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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020122

HE Zhe, LI Ke, PAN Cuiping, et al. Revealing the Effect of Different Sterilization Methods on the Quality of 'Hong yang' Kiwifruit Juice Based on OPLS-DA[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 61−71. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020122

·研究与探讨·

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

何　哲[1], 李　可[2], 潘翠萍[2], 袁怀瑜[2], 杨雨函[2], 李克韩[1], 杨　飞[3], 刘　莹[2], 王艺月[2], 李华佳[2], 马沁沁[1,*]

（1.四川师范大学生命科学学院, 四川成都 610101;
2.四川省农业科学院农产品加工研究所（四川省农业科学院食物与营养健康研究所）, 四川成都 610000;
3.沃丰生态农业有限责任公司, 四川雅安 625400）

摘　要: 为了解不同杀菌方式对猕猴桃果汁品质的影响。本文以‘红阳’猕猴桃为原料，采用显著性分析和 OPLS-DA 分析比较了不同杀菌方式处理对猕猴桃果汁常规理化、色泽、多酚、黄酮、V_C 及抗氧化活性等品质影响。结果表明：热杀菌、超高压灭菌（High hydrostatic pressure，HHP）与辐照杀菌（Food irradiation，FI）对猕猴桃果汁品质影响差异显著；其中，超高压灭菌猕猴桃果汁的灭菌效果最佳，对保持色泽稳定和 V_C 含量，提高功能活性成分及抗氧化活性方面均有积极影响。三种热杀菌方式对猕猴桃果汁的乳酸含量、柠檬酸含量、V_C 含量等影响具有显著性差异，对苹果酸影响没有显著差异，通过热杀菌处理可提高蔗糖、总多酚、总黄酮含量，HTST 组降低了果糖含量。辐照杀菌对果汁品质影响最大，辐照杀菌导致猕猴桃果汁发生明显的色泽劣变和主要活性成分 V_C 的损失。该研究为科学选择猕猴桃果汁灭菌工艺提供了理论依据。

关键词: ‘红阳’猕猴桃, 果汁, 杀菌方式, 品质, OPLS-DA
中图分类号: TS255　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0061−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020122　　本文网刊:

Revealing the Effect of Different Sterilization Methods on the Quality of 'Hong yang' Kiwifruit Juice Based on OPLS-DA

HE Zhe[1], LI Ke[2], PAN Cuiping[2], YUAN Huaiyu[2], YANG Yuhan[2], LI Kehan[1], YANG Fei[3], LIU Ying[2], WANG Yiyue[2], LI Huajia[2], MA Qinqin[1,*]

（1.College of Life Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China;
2.Institute of Agricultural Products Processing, Sichuan Academy of Agricultural Sciences (Institute of Food, Nutrition and Health, Sichuan Academy of Agricultural Sciences), Chengdu 610000, China;
3.Wofeng Ecological Agriculture Co., Ltd., Ya'an 625400, China）

Abstract: To investigate the effects of different sterilization methods on the quality of kiwifruit juice. In this study, 'Hong yang' kiwifruit was used as raw material, and significance analysis and orthogonal projections to latent structures discriminant analysis (OPLS-DA) were used to evaluate the impacts of various sterilization treatments on several quality attributes of kiwifruit juice, including conventional physicochemical properties, color, polyphenols, flavonoids, vitamin C (V_C) content, and antioxidant activity. The results showed that thermal sterilization, high hydrostatic pressure (HHP)

收稿日期: 2025−02−17
基金项目: 四川省农业科学院“1+9 揭榜挂帅”项目（1+9KJGG007）; 成都市重点研发支撑计划项目（2025-YF05-00606-SN）; 新疆农业科学院农业科技创新稳定支持专项（xjnkywdzc-2024002-06）; 四川省十四五育种攻关（2021YFYZ0023-14）。
作者简介: 何哲（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: 2283404089@qq.com。
*** 通信作者:** 马沁沁（1978−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 资源微生物学, E-mail: qqma@sicnu.edu.cn。

sterilization and food irradiation (FI) exhibited significantly different effects on the quality of kiwifruit juice. Among them, HHP sterilization achieved the optimal sterilization effect, which exerted positive effects on maintaining color stability and V_C content, improving the contents of functional active components and the antioxidant activity of kiwifruit juice. The three thermal sterilization methods had significant differences in their impacts on lactic acid content, citric acid content and V_C content of kiwifruit juice, while no significant difference was found in the influence on malic acid content. Thermal sterilization treatments could increase the contents of sucrose, total polyphenols and total flavonoids in kiwifruit juice, whereas the high-temperature short-time (HTST) sterilization group showed a decrease in fructose content. Food irradiation had the most significant impact on juice quality, which caused obvious color deterioration and a significant loss of V_C, the main active component, in kiwifruit juice. This study provides a theoretical basis for the scientific selection of sterilization technologies for kiwifruit juice production.

Key words: 'Hong yang' kiwifruit; fruit juice; sterilization method; quality; OPLS-DA

猕猴桃属于猕猴桃科、猕猴桃属多年生落叶藤本植物，果肉细腻多汁，酸甜可口，且含有丰富的矿物质、维生素等营养物质以及 V_C、多酚、花青素、多糖等功能活性成分[1−3]，具有促进消化、增强免疫力和提高代谢等多种生理功能[2,4−7]。我国是猕猴桃原产国，栽培面积和产量均居世界第一。近年来，随着栽培和管理技术的改进，我国猕猴桃产量得到较大提升，2022 年总产量高达 238 万吨。猕猴桃产业的发展也带动了精深加工产业的发展，精深加工水平还需进一步提升[8−9]。其中，猕猴桃果汁由于其加工便捷、口感好、营养丰富，成为猕猴桃精深加工的主要方向之一[10−11]。猕猴桃果汁营养丰富，在加工和贮藏过程中会受到内源酶、微生物等的影响，使其感官、营养发生劣变以及安全性受到威胁[12−14]，因此杀菌处理成为果蔬汁加工的必需环节。

果汁灭菌方式主要分为热杀菌和非热杀菌两大类[15−16]，热杀菌包括巴氏杀菌、高温杀菌和超高温瞬时杀菌[17−18] 等，是目前使用最为普遍的灭菌方式。然而，猕猴桃果汁中含有热敏性物质，许多研究均表明受热过程会造成果汁色泽、营养物质、功能活性成分及香气感官等发生劣变[19−23]。随着人们对果汁类产品新鲜感官和营养要求不断提高，人们更倾向于采用非热杀菌技术如超高压杀菌、辐射杀菌、紫外杀菌、高压电场脉冲杀菌、臭氧杀菌等[24−27]，达到灭菌保鲜效果。非热杀菌技术能够使果蔬汁具有较好的色泽、稳定性和安全性，还能够较好地保持甚至改善其风味及营养价值。牛慧慧等[28] 分析比较了超高压灭菌、巴氏杀菌和高温短时杀菌对百香果汁感官和营养品质影响，结果表明，热杀菌对百香果中热敏物质 V_C、类胡萝卜素及抗氧化活性等均有显著影响，同时还会对风味带来不良影响，而超高压灭菌则可最大限度保留百香果的风味、色泽和抗氧化活性物质。此外，超高压灭菌还可促进果汁中风味物质的释放，改善果汁的香气特征。方亮[29] 研究表明，400 MPa 超高压处理在达到灭菌效果的同时可使猕猴桃果汁中过氧化物酶活力显著下降，有效抑制猕猴桃果汁氧化褐变，保持猕猴桃果汁中的天然营养成分如还原糖、V_C、氨基酸等稳定。黄若涵等[30] 比较了热杀菌和辐照杀菌对高浓度 CO_2 胁迫预处理苹果汁营养品质、感官品质和抑菌效果的影响，结果表明相较于巴氏杀菌，电子束辐照更有利于酚类物质的保留，可以有效保持果汁色泽，降低其褐变度，同时更有利于香气的保留。但由于不同灭菌技术作用机制不同，根据果汁样品的类型及其生物活性成分，不同的加工方法具有不同的效果。然而，不同灭菌方式对猕猴桃果汁影响尚不清晰。

因此，本研究以四川省特色猕猴桃品种‘红阳’为试材，分析比较三种热杀菌处理（PA：62 ℃，30 min；PB：80 ℃，15 min；HTST：100 ℃，5 min）及辐照杀菌、超高压灭菌对猕猴桃果汁品质的影响，以期为猕猴桃果汁加工提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘红阳’猕猴桃　2020 年 9 月中旬采摘自四川省成都市浦江产区；总抗氧化能力（FRAP 法）试剂盒、总抗氧化能力（ABTS 法）试剂盒、总抗氧化能力（DPPH 法）试剂盒　苏州科铭生物技术有限公司；酚酞、氢氧化钠、氯化钠、偏磷酸、甲醇、乙醇　均为分析纯，成都市科隆化学品有限公司；琥珀酸、柠檬酸、乳酸、酒石酸、奎尼酸、苹果酸、乙酸、葡萄糖、蔗糖、果糖、没食子酸、芦丁　色谱纯，上海源叶生物科技有限公司；MRS 培养基、MRS 肉汤培养基、孟加拉红培养基　北京奥博星生物技术有限责任公司。

GGI100DS 型高压蒸汽杀菌锅　致微（厦门）仪器有限公司；MDF-86V340E 型医用低温保存箱　安徽中科都菱商用电器股份有限公司；SW-CJ-2FD 双人单面净化工作台　苏州净化设备有限公司；TD5A 型低速离心机　河南北宏实业有限公司；DHP-9082 型电热恒温培养箱　上海齐欣科学仪器有限公司；Synergy HTX 型多功能酶标仪　美国伯腾仪器有限公司；FA2014N 型电子天平　上海佑科仪器仪表有限公司；HH-8 型数显恒温水浴锅　江苏金坛市金城国胜实验仪器厂；CHROMA METEA CR-400 型色差仪　日本柯尼卡美能达公司；PHS-3C 型 pH 计　上海雷磁公司；安捷伦 1260 HPLC 系统　美国安捷伦技术公司；^{60}Co-γ 射线辐照装置　四川省农业科学院生物技术核技术研究所辐照中心。

1.2　实验方法

1.2.1　猕猴桃汁的制备与灭菌处理　将软熟的‘红阳’猕猴桃果子置于−20 ℃ 冷冻 24 h，沸水热激后去除果皮。冰温条件下手工破碎制浆，4000 r/min 离心 10 min，取上清液备用。根据前期预实验结果，按照表 1 条件对猕猴桃果汁进行杀菌处理[12,29,31−33]，每个处理做 3 次平行。

表 1　猕猴桃果汁不同杀菌处理条件

Table 1　Different sterilization treatment conditions of kiwifruit juice

编号	杀菌条件
PA	62 ℃, 30 min
PB	80 ℃, 15 min
HTST	100 ℃, 5 min
LI	低剂量辐照, 0.75 kGy
MI	中剂量辐照, 1.5 kGy
HI	高剂量辐照, 3.0 kGy
LHP	100 MPa, 5 min
MHP	300 MPa, 5 min
HHP	500 MPa, 5 min
CK	未杀菌，空白对照

1.2.2　微生物菌落计数　猕猴桃果汁灭菌后的微生物计数方法参考 GB 4789.2-2022《食品安全国家标准 食品微生物学检验 菌落总数测定》进行。

1.2.3　理化指标的测定

1.2.3.1　pH 的测定　pH 采用 PHS-3C 型 pH 计测定。

1.2.3.2　总酸的测定　取果实两端制备果汁，混合均匀后移取 1 mL 果汁，加入 50 mL 蒸馏水稀释，使用全自动电位滴定仪进行测定，以浓度为 1 mol/L 的 NaOH 标准溶液进行滴定，滴定终点为 pH8.2。最终，总酸含量以柠檬酸当量计，结果表示为 %[34]。

1.2.4　色差的测定　L^*、a^*、b^*颜色参数使用 CR-400 色差仪进行测定。各组之间的差异以色差（ΔE）来说明。彩度值 C^*值和 ΔE 计算公式如下：

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

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2}$$

式中：$\Delta L = L^*_{样品} - L^*_{CK}$（明度差异），$\Delta L$ 为正表示偏白，为负表示偏黑；$\Delta a = a^*_{样品} - a^*_{CK}$（红绿差异），$\Delta a$ 为正表示偏红，为负表示偏绿；$\Delta b = b^*_{样品} - b^*_{CK}$（黄蓝差异），$\Delta b$ 为正表示偏黄，为负表示偏蓝。

1.2.5　猕猴桃果汁中可溶性糖的组成及含量的测定　采用 HPLC 测定[35]，猕猴桃果汁取 0.2 g，稀释 200 倍后过 0.22 μm 微孔滤膜后备用。标准溶液的配制：分别称取 0.1000 g 葡萄糖、蔗糖、果糖，用超纯水定容至 100 mL，配制成 1 mg/mL 的混合糖标准储备液，再依次稀释成 5、10、20、50、100 μg/mL 的标准使用液，经 0.22 μm 滤膜过滤后备用。

葡萄糖标曲：$y=2727.4x^{1.569}$，$R^2=0.9999$

蔗糖标曲：$y=0.003x^{0.6913}$，$R^2=0.9998$

果糖标曲：$y=0.011x^{0.578}$，$R^2=0.9998$

HPLC 条件：色谱柱：Aminex/Hiplex-Ca 分析柱（300×7.8 mm）；流动相：超纯水；流速：0.6 mL/min；进样量：20 μL；柱温 80 ℃。蒸发光检测器条件：氮气流速：2 mL/min；漂移管温度：60 ℃；蒸发管温度：80 ℃。

1.2.6　猕猴桃果汁中有机酸组成及含量的测定　有机酸采用 HPLC 测定[35]，猕猴桃果汁取 0.2 g，稀释 20 倍后过 0.22 μm 微孔滤膜后备用。标准溶液的配制：分别称取 0.1000 g 琥珀酸、乳酸、柠檬酸、酒石酸、奎尼酸、苹果酸和乙酸，用超纯水定容至 100 mL，配制成 1 mg/mL 的混合酸标准储备液，再依次稀释成 5、10、20、50、100 μg/mL 的标准使用液，经 0.22 μm 滤膜过滤后备用。HPLC 条件：色谱柱：美国伯乐 Aminex HPX-87H（300 mm×7.8 mm）；流动相：0.005 mol/L H_2SO_4；流速：0.6 mL/min；紫外检测波长：210 nm；进样量：10 μL；柱温 30 ℃。标准曲线方程见表 2。

表 2　有机酸对照品标准曲线方程

Table 2　Standard curve equation for organic acid references

有机酸	回归方程	决定系数（R^2）
酒石酸（Tartaric acid）	y=1393x−3.56	0.9994
奎尼酸（Quinic acid）	y=58.7x−0.47	0.9998
柠檬酸（Citric acid）	y=1020.5x−1.43	0.9992
苹果酸（Malic acid）	y=792.97x−5	0.9999
琥珀酸（Succinic acid）	y=578.63x−4.02	0.9992
乙酸（Acetic acid）	y=540x−5.99	0.9995
乳酸（Lactic acid）	y=737.54x−3.25	0.9992

注：表中x表示吸光度值，y表示酸浓度（μg/mL）。

1.2.7　维生素 C 含量的测定　采用 HPLC 测定[19]，每组样品取 200 μL 果汁，加入 1.8 mL 0.1% 偏磷酸，振荡 5 min，8000 r/min 离心 5 min 后取上清液经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后备用。HPLC 条件：ZORBAX-SB C_{18} 型色谱柱（4.6 mm×250 mm，5 μm）；流动相：0.1% 偏磷酸∶甲醇=96∶4（V/V）；流速：1.0 mL/min；紫外检测波长：243 nm；柱温：30 ℃；进样量：10 μL。

1.2.8　总酚含量的测定　猕猴桃果汁总酚含量采用福林酚法测定[20]。取 200 μL 果汁样品，加入 2 mL 福林酚试剂，再加入 2 mL 75 g/L 的无水碳酸钠混匀，25 ℃ 保温 40 min，760 nm 处测定吸光度。以没食子酸为标品绘制标准曲线（$y=0.083x+0.0717$，$R^2=0.9994$），总酚含量通过标准曲线计算得出。

1.2.9　黄酮含量的测定　黄酮含量采用 $AlCl_3$ 显色法测定，在王华等[36]方法的基础上略作修改。1 mL 样品加入 300 μL 亚硝酸钠（5 g/100 mL）和 4 mL 蒸馏水混匀，5 min 后加入 1 mL 三氯化铝（10 g/100 mL），混匀放置 5 min，加入 2 mL（4 g/100 mL）的 NaOH 和 2.4 mL 的蒸馏水，25 ℃ 条件下振荡混匀

2 min, 10 min 后在 510 nm 处测定吸光度, 以芦丁为标品绘制标准曲线(y=0.0451x+0.0902, R^2=0.9999), 通过标准曲线计算出黄酮含量。

1.2.10 猕猴桃果汁抗氧化活性的测定 猕猴桃果汁总抗氧化活性按照抗氧化试剂盒(DPPH 法、ABTS 法、FRAP 法)说明书进行测定。

1.3 数据处理

每个样品做三个平行, 使用 SPPS 12.0 软件进行数据分析, 结果以平均值±标准差表示。图片使用 Origin 8.5 软件和 SIMCA 14.1 绘制。

2 结果与分析

2.1 不同杀菌方式猕猴桃汁的微生物检测结果

评价灭菌方式能否达到有效灭菌效果通常用菌落数来表示。本实验选用不同杀菌条件巴氏杀菌法、^{60}Co-γ 射线辐照杀菌法、超高压杀菌法处理猕猴桃果汁, 其微生物指标变化实验结果见表 3。由表可知, 通过统计样品中菌落总数、霉菌和酵母菌数量发现, PA、PB、HTST、HI、HHP 五种杀菌方式的微生物致死效果显著, 达到了 100% 杀灭率。因此, 后续实验只针对 PA、PB、HTST、HI、HHP 和 CK 组进行分析。

表 3 不同杀菌方式对猕猴桃果汁菌落总数、霉菌和酵母总数的影响

Table 3 Effect of different modes of sterilization on the total number of colonies, mold and yeast counts of kiwifruit juice

杀菌方式	微生物指标[lg(CFU/mL)]	
	菌落总数	霉菌和酵母总数
CK	3.58±0.09	3.21±0.04
PA	ND	ND
PB	ND	ND
HTST	ND	ND
LI	3.26±0.03	2.71±0.01
MI	2.48±0.03	2.07±0.07
HI	ND	ND
LHP	2.23±0.23	2.75±0.02
MHP	1.85±0.36	ND
HHP	ND	ND

注: ND表示未检出, 数值表示方法为平均值±标准差。

2.2 不同杀菌方式对猕猴桃果汁 pH 与总酸的影响

pH 和总酸是反映红阳猕猴桃果汁品质重要的理化指标, 不仅影响果汁的口感, 同时也因其对花青素稳定性有较大影响从而影响果汁的色泽品质[37]。五种杀菌方式对猕猴桃果汁 pH 和总酸含量的影响见图 1。不同灭菌方式灭菌后果汁中总酸含量均有所降低, 但与 CK 相比无显著差异(P>0.05), 说明以上五种灭菌方式对猕猴桃果汁总酸含量无显著影响(P>0.05)。张欣等[12] 研究表明巴氏杀菌和超高压灭菌对刺梨汁总酸含量无显著影响, 其结果与本文研究一致。热杀菌和超高压杀菌能够破坏果肉细胞壁, 导致细胞内多种物质被释放到果汁中(如多种有机酸和水解酶等), 这些物质都能够影响果汁的 pH。在本研究中热杀菌和超高压杀菌均会降低果汁的 pH, 其中, HHP 灭菌对猕猴桃果汁 pH 无显著影响(P>0.05), 研究结果与方亮等[38] 一致。热处理显著降低了果汁 pH, 而高瑞萍等[22]、刘志成等[39] 发现热杀菌对橙汁和猴头菇山药复合饮料的 pH 无显著影响(P>0.05), 由此可以看出, 这种不同的灭菌方式可能与果汁基质有关。本文发现辐照杀菌能够提升猕猴桃果汁的 pH, 有研究表明相较于 CK 处理, 辐照杀菌导致 pH 升高, 推测是因为电离辐射会破坏有机酸(如柠檬酸)的分子结构, 导致其水解为中性或碱性物质, 使得 pH 升高, 该研究与黄若涵等[30] 研究一致。

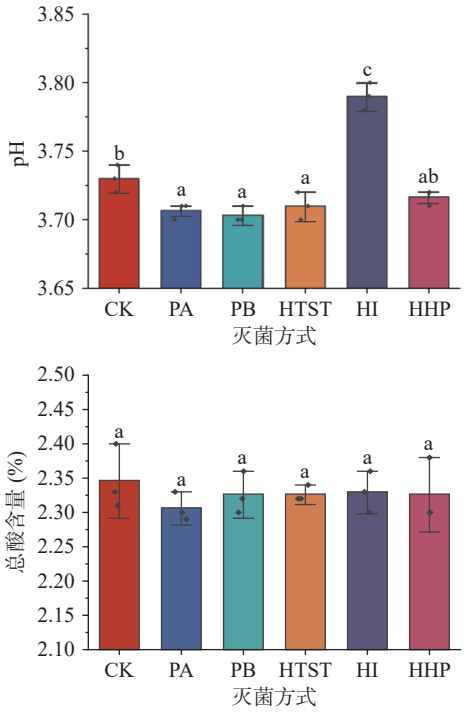


图 1 不同杀菌方式对猕猴桃果汁 pH 和总酸的影响

Fig.1 Effects of different sterilization methods on pH and total acid of kiwifruit juice

注: 不同小写字母表示差异显著(P<0.05), 图 2~图 6 同。

2.3 不同杀菌方式对猕猴桃果汁色泽的影响

色泽是果汁感官评价的重要指标[40]。色泽一般用 L^*、a^*、b^*表示, L^*值表示明亮度, 范围在 0~100 之间, 值越大说明偏向白色, 越小表示偏向黑色。a^*值表示红绿色值, 正数表示红色, 值越大红色越深, 负数表示绿色, 值越小绿色越深。b^*表示黄蓝色值, 正数表示黄色, 值越大黄色越深, 负数表示蓝色, 值越小蓝色越深。'红阳'猕猴桃为黄肉红心品种, 果肉中因富含花青素使果汁呈现出诱人的红色。但花青素是一种不稳定的物质, 加工过程中高温、辐照以及强光等外部因素均会导致其发生氧化或分解, 影响猕猴桃果汁的色泽。本实验比较了三种热杀菌方式、辐照和超高压灭菌方式对猕猴桃果汁色泽的影响。从表 4 可以看出: 不同杀菌方式与 CK 相比, 其 L^*、a^*、b^*值均呈现显著性差异(P<0.05)。除了 HI 组 L^*显著高于 CK 组以外, 其它处理组的 L^*、a^*和 b^*值均显著低

表 4　不同杀菌方式对猕猴桃果汁色泽的影响

Table 4　Effects of different sterilization methods on the color of kiwifruit juice

杀菌方式	色泽				
	L^*	a^*	b^*	C^*	ΔE
CK	35.521±0.004^{d}	17.456±0.018^{f}	16.523±.015^{f}	24.037±0.03^{e}	–
PA	34.580±0.003^{b}	14.383±0.004^{d}	12.120±0.012^{b}	18.807±0.009^{c}	5.451±0.015^{b}
PB	34.571±0.011^{b}	14.329±0.012^{c}	12.193±0.007^{c}	18.807±0.003^{c}	5.433±0.005^{b}
HTST	34.375±0.014^{a}	13.694±0.023^{b}	12.046±0.003^{a}	18.247±0.012^{b}	5.947±0.019^{c}
HI	43.985±0.018^{e}	0.983±0.019^{a}	15.766±0.037^{e}	15.663±0.097^{a}	18.551±0.009^{d}
HHP	35.193±0.014^{c}	16.950±0.038^{e}	15.476±0.012^{d}	22.957±0.019^{d}	1.219±0.027^{a}

注：同列不同小写字母表示有显著性差异，P<0.05。

于 CK 组（P<0.05）。产生这种差异的原因可能是辐照处理加剧果汁中的非酶促褐变反应，从而导致 a^*和 b^*低于 CK 组[41]。在热杀菌处理中花青素受热不稳定而分解，影响果汁色泽；或发生美拉德反应、焦糖化反应生成类黑精等深色物质，降低明度。说明不同灭菌方式都使得‘红阳’猕猴桃果汁颜色发生变化，其中 HI 处理的颜色变化最为显著。C^*值是彩度值，用于定量描述样品颜色的纯度、鲜艳度或饱和度，它代表了颜色点在 a^*-b^*色度平面上距离中心原点（中性灰点，a^*=0，b^*=0）的径向距离，C^*值越高，代表该样品的颜色越鲜艳、越纯正、饱和度越高，C^*值越低，代表颜色越暗淡、越浑浊、越接近灰色。不同杀菌方式处理组中，HI 组 C^*值最小，HHP 组最大。ΔE 表示颜色总体的差异，在 0~2 之间表示色差基本不能被肉眼分辨清楚，ΔE 在 5 以上则表示两种物质的色差非常明显且可以通过肉眼分辨出来，在视觉上可以认为是两种颜色。结果表示，HHP 组的 ΔE 值最小为 1.219±0.027，从感官上与 CK 组之间无区别，三种热杀菌方式对色泽影响居中，ΔE 值均在 5~6 之间，彼此之间颜色较为接近，在感官上难以很好区分。而 HI 组 ΔE 值最大为 18.551±0.009，属于不同色调范围，已转变为绿色色调。辐照杀菌对猕猴桃果汁色泽的影响主要是由于高能辐照导致果汁中的花青素等天然色素发生降解，使得 HI 组的 a^*值发生明显的降低，感官上表现为辐照灭菌的果汁颜色呈现黄褐色。

2.4　不同杀菌方式对猕猴桃果汁甜味物质的影响

糖是影响猕猴桃果汁味道的重要呈味物质，对猕猴桃果汁的最终风味起很大作用[42]。水果中的糖不仅作为风味成分，同时是维生素、色素和芳香化合物等物质合成的前体或基础，也是植物生命活动包括果实生长发育的基础物质[43]。通过 HPLC 法对不同杀菌方式处理后的果汁进行分析。根据图 2 可知，猕猴桃果实中的糖主要是蔗糖、葡萄糖和果糖，其中果糖在猕猴桃果实中的含量最多，其次为葡萄糖。PA、PB、HTST、HI、HHP 五组与对照组 CK 相比，PA、PB 处理可显著提高果汁中蔗糖含量（P<0.05），HI 组蔗糖含量则显著降低（P<0.05），HHP 处理组主要表现为可显著提高果汁中葡萄糖含量（P<0.05），其余各组蔗糖、果糖和葡萄糖均与 CK 组没有显著性差异（P>0.05），说明以上不同灭菌方式可在一定程度上影响果汁中糖的组成，但整体影响不大。分析其原因，可能是热杀菌会使蔗糖水解酶失活，从而导致蔗糖消耗降低；电离辐射会导致羟基醛酮氧化，导致糖类物质减少[41]；超高压处理会破碎细胞，大量葡萄糖或多糖流出，多糖又会被水解酶分解成葡萄糖，导致葡萄糖含量上升。张欣等[12] 和王凤玲等[32] 研究结果也表明，不同灭菌方式对刺梨汁、鲜榨复配果汁中甜味物质影响均较小。

2.5　不同杀菌方式对猕猴桃果汁酸味物质的影响

有机酸是猕猴桃果实中主要的呈酸物质，不同种类有机酸的酸度和口感也各不相同[31,44-45]。从图 3 中可以看出，PA、PB、HTST 热杀菌组与对照组 CK 相比柠檬酸、乳酸和酒石酸含量有显著性差异（P<0.05），呈下降趋势；奎尼酸含量显著性上升（P<0.05）（HTST 除外，其灭菌时间短，对果汁有机酸

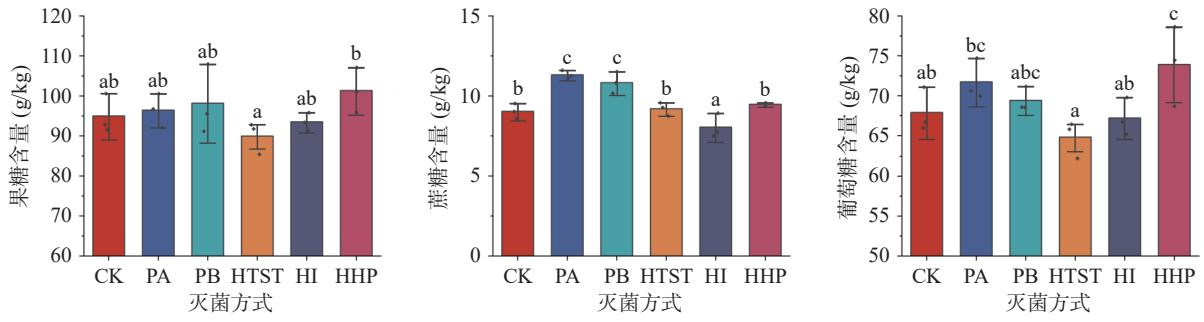


图 2　不同杀菌方式对猕猴桃果汁糖的影响

Fig.2　Effect of different sterilization methods on sugar of kiwifruit juice

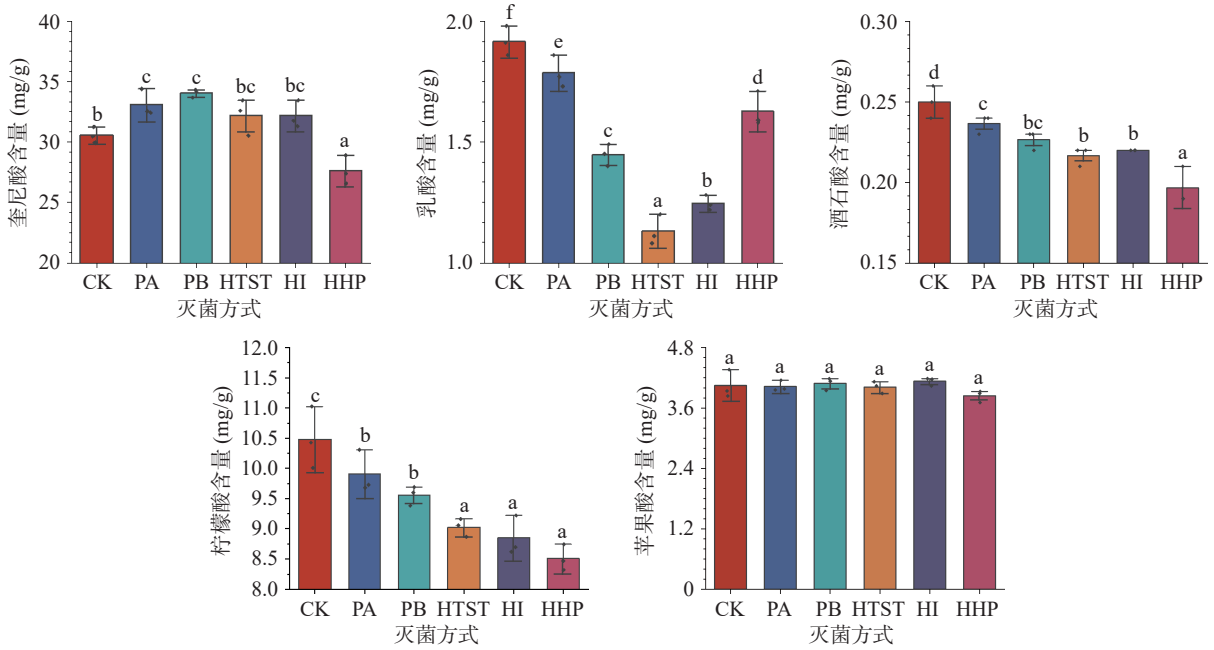


图 3 不同杀菌方式对猕猴桃果汁有机酸的影响

Fig.3 Effects of different sterilization methods on organic acids of kiwifruit juice

含量影响较小), 对苹果酸含量没有影响。在热杀菌处理方式中, 乳酸含量随温度的升高而降低, 是因为在热杀菌的过程中, 乳酸会受热分解成乙醛、乙酸、丙酮等小分子物质。HI 组与对照组 CK 相比柠檬酸、酒石酸、乳酸含量呈显著性下降趋势(P<0.05), 苹果酸、奎尼酸含量没有显著差异(P>0.05)。辐照灭菌的影响主要是其产生的羟基自由基直接攻击有机酸分子, 使其发生降解(如柠檬酸、酒石酸、乳酸), 而苹果酸结构稳定、奎尼酸疏水性强, 因此不会受到影响。与对照组 CK 相比, HHP 组的柠檬酸、酒石酸、奎尼酸、乳酸含量均显著性下降(P<0.05), 苹果酸含量则无显著差异(P>0.05)。朱奕婷等[33]、张琦婧[46] 研究发现热杀菌可导致胡柚汁和诺丽果汁总酸和有机酸的降低, 吕欣然等[41] 也发现辐照杀菌可降低黑果腺肋花楸果汁总酸的含量。

2.6 不同杀菌方式对猕猴桃果汁 V_C 含量的影响

维生素 C 具有很强的还原性, 能有效地清除自由基, 抑制猕猴桃果汁褐变且与猕猴桃果汁的抗氧化活性密切相关, 是评价猕猴桃果汁营养价值的一个重要指标[47]。不同杀菌方式对猕猴桃果汁维生素 C 的影响如图 4 所示, PA、PB、HHP 处理对猕猴桃果汁维生素含量的影响均不显著(P>0.05), HTST 处理组中的 V_C 含量显著增加(P<0.05)。张琦婧[46]、任书凝等[48] 研究发现 HHP 对果汁中 V_C 无显著影响, 而热处理会导致果汁中 V_C 含量减少。但本研究中, 只有 HTST 组 V_C 含量上升, 是因为猕猴桃中天然存在的抗坏血酸氧化酶受高温迅速失活, 切断了 V_C 的酶促降解途径。辐照杀菌对猕猴桃果汁中 V_C 影响最为显著(P<0.05), 分析其原因是 V_C 在有氧条件下可转化为脱氢抗坏血酸(DHA), DHA 进一步降解为二酮古洛酸(DKGA), 辐照可以加快 V_C 向 DHA 的转化速度[49−50]。张欣等[12] 研究发现辐照灭菌会使果汁 V_C 含量降低而超高压处理对果汁 V_C 含量的影响不大, 与本文研究结果一致。

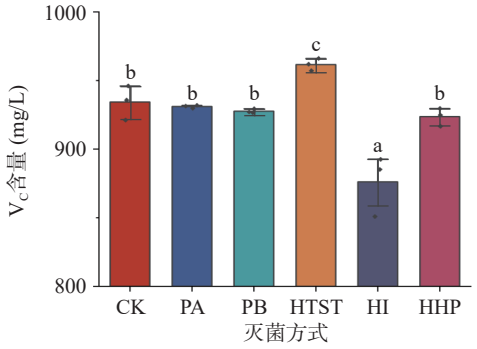


图 4 不同杀菌方式对猕猴桃果汁 V_C 的影响

Fig.4 Effects of different sterilization methods on V_C of kiwifruit juice

2.7 不同杀菌方式对猕猴桃果汁多酚、黄酮含量的影响

多酚、黄酮类化合物广泛存在于天然植物中, 具有抗癌、抗炎、保肝、抗菌、神经保护、抗肥胖等多种功能[51], 果蔬中的多酚和黄酮类物质具有一定的抗氧化能力, 有助于维护果蔬汁原本的色泽和风味[5,52]。本实验探讨了多酚、黄酮类化合物在不同灭菌方式灭菌之后的变化情况。结果如图 5 所示, 热杀菌和超高压杀菌处理的猕猴桃果汁较 CK 组总酚含量显著上升(P<0.05), 辐照灭菌组没有显著差异(P>0.05)。PA、PB、HIST 组总黄酮含量上升显著(P<0.05), HI 组和 HHP 组总黄酮含量相较于 CK 组没有显著差异(P>0.05)。结果显示, 热杀菌组的多酚、黄酮含量高于冷杀菌组, 分析其原因可能是热杀菌使得猕猴桃果肉细胞中的多酚、黄酮类物质释放出来, 造成其含量

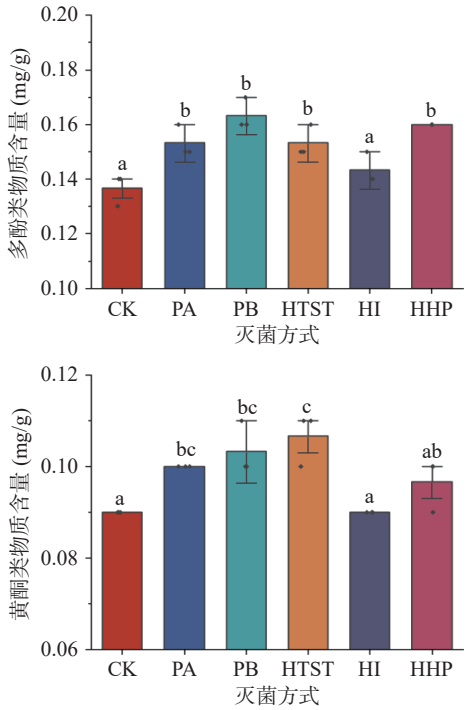


图 5　不同杀菌方式对猕猴桃果汁多酚、黄酮的影响

Fig.5　Effects of different sterilization methods on polyphenol and flavonoid in kiwifruit juice

的上升[53]；另外高温将导致多酚氧化酶失活和不耐热的多聚化合物受热水解成单体[54–55]。有研究表明，巴氏杀菌会造成多种果汁（杨桃、西瓜、荔枝等）中抗氧化物质的上升[19]。孙曙光等[56]、张琦婧[46] 研究也表明热杀菌可提高冬枣汁和诺丽果汁中黄酮类物质含量，增加冬枣汁中酚类物质的含量。

2.8　不同杀菌方式对猕猴桃果汁抗氧化能力的影响

果汁的抗氧化能力是其抵抗氧化反应、清除自由基的能力，本文通过 DPPH、ABTS、FRAP 这 3 种体外抗氧化方法来比较不同杀菌方式处理猕猴桃果汁样品的总抗氧化能力，结果如图 6 所示。综合比较可知，PA、PB、HTST 三组与对照组 CK 相比 ABTS、DPPH 和 FRAP 抗氧化活性均显著提高（P<0.05），与热杀菌处理提高果汁中多酚、黄酮等抗氧化活性成分有关[57–58]。究其原因，可能是热杀菌使得猕猴桃果汁中多种具有抗氧化能力物质由结合态转变为游离态；或在热杀菌过程中，通过密封隔绝氧气，能够在灭菌后维持较高的抗氧化能力，这些将造成热杀菌后的猕猴桃果汁总体的抗氧化能力提升。王丹等[59] 研究也表明，高温灭菌可提高荔枝汁中抗氧化活性成分含量从而提高其抗氧化活性，也有研究认为热杀菌处理会对果汁抗氧化活性产生消极影响，如李根等[60]、牛慧慧等[28] 研究则认为热杀菌处理可导致冬枣汁和百香果汁中抗氧化活性成分损失而降低其抗氧化活性，这种差异可能与原料基质及抗氧化活性成分的组成等有关。HI 组的三项指标的抗氧化能力相较 CK 组均有显著上升（P<0.05），而大多数研究均表明 HI 处理会导致果汁抗氧化活性降低[30]，由于抗氧化活性除受以上物质含量影响外，还与果汁中其它物质如过氧化物酶（Peroxidase，POD）、多糖等有关[61]，因此具体原因仍需进一步探究。HHP 组与 CK 组相比 $ABTS^{+}$、DPPH 自由基清除能力提高，将 Fe^{3+}还原为 Fe^{2+}的能力提高，该研究结果与许文文等[62] 研究结果较为一致，认为 HHP 对多酚、黄酮类物质含量提高有积极影响，从而增强其抗氧化活性。

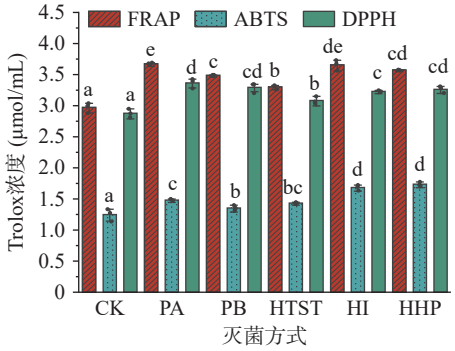


图 6　不同杀菌方式对猕猴桃果汁抗氧化能力的影响

Fig.6　Effects of different sterilization methods on the antioxidant capacity of kiwifruit juice

2.9　OPLS-DA 解析杀菌方式对猕猴桃果汁品质影响

通过以上分析可知，不同灭菌方式对猕猴桃果汁品质有着不同的影响，为了更好地确定不同灭菌方式所造成的差异以及具体的差异指标，运用 SIMCA 14.1 软件，基于多种理化指标应用偏最小二乘判别分析（PLS-DA）方法分析不同灭菌方式对样品影响的差异性。OPLS-DA 是一种有监督的统计分析方法，可以用来建模综合表达各样品之间的关系，为区分不同特征的样品提供了有力的方法[63]。从图 7 可以看出，PA、PB 和 HTST 三种热杀菌方式聚集在一起，HI、HHP 与 CK 各自聚成一组。表明 PA、PB 和 HTST 处理对猕猴桃果汁的影响较为接近，热杀菌各组之间差异较小。辐照灭菌（HI）对猕猴桃果汁的影响最大，由图 7 可以看出，HI 组距离 CK 组最远。超高压灭菌（HHP）与 CK 各自呈现单独聚类，说明二者彼此之间差异较大。并且 HHP 与三种热杀菌距离较为接近，说明超高压灭菌和热杀菌对猕猴桃果汁造成的影响较为接近。

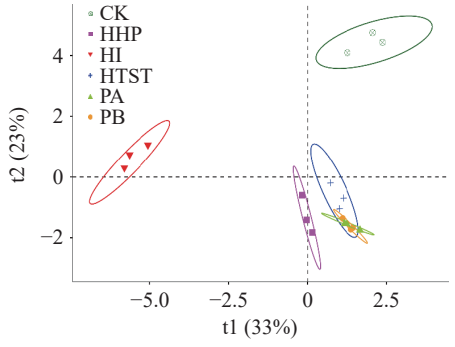


图 7　OPLS-DA 分析结果

Fig.7　OPLS-DA analysis results

进一步根据 OPLS-DA 分析的模型计算出变量重要性投影值(Variable importance in projection, VIP), VIP 值主要用于评估每个自变量对模型预测能力的贡献, VIP 值越高, 表示该变量对模型的重要性越大[64−66]。结果如图 8 所示, 为了获得 PLS-DA 模型下区分两个样品的关键差异性指标, 筛选出 VIP> 1 的重要差异化合物 11 种, 从大到小依次是奎尼酸、果糖、乳酸、DPPH、柠檬酸、酒石酸、葡萄糖、蔗糖、b^*、FRAP、C^*。根据物质载荷图(图 9)分析可知: 辐照杀菌(HI)主要是影响猕猴桃果汁的色差值 b^*, 使得 HI 处理的猕猴桃果汁黄色程度更大, 对其余的理化指标影响较小。三种热杀菌主要对猕猴桃果汁中的糖尤其是葡萄糖和果糖含量影响最大。超高压灭菌(HHP)主要对猕猴桃果汁中奎尼酸等酸含量影响较大。

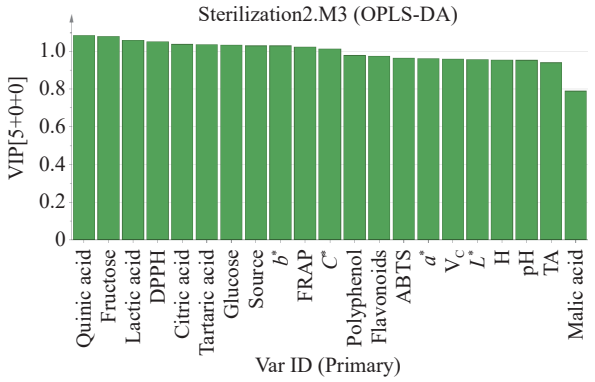


图 8 VIP 值分析结果

Fig.8 VIP value analysis results

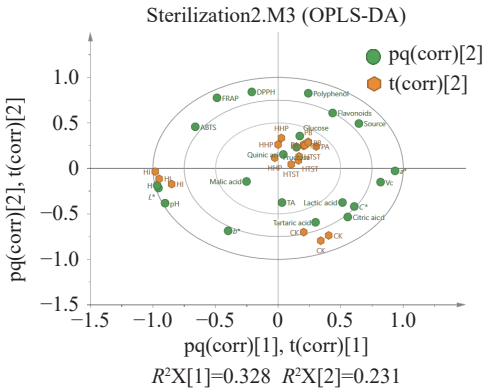


图 9 物质载荷图

Fig.9 Material load diagram

3 结论

本实验探讨了热杀菌、辐照杀菌和超高压杀菌对红阳猕猴桃果汁的 pH、总酸、色泽、甜味物质、酸味物质、V_C 含量、多酚和黄酮类以及抗氧化能力的影响。发现三种热杀菌降低了猕猴桃果汁的 pH, 略微减少有机酸含量, 显著提升果汁中多酚、黄酮类物质的含量, 进而提升果汁的抗氧化能力。辐照杀菌对果汁色泽的改变最大, 使得果汁呈现黄褐色, 降低果汁 V_C 的含量。超高压灭菌对果汁色泽的影响最小, 能够较好保持果汁中 V_C 含量, 提高多酚类物质含量, 提高抗氧化活性。

综上可知, 超高压灭菌最适宜于猕猴桃果汁灭菌, 但由于其设备昂贵, 仅适宜于高端产品开发, 三种热杀菌方式对猕猴桃果汁品质影响差异较小且对猕猴桃果汁有一定影响, 同时三种热杀菌方式还具有技术成熟度高、设施设备投入较小等优点, 因此仍作为常规猕猴桃加工的首推方式。辐照杀菌由于会引起色泽劣变、严重的 V_C 流失等原因而不适合猕猴桃果汁的灭菌。本研究明确了非热杀菌方式与传统热杀菌对红阳猕猴桃果汁品质影响的差异, 可为猕猴桃果汁的加工提供科学理论指导。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 戴芳, 吴宇昊, 祝振洲, 等. 不同物理场预处理对猕猴桃酵素品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 96−105. [DAI Fang, WU Yuhao, ZHU Zhenzhou, et al. Effects of different physical field pretreatment on the quality of kiwifruit Jiaosu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 96−105.]

[2] RICHARDSON D P, ANSELL J, DRUMMOND L N. The nutritional and health attributes of kiwifruit: A review[J]. European Journal of Nutrition, 2018, 57(8): 2659−2676.

[3] CARR A C, BOZONET S M, PULLAR J M, et al. A randomized steady-state bioavailability study of synthetic versus natural (kiwifruit-derived) vitamin C[J]. Nutrients, 2013, 5(9): 3684−3695.

[4] 陈林, 苏珊, 吴应梅, 等. 红阳猕猴桃酵素发酵工艺优化及其体外抗氧化活性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(4): 224−233. [CHEN Lin, SU Shan, WU Yingmei, et al. Optimization of fermentation process for Hongyang kiwifruit jiaosu and antioxidant activity *in vitro*[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(4): 224−233.]

[5] 温锦丽, 何艳丽, 曹炜玉, 等. 不同软枣猕猴桃品种果实生物活性物质含量及抗氧化活性比较分析[J]. 中国果树, 2024(1): 52−61. [WEN Jinli, HE Yanli, CAO Weiyu, et al. Comparative analysis of bioactive substances content and antioxidant activity of different *Actinidia arguta* cultivars[J]. China Fruits, 2024(1): 52−61.]

[6] MONTANARO G, DICHIO B, LANG A, et al. Internal versus external control of calcium nutrition in kiwifruit[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2014, 177(6): 819−830.

[7] 朱建华, 田金河. 猕猴桃生物活性物质研究进展[J]. 酿酒, 2006, 33(3): 57−59. [ZHU Jianhua, TIAN Jinhe. Recent advances in bioactive components in kiwifruit[J]. Liquor Making, 2006, 33(3): 57−59.]

[8] 梁勇. 红阳猕猴桃标准化生产技术研究与运用[J]. 四川农业科技, 2016(7): 31−33. [LIANG Yong. Research and application of standardized production technology of Hongyang kiwifruit[J]. Sichuan Agricultural Science and Technology, 2016(7): 31−33.]

[9] 翟金良. 我国猕猴桃产业存在的问题及发展对策[J]. 科技促进发展, 2015, 11(4): 521−529. [ZHAI Jinliang. Problems and countermeasures of kiwifruit industry development in China[J]. Science & Technology for Development, 2015, 11(4): 521−529.]

[10] 兰天, 赵沁雨, 王家琪, 等. 益生菌发酵猕猴桃果汁的贮藏特

性及货架期预测[J]. 食品工业科技，2024, 45(5)：301−308.［LAN Tian, ZHAO Qinyu, WANG Jiaqi, et al. Storage characteristics and shelf-life prediction of probiotic fermented kiwifruit juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5)：301−308.］

［11］吕晓冬, 叶更新, 杨艺新, 等. 猕猴桃果汁加工工艺研究进展[J]. 保鲜与加工，2023, 23(4)：55−61.［LÜ Xiaodong, YE Gengxin, YANG Yixin, et al. Research progress on processing technology of kiwifruit juice[J]. Storage and Process, 2023, 23(4)：55−61.］

［12］张欣, 王辉, 罗婧文, 等. 超高压等灭菌方式对刺梨汁营养及风味的影响研究[J]. 食品科技，2024, 49(2)：82−89.［ZHANG Xin, WANG Hui, LUO Jingwen, et al. Effects of ultra-high pressure and other sterilization methods on nutritional quality and flavor of *Rosa roxburghii* Tratt juice[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(2)：82−89.］

［13］卢薇, 邵昕, 鲁江. 高压灭菌工艺对蓝莓汁品质的影响[J]. 饮料工业，2023, 26(4)：12−17.［LU Wei, SHAO Xin, LU Jiang. Effects of high pressure sterilization on the quality of blueberry juice[J]. The Beverage Industry, 2023, 26(4)：12−17.］

［14］唐征, 肖逸, 杜长江, 等. 不同杀菌方式对百香果汁有机物含量、色泽和褐变系数的影响分析[J]. 食品安全导刊，2024(18)：60−62.［TANG Zheng, XIAO Yi, DU Changjiang, et al. Effect of different sterilization methods on organic content, color and browning coefficient of passion fruit juice[J]. China Food Safety Magazine, 2024(18)：60−62.］

［15］胡盼盼, 李军, 王莉, 等. 不同杀菌技术对鲜榨苹果汁贮藏品质的影响[J]. 江苏农业科学，2017, 45(21)：196−199.［HU Panpan, LI Jun, WANG Li, et al. Effects of different sterilization techniques on storage quality of freshly squeezed apple juice[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2017, 45(21)：196−199.］

［16］王仪, 珺萌萌, 李雨浩, 等. 混合浆果汁抗氧化能力及果汁杀菌方法的比较[J]. 食品与发酵工业，2023, 49(3)：205−212.［WANG Yi, JUN Mengmeng, LI Yuhao, et al. Comparison of antioxidant capacity of mixed berry juice and juice sterilization methods[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(3)：205−212.］

［17］王莉梅, 肖逸, 李游, 等. 超高压和巴氏杀菌对石榴果汁饮料品质影响的研究[J]. 食品科技，2023, 48(6)：89−94.［WANG Limei, XIAO Yi, LI You, et al. Quality effects of pomegranate juice beverage by ultra high pressure and pasteurization[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(6)：89−94.］

［18］李根, 初乐, 赵岩, 等. 巴氏杀菌对 NFC 苹果汁杀菌效果及品质的影响[J]. 食品工业，2021, 42(1)：52−55.［LI Gen, CHU Le, ZHAO Yan, et al. The effects of different sterilization conditions on efficiency and quality in NFC apple juice[J]. The Food Industry, 2021, 42(1)：52−55.］

［19］SAIKIA S, MAHNOT N K, MAHANTA C L. A comparative study on the effect of conventional thermal pasteurisation, microwave and ultrasound treatments on the antioxidant activity of five fruit juices[J]. Food Science and Technology International, 2016, 22(4)：288−301.

［20］KATARIYA P, ARYA S S, PANDIT A B. Novel, non-thermal hydrodynamic cavitation of orange juice：Effects on physical properties and stability of bioactive compounds[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 62：102364.

［21］RIGANAKOS K A, KARABAGIAS I K, GERTZOU I, et al. Comparison of UV-C and thermal treatments for the preservation of carrot juice[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2017, 42：165−172.

［22］高瑞萍, 刘松林, 吴振. UV-C 联合热处理对橙汁品质特性的影响[J]. 食品工业科技，2022, 43(9)：79−86.［GAO Ruiping, LIU Songlin, WU Zhen. Effect of ultraviolet-C combined with heat treatments on the quality properties of orange juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(9)：79−86.］

［23］LU Qi, PENG Ying, ZHU Chunhua, et al. Effect of thermal treatment on carotenoids, flavonoids and ascorbic acid in juice of orange cv. Cara Cara[J]. Food Chemistry, 2018, 265：39−48.

［24］马雅丽. 脉冲强光杀灭苹果汁中脂环酸芽孢杆菌方法构建及机制解析[D]. 杨凌：西北农林科技大学, 2023.［MA Yali. Construction and mechanism analysis of killing *Bacillus* alicyclic acids in apple juice by pulsed strong light[D]. Yangling：Northwest A & F University, 2023.］

［25］韩春然, 薛清卓, 遇世友, 等. 微波杀菌对果汁品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报，2022, 13(15)：4917−4923.［HAN Chunran, XUE Qingzhuo, YU Shiyou, et al. Effects of microwave sterilization on fruit juice quality[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(15)：4917−4923.］

［26］马金花. 超高压均质对 NFC 甜瓜汁流变性质及其影响因素研究[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学, 2023.［MA Jinhua. Study on the effect of ultra high pressure homogenization on the rheology properties of NFC melon juice and its influencing factors[D]. Urumqi：Xinjiang Agricultural University, 2023.］

［27］刘育颖. 非热杀菌技术在鲜榨果汁加工中的应用研究[J]. 食品科技，2019, 44(8)：87−90.［LIU Yuying. Application of non-thermal sterilization technology in fresh juice processing[J]. Food Science and Technology, 2019, 44(8)：87−90.］

［28］牛慧慧, 张慧云, 邹文惠, 等. 不同杀菌方式对百香果汁感官和营养品质的影响[J]. 食品与发酵工业，2022, 48(20)：145−151.［NIU Huihui, ZHANG Huiyun, ZOU Wenhui, et al. Effects of sterilization methods on the sensory related characteristics and nutritional quality of passion fruit juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(20)：145−151.］

［29］方亮. 超高压处理对猕猴桃果汁杀菌钝酶效果和品质的影响[D]. 无锡：江南大学, 2008.［FANG Liang. Effect of high pressure treatment on sterilization, enzyme inactivation and quality of kiwifruit juice[D]. Wuxi：Jiangnan University, 2008.］

［30］黄若涵, 张天天, 刘芳, 等. 高浓度 CO_2 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.［HUANG Ruohan, ZHANG Tiantian, LIU Fang, et al. Effect of CO_2 stress pretreatment and electron beam irradiation on the quality of NFC apple juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9)：325−332.］

［31］吕真真, 路绪强, 刘慧, 等. 热加工结合添加抗坏血酸对酸味西瓜制汁品质的影响[J]. 果树学报，2021, 38(12)：2166−2177.［LÜ Zhenzhen, LU Xuqiang, LIU Hui, et al. Effects of thermal processing combined with adding ascorbic acid on the quality of sour watermelon juice[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(12)：2166−2177.］

［32］王凤玲, 朱琳, 柴瑾, 等. 超高压处理对鲜榨复配果汁品质及货架期的影响[J]. 食品工业科技，2024, 45(9)：309−316.［WANG Fengling, ZHU Lin, CHAI Jin, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on quality and its shelf life of freshly squeezed compound juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9)：309−316.］

［33］朱奕婷, 林杨, 汪丽霞, 等. 不同加工工艺对胡柚汁品质的影响研究[J]. 食品与发酵工业，2025, 51(1)：297−304.［ZHU Yiting, LIN Yang, WANG Lixia, et al. Effects of different processing technologies on quality of *Citrus aurantium* L. Changshanhuyou juice

[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 297−304.]
[34] 袁怀瑜, 朱永清, 李可, 等. 成熟度对‘金艳’猕猴桃采后及后熟品质的影响研究[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(3): 34−40. [YUAN Huaiyu, ZHU Yongqing, LI Ke, et al. Study on postharvest and ripening quality of 'Jinyan' kiwifruit with different maturation[J]. Storage and Process, 2020, 20(3): 34−40.]
[35] 梁钰梅, 李可, 林籽汐, 等. 基于主成分分析法的 9 个品种蓝莓品质评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(9): 235−244. [LIANG Yumei, LI Ke, LIN Zixi, et al. Quality evaluation of nine varieties of blueberry based on principal component analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(9): 235−244.]
[36] 王华, 曹婧, 翟丽娟, 等. 猕猴桃果肉提取物抗氧化活性研究[J]. 华北农学报, 2013, 28(2): 144−149. [WANG Hua, CAO Jing, ZHAI Lijuan, et al. Investigation on the anti-oxidative activity of kiwifruits pulp extracts[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2013, 28(2): 144−149.]
[37] 邱菊, 陈婧司, 陈冰艺, 等. 桑葚花青素的稳定性及降解动力学研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(8): 179−185. [QIU Ju, CHEN Jingsi, CHEN Bingyi, et al. Study on stability and degradation kinetics of anthocyanins from mulberry[J]. China Condiment, 2024, 49(8): 179−185.]
[38] 方亮, 江波, 张涛, 等. 超高压中温协同处理对猕猴桃果汁品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(33): 10843−10844. [FANG Liang, JIANG Bo, ZHANG Tao, et al. Effect of combined high pressure and thermal treatment on quality of kiwifruit juice[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(33): 10843−10844.]
[39] 刘志成, 胡秋辉, 赵立艳, 等. 杀菌方法对猴头菇山药复合饮料品质及货架期的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 261−270. [LIU Zhicheng, HU Qiuhui, ZHAO Liyan, et al. Effects of sterilization methods on the quality and shelf-life of *Hericium erinaceus* and yam composite beverage[J]. Food Science, 2024, 45(21): 261−270.]
[40] LIU Jianing, BI Jinfeng, LIU Xuan, et al. Modelling and optimization of high-pressure homogenization of not-from-concentrate juice: Achieving better juice quality using sustainable production[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131058.
[41] 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. [LÜ Xinran, WANG Shujuan, ZHANG Dan, et al. Effects of sterilization with different doses of electron beam irradiation on the quality of *Aronia melanocarpa* juice[J]. Food Science, 2025, 46(5): 272−280.]
[42] 倪慧, 李华佳, 李可, 等. 高效液相色谱法测定猕猴桃酒中 4 种有机酸含量[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(12): 205−211. [NI Hui, LI Huajia, LI Ke, et al. The content of 4 kinds of organic acids in kiwi wine determined by HPLC[J]. Food Research and Development, 2019, 40(12): 205−211.]
[43] 张雅欣, 李旋, 胡佳星, 等. 水果及其制品滋味特征及调控方法研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 299−311. [ZHANG Yaxin, LI Xuan, HU Jiaxing, et al. Research progress in taste characteristics of fruits and fruit products and methods for their regulation [J]. Food Science, 2024, 45(14): 299−311.]
[44] 杨桂馥. 主要食用有机酸的用途及国际市场动向[J]. 中国食品添加剂, 1994, 5(4): 43−50. [YANG Guifu. Application and international market trend of main edible organic acids[J]. China Food Additives, 1994, 5(4): 43−50.]
[45] 何新莉, 邱永军. 酸味剂与食品风味: 谈谈葡萄糖酸的特性[J]. 中国食品工业, 1998(5): 12−13. [HE Xinli, QIU Yongjun. Functions of gluconic acid in food flavoring[J]. China Food Industry, 1998(5): 12−13.]
[46] 张琦婧. 热处理对诺丽果汁理化性质及风味影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2020. [ZHANG Qijing. Effect of heat treatment on physicochemical properties and flavor of noni juice[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2020.]
[47] 卜凡琼, 代雨婷, 冯武, 等. 徐香猕猴桃多酚抗氧化特性研究[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(1): 112−118. [BU Fanqiong, DAI Yuting, FENG Wu, et al. Antioxidant activity of Xuxiang kiwifruit polyphenol[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(1): 112−118.]
[48] 任书凝, 宋永程, 李缘, 等. 超高压和热处理对沙棘-哈密瓜复合果汁品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(2): 195−201. [REN Shuning, SONG Yongcheng, LI Yuan, et al. Effects of ultrahigh pressure and heat treatment on the quality of seabuckthorn-Hami melon compound juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(2): 195−201.]
[49] MAZUREK A, WŁODARCZYK-STASIAK M. A new method for the determination of total content of vitamin C, ascorbic and dehydroascorbic acid, in food products with the voltammetric technique with the use of tris (2-carboxyethyl) phosphine as a reducing reagent[J]. Molecules, 2023, 28(2): 812.
[50] SEMENOVA Z A, LEVSHENKO M T, KOLOKOLOVA A Y, et al. Establishment of a test culture to study the effects of ionizing radiation on the opportunistic and pathogenic microflora of food[J]. Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies, 2019, 81(2): 245−249.
[51] YANG Fang, XIE Chenyang, LI Jie, et al. Foodomics technology: Promising analytical methods of functional activities of plant polyphenols[J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(9): 2129−2142.
[52] ŠAVIKIN K, ZDUNIĆ G, JANKOVIĆ T, et al. Phenolic content and radical scavenging capacity of berries and related Jams from certificated area in Serbia[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2009, 64(3): 212−217.
[53] ALONGI M, VERARDO G, GORASSINI A, et al. Phenolic content and potential bioactivity of apple juice as affected by thermal and ultrasound pasteurization[J]. Food & Function, 2019, 10(11): 7366−7377.
[54] 邓俊琳, 李晚谊, 于丽娟, 等. 干燥温度对醇提余甘子多酚含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 57−61. [DENG Junlin, LI Wanyi, YU Lijuan, et al. Effect of drying temperature on phenolic contents and its antioxidant activity of *Phyllanthus emblica* L[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(24): 57−61.]
[55] ZHANG Ruifen, ZENG Qingshuai, DENG Yuanyuan, et al. Phenolic profiles and antioxidant activity of *Litchi* pulp of different cultivars cultivated in southern China[J]. Food Chemistry, 2013, 136(3-4): 1169−1176.
[56] 孙曙光, 冀利, 贺晓芳, 等. 不同热杀菌方式对沾化冬枣汁总酚、总黄酮含量及体外抗氧化性能的影响[J]. 中国果菜, 2023, 43(4): 21−25,48. [SUN Shuguang, JI Li, HE Xiaofang, et al. Effect of heat sterilization methods on the contents of total phenols and flavonoids and *in-vitro* antioxidant activity of Zhanhua winter jujube juice[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(4): 21−25,48.]
[57] 彭欢, 黄子健, 吴涛, 等. 刺梨自然发酵制酒过程中化学成分、抗氧化活性及优势菌的变化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(2): 205−213. [PENG Huan, HUANG Zijian, WU Tao, et al. Changes in chemical composition, antioxidant activity and dominant mi-

crobes during the wine production with *Rosa roxburghii* Tratt via natural fermentation[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 205−213.]

[58] 曾朝珍, 慕钰文, 袁晶, 等. 发酵方式对苹果草莓酒理化成分和抗氧化活性的影响研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(1): 212−218. [ZENG Chaozhen, MU Yuwen, YUAN Jing, et al. Effect of fermentation methods on physicochemical components and antioxidant activities of apple-strawberry wine[J]. China Brewing, 2025, 44(1): 212−218.]

[59] 王丹, 王智能, 董丽红, 等. 灭菌和贮藏温度对荔枝汁中多酚化合物组成、含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 275−280. [WANG Dan, WANG Zhineng, DONG Lihong, et al. Effect of sterilization and storage temperature on the composition, content and antioxidant activity of polyphenol compounds in lychee juice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 275−280.]

[60] 李根, 路遥, 马寅斐, 等. 热杀菌条件对 NFC 冬枣汁成分及抗氧化活性的影响研究[J]. 中国果菜, 2021, 41(3): 7−12. [LI Gen, LU Yao, MA Yinfei, et al. Effects of different heat sterilization conditions on the composition and antioxidant activity of NFC 'Dongzao' jujube juice[J]. China Fruit & Vegetable, 2021, 41(3): 7−12.]

[61] 马永昆. 热力、非热力处理对哈密瓜汁香气、酶和微生物的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2005. [MA Yongkun. Effects of thermal and nonthermal processing on aroma substances, enzymes and bacteria in Hami melon juice[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005.]

[62] 许文文, 曹霞敏, 刘凤霞, 等. 超高压处理的草莓果肉饮料在贮藏过程中的品质变化[J]. 高压物理学报, 2013, 27(1): 137−146. [XU Wenwen, CAO Xiamin, LIU Fengxia, et al. Quality changes of strawberry nectar processed by ultra high pressure during storage [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(1): 137−146.]

[63] WANG X R, ROGERS K M, LI Y, et al. Untargeted and targeted discrimination of honey collected by apis cerana and apis mellifera based on volatiles using HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(43): 12144−12152.

[64] ZHANG Yicai, LIN Qinbao, ZHONG Huaining, et al. Identification and source analysis of volatile flavor compounds in paper packaged yogurt by headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2022, 34: 100947.

[65] LI Juan, XU Yuxia, DU Wenbin, et al. Comparative analysis of aroma compounds in Chinese traditional dry-rendered fat by HS/GC-IMS, SPME/GC-MS, and SPME/GC-O[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 107: 104378.

[66] LI C, AL-DALALI S, WANG Z P, et al. Investigation of volatile flavor compounds and characterization of aroma-active compounds of water-boiled salted duck using GC-MS-O, GC-IMS, and E-nose[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132728.