴锅, 上海科伟永兴仪器有限公司; TB-211B 摇床, 长沙东旺试验仪器有限公司; PEN3 电子鼻, 德国 Airsense 公司; FlavourSpec[®]气相色谱-离子迁移谱仪 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS; GAS 公司, 德国, 配顶空进样器); UV-3100 紫外可见分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司; PHS-3C pH 计, 上海大普仪器有限公司; CR-400 色差仪, 柯尼卡美能达公司; Spark 多功能酶标仪, 帝肯试验器材有限公司; JP-2 榨汁机, Mr.Orange 公司等。

1.3 样品制备与杀菌处理

取均质后、杀菌前的猕猴桃 NFC 果汁共 30 000 mL, 按以下方式分别处理:

(1) 对照组 (CK): 取 10 000 mL 果汁, 不经任何杀菌处理, 直接分装于 250 mL 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (Polyethylene Terephthalate, PET) 瓶中 (每瓶灌装 200 mL, 瓶身平均壁厚约 0.3~0.5 mm, 瓶体直径约 55 mm), 封盖后于 4 ℃避光贮藏, 作为空白对照。

(2) 辐照处理: 取 20 000 mL 果汁平均分成三组分装于相同规格的 PET 瓶中 (每瓶灌装 200 mL), 封盖后送至杨凌核盛辐照技术有限公司进行电子束辐照处理。使用 DZ-10MeV/20kW 电子加速器, 样品平铺于传送带上单层排列, 液层厚度约 3.5 cm, 采用单面辐照方式。设定辐照剂量分别为 3、5、7 kGy, 实际吸收剂量经重铬酸钾剂量计校准, 实测值分别为 3.25、5.27、7.47 kGy。分别记为 3、5、7 kGy 组。

(3) UHT 处理: 取同一批次果汁 10 000 mL, 经超高温瞬时杀菌 (115 ℃、6~10 s) 后, 在无菌灌装系统中

完成灌装、封盖（使用 250 mL PET 瓶，每瓶灌装 200 mL），记为 UHT 组。该参数由陕西千裕酒业有限公司依据其生产设备特性及产品要求确定，为企业猕猴桃 NFC 果汁生产线使用的成熟工艺参数。

所有样品在封盖前均未进行脱气处理，以模拟大多数非热灌装、无菌果汁生产线中的常规包装状态，瓶内顶空体积约 50 mL，含氧气约 10.5 mL。处理后的样品低温条件下运至实验室冷库，于 4 ℃ 避光贮藏 0、7、14、21、28 d 后取样测定。

1.4 试验方法

1.4.1 微生物指标

按 GB 4789.2-2016 测定菌落总数；按 GB 4789.15-2016 测定霉菌及酵母总数；按 GB 4789.3-2025 测定大肠菌群。

1.4.2 pH 值

使用 PHS-3C pH 计直接测定。

1.4.3 可溶性固形物（Total Soluble Solids, TSS）

采用 PAL-1 手持糖度仪测定，结果以 Brix 表示^[10]。

1.4.4 色泽

参照崔燕等^[11]的方法，取 5 mL 样品于比色管中，用 CR-400 色差仪测定 L^* （明度）、 a^* （红绿值）、 b^* （黄蓝值），并计算样品与 0 d 时对照组样品的色差值。

1.4.5 还原糖

采用 3,5-二硝基水杨酸（3,5-Dinitrosalicylic Acid, DNS）比色法^[12]。取 2 mL 样品加入 1.5 mL DNS 溶液，沸水浴 5 min 后冷却定容至 25 mL，在 540 nm 处测定吸光度，以葡萄糖标准曲线计算含量。结果以葡萄糖质量浓度表示，单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

1.4.6 总酚含量

参照 Huang 等^[13]的方法。取 5.0 mL 样品与 20.0 mL 60% 甲醇混匀，25 ℃ 水浴 40 min，8 000 r min^{-1} 离心 10 min 取上清液。取 2.0 mL 上清液，加入 1.0 mL Folin-Ciocalteu 试剂、4.0 mL 蒸馏水和 3.0 mL 7.5% Na_2CO_3 溶液，避光反应 2 h 后在 760 nm 处测定吸光度，以没食子酸标准曲线计算，结果表示为 $\mu\text{g GAE}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

1.4.7 类黄酮含量

采用芦丁-甲醇法^[14]。取 1.0 mL 上清液，依次加入 0.3 mL 5% NaNO_2 （静置 6 min）、0.3 mL 10% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ （静置 6 min）、4 mL 1 mol/L NaOH，定容至 10 mL 避光反应 15 min，在 510 nm 处测定吸光度，以芦丁标准曲线计算，结果表示为 $\mu\text{g RE}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

1.4.8 感官评价

参照 Zhang 等^[15]的方法，由 10 名食品专业学生（5 男 5 女）组成评价小组，对贮藏 0 d 时的样品外观、气味、口感、整体接受度进行评分，评分标准如下表所示。

表 1 猕猴桃 NFC 果汁人工感官评价表

Table 1 Sensory evaluation form for NFC kiwifruit juice

指标	外观	气味	口感	整体接受度
1~3 分	清晰度、稠度差，絮凝严重	无味或异味明显	没有猕猴桃的味觉特征，过酸或过甜	完全拒绝
4~6 分	清晰度、稠度一般，轻微絮凝	淡淡果香	有猕猴桃的味觉特征，有点过酸或过甜	一般接受
7~9 分	清晰度、稠度良好，不絮凝	浓郁的新鲜猕猴桃香气，无杂味	猕猴桃特有的味觉特点，适当的糖酸比	强烈推荐

1.4.9 电子鼻分析

参照杨春杰等^[16]的方法。取 5 mL 样品于 20 mL 顶空瓶中，40 ℃ 平衡 10 min，用 PEN3 电子鼻测定。传感器阵列含 10 个金属氧化物传感器，清洗时间 300 s，测定时间 60 s，气体流速 350 mL min^{-1} 。每个样品重复测定 3 次，取平均值进行主成分分析（Principal Component Analysis, PCA）。

表 2 电子鼻传感器性能

Table 2 Electronic nose sensor performance

传感器序号	传感器性能	性能特点
S1	W1C	主要检测芳香族化合物
S2	W5S	主要检测氮氧化合物
S3	W3C	主要检测氨气及芳香族化合物
S4	W6S	主要检测氢气
S5	W5C	主要检测烷烃类化合物、芳香族化合物以及弱极性化合物
S6	W1S	对甲烷敏感
S7	W1W	对无机硫化物、含硫有机物以及萜烯类、吡嗪类化合物敏感
S8	W2S	主要检测乙醇以及部分芳香族化合物
S9	W2W	主要检测芳香族化合物以及含硫有机化合物
S10	W3S	对甲烷选择性较强

1.4.10 GC-IMS 分析

参照胡冰倩^[17]的方法。取 1 mL 样品于顶空瓶，60 ℃孵化 15 min，进样针温度 85 ℃，进样量 100 μL。色谱柱为 FS-SE-54 毛细管柱（30 m×0.32 mm，0.25 μm），柱温 40 ℃，载气为高纯 N₂，流速程序：初始 2 mL min⁻¹ 保持 5 min，5 min 内线性增至 10 mL min⁻¹，再在 10 min 内线性增至 100 mL min⁻¹ 并保持 10 min。IMS 条件：漂移管温度 45 ℃，漂移气 N₂，流速 150 mL min⁻¹。通过 GC-IMS Library Search 软件比对 NIST 数据库定性挥发性成分，采用峰面积归一化法计算各挥发性成分的相对含量，结果以质量分数（%）表示。

1.5 数据分析

采用 Excel 整理数据，SPSS 软件进行单因素方差分析（ANOVA），Duncan's 多重比较检验组间差异（*P*<0.05 为显著），Origin 2022 软件绘图。所有实验重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁微生物安全性的影响

根据 GB 7101-2022《食品安全国家标准 饮料》的规定，菌落总数应≤100 CFU/mL（≤2.0 log CFU/mL），霉菌和酵母菌应≤20 CFU/mL（≤1.3 log CFU/mL），大肠菌群不得检出。不同处理组在 4 ℃贮藏 0~28 d 内的微生物指标变化如表 3 所示。对照组在贮藏至 21 d 时，菌落总数已超出国标限值，至 28 d 时霉菌和酵母菌同样超标。说明未处理果汁在 4 ℃条件下仅能保持约 2 周的微生物安全。3 kGy 辐照处理在 28 d 时菌落总数升至 4.08 log CFU/mL，已不符合商业无菌要求；而 5、7 kGy 辐照以及 UHT 处理在整个 28 d 贮藏期内均未检出菌落总数及霉菌酵母菌。所有杀菌处理组在贮藏期内大肠菌群均未检出。

有研究表明，有机猕猴桃汁在 5 ℃贮藏条件下，对照组酵母菌约在 27~32 天内即可达到腐败阈值 6 log CFU/mL^[18]。黄若涵等^[6]对 NFC 苹果汁的研究发现，2 kGy 和 4 kGy 电子束辐照组均具有显著的抑菌效果，完全满足国标要求。吕欣然等^[8]对黑果腺肋花楸果汁的研究同样证实，3~9 kGy 辐照处理均可有效控制微生物。本研究结果表明，5 kGy 是本实验条件下确保猕猴桃 NFC 果汁贮藏期内微生物安全的最低有效剂量。

表 3 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁微生物安全性的影响

Table 3 The impact of different sterilization methods on the microbial safety of kiwi fruit NFC juice

微生物指标	处理组	贮藏时间				
		0 d	7 d	14 d	21 d	28 d
霉菌和酵母菌总数 (log CFU/mL)	CK	ND	ND	ND	2.55±0.35 ^a	3.44±0.20 ^a
	3 kGy	ND	ND	ND	ND	ND
	5 kGy	ND	ND	ND	ND	ND
	7 kGy	ND	ND	ND	ND	ND

	UHT	ND	ND	ND	ND	ND
菌落总数 (log CFU/mL)	CK	ND	ND	ND	3.11±0.01 ^a	3.51±0.13 ^b
	3 kGy	ND	ND	ND	1.91±0.13 ^b	4.08±0.04 ^a
	5 kGy	ND	ND	ND	ND	ND
	7 kGy	ND	ND	ND	ND	ND
	UHT	ND	ND	ND	ND	ND
大肠杆菌 (log MPN mL ⁻¹)	CK	ND	ND	ND	ND	ND
	3 kGy	ND	ND	ND	ND	ND
	5 kGy	ND	ND	ND	ND	ND
	7 kGy	ND	ND	ND	ND	ND
	UHT	ND	ND	ND	ND	ND

注：“ND”表示未检出。同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)，下同。

2.2 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁感官理化品质的影响

2.2.1 色泽

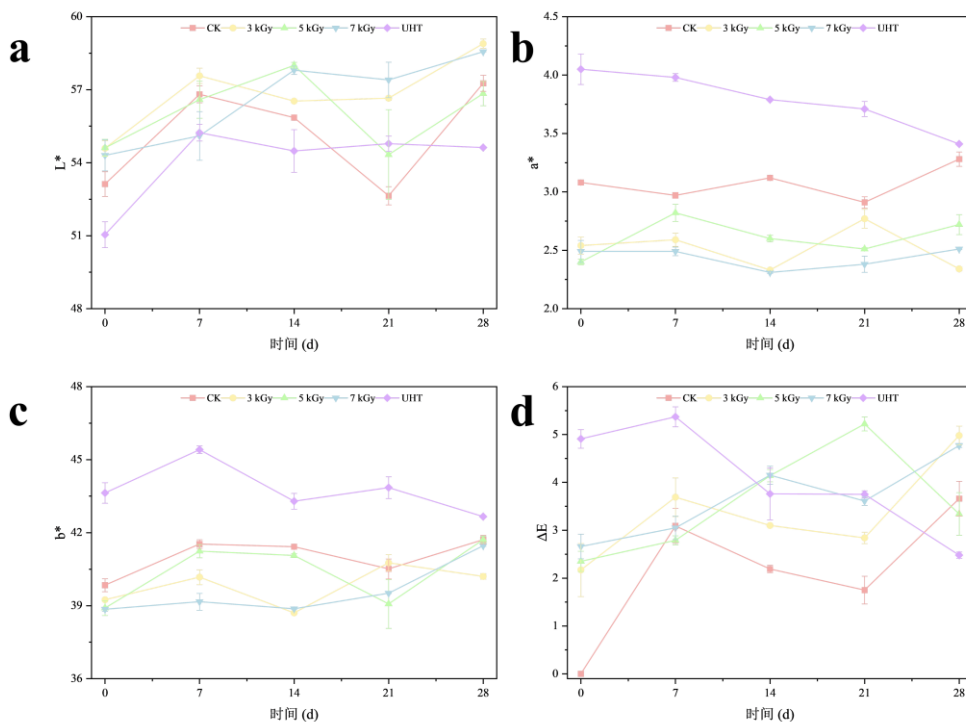


图 1 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁色泽的影响

Fig.1 The influence of different sterilization methods on the color of kiwi NFC juice

注：图 a 为 L^* 值；图 b 为 a^* 值；图 c 为 b^* 值；图 d 为与 0 d 时未处理新鲜果汁的 ΔE 值。

以贮藏 0 d 的新鲜未处理果汁为参比，各处理组在贮藏期间的色泽变化通过 L^* 、 a^* 、 b^* 值及总色差 ΔE 进行评估。如图 1 所示，在 0~28 d 贮藏期内，各处理组 L^* 值均呈上升趋势，可能与贮藏过程中颗粒沉降造成上清液澄清度提升有关；而 UHT 组的 L^* 值在贮藏期间相对较低，至 28 d 贮藏结束时，3、5 及 7 kGy 辐照处理组的 L^* 值分别比 UHT 处理组高出 7.82%、4.06% 和 7.21%。而 UHT 组 a^* 、 b^* 值显著高于各辐照组，但在整个贮藏期中变化幅度较小。通常认为 $\Delta E<3.0$ 时人眼难以分辨色差^[19]，而 UHT 组在 0 d 的 ΔE 值高达 4.91，各辐照处理组 0 d 的 ΔE 值则均在 3.0 以下，表明热处理对色泽的即时破坏远大于辐照处理，叶绿素降解为脱镁叶绿素导致果汁褐变以及美拉德反应生成的类黑精等褐色产物进一步加剧褐变^[15]。贮藏期间对照组及各辐照处理组 ΔE 总体呈现上升趋势，而 UHT 组 ΔE 发生下降，这与其 b^* 值在贮藏后期的回落有关，可能是贮藏期间褐变产物转化消耗所致。何哲等^[20]解析不同杀菌方式对“红阳”猕猴桃果汁品质的影响时发现，辐照会使其发生明显的色泽劣变，然而，本

研究中徐香猕猴桃 NFC 果汁经 EBI 处理后反而在色泽方面优于 UHT 处理。可能是由于红阳为红肉品种,其色素成分以花青素和类胡萝卜素为主,对辐照较为敏感^[21]。而本研究采用的徐香为绿肉品种,以叶绿素为主,对辐照具有更好的耐受性^[22]。这一发现提示,EBI 对果汁色泽的影响具有品种依赖性,在实际应用中需根据品种匹配合适的杀菌工艺。

2.2.2 pH 与 TSS

由图 2 可知,在 0~28 d 贮藏期内,所有处理组果汁 pH 值维持在 3.44~3.48 之间,组间无显著差异。而 UHT 处理组的 TSS 含量显著高于各辐照组及 CK 组,0 d 时 UHT 处理使果汁 TSS 相较于 CK 组提升了 7.02%。而辐照组之间与对照组 TSS 均无显著差异,其中 5 kGy 组波动最小,始终维持在 11.60 °Brix~11.80 °Brix 之间。有研究表明,混合橙汁和胡萝卜汁经过 98 °C/21 s 的热处理后 TSS 增加了 9.5%,可能是高温导致多糖类成分部分热降解生成小分子可溶性糖^[23]。同时,高温处理导致少量水分蒸发,使果汁发生轻微浓缩也是 TSS 上涨的可能原因之一。此外,在非真空包装条件下,瓶内顶空氧气可能引起糖类及酚类物质的氧化,而电子束辐照为非热杀菌,灌装温度低,氧化反应相对较弱,可能是辐照组 TSS 更稳定的原因之一^[24]。叶力瑕等^[25]使用 0.4 kGy 电子束辐照处理“徐香”猕猴桃的研究同样表明,电子束辐照有利于延缓其贮藏期间 TSS 和可滴定酸含量的波动。综上,各处理对 pH 和 TSS 的贮藏稳定性均无明显不良影响,而经辐照处理的 TSS 值更接近新鲜果汁,对果汁 TSS 原始水平的保持效果优于 UHT 处理。

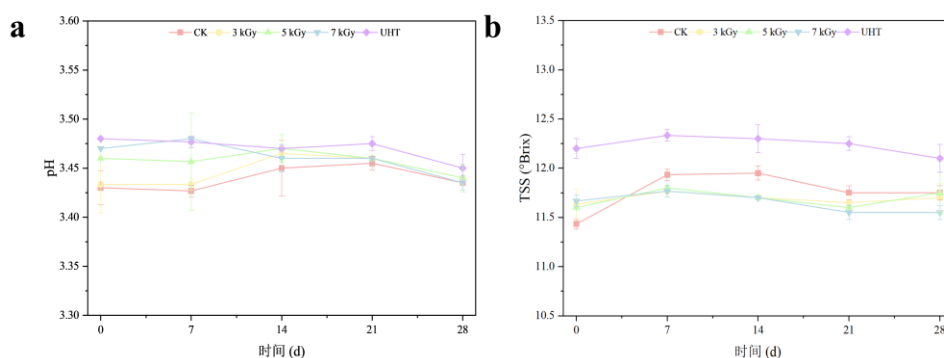


图 2 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁 pH 值与 TSS 的影响

Fig.2 The influence of different sterilization methods on the pH value and TSS of kiwi NFC juice

注: 图 a 为 pH 值; 图 b 为 TSS。

2.2.3 还原糖

由图 3 可知,贮藏期间猕猴桃 NFC 果汁的还原糖含量先升后降,于 21 d 时达到峰值。UHT 组在整个贮藏期内还原糖含量均显著低于辐照组;而在各辐照组中,5 kGy 组在 7~21 d 的还原糖含量显著高于 3 kGy 和 7 kGy 组,21 d 时分别高出 11.07% 和 7.92%。UHT 组还原糖含量较低是多种因素共同作用的结果:高温直接促进美拉德反应消耗还原糖并生成类黑精,同时诱导焦糖化降解和异构化反应^[26]。同时,UHT 处理相较于辐照处理可更彻底地杀灭内源酶,从而减少多糖水解为还原糖。此外,高温灌装后瓶内顶空氧气也可能加速还原糖的氧化反应。相比之下,5 kGy 组还原糖保留较好,可能与适宜剂量的 EBI 可以激活内源酶、促进多糖水解有关,同时 EBI 也避免了高温对糖类的过度破坏^[27]。

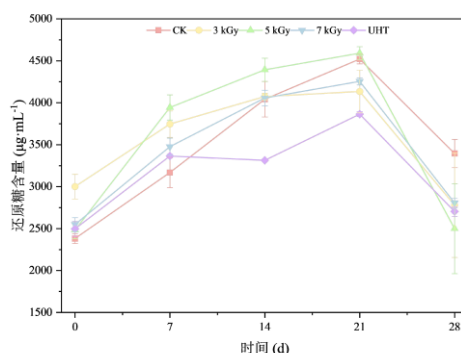


图 3 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁还原糖含量的影响

Fig.3 The influence of different sterilization methods on reducing sugar content of kiwi NFC juice

2.2.4 感官评价

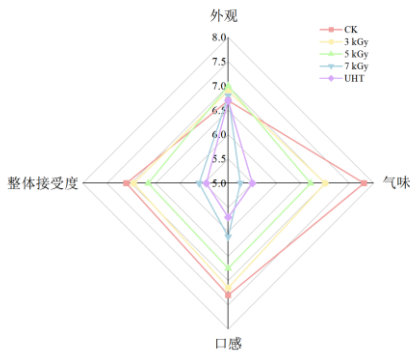


图 4 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁感官评价的影响

Fig.4 The influence of different sterilization methods on sensory evaluation of kiwi NFC juice

图4展示了各处理组猕猴桃 NFC 果汁贮藏 0 d 时的感官评价结果。各组在外观上无显著差异,而 3 kGy 和 5 kGy 组的气味、口感及整体接受度评分均显著高于 UHT 和 7 kGy 组,其中 3 kGy 组各项评分最接近对照组。7 kGy 组气味评分最低,为 5.25 分, UHT 组气味评分为 5.50 分。其中, 7 kGy 组气味评分低可能与高剂量辐照引发异味有关; UHT 组气味评分低则归因于高温灭菌导致香气损失并产生蒸煮味^[28]。而 3 kGy 处理组虽能较大程度保留猕猴桃的天然风味,但其长期贮藏下的微生物安全性无法保障。综合来看, 5 kGy 的 EBI 在维持果汁感官品质方面优于 UHT 及其他剂量。

2.3 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁营养品质的影响

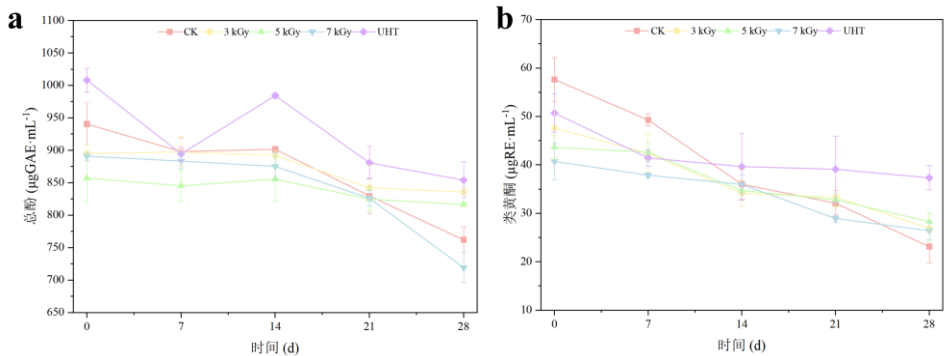


图 5 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁总酚、类黄酮含量的影响

Fig.5 The influence of different sterilization methods on the total phenolic and flavonoid contents of kiwi NFC juice

注：图 a 为总酚含量；图 b 为类黄酮含量。

酚类和类黄酮是果汁中重要的抗氧化活性成分,其含量变化反映了不同杀菌方式对营养品质的保护能力^[20]。如图 5a 所示,所有处理组总酚含量随贮藏时间延长呈下降趋势。其中 UHT 组 0 d 时总酚含量显著高于其他各组,可能是高温处理导致少量水分蒸发使样品轻微浓缩所致,该现象与 UHT 组 TSS 初始值升高的规律一致;但其相较 0 d 时降幅最大,28 d 时达 15.29%;而 3 kGy 和 5 kGy 组总酚含量则显著高于 UHT 和 7 kGy 组,其中 5 kGy 组降解率最低,仅 4.73%。类似地,如图 5b 所示,对照组类黄酮初始含量最高,但降解速度最快,降解率达 59.91%;而各辐照组和 UHT 组均能延缓类黄酮损失,其中 5 kGy 组降解率为 35.16%,UHT 组为 26.37%。这可能是由于适宜剂量的 EBI 可通过避免高温破坏,并部分钝化多酚氧化酶或调控次生代谢途径,有效保护果汁中的热敏性营养成分^[29]。而 UHT 处理虽对类黄酮结构破坏较小,但酚类损失较大。综上所述,5 kGy 的 EBI 对猕猴桃 NFC 果汁总酚和类黄酮的保留效果相对较好。

2.4 不同杀菌方式对猕猴桃 NFC 果汁香气品质的影响

2.4.1 电子鼻分析

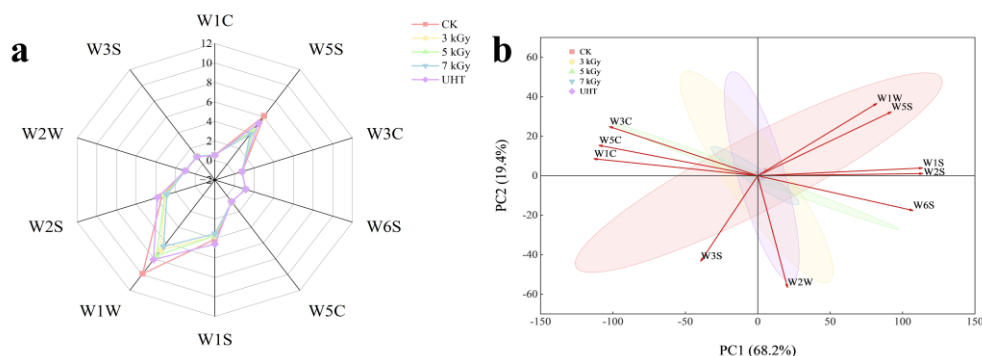


图 6 不同杀菌方式猕猴桃 NFC 果汁电子鼻分析

Fig.6 E-nose analysis of kiwifruit NFC juice under different sterilization methods

注：图 a 为电子鼻雷达图；图 b 为电子鼻 PCA 主成分分析图。

电子鼻雷达图（图 6a）显示，各处理组的猕猴桃 NFC 果汁对 W1W、W5S、W2S、W1S 传感器响应值较高。UHT 组在 W1S 和 W2S 上的响应值远高于各辐照组，表明高温导致烷烃和醇酯类物质过度生成，产生蒸煮异味^[30]。而各辐照组的多边形轮廓则与 CK 组相对吻合，说明辐照处理能够较好地保留猕猴桃汁的原有香气特征。PCA 分析（图 6b）显示，PC1 与 PC2 累计贡献率达 87.6%，模型可有效表征不同处理组猕猴桃汁的气味差异。CK 组风味样本主要分布于 PC1 正半轴，而辐照及 UHT 处理组均向 PC1 负半轴发生偏移，其中 UHT 组的偏移程度较为显著，该变化主要由 W2W 传感器响应主导。W2W 主要检测含硫有机化合物，多见于热加工产生的不良风味^[8]。综上所述，EBI 在维持猕猴桃 NFC 果汁香气特征方面优于 UHT 处理。

2.4.2 GC-IMS 挥发性成分分析

采用 GC-IMS 对不同杀菌处理后的猕猴桃 NFC 果汁挥发性风味成分进行检测，并借助聚类热图、指纹图谱及差异图对数据进行可视化分析。从各处理组的猕猴桃 NFC 果汁中共鉴定出 42 种挥发性物质。聚类热图（图 7a）显示，CK 组与各辐照处理组颜色图谱较为相近，而 UHT 组则差异较大。指纹图谱（图 7b）显示 3 kGy 组风味物质轮廓最接近 CK 组；差异图（图 7c）以 CK 为参比，3 kGy 组白色区域最多，即变化最小；5 kGy 组出现少量红色斑点，表示积极提升；7 kGy 组红蓝区域显著增多；UHT 组则以大面积蓝色为主，表明果香损失，而红色斑点则指示不良风味生成^[31]。

猕猴桃的典型香气主要由酯类、醇类和醛类协同贡献，其中 β -苯乙醇、乙酸己酯、戊酸甲酯等是果香与甜香的关键成分^[32]。表 4 数据显示，5 kGy 组中 β -苯乙醇含量从 CK 组的 0.28% 升至 0.35%，丁酸异丙酯由 0.05% 升至 0.09%，且戊酸甲酯、庚酸甲酯等酯类均保持在较高水平；7 kGy 组中四氢呋喃含量达 0.90%，显著高于 5 kGy 组和 3 kGy 组，而该物质是辐照异味的关键标志物^[33]。UHT 组中 2-呋喃甲醛含量高达 1.04%，达 CK 组的 1.89 倍，2-戊醇含量也为各处理组最高，这两者是蒸煮异味的主要成分^[34]；同时戊酸甲酯、3-甲基丁基乙酸酯等特征果香酯类损失严重^[4]。

上述结果表明，EBI 能够有效保留猕猴桃汁的原有香气特征^[20]；5 kGy 的 EBI 不仅能保留原有风味，还能提升部分有益香气物质，可能与适宜剂量的刺激效应促进结合态香气前体释放有关^[35]。UHT 组蒸煮味产物源于美拉德反应和热裂解，而 7 kGy 组的不良风味则可能来自高剂量辐照引发的自由基链式反应^[36]。综上所述，5 kGy 的 EBI 处理后果汁的风味组成最接近新鲜果汁且部分关键香气物质得到提升，而 7 kGy 和 UHT 处理则可能分别以自由基氧化和热反应途径导致不可逆的风味劣变。

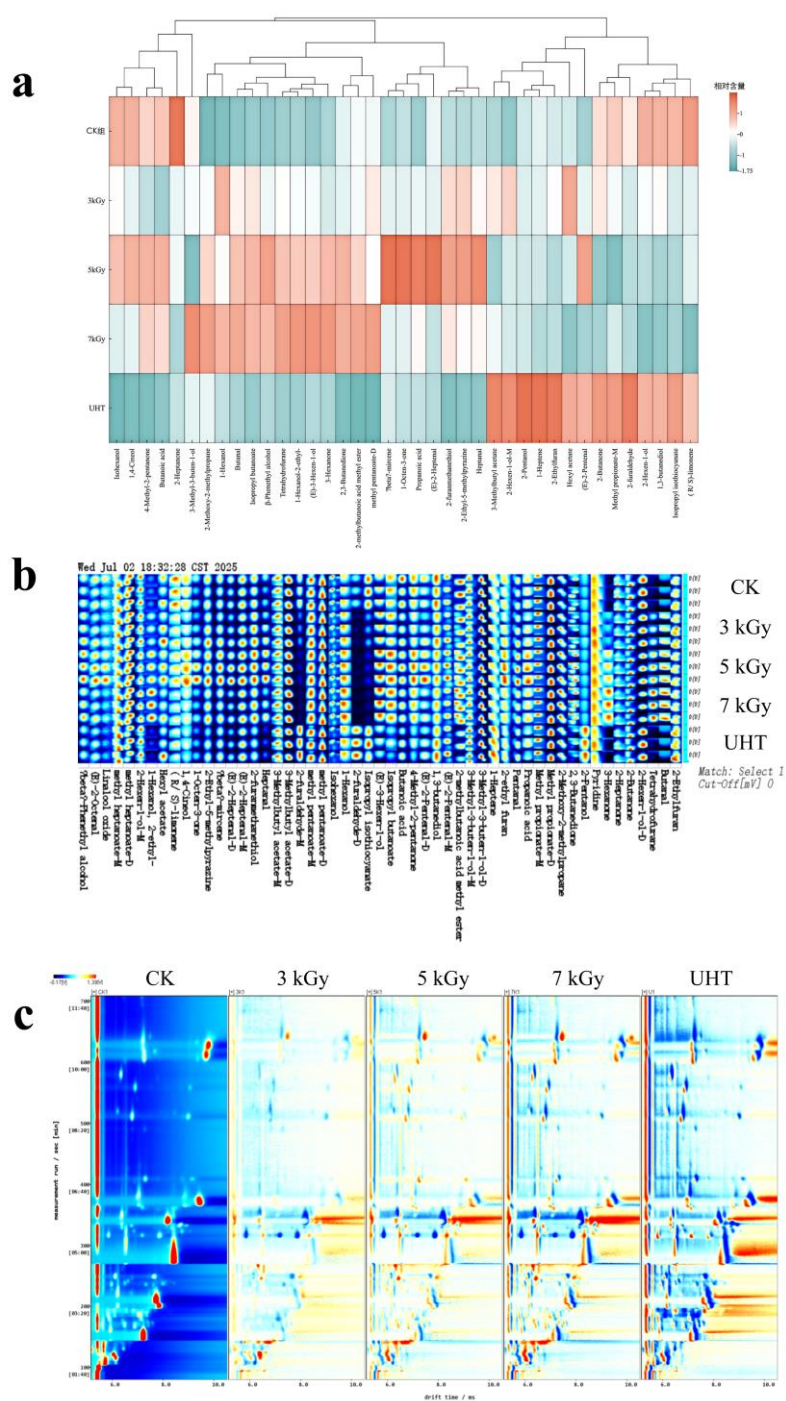


图 7 不同杀菌方式猕猴桃 NFC 果汁 GC-IMS 挥发性成分分析

Fig.7 GC-IMS analysis of volatile components in kiwifruit NFC juice under different sterilization methods

注: 图 a 为香气成分聚类热图; 图 b 为香气成分指纹图谱; 图 c 为香气成分差异图。

表 4 各处理组猕猴桃 NFC 果汁中挥发性香气成分相对含量

Table 4 Relative content of volatile aroma components in NFC fruit juice of kiwifruit in each treatment group

类别	保留时间/s	分子式	物质名称	CAS 号	相对含量/%				
					CK 组	3 kGy	5 kGy	7 kGy	UHT
醇类 (10 种)	118.82	C ₆ H ₁₂ O	2-己烯-1-醇	928-95-0	4.75±0.13 ^a	3.92±0.07 ^b	3.29±0.07 ^c	2.79±0.10 ^d	4.73±0.03 ^a
	192.98	C ₅ H ₁₂ O	2-戊醇	6032-29-7	0.14±0.01 ^b	0.15±0.01 ^b	0.14±0.00 ^b	0.14±0.01 ^b	0.32±0.03 ^a
	267.30	C ₅ H ₁₀ O	3-甲基-3-丁烯-1-醇	763-32-6	14.88±0.15 ^a	14.84±0.24 ^a	14.67±0.49 ^a	15.03±0.10 ^a	14.81±0.42 ^a
	294.58	C ₆ H ₁₂ O	反式-3-己烯-1-醇	928-97-2	0.13±0.01 ^d	0.16±0.00 ^c	0.18±0.01 ^b	0.20±0.00 ^a	0.14±0.00 ^d
	322.50	C ₄ H ₁₀ O ₂	1,3-丁二醇	107-88-0	0.44±0.03 ^a	0.41±0.01 ^a	0.37±0.00 ^b	0.36±0.02 ^b	0.44±0.03 ^a
	331.83	C ₆ H ₁₄ O	1-己醇	111-27-3	0.13±0.01 ^c	0.16±0.00 ^a	0.15±0.01 ^{ab}	0.16±0.01 ^a	0.14±0.01 ^{bc}
	343.18	C ₆ H ₁₂ O	2-己烯-1-醇-M	928-95-0	1.66±0.06 ^b	1.88±0.01 ^a	1.75±0.03 ^b	1.75±0.02 ^b	1.99±0.12 ^a
	360.96	C ₆ H ₁₄ O	异己醇	626-89-1	2.65±0.06 ^a	2.53±0.05 ^{bc}	2.62±0.03 ^{ab}	2.46±0.04 ^c	2.28±0.07 ^d
	621.37	C ₈ H ₁₀ O	β -苯乙醇	60-12-8	0.28±0.01 ^a	0.31±0.13 ^a	0.35±0.13 ^a	0.34±0.02 ^a	0.29±0.01 ^a
	638.81	C ₈ H ₁₈ O	2-乙基-1-己醇	104-76-7	0.27±0.01 ^d	0.41±0.03 ^c	0.51±0.01 ^b	0.61±0.03 ^a	0.26±0.01 ^d
醛类 (6 种)	121.72	C ₄ H ₈ O	正丁醛	123-72-8	0.12±0.00 ^e	0.21±0.01 ^c	0.24±0.01 ^b	0.26±0.00 ^a	0.14±0.00 ^d
	316.91	C ₅ H ₈ O	反式-2-戊烯醛	1576-87-0	0.51±0.04 ^a	0.54±0.06 ^a	0.60±0.02 ^a	0.51±0.01 ^a	0.59±0.07 ^a
	374.30	C ₅ H ₄ O ₂	2-呋喃甲醛	98-01-1	0.55±0.03 ^b	0.24±0.02 ^c	0.13±0.01 ^d	0.10±0.00 ^d	1.04±0.12 ^a
	524.02	C ₇ H ₁₄ O	庚醛	111-71-7	0.12±0.02 ^{bc}	0.17±0.03 ^b	0.24±0.03 ^a	0.17±0.04 ^b	0.09±0.01 ^c
	557.38	C ₇ H ₁₂ O	反式-2-庚烯醛	18829-55-5	1.45±0.11 ^b	1.44±0.17 ^b	1.76±0.14 ^a	1.39±0.09 ^b	1.36±0.13 ^b
酯类 (7 种)	621.51	C ₈ H ₁₄ O	反式-2-辛烯醛	2548-87-0	0.30±0.02 ^b	0.30±0.03 ^b	0.36±0.02 ^a	0.32±0.02 ^{ab}	0.30±0.02 ^b
	211.05	C ₄ H ₈ O ₂	丙酸甲酯	554-12-1	11.03±0.12 ^{ab}	10.82±0.23 ^{ab}	10.43±0.75 ^b	10.71±0.06 ^{ab}	11.23±0.29 ^a
	249.09	C ₆ H ₁₂ O ₂	2-甲基丁酸甲酯	868-57-5	0.25±0.02 ^b	0.25±0.03 ^b	0.28±0.02 ^{ab}	0.31±0.01 ^a	0.17±0.01 ^c
	340.07	C ₇ H ₁₄ O ₂	丁酸异丙酯	638-11-9	0.05±0.00 ^c	0.08±0.00 ^b	0.09±0.01 ^a	0.09±0.00 ^a	0.05±0.00 ^c
	373.83	C ₆ H ₁₂ O ₂	戊酸甲酯	624-24-8	19.28±0.24 ^{ab}	19.44±0.38 ^a	19.37±0.21 ^a	19.76±0.11 ^a	18.73±0.50 ^b
	407.85	C ₇ H ₁₄ O ₂	3-甲基丁基乙酸酯	123-92-2	8.23±0.18 ^a	8.19±0.23 ^a	8.17±0.08 ^a	8.33±0.14 ^a	7.75±0.32 ^b
	621.37	C ₈ H ₁₆ O ₂	庚酸甲酯	106-73-0	9.79±0.24 ^a	9.59±0.17 ^a	9.86±0.05 ^a	9.92±0.09 ^a	9.23±0.78 ^a
萜烯及其氧化物	343.18	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	芳樟醇氧化物	60047-17-8	0.04±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a	0.04±0.01 ^a	0.04±0.00 ^a	0.04±0.01 ^a

(4 种)	581.73	C ₁₀ H ₁₆	β -月桂烯	123-35-3	0.57±0.05 ^b	0.61±0.06 ^b	0.76±0.06 ^a	0.61±0.03 ^b	0.60±0.05 ^b
	614.85	C ₁₀ H ₁₆	柠檬烯外消旋体	138-86-3	0.19±0.01 ^a	0.16±0.01 ^b	0.16±0.01 ^b	0.14±0.01 ^b	0.18±0.01 ^a
	630.85	C ₁₀ H ₁₈ O	1,4-桉叶素	470-67-7	0.11±0.00 ^a	0.10±0.01 ^{ab}	0.11±0.01 ^a	0.10±0.00 ^{ab}	0.09±0.00 ^b
酮类 (6 种)	135.03	C ₄ H ₈ O	2-丁酮	78-93-3	9.84±0.15 ^b	9.79±0.16 ^b	9.08±0.02 ^c	9.18±0.07 ^c	10.23±0.32 ^a
	155.19	C ₆ H ₁₂ O	3-己酮	589-38-8	0.04±0.00 ^d	0.05±0.01 ^c	0.08±0.00 ^b	0.09±0.00 ^a	0.04±0.00 ^d
	155.98	C ₇ H ₁₄ O	2-庚酮	110-43-0	1.74±0.06 ^a	1.50±0.03 ^b	1.51±0.02 ^b	1.42±0.04 ^b	1.45±0.12 ^b
	186.41	C ₄ H ₆ O ₂	2,3-丁二酮	431-03-8	0.96±0.14 ^{ab}	0.96±0.13 ^{ab}	1.15±0.15 ^a	1.16±0.13 ^a	0.78±0.08 ^b
	314.98	C ₆ H ₁₂ O	4-甲基-2-戊酮	108-10-1	0.19±0.01 ^a	0.16±0.01 ^b	0.20±0.00 ^a	0.19±0.00 ^a	0.14±0.02 ^b
	606.08	C ₈ H ₁₄ O	1-辛烯-3-酮	4312-99-6	0.09±0.01 ^b	0.10±0.02 ^b	0.16±0.03 ^a	0.10±0.01 ^b	0.09±0.01 ^b
呋喃类化合物 (3 种)	140.69	C ₄ H ₈ O	四氢呋喃	109-99-9	0.23±0.01 ^d	0.58±0.01 ^c	0.77±0.03 ^b	0.90±0.01 ^a	0.23±0.01 ^d
	144.49	C ₆ H ₈ O	2-乙基呋喃	3208-16-0	0.76±0.07 ^b	0.83±0.05 ^b	0.72±0.02 ^b	0.73±0.01 ^b	1.04±0.09 ^a
	511.43	C ₅ H ₆ OS	2-呋喃甲硫醇	98-02-2	0.46±0.03 ^b	0.56±0.05 ^a	0.62±0.02 ^a	0.55±0.05 ^a	0.40±0.04 ^b
有机酸类 (2 种)	215.65	C ₃ H ₆ O ₂	丙酸	79-09-4	0.35±0.02 ^c	0.39±0.04 ^{bc}	0.48±0.02 ^a	0.41±0.02 ^b	0.37±0.02 ^{bc}
	329.01	C ₄ H ₈ O ₂	丁酸	107-92-6	0.62±0.07 ^a	0.55±0.03 ^a	0.63±0.03 ^a	0.61±0.01 ^a	0.54±0.06 ^a
含氮/含硫杂环及异硫氰酸酯 (2 种)	305.29	C ₄ H ₇ NS	异硫氰酸异丙酯	2253-73-8	0.51±0.01 ^b	0.22±0.02 ^c	0.13±0.01 ^d	0.10±0.00 ^d	0.58±0.03 ^a
	558.33	C ₇ H ₁₀ N ₂	2-乙基-5-甲基吡嗪	13360-64-0	0.65±0.08 ^b	0.78±0.11 ^{ab}	0.85±0.07 ^a	0.74±0.06 ^{ab}	0.60±0.09 ^c
烯烃类 (1 种)	236.74	C ₇ H ₁₄	1-庚烯	592-76-7	0.42±0.01 ^b	0.42±0.01 ^b	0.41±0.00 ^b	0.40±0.01 ^b	0.51±0.04 ^a
醚类 (1 种)	192.98	C ₅ H ₁₂ O	2-甲氧基-2-甲基丙烷	1634-04-4	4.28±0.17 ^d	5.12±0.30 ^c	5.43±0.08 ^b	5.82±0.04 ^a	5.01±0.10 ^c

3 结论

本研究比较了 3、5、7 kGy 的 EBI 与 UHT 处理对猕猴桃 NFC 果汁在 4 °C 贮藏 28 d 内品质的影响。在微生物安全性方面, 3 kGy 的 EBI 处理适用于 0~21 d 的短期贮藏, 而 28 d 时菌落总数超标; 5 kGy 及以上剂量的 EBI 与 UHT 处理在贮藏期内均能达到商业无菌效果; 在感官理化品质方面, 5 kGy 的 EBI 处理能更好地维持果汁的 pH 值、色泽和还原糖含量, 而 UHT 处理则导致褐变及还原糖损失; 在营养品质方面, 5 kGy 辐照可有效延缓总酚和类黄酮的降解, 其保留效果优于 UHT 及 7 kGy 处理; 在香气品质方面, 5 kGy 组的风味轮廓最接近新鲜果汁, 关键香气物质得到良好保留, 感官评分显著高于 UHT 组; 而 7 kGy 处理和 UHT 处理则引发部分风味劣变。综上所述, 5 kGy 的 EBI 能够在确保杀菌效果的同时, 最大程度维持猕猴桃 NFC 果汁的感官理化、营养及香气品质, 是替代传统 UHT 的优选非热加工工艺。

参考文献

- [1] 徐光焕,陈元磊,王南南.陕西省周至县‘翠香’猕猴桃叶片营养诊断研究[J].陕西农业科学,2021,67(2):23-29.
- [2] SUN W, CHEN X, FENG S, et al. Effect of sequential fermentation with indigenous non-*Saccharomyces cerevisiae* combinations and *Saccharomyces cerevisiae* on the chemical composition and aroma compounds evolution of kiwifruit wine [J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140758.
- [3] TEIXEIRA J C, RIBEIRO C, SIMÕES R, et al. Characterization of the effect of a novel production technique for ‘not from concentrate’ pear and apple juices on the composition of phenolic compounds [J]. Plants, 2023, 12(19): 3397.
- [4] WIBOWO S, ESSEL E A, DE MAN S, et al. Comparing the impact of high pressure, pulsed electric field and thermal pasteurization on quality attributes of cloudy apple juice using targeted and untargeted analyses [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2019, 54: 64-77.
- [5] RAVICHANDRAN C, JAYACHANDRAN L E, KOTHAKOTA A, et al. Influence of high pressure pasteurization on nutritional, functional and rheological characteristics of fruit and vegetable juices and purees-an updated review [J]. Food Control, 2023, 146: 109516.
- [6] 黄若涵,张天天,刘芳,等.高浓度 CO₂ 胁迫预处理与电子束辐照对 NFC 苹果汁品质的影响[J].食品工业科技,2024,45(9):325-332.
- [7] CHEN M, WANG Z, YU J, et al. Effects of electron beam irradiation and ultrahigh-pressure treatments on the physicochemical properties, active components, and flavor volatiles of jujube jam [J]. LWT, 2023, 187: 115292.
- [8] 吕欣然,王淑娟,张丹,等.不同剂量电子束辐照杀菌处理对黑果腺肋花楸果汁品质的影响[J].食品科学,2025,46(5):272-280.
- [9] YAN J, LI Y, HE H, et al. Effects of electron beam irradiation on the sensory qualities and bioactive compounds of broccoli sprout juice [J]. Food Research International, 2025, 199: 115365.
- [10] HAFIZ A F A, KEAT Y W, ALI A. Effect of integration of oxalic acid and hot water treatments on postharvest quality of rambutan (*Nephelium lappaceum* L. cv. Anak Sekolah) under modified atmosphere packaging [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(7): 2181-2185.
- [11] 崔燕,宣晓婷,朱宏芬,等.不同品种蓝莓制汁特性评价[J].食品工业科技,2024,45(15):304-312.
- [12] 张小希,李根,孔天宇,等.不同贮藏条件对浓缩桃汁非酶褐变的动态变化分析[J].现代食品科技,2026,42(7):122-131.
- [13] HUANG D, REN X, ZHONG Y, et al. Effect of multi-step chaptalisation on physicochemical properties, potentially harmful alcohols, nutritional composition and volatile profiles of kiwi wine [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2023, 58(7): 3715-3726.
- [14] 余菲,赵晓燕,周昌艳,等.不同品种生菜的多酚、黄酮差异比较与抗氧化活性[J].食品科学,2024,45(13):17-25.
- [15] ZHANG M, WANG H, BAO S, et al. Using multi-criteria decision-making method to select the optimal color fixative for cloudy kiwi juice during thermal sterilization processing [J]. LWT, 2023, 187: 115266.
- [16] 杨春杰,丁武,马利杰.电子鼻技术在区分酸羊奶发酵菌种中的应用[J].食品科学,2014,35(18):267-271.
- [17] 胡冰倩.软枣猕猴桃甘蔗渣酒加工工艺研究及其成分分析[D].天津:天津农学院,2025.
- [18] PATRIGNANI F, MANNOZZI C, TAPPI S, et al. (Ultra) high pressure homogenization potential on the shelf-life and functionality of kiwifruit juice [J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 246.

- [19] 孙秀如,林志定,张家英,等.中国人眼对表色色差辨别的实验研究[J].心理学报,1996,1:9-15.
- [20] 何哲,李可,潘翠萍,等.基于 OPLS-DA 解析不同杀菌方式对‘红阳’猕猴桃果汁品质的影响[J].食品工业科技,2026,47(7):61-71.
- [21] LIU Y, ZHOU B, QI Y, et al. Electron-beam irradiation delayed the postharvest senescence of kiwifruit during cold storage through regulating the reactive oxygen species metabolism [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8:1507.
- [22] LI R, YANG S, WANG D, et al. Electron-beam irradiation delayed the postharvest senescence of kiwifruit during cold storage through regulating the reactive oxygen species metabolism [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, 189: 109717.
- [23] POLAK N, KALISZ S, KRUSZEWSKI B. High-temperature short-time and ultra-high-temperature processing of juices, nectars and beverages: influences on enzyme, microbial inactivation and retention of bioactive compounds [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(19): 8978.
- [24] BALTA M, KIRIT B D, AĞÇAM E, et al. Determination of the effect of different atmospheric conditions on bioactive components of various citrus juices [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2023, 115: 105006.
- [25] 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.
- [26] SCHMIDT H D O, ROCKETT F C, SARTORI G V, et al. Influence of processing conditions on the composition of feijoa (*Acca sellowiana*) juices during storage [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 114: 104769.
- [27] 陈美玲,简磊,原秋艳,等.电子束辐照和超高压处理对红枣浓浆风味的影响[J].食品科学,2024,45(6):175-182.
- [28] 齐宁利,张诚涵,龚霄,等.超高温瞬时和超高压杀菌对诺丽发酵果汁风味物质的影响 [J].保鲜与加工,2025,25(6):128-137.
- [29] ARJEH E, BARZEGAR M, ALI SAHARI M. Effects of gamma irradiation on physicochemical properties, antioxidant and microbial activities of sour cherry juice [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2015, 114: 18-24.
- [30] 彭旭怡,郑经绍,刘宇航,等.基于电子鼻、顶空气相色谱-离子迁移谱分析比较不同杀菌处理紫米甜酒酿中的挥发性成分[J].现代食品科技,2021,37(7):259-268.
- [31] YUAN N, CHI X, YE Q, et al. Analysis of volatile organic compounds in milk during heat treatment based on E-Nose, E-Tongue and HS-SPME-GC-MS [J]. *Foods*, 2023, 12(5): 1071.
- [32] ZHAO Y, ZHAN P, TIAN H-L, et al. Insights into the aroma profile in three kiwifruit varieties by HS-SPME-GC-MS and GC-IMS coupled with DSA [J]. *Food Analytical Methods*, 2021, 14(5): 1033-1042.
- [33] SHI Z, LI Q, XIA C, et al. Elucidating the impact of gamma irradiation treatment prior to aging on light-flavor tartary buckwheat baijiu flavor profiles: a multimodal analysis combining E-Nose, E-Tongue and HS-GC-IMS [J]. *Foods*, 2026, 15(8): 1441.
- [34] GAO Q, WANG Y, LI Y, et al. Investigation of the formation of furfural compounds in apple products treated with pasteurization and high pressure processing [J]. *Food Research International*, 2024, 190: 114546.
- [35] SCHMIDT S, YANG N, GRÖGER H, et al. Treatment of fruit juices with β -glucosidase for release of aroma precursors [J]. *Food Chemistry*, 2025, 491: 145212.
- [36] FAN X. Formation of furan from carbohydrates and ascorbic acid following exposure to ionizing radiation and thermal processing [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(20): 7826-7831.