

基于黄蟠汁加工的香气回补及风味复原研究

马欣宜^{1,2}, 赵瑞瑞^{1,2}, 赵敏^{1,2}, 李昊城^{1,2}, 魏莱^{1,2}, 王斌^{1,2*}, 史学伟^{1,2}

(1. 农业农村部特色农产品加工与质量安全控制重点实验室(部省共建), 石河子大学食品学院, 新疆石河子 832000)(2. 兵团食品营养与安全控制重点实验室, 新疆特色果蔬贮藏加工教育部工程研究中心, 石河子大学食品学院, 新疆石河子 832000)

摘要: 为解决新疆蟠桃加工产品因热加工导致的风味损失问题, 本研究基于特征风味指纹图谱探究不同杀菌方式对黄蟠桃汁风味物质的影响及特征风味重组技术。以黄蟠桃为原料, 采用巴氏杀菌(Pasteurization, PS)、高温短时杀菌(High-Temperature Short-Time Pasteurization, HTST)和超声波杀菌(Ultrasonic Sterilization, US)处理, 通过高效液相色谱、顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用及分子感官技术测定理化指标与风味物质。结果表明: 热杀菌导致可溶性固形物下降, 有机酸中奎宁酸显著上升、苹果酸在 HTST 组下降; 氨基酸总量在 PS 和 HTST 组增加, 在 US 组降低, 鲜味氨基酸占比最高。挥发性化合物总含量显著降低, 醇类在 PS、US 组增加, 醛类下降, 正己醇、己醛等关键香气物质减少, 1-辛烯-3-酮、 β -大马士酮等异味物质积累。超声波杀菌较热杀菌更利于保持天然风味, 基于特征香气指纹图谱回补关键香气物质后, 蟠桃汁蒸煮味(PS 组从 7.38 分降至 6.53 分, HTST 组从 6.29 分降至 5.57 分)、异味(PS 组从 5.41 分降至 4.89 分, HTST 组从 4.59 分降至 4.12 分)显著降低, 蟠桃汁典型香味恢复。本研究明确了不同杀菌方式对蟠桃汁风味物质的影响规律, 揭示了热加工风味损失的原因, 为蟠桃加工产品风味强化提供了理论依据和技术支撑。

关键词: 蟠桃; 特征风味重组; 蟠桃加工产品; 风味回补

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.6.0254

Study on Aroma Restoration and Flavor Reconstruction in Processed Yellow Flat Peach Juice

MA Xinyi^{1,2}, ZHAO Ruirui^{1,2}, ZHAO Min^{1,2}, LI Haocheng^{1,2}, WEI Lai^{1,2}, WANG Bin^{1,2*}, SHI Xuewei^{1,2}

(1.Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Quality Control of Specialty(Co-construction by Ministry and Province), School of Food Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China) (2.Key Laboratory for Food Nutrition and Safety Control of Xinjiang Production and Construction Corps, Engineering Research Center of Storage and Processing of Xinjiang Characteristic Fruits and Vegetables, Ministry of Education, School of Food Science and Technology Shihezi University, Shihezi 832000 China)

Abstract: To address flavor loss in Xinjiang flat peach processed products caused by thermal processing, the effects of different sterilization methods on flavor compounds in yellow flat peach juice were investigated, and characteristic flavor reconstruction technology based on flavor fingerprinting was explored. Yellow flat peaches were used as raw material, and pasteurization (PS), high-temperature short-time pasteurization (HTST), and ultrasonic sterilization (US) treatments were applied. Physicochemical indicators and flavor compounds were determined via High Performance Liquid Chromatography, Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS, and molecular sensory techniques. Results indicate that soluble solids are reduced by thermal sterilization, while quinic acid among organic acids is significantly increased. Malic acid was decreased in the HTST group. Total amino acids were increased in the PS and HTST groups, respectively, whereas a decrease was observed in the US group. Umami amino acids exhibited the highest proportion. Total volatile compounds were significantly reduced. Alcohols were increased in the PS and US groups, respectively, while aldehydes were decreased. Key aroma compounds such as n-hexanol and hexanal were diminished, and off-flavor compounds including 1-octen-3-one and β -damascenone were accumulated. Compared with thermal sterilization, ultrasonic sterilization was found to be more effective in preserving the natural flavor

收稿日期: 2026-02-15; 修回日期: 2026-06-20; 接受日期: 2026-06-22

基金项目: 一师科技计划项目(2024GX03); 国家自然科学基金项目(32260569); 国家大学生创新创业训练项目(202410759048)

作者简介: 马欣宜(2004-), 女, 本科, 研究方向: 食品工程, E-mail: 18866192693@163.com

通讯作者: 王斌(1985-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品科学, E-mail: binwang0228@shzu.edu.cn

profile. Following the reconstitution of key aroma compounds based on the characteristic aroma fingerprint, the cooked flavor (reduced from 7.38 to 6.53 in the PS group and from 6.29 to 5.57 in the HTST group) and off-flavor (reduced from 5.41 to 4.89 in the PS group and from 4.59 to 4.12 in the HTST group) were significantly diminished, and the typical flat peach aroma was restored. This study clarifies the impact patterns of different sterilization methods on the flavor compounds of flat peach juice, reveals the causes of flavor loss during thermal processing, and provides a theoretical basis and technical support for flavor enhancement in flat peach processed products..

Key words: flat peach; flavor profile reconstruction; flat peach processing products; flavor restoration

蟠桃 (*Amygdalus persica* L.) 属蔷薇目蔷薇科 (*Rosaceae*) 桃属 (*Amygdalus* L.) 植物桃的变种, 具有两千多年的栽培历史^[1], 原产于新疆, 是新疆特色果品资源, 果实鲜嫩多汁、果香四溢、清香浓郁, 深受广大消费者喜爱^[2]。目前, 新疆蟠桃种植面积约为 2 489 hm², 产量高达 44 112 t^[3]。其中, 八师石河子市已发展为新疆地区规模最大的蟠桃种植基地, 品种多样, 能满足早、中、晚成熟期需求。蟠桃产业已成为新疆林果产业经济发展重要支柱之一。

水果的香气是评价果实品质的重要特征之一, 也是其深加工产品的重要考量指标, 能够直接影响消费者的接受程度。不同类型的果实具有不同的特征香味, 香气化合物的不同比例与构成决定了水果的特有风味^[4]。蟠桃是香气化合物种类最丰富的水果之一, 成熟蟠桃果实中含有多种挥发性香气成分, 涵盖了醇类、醛类、酮类、内酯类、酯类、醚类、酚类、萜烯类和部分硫化物。不同品种果实的特征香气, 是吸引消费者并提升市场影响力的关键因素之一。

蟠桃是一种呼吸跃变型果实, 对低温具有较强的敏感性, 果实成熟伴随着呼吸跃变及明显的软化^[5], 在采摘运输中极易受到损伤以及微生物感染, 导致果实出现褐变、腐败变质的问题。因此, 鲜桃加工是延长其商品货架期、减少采后损失的有效方法。然而, 蟠桃属于热敏性水果, 在加工制汁过程中经预煮、浓缩、巴氏杀菌等工序均在不同程度上造成风味损失现象, 甚至产生令人不适的异味, 导致蟠桃鲜果原本自然呈现的香气轮廓失真, 严重影响相关系列产品的感官品质^[6]。其中杀菌程序是确保果汁安全性的重要环节, 也是造成果汁产生风味异化及关键风味物质损失质的关键操作单元, 而酯类化合物的变化是导致蟠桃鲜果和蟠桃汁等相关产品风味品质显著差异的重要原因^[7]。因此, 提升蟠桃汁的天然风味呈现能力, 并提高产品的市场满意度, 已成为果汁加工企业关注的重点问题^[8]。本研究基于蟠桃特征风味指纹图谱, 比较蟠桃原料 (以黄蟠桃为例) 及其产品 (蟠桃汁) 挥发性风味物质组成, 分析蟠桃系列产品加工过程中风味损失情况, 进而有针对性回补相应挥发性物质, 开发蟠桃产品风味强化技术。该策略基于特征风味指纹图谱, 具有推广至其他热敏性水果加工产品的潜力。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验原料

新鲜蟠桃样品采摘于新疆石河子市 143 蟠桃生产基地及伊犁商业果园 (图 1)。从果树的的不同位置 (上部、中部和下部) 采摘黄蟠桃果实, 选择具有同源性状的达到商业成熟度 (可溶性固形物, 12.00~16.00 °Brix) 的大小均匀和无病虫害的蟠桃果实。



图 1 黄蟠桃原料

Fig.1 Yellow flat peach raw material

1.1.2 主要试剂

酚酞 (AR), 天津市北方天医化学试剂厂; 果糖标品 (色谱纯), 上海源叶生物科技有限公司; 葡萄糖标品 (色谱纯), 上海源叶生物科技有限公司; 蔗糖标品 (色谱纯), 上海源叶生物科技有限公司; 山梨糖醇标品 (色谱纯), 上海源叶生物科技有限公司; 磷酸 (AR), 国药集团化学试剂有限公司; 甲醇 (色谱纯), 国药集团化学试剂有限公司; 乙腈 (色谱纯), 北京索莱宝科技有限公司; 硝酸钠 (AR), 国药集团化学试剂有限公司; 奎宁酸标品 (色谱纯), 北京索莱宝科技有限公司; 苹果酸标品 (色谱纯), 北京索莱宝科技有限公司; 柠檬酸标品 (色谱纯), 北京索莱宝科技有限公司; 琥珀酸标品 (色谱纯), 北京索莱宝科技有限公司; 氨基酸标品 (例如天冬氨酸, 苏氨酸, 丝氨酸等) 99.00%, 均来自于天津阿尔塔科技有限公司。

1.1.3 主要仪器与设备

Waters 2998 高效液相色谱仪, 美国 Waters 公司; BJPX-HGZ 鼓风干燥箱, 广东宏阔试验设备有限公司; LA8080 全自动氨基酸分析仪, 天津市兰博实验仪器设备有限公司; DIKMA-Spursil C18 (5 μm , 4.6 $\times$ 250 mm), 济南赛畅科学仪器有限公司; Atago PR-101R 糖度计, 山东天合环境科技有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 蟠桃汁制备

蟠桃汁的制备: 以黄蟠桃 (Yellow Flat Peach, YF) 为原料, 选取 3 kg 大小均匀、无机械损伤的新鲜果实, 用蒸馏水洗涤后浸泡于 1.00% 的 Vc 水溶液中以防止果汁褐变。榨汁和过滤后得到蟠桃果汁 (Yellow Flat Peach Juice, YFJ), 将其冷藏于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱中备用。

1.2.2 不同方式杀菌处理及过程取样

巴氏杀菌 (Pasteurization, PS): 称取 3 份 100 mL 蟠桃果汁置入不同无菌玻璃瓶中, 将其置于 85 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中加热, 杀菌完成时间为 30 min, 分别在 10 min (PS1)、20 min (PS2)、30 min (PS) 取出其中一份样品, 所有样品冷却至室温后置于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存备用^[9]。

高温短时杀菌 (High-Temperature Short-Time Pasteurization, HTST): 称取 3 份 100 mL 蟠桃果汁置入不同无菌玻璃瓶中, 将其置于 100 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中加热, 时间设置为 5 min, 分别在 2 min (HTST1)、4 min (HTST2)、5 min (HTST) 动态取样, 所有样品冷却至室温后置于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存备用^[10]。

超声波杀菌 (Ultrasonic Sterilization, US): 称取 3 份 100 mL 蟠桃鲜汁置入不同无菌玻璃瓶中, 将其放置于超声发生装置, 超声灭菌的条件设置为超声温度 25 $^{\circ}\text{C}$, 超声波频率 40 KHz, 超声功率 240 W, 分别在 5 min (US1)、10 min (US2)、15 min (US) 取出其中一份样品, 所有样品置于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存备用^[11]。

1.2.3 蟠桃汁基本理化指标测定

1.2.3.1 可溶性固形物 (Soluble Solids Content, SSC) 测定

将蟠桃整果进行去核和切片处理后, 捣碎, 用纱布过滤。用糖度计测定蟠桃汁可溶性固形物。试验重复三次。

1.2.3.2 可滴定酸测定

采用酸碱滴定法测定可滴定酸, 具体操作见参考文献^[12]并略微修改。蟠桃破碎取汁后吸取 5 mL 定容至 500 mL, 在锥形瓶中倒入 100 mL 该稀释液并用 0.1 mol L⁻¹ 的 NaOH 溶液进行滴定。将 pH 计探针置于液面下方, 观察到样品 pH 值达到 8.1 即完成滴定。可滴定酸以苹果酸的质量分数 (%) 表示, 重复测量三次。

1.2.4 蟠桃汁可溶性糖测定

表 1 可溶性糖的标准品曲线

Table 1 Standard concentration of soluble sugars

标品	线性回归方程	R ²
蔗糖	y=166 191.00x-845.66	0.998 6
葡萄糖	y=126 374.00x-1 065.7	0.996 0
果糖	y=147 212.00x-993.47	0.998 8
山梨糖醇	y=162 779.00x-111.38	0.999 4

参考 Liu 等^[13]方法并略作修改, 基于高效液相色谱仪 (配备示差检测器) 测定蟠桃汁可溶性糖含量。称取 1 mL 蟠桃汁样品, 用超纯水定容至 10 mL 并使其充分混匀。样品在 30 $^{\circ}\text{C}$ 下超声提取 30 min, 以 10 000r min⁻¹ 离

心 15 min, 取上清液重复离心, 合并上清液后用超纯水定容至 20 mL, 过 0.22 μm 有机膜。检测条件: 色谱柱使用 Xbridge Amide 氨基色谱柱 (3.5 μm , 250 $\times$ 4.6 mm); 柱温: 30 $^{\circ}\text{C}$; 流动相为乙腈和超纯水 (75:25, V/V); 流量: 0.80 mL min^{-1} ; 进样量: 20.00 μL 。根据糖的标准品, 以可溶性糖的质量浓度为横坐标 x , 以可溶性糖检测峰面积为 y , 进行标准曲线的制作 (标准曲线如表 1)。

1.2.5 蟠桃汁有机酸的测定

有机酸提取方法同 1.1.4。利用高效液相色谱仪 (配备二极管阵列检测器) 测定有机酸。条件如下: 色谱柱为 DIKMA-Spursil C18 柱 (5 μm , 4.6 $\times$ 250 mm); 柱温: 30 $^{\circ}\text{C}$; 流动相为 K_2HPO_4 溶液 (1.00 mmol L^{-1} , pH 值 2.6) 与甲醇 (水相:有机相=97:3); 流量: 0.80 mL min^{-1} , 进样量: 10.00 μL ; 于 210 nm 波长下进行检测。根据有机酸标准品, 以有机酸的质量浓度为横坐标 x , 以有机酸检测峰面积为 y , 绘制标准曲线 (标准曲线如表 2)。

表 2 有机酸的标准品曲线

Table 2 Standard concentration of organic acids

标品	线性回归方程	R^2
柠檬酸	$y=839\ 000.00x-4\ 330.00$	0.997 0
苹果酸	$y=395\ 000.00x-731.00$	0.998 7
琥珀酸	$y=307\ 000.00x-465.00$	0.998 2
奎宁酸	$y=204\ 000.00x-286.00$	0.999 1

1.2.6 蟠桃汁氨基酸的测定

蟠桃汁中氨基酸的检测根据 GB5009.124-2016 并稍做修改, 将 5 mL 蟠桃汁样品加入试管中, 并与 5.00 mL 的 6.00 mol L^{-1} 盐酸溶液均匀混合, 加入 2~3 滴苯酚, 使用氮吹仪氮吹 4~5 min, 将样品与水解管放入鼓风干燥箱, 设定参数为 110 $^{\circ}\text{C}$, 24 h, 水解后冷却至室温, 过滤水解液并用超纯水定容至 50 mL, 混合均匀, 取 1 mL 定容后的样品氮吹至水解管底部无液体, 加入 1~2 mL 柠檬酸钠缓冲溶液, 在 12 000 r min^{-1} 条件下离心 10 min, 取上清液过 0.22 μm 滤膜, 得到待测液。

检测条件: 采用阳离子交换色谱柱 (4.6 mm $\times$ 60 mm), 柱温: 57.00 $^{\circ}\text{C}$; 进样量: 20.00 μL ; 双通道紫外检测波长 440 nm 和 570 nm。氨基酸种类与含量通过外标法进行定性与定量分析。

1.2.7 蟠桃汁香气化合物的测定

1.2.7.1 顶空固相微萃取法 (Headspace Solid-Phase Microextraction, HS-SPME) 分析

采用 HS-SPME 法提取蟠桃汁中的挥发性成分。准确称取 5.00 g 蟠桃汁样品和 1.00 g NaCl 于 20 mL 顶空瓶中, 然后加入 2.00 μL 内标 3-辛醇溶液 (330.00 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。待测液于 45 $^{\circ}\text{C}$ 、300 r min^{-1} 条件下平衡 15 min, 随后将萃取头插入顶空瓶中, 缓缓推出萃取涂层, 萃取 45 min (45 $^{\circ}\text{C}$, 300 r min^{-1})。萃取完成后, 收回萃取涂层, 将萃取头插入 GC-MS 进样口进行 5 min 解吸。

1.2.7.2 气相色谱-质谱联用 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry, GC-MS) 检测

色谱条件: 选用 HP-Innowax 毛细管柱 (30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm) 进行挥发性化合物的分离。设置不分流进样模式, 以氦气 (纯度, 99.999%) 作为载气, 流速设为 1.00 mL min^{-1} , 进样口温度调整为 230 $^{\circ}\text{C}$ 。升温程序: 初始温度 40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 5 min; 随后以 4 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度升温至 86 $^{\circ}\text{C}$, 保持 5 min 后以 1.5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 90 $^{\circ}\text{C}$; 再以 4 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 180 $^{\circ}\text{C}$, 保持 3 min; 最后以 10 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升至 230 $^{\circ}\text{C}$ 保留 5 min。

质谱条件: 采用电子轰击电离模式, 电离源温度设定为 270 $^{\circ}\text{C}$, 能量设为 70 eV, 设置质谱扫描范围为 35 到 350 m/z , 扫描速度 5 s/次, 在此条件下获得总离子色谱图 (Total Ion Chromatogram, TIC)。

1.2.8 特征香气物质回补试验

基于蟠桃特征香气物质的鉴定及 GC-MS 检测蟠桃汁中的挥发性香气成分, 对比分析蟠桃果实与不同杀菌方式处理果汁的关键香气化合物的种类与含量, 将 16 种关键香气化合物依据前期定量的实际浓度添加到不同杀菌处理的蟠桃汁中, 制备更类似于天然水果风味的蟠桃汁。以蟠桃特征风味重组分析中确定的 6 种风味属性词 (果香味、青香味、花香味、桃香味、奶香味和甜香味) 及杀菌产生的蒸煮味、异味为评价依据, 依照以下方法评估杀菌后的蟠桃汁风味属性, 并对添加特征香气物质的蟠桃汁进行感官评估。

通过定量描述性感官分析 (Quantitative Descriptive Analysis, QDA) 对蟠桃样品的香气特征进行了评估。招募石河子大学食品学院 15 名教师和研究生 (男 7 名, 女 8 名, 年龄 21~35 岁) 作为品尝员, 组成感官评定小组。

感官小组的所有成员在进行试验之前均接受了蟠桃香气感官训练。首先,组织感官评价人员充分熟悉蟠桃鲜果的香气特征,并使用香气属性词库的术语进行描述,随后,选取不同浓度的香气物质标准品系统化培训,直至所有感官小组成员能够准确辨识出标准品^[14]。通过几次感官评估会议(至少三次)分析蟠桃的香气特征,直到所有小组成员就香气描述达成共识。选取果香、青香、花香、桃香、奶香和甜香 6 个感官属性为蟠桃鲜香气的评价指标。六种属性被定义为以下试剂香气参考:乙酸乙酯用于“果香”属性,芳樟醇用于“花香”属性, δ -癸内酯用于“桃样”属性,2-乙基呋喃用于“甜味”属性,2-己烯醛用于“青香味”属性。最后,采用 0~10 分的等级对蟠桃果实的香气属性强度进行打分(0=不可感知,1=弱,5=显著,9=极强)以随机顺序评价用 3 位数标签编码的蟠桃样品。每份样品重复三次

1.2.9 数据分析

所有试验均重复 3 次,结果以平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)表示。使用 Excel 2013 及 SPSS 19.0 软件进行数据处理及分析,采用软件 Origin 2022 绘制感官雷达图、TBtools 1.068 绘制花瓣图、聚类热图。通过邓肯检验($P<0.05$)来衡量差异显著性。

2 结果与讨论

2.1 不同杀菌方式处理蟠桃汁感官分析

经不同杀菌处理的蟠桃汁风味轮廓感官评价如图 2 所示,相较于新鲜蟠桃汁,经过杀菌处理的蟠桃汁整体香气属性明显减弱,并产生强烈的蒸煮味(PS 组评分 7.38、HTST 组评分 6.29、US 组评分 0.75)以及令人不愉快的异味(PS 组评分 5.41、HTST 组评分 4.59、US 组评分 4.15)。研究表明,1-辛烯-3-酮是浓缩桃汁中“蒸煮”属性的主要贡献者,该气味物质由亚麻酸代谢产生^[15]。此外,蟠桃中富含各种热敏性成分,热处理会导致香气化合物的变化,从而产生蒸煮的、含硫的或发酵的异味^[16],据报道,经过热处理的果汁中糖、氨基酸、脂类等物质发生非酶反应,形成较为突出的蒸煮味^[17]。由图可知,与非热杀菌方式相比,经 PS、HTST 杀菌处理的蟠桃汁蒸煮味更加明显,表明热杀菌时间和温度对蟠桃汁蒸煮味的形成有重要影响。异味属性是影响果汁质量的重要指标之一,蟠桃汁经不同杀菌处理后,异味均显著增强且热杀菌处理的样品具有更高的感知强度,该异味来源于多个形成途径,如美拉德反应、Strecker 降解和脂质氧化,导致碳水化合物、氨基酸和脂质的降解,使热加工果汁产品的感官质量与新鲜水果的感官质量大不相同^[18]。与新鲜果汁相比,不同杀菌方式处理的蟠桃汁青香属性强度均明显下降且差异较大,US 杀菌比 PS、HTST 杀菌的果汁青香味保持更好,表明热杀菌导致 C6 醛类和醛类物质发生变化,使得蟠桃汁青香味减弱或被其他气味掩盖。经过热杀菌的蟠桃汁甜香属性明显增强,可能是高温条件下一系列复杂的反应导致表征调香属性化合物的产生。研究表明,羰基化合物可与氨基酸或糖降解产物在高温下反应生成含氮杂环化合物、呋喃和其他化合物^[19]。蟠桃鲜汁在其他几种香气属性的得分值均高于处理组,从整体上来看,杀菌处理对蟠桃汁的风味轮廓有重要影响,且非热杀菌处理的果汁与鲜汁表现出更为相似的感官属性,能够更好的保持果汁的天然特征风味。

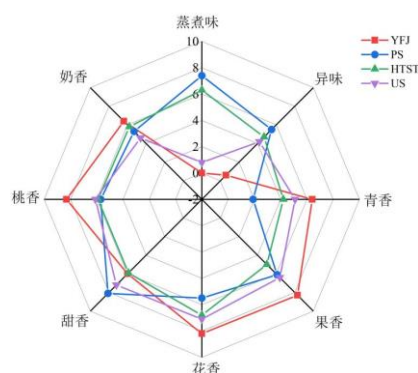


图 2 不同杀菌处理的蟠桃汁风味轮廓图

Fig.2 Flavor profile diagram of peach juice with different sterilization treatments

2.2 不同杀菌方式对蟠桃汁非挥发性风味物质的影响

2.2.1 基础理化

果汁的糖度和酸度能够直接影响其风味和感官特性。如图 3 所示，与未处理组相比，经热杀菌处理的蟠桃汁 SSC 含量均有所下降，尤其是 HTST 处理组显著降低，其原因可能是热杀菌处理在高温下引起果汁还原糖的焦糖化、美拉德等非酶褐变反应导致 TSS 含量降低，而 US 处理组的果汁 SSC 含量并无显著变化，SSC 含量的任何轻微变化都可能与空化过程中果糖细胞间成分的超声分解有关^[20]。HTST 杀菌处理导致果汁 TA 含量升高，而 US 和 PS 杀菌处理对桃汁的 TA 含量无显著影响，这可能是高温处理导致果汁的细胞结构被破坏，大量有机酸流出。TA 含量的变化可能与果汁超声分解过程中释放的酚类化合物和其他生化化合物的水平有关。早在 Oliveiral 等^[21]的研究中就已指出，杀菌处理对果汁 pH 值的影响有限，本研究中不同杀菌方式下桃汁 pH 值稳定在 4.00 左右，进一步印证了杀菌过程中 pH 值的稳定性特征。总体来看，经 US 杀菌处理的蟠桃汁 SSC、TA 和 pH 与对照组相比均无显著性变化，表明超声波处理后蟠桃汁的理化性质稳定，风味和口感保持较好。TSS 是可溶性糖的反映。因此，观察到的任何轻微变化都可能与空化过程中果糖细胞间成分的超声分解有关。在 TA 中观察到的边际变化可能与果汁超声分解过程中释放的酚类化合物和其他生化化合物的水平有关。

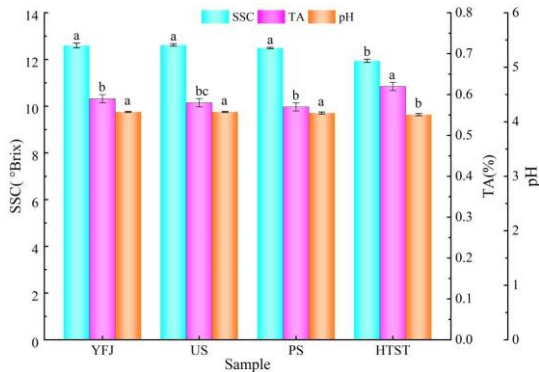


图 3 不同杀菌处理蟠桃汁的 SSC、TA 和 pH

Fig.3 SSC, TA and pH of flat peach juice treated with different sterilization methods

注：不同小写字母表示组间差异显著 ($P<0.05$)，相同字母表示组间无显著差异。每组从左到右三个柱子分别代表 SSC、TA、pH。

2.2.2 可溶性糖和有机酸

水果中糖分组成和含量与果实的风味密切相关，对果实加工产品的整体口感起着至关重要的作用。因此，比较分析了不同杀菌处理的蟠桃汁中可溶性糖的变化，如图 4 所示，蔗糖、葡萄糖、果糖与山梨糖醇是蟠桃汁样品中主要的可溶性糖。蔗糖的含量最高，其次是果糖和葡萄糖，占总糖含量的 90.00%以上。

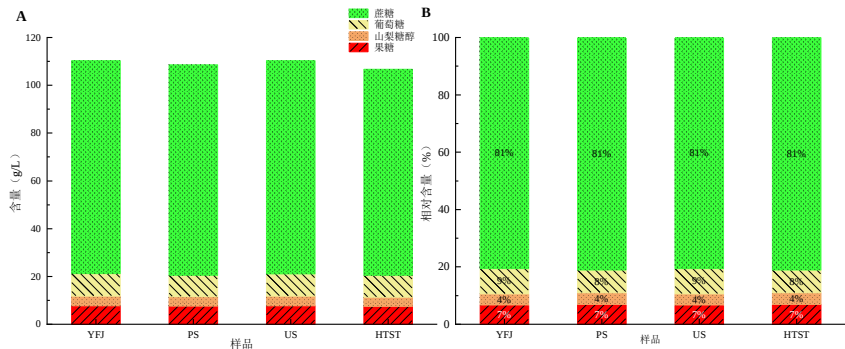


图 4 不同杀菌处理蟠桃汁的可溶性糖含量

Fig.4 Soluble sugar content of flat peach juice with different sterilization treatments

热杀菌处理后，蟠桃汁的果糖和葡萄糖含量显著降低，而 US 杀菌处理对蟠桃汁的糖浓度没有影响。PS 和 HTST 处理组蔗糖、果糖和葡萄糖含量的降低可能与加热引发的美拉德反应有关^[22]。总体而言，热杀菌处理导致蟠桃汁中总糖含量分别下降 1.73%和 3.59%，这可能是由于在热杀菌过程中相关糖代谢酶活性增强，蔗糖在酶催化下裂解生成葡萄糖和果糖，但生成的单糖进一步参与了美拉德反应等非酶褐变反应，导致总糖含量净减少。US 处理组的果汁总糖含量与对照组相比无明显变化，表明该杀菌方式不会改变蟠桃汁的甜味特性。

有机酸不仅能对细胞代谢产生影响,还对果汁最终的风味和口感形成有着积极的影响。李佳秀等^[23]通过对不同品种桃汁的检测,明确了苹果酸和奎宁酸在桃汁有机酸中的主导地位,本研究在蟠桃汁中共检测出 4 种主要的有机酸,包括苹果酸、奎宁酸、琥珀酸和柠檬酸,其中苹果酸和奎宁酸是最主要的有机酸,分别占总有机酸的 42.65%~49.44%和 26.75%~34.89%,柠檬酸含量最少(图 5),凸显了桃汁有机酸组成的共性特征。同时也表明果实的有机酸组成是决定果汁组分的重要因素。由图可知,热杀菌处理导致蟠桃汁的苹果酸含量降低,且在 HTST 杀菌处理过程中,苹果酸含量在高温加热 2 min 后显著增加,随后在 1 min 后显著下降,可能是高温使得苹果酸的降解反应加快,总体上比对照组降低了 6.79%。Choo 等^[24]在诺丽果汁杀菌研究中发现,高温会导致苹果酸含量下降,本研究中 HTST 杀菌处理使蟠桃汁苹果酸较对照组的降低,反映了高温对苹果酸稳定性的影响具有普遍性。苹果酸含量在 PS 杀菌处理过程中也表现出相似的变化趋势,在加热后含量显著上升,杀菌 20 min 后下降。奎宁酸在 PS、HTST 和 US 三种杀菌方式处理后均呈现显著上升的趋势,分别提高了 10.57%、4.68%和 3.83%,奎宁酸的苦味和涩味对蟠桃汁风味品质与感官特征造成一定程度的影响^[25]。与其他杀菌方式相比,PS 杀菌能够显著提高桃汁中奎宁酸的水平,使得其风味品质与蟠桃鲜汁差异较大。琥珀酸也是蟠桃汁中重要的有机酸,其含量在不同杀菌方式处理后均有所提高,且在杀菌过程中呈现缓慢增长的趋势。US 处理组的桃汁琥珀酸含量显著增多,与未处理组相比提高了 1.36%。柠檬酸的含量在杀菌处理后均有所降低,且三个处理组之间差异性不大,桃汁中柠檬酸水平的减少可能是由于在自身酶解的作用下生成草酰乙酸和乙酰辅酶 A,进而生成黄酮类物质。US 杀菌导致果汁中有机酸的总含量显著升高,改变化归因于空化过程中羟基自由基的形成^[26]。

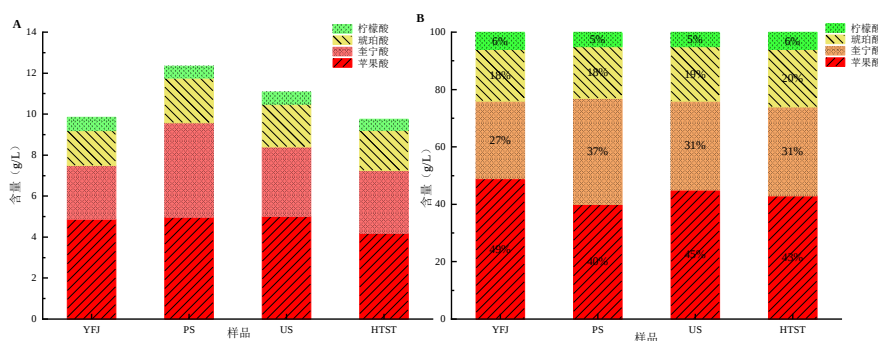


图 5 不同杀菌处理蟠桃汁的有机酸含量 (A) 和相对百分比 (B)

Fig.5 The organic acid content (A) and relative percentage (B) of flat peach juice with different sterilization treatments

总体来说,相较于热杀菌处理组,经超声波处理的蟠桃汁可溶性糖和有机酸含量与鲜汁的差异性更小,说明超声波处理后果汁的理化性质稳定,能更好地保持蟠桃汁天然的感官品质,降低热不稳定性造成关键风味物质损失的风险。

2.2.3 氨基酸

游离氨基酸是水果中重要的生物活性成分,对果实的风味、口感及营养价值均具有显著影响。在本研究中,基于氨基酸全自动分析仪对不同杀菌处理的蟠桃汁中氨基酸的组成和分布进行表征。共检测出 17 种氨基酸(表 3),其中,天冬氨酸的含量(8.85 g kg^{-1})远远高于其他氨基酸,有研究表明,天冬氨酸是桃果中最丰富的氨基酸,该氨基酸的积累可能归因于果实发育早期其合成量增加成熟期天冬氨酸催化剂的减少^[27]。此外,谷氨酸(0.65 g kg^{-1})、丝氨酸(0.42 g kg^{-1})、脯氨酸(0.38 g kg^{-1})和丙氨酸(0.37 g kg^{-1})的含量也相对较高。杀菌处理的蟠桃汁氨基酸总量在 $11.05 \sim 14.46 \text{ g kg}^{-1}$ 之间。热杀菌处理后,除组氨酸外的其他氨基酸含量均显著上升,由此可能对果汁的风味产生影响。在 PS 处理过程中,随着杀菌时间的增加,氨基酸的含量呈现显著上升的趋势,与鲜汁相比,PS 杀菌处理后氨基酸总含量增加了 2.52 g kg^{-1} 。而通过 HTST 杀菌处理时,丙氨酸、缬氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸和精氨酸在高温加热 2 min 时含量显著上升,随后又呈现下降趋势,在 4 min 后又显著增加。热杀菌果汁种氨基酸总量增加,其原因可能是加热促进蛋白质的水解作用,使蛋白质水解成为氨基酸单体^[28]。US 处理导致果汁的总氨基酸含量降低,而丙氨酸、蛋氨酸、精氨酸和脯氨酸含量有所增加,可能是超声对细胞的破碎作用致使胞内酶的溶出,使蛋白质降解为短肽或氨基酸^[29]。在蟠桃鲜汁中检测到见低水平的组氨酸(0.09 g kg^{-1})和酪氨酸(0.05 g kg^{-1}),而经过 PS 和 US 杀菌处理的桃汁中未检测到这两种氨基酸,表明杀菌方式对果汁氨基酸的组成有

影响。值得注意的是, 蟠桃鲜汁中未检测到苏氨酸和半胱氨酸, 而在 HTST、US 杀菌处理过程中检测到苏氨酸, 在 PS、US 杀菌处理过程中检测到半胱氨酸。氨基酸可作为底物参与美拉德反应与氨基酸代谢, 这些结果表明, 杀菌处理对沙蟠桃汁的氨基酸有显著影响, 并有可能作为香气前体物质参与香气合成。

根据氨基酸的呈味特性, 将检 17 种氨基酸分为甜味氨基酸(苏氨酸、甘氨酸、丙氨酸、丝氨酸、脯氨酸、组氨酸), 苦味氨基酸(异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、精氨酸)、鲜味氨基酸(天冬氨酸、谷氨酸、赖氨酸)和芳香类氨基酸(苯丙氨酸、酪氨酸、半胱氨酸)。由图 6 可知, 鲜味氨基酸的质量分数占比最大, 达到 78.63%~81.32%, 其次是甜味氨基酸(12.90%~14.30%), 尽管 US 杀菌处理后氨基酸含量降低, 但甜味氨基酸和鲜味氨基酸在样品中所占比例较大, 可能对果汁优良风味的保持具有积极作用。

氨基酸对果汁风味的作用还与滋味感知阈值有关, 通常采用味觉活度值(Taste activity values, TAV)来评价各种氨基酸对水果风味的影响, TAV 为滋味物质含量与该滋味物质阈值的比值, 一般当 TAV>1 时, 则认为该氨基酸对果实风味有重要贡献。如表 4 所示。共 3 种氨基酸的 TAV 在样品组中大于 1, 包括天冬氨酸、谷氨酸和组氨酸。有研究报道, 天冬氨酸和谷氨酸有助于茶和蘑菇等食物的鲜味形成^[30], 天冬氨酸和谷氨酸在蟠桃鲜汁和处理样品组的 TAV 均大于 1。由于风味成分之间复杂的协同作用和拮抗作用, 需研究其对桃鲜味的贡献程度。有研究使用高温酸解法评估了早熟和中熟桃品种的氨基酸含量, 结果发现, 谷氨酸含量为 75.50~1 262.70 μg·g⁻¹ FW, 而天冬氨酸含量为 LOD-1 674.70 μg·g⁻¹ FW。与本研究蟠桃汁的结果相比, 发现具有“鲜味”的谷氨酸水平明显更高, 而天冬氨酸的含量较低。经 PS 杀菌处理, 5 种甜味氨基酸和所有苦味氨基酸的水平明显低于其阈值, 因此, 可能对桃的风味不会产生实质性的影响。

表 3 不同杀菌处理过程中氨基酸含量

Table 3 Amino acid content in different sterilization process

氨基酸(g kg-1)	YFJ	PS1	PS2	PS	US1	US2	HTST1	HTST2	HTST
天冬氨酸	8.85±0.23 ^e	8.80±0.23 ^e	8.99±0.24 ^{de}	10.56±0.28 ^b	9.39±0.25 ^{cd}	11.04±0.29 ^a	8.82±0.23 ^e	9.32±0.25 ^{cd}	9.47±0.25 ^c
苏氨酸	0	0	0	0	0.60±0.16 ^a	0	0	0.54±0.01 ^b	0
丝氨酸	0.42±0.01 ^f	0.59±0.02 ^b	0.59±0.02 ^b	0.10±0.00 ^a	0.50±0.01 ^d	0.50±0.01 ^d	0.46±0.01 ^e	0.54±0.01 ^c	0.52±0.01 ^{cd}
谷氨酸	0.65±0.02 ^e	0.69±0.02 ^d	0.74±0.02 ^{bc}	0.80±0.02 ^a	0.69±0.02 ^d	0.77±0.02 ^{ab}	0.69±0.02 ^d	0.72±0.02 ^{cd}	0.79±0.02 ^a
甘氨酸	0.28±0.01 ^f	0.29±0.01 ^{ef}	0.34±0.01 ^c	0.38±0.01 ^a	0.32±0.01 ^d	0.36±0.01 ^b	0.30±0.01 ^e	0.30±0.01 ^e	0.35±0.01 ^{bc}
丙氨酸	0.37±0.01 ^{de}	0.36±0.01 ^e	0.42±0.01 ^c	0.51±0.01 ^a	0.38±0.01 ^d	0.47±0.01 ^b	0.42±0.01 ^c	0.33±0.01 ^f	0.47±0.01 ^b
半胱氨酸	0	0	0.03±0.001 ^a	0	0.03±0.00 ^a	0	0	0	0
缬氨酸	0.13±0.00 ^c	0.12±0.00 ^d	0.13±0.00 ^c	0.14±0.00 ^b	0.13±0.00 ^c	0.14±0.00 ^b	0.14±0.00 ^b	0.10±0.00 ^f	0.16±0.00 ^a
蛋氨酸	0.02±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b	0.03±0.00 ^a	0.03±0.001 ^a	0.02±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b	0.01±0.00 ^c	0.02±0.00 ^b	0.03±0.00 ^a
异亮氨酸	0.04±0.00 ^d	0.04±0.00 ^d	0.05±0.00 ^c	0.06±0.00 ^b	0.05±0.00 ^c	0.04±0.00 ^d	0.06±0.00 ^b	0.04±0.00 ^d	0.07±0.00 ^a
亮氨酸	0.19±0.01 ^f	0.18±0.01 ^g	0.21±0.01 ^d	0.22±0.01 ^c	0.19±0.01 ^f	0.20±0.01 ^e	0.23±0.01 ^b	0.19±0.01 ^g	0.27±0.01 ^a
酪氨酸	0.05±0.00 ^b	0	0	0	0	0	0.05±0.00 ^b	0	0.07±0.00 ^a
苯丙氨酸	0.13±0.00 ^g	0.14±0.00 ^d	0.15±0.00 ^d	0.17±0.00 ^c	0.14±0.00 ^e	0.17±0.01 ^f	0.16±0.00 ^b	0.15±0.00 ^b	0.18±0.01 ^a
赖氨酸	0.21±0.01 ^{ef}	0.19±0.01 ^g	0.26±0.01 ^c	0.28±0.01 ^b	0.22±0.01 ^e	0.24±0.01 ^d	0.26±0.01 ^c	0.20±0.01 ^{fg}	0.30±0.01 ^a
组氨酸	0.09±0.00 ^e	0.45±0.01 ^b	0.51±0.01 ^a	0.51±0.01 ^a	0	0	0.10±0.00 ^d	0	0.12±0.00 ^c
精氨酸	0.13±0.00 ^e	0.14±0.00 ^d	0.15±0.00 ^c	0.17±0.00 ^a	0.16±0.00 ^b	0.17±0.01 ^a	0.16±0.00 ^b	0.14±0.00 ^d	0.17±0.01 ^a
脯氨酸	0.38±0.01 ^e	0.47±0.01 ^{bc}	0.49±0.01 ^{ab}	0.51±0.01 ^a	0.49±0.01 ^{ab}	0.49±0.01 ^{ab}	0.40±0.01 ^{de}	0.48±0.01 ^{bc}	0.46±0.01 ^c

注: 不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05), 相同字母表示组间无显著差异。

表 4 不同杀菌处理过程中氨基酸滋味活性值

Table 4 Amino acid flavor activity values in different sterilization processes

	阈值/(g L ⁻¹) ^[31]	YFJ	PS1	PS2	PS	US1	US2	US	HTST1	HTST2	HTST
天冬氨酸	1.00	8.85	8.80	8.99	10.56	9.39	11.04	8.13	8.82	9.32	9.47
苏氨酸	2.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23	0.00	0.00	0.00	0.21	0.00
丝氨酸	1.50	0.28	0.39	0.39	0.42	0.33	0.33	0.27	0.31	0.36	0.35

	阈值/(g L ⁻¹) ^[31]	YFJ	PS1	PS2	PS	US1	US2	US	HTST1	HTST2	HTST
谷氨酸	0.30	2.17	2.30	2.47	2.67	2.30	.57	2.13	2.30	2.40	2.63
甘氨酸	1.10	0.25	0.26	0.31	0.35	0.29	0.33	0.25	0.27	0.27	0.32
丙氨酸	0.60	0.62	0.60	0.70	0.85	0.63	0.78	0.63	0.70	0.55	0.78
半胱氨酸	Nd	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
缬氨酸	1.50	0.09	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.07	0.09	0.07	0.11
蛋氨酸	0.30	0.07	0.07	0.10	0.10	0.07	0.07	0.10	0.03	0.07	0.10
异亮氨酸	0.90	0.04	0.04	0.06	0.07	0.06	0.04	0.03	0.07	0.04	0.08
亮氨酸	1.90	0.10	0.09	0.11	0.12	0.10	0.11	0.08	0.12	0.09	0.14
酪氨酸	2.60	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03
苯丙氨酸	1.50	0.09	0.09	0.10	0.11	0.09	0.11	0.08	0.11	0.10	0.12
赖氨酸	0.50	0.42	0.38	0.52	0.56	0.44	0.48	0.38	0.52	0.40	0.60
组氨酸	0.20	0.45	2.25	2.55	2.55	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00	0.60
精氨酸	1.00	0.13	0.14	0.15	0.17	0.16	0.17	0.15	0.16	0.14	0.17
脯氨酸	3.00	0.13	0.16	0.16	0.17	0.16	0.16	0.14	0.13	0.16	0.15

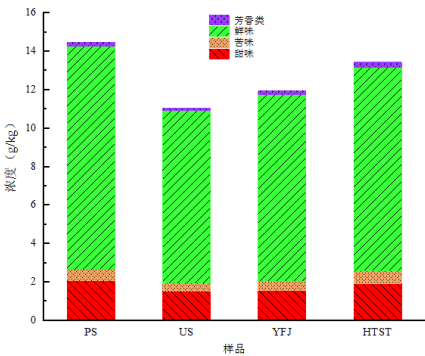


图 6 不同杀菌处理蟠桃汁呈味氨基酸的含量

Fig.6 The content of flavor amino acids in flat peach juice with different sterilization treatments

2.3 不同杀菌方式对蟠桃汁挥发性风味物质的影响

采用 GC-MS 对蟠桃汁杀菌过程中的挥发性香气化合物进行动态监测，以探究不同杀菌方式对蟠桃汁挥发性物质的影响，明晰关键香气组分的演替规律。在不同样品中共检测到 83 种香气化合物，如图 7 所示，不同杀菌方式对各类挥发性物质的影响存在差异：醇类、醛类、酯类在三种杀菌处理后均显著下降；酮类在三种杀菌处理后均显著上升；内酯类在 PS 和 HTST 杀菌处理后均下降，在 US 杀菌处理后上升；萜烯类在三种杀菌处理后均下降。在蟠桃鲜汁、PS 处理组、US 处理组和 HTST 处理组分别检测到 45、51、60 和 47 种香气物质，其中，19 种化合物为四个组别中所共有的，而四组中所独有的物质分别为 10 个、9 个、11 个与 4 个（图 8B），结果表明，US 杀菌能够保留更多的香气成分。值得注意的是，US 组检测到的挥发性化合物总数（60 种）高于 PS 组（51 种）和 HTST 组（47 种），但更重要的是，US 组中关键香气物质（如图 10 所示的芳樟醇、乙酸己酯、β-紫罗兰酮等）的含量更接近鲜汁水平，而 PS 和 HTST 组中异味物质（1-辛烯-3-酮、β-大马士酮、α-松油醇）积累更为显著。因此，US 杀菌的优势不仅体现在保留更多种类的香气成分，更体现在对特征呈香组分的“质量”保留上。

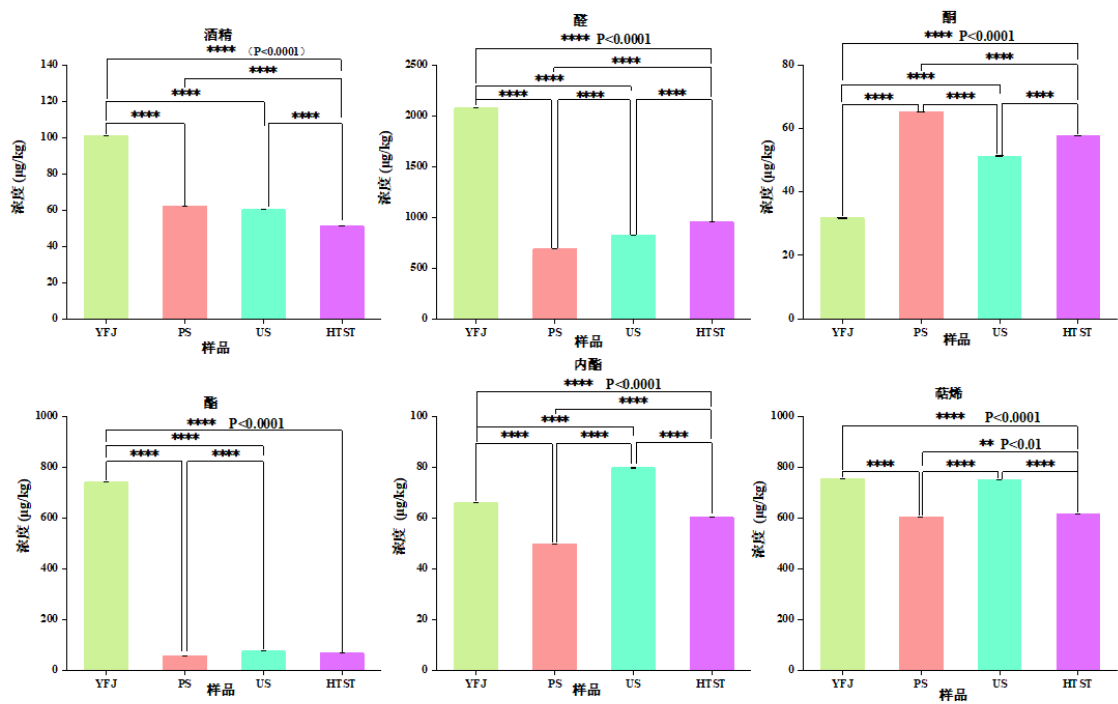


图 7 不同杀菌处理蟠桃汁的挥发性化合物含量变化

Fig.7 The volatile compounds content of flat peach juice with different sterilization treatments

注：柱形图之间的连接线与星号代表组间差异显著性 (** $P<0.01$, **** $P<0.0001$)。

由图 8A 可知，不同杀菌方式处理的蟠桃汁在挥发性物质种类上表现出显著差异，在 PS 和 US 杀菌处理后醇类物质分别增加了 1 种和 4 种，而醛类和酮类的数量在三种处理方式下均显著增加，酸的种类减少。US 杀菌增加酯类种类，但热杀菌后数量减少。这可能是由于超声的空化效应导致可溶性糖的水解酶被释放，进而促进果汁中键合态化合物转化为游离态芳香化合物^[32]。在所有挥发性化合物中，醛类的占比最高（42.28%~54.49%），其次是萜烯类（19.77%~41.50%）和酯类（3.31%~19.6%）。经不同杀菌处理后，醇类物质在 PS 处理组和 US 处理组中分别增加了 1.38%和 0.71%，而在 HTST 处理组降低了 0.21%，醛类在三个处理组中下降率均超过 9.00%，C6 醇和醛类化合物含量的降低可能是导致蟠桃汁青香味下降的原因。

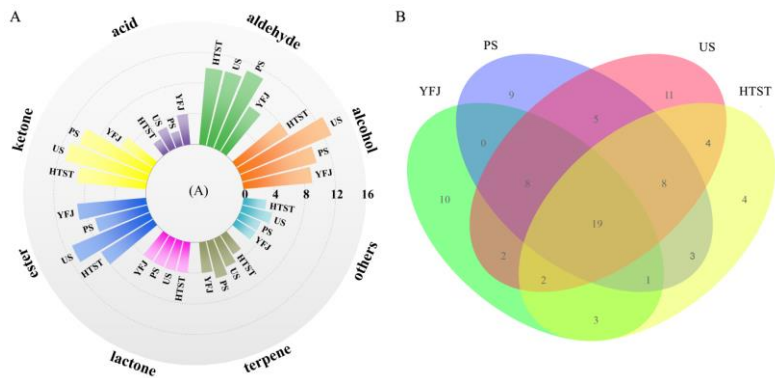


图 8 不同杀菌处理蟠桃汁的挥发性化合物种类 (A) 和花瓣图 (B)

Fig.8 The volatile compounds species (A) and petal diagram (B) of flat peach juice with different sterilization treatments

注：aldehyde, 醛类; ketone, 酮类; alcohol, 醇类; lactone, 内酯类; ester, 酯类; terpene, 萜烯类; acid, 酸。

通过聚类热图对杀菌过程中的香气成分变化规律进行可视化分析（图 9），杀菌处理能显著降低酯类和醛类物质的含量，在 PS 杀菌处理过程中，大部分酯类化合物呈先下降后上升的趋势，而 HTST 处理组随着杀菌时间的增长，酯类物质含量显著下降。灭菌过程中出现了一些新的酯类化合物，如乙酸 3-甲基戊酯、异丁酸叶醇酯、苯甲酸乙酯、2-甲基戊酸甲酯和邻苯二甲酸二异丁酯等，上述化合物在对照组中未检测到。这些风味组分的增加可

能是风味前体物质被热激活或风味化合物从细胞质膜释放的结果。此外,也可能是由于热处理增强了芳香化合物和大分子之间的疏水作用^[33]。US 处理组蟠桃汁中酯类水平的下降可能是由于气泡内部的极端物理条件在微观层面的空化坍塌与 PS 和 HTST 处理组相比,US 杀菌处理对蟠桃汁中挥发性化合物的保持最好,表明 US 杀菌比其他杀菌方法更能保持蟠桃汁的风味。醛类物质是果汁香气的重要来源,不饱和脂肪酸的氧化降解是醛类形成的主要原因^[34]。与蟠桃鲜汁相比,杀菌显著降低了正己醛的含量,且在杀菌处理的桃汁样品中未检测到 2-己烯醛,此外,PS 和 US 处理组果汁中出现壬醛和 2-辛烯醛,表明可能涉及自动氧化和酶促氧化^[35]。醇类化合物的气味活性值通常较低,并且能够以糖苷结合的形式在水果中以低浓度存在^[36]。正己醇 ($48.84 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、叶醇 ($10.88 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)、2-乙基己醇 ($5.91 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 和二氢- β -紫罗兰醇 ($3.96 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 是蟠桃汁鲜汁中含量最丰富的醇类,杀菌处理导致其含量显著减低。与对照组相比,PS 和 US 处理组果汁中醇类化合物含量提高了 1.38% 和 0.59%,而 HTST 处理组降低了 0.16%。萜烯类化合物是蟠桃汁的特征呈香组分,芳樟醇是蟠桃汁中最丰富的萜烯类物质,热杀菌处理后芳樟醇含量显著降低,而 US 处理组果汁仅降了 $7.09 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。芳樟醇在贮存时可降解为 α -松油醇、橙花醇和香叶醇^[37]。因此,杀菌处理后 α -松油醇含量的增加可能是由芳樟醇形成的,而 α -松油醇通常会赋予果汁松木味,导致蟠桃汁风味异化,有报道表明 α -松油醇是造成柑橘汁不良风味的主要异味物质^[38]。杀菌桃汁中酮类物质的种类和含量明显增加,热杀菌产生的 1-辛烯-3-酮和 β -大马士酮被鉴定为果汁中的主要异味物质,在蟠桃汁加工过程中产生强烈蒸煮味^[39]。1-辛烯-3-酮主要由亚麻酸通过脂氧合酶途径氧化降解生成^[40],而 β -大马士酮是类胡萝卜素在 C13-降异戊二烯代谢途径中的降解产物,其前体可由糖苷键合形式释放^[41]。热加工可能激活这些代谢途径或促进前体物质释放,导致异味物质积累。

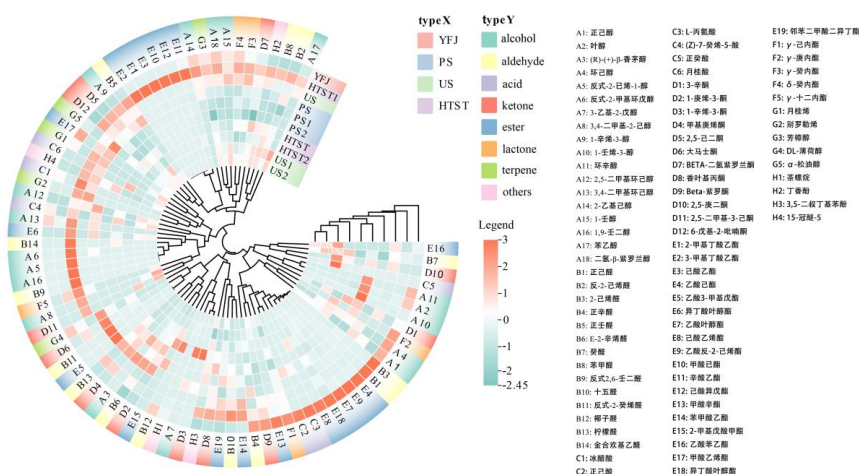


图9 不同杀菌处理过程中挥发性组分含量变化热图

Fig.9 Heat map of volatile component content changes during different sterilization processes

注: aldehyde, 醛类; ketone, 酮类; alcohol, 醇类; lactone, 内酯类; ester, 酯类; terpene, 萜烯类; acid, 酸。

PS、US 及 HTST 杀菌处理后,蟠桃汁中 16 种关键香气物质及 3 种主要的异味物质在不同杀菌时间的含量变化如图 10 所示。由图可知,正己醇含量在高温加热过程中急剧降低,在加热后期又有所回升,正己醛含量在三种杀菌方式下均呈现显著下降的趋势,在 HTST 处理组,正己醛在高温条件下急剧下降,在杀菌 10 min 后缓慢增加,而在 PS 组其含量随加热时间持续降低。在三种杀菌果汁中均未检测到 2-己烯醛,因此可被用作区分不同加工方法的生物标志物。癸醛含量在 PS 和 US 处理组随杀菌时间先增加,而后又缓慢下降。苯甲醛在 PS 组随杀菌时间显著增加,而在 US 和 HTST 处理组呈急剧上升后下降的趋势,瞬时高温条件可能导致蟠桃汁中相关的酶被释放并激活。蟠桃汁经杀菌处理后,其上述香气成分的改变使其绿色清新气味明显减弱。与 US 杀菌处理的果汁相比, β -紫罗兰酮含量在热杀菌过程中显著降低。 β -紫罗兰酮是由类胡萝卜素在甲基赤藓糖醇 4-磷酸途径中,通过双加氧酶的作用合成的。这一过程类似于萜烯合成代谢的类异戊二烯代谢途径^[42]。 β -二氢紫罗兰酮含量在杀菌过程中逐渐增加,导致杀菌汁中甜香味增强。乙酸己酯、乙酸叶醇酯和反-2-乙酸己烯酯是蟠桃汁中重要的果香、青香型化合物,三种杀菌方式处理导致其含量显著降低。上述酯类物质的损失可能导致蟠桃汁较弱的青香和果香属性。此外,1-辛烯-3-酮、 β -大马士酮和 α -松油醇是蟠桃汁热杀菌的产物,赋予蟠桃汁蒸煮味以及令人不愉快的气味。

据报道， β -大马士酮是类胡萝卜素降解的次级代谢产物的水解产物^[43]，也被确定为苹果汁和橙汁中具有显著熟果风味的香气标志物。

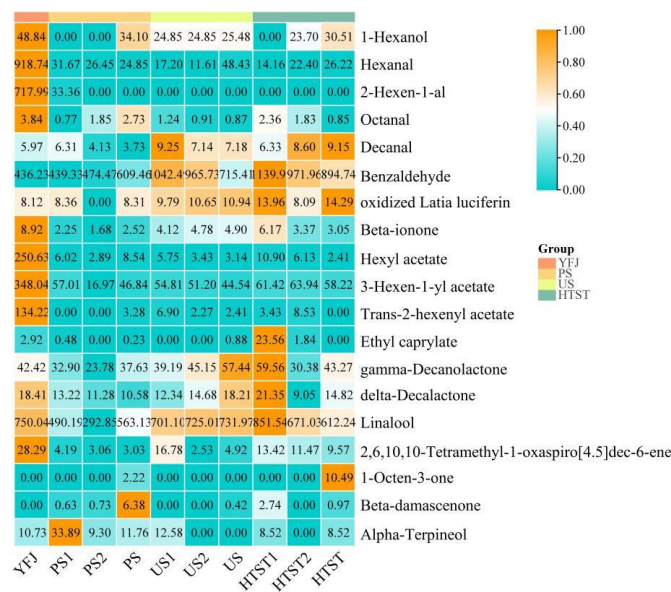


图 10 16 种关键香气化合物及主要异味物质含量的可视化热图分析

Fig.10 Visual heat map analysis of 16 key aroma compounds and main odor substances content

注：1-Hexanol，正己醇；Hexanal，正己醛；2-Hexen-1-al，2-己烯醛；Octanal，正辛醛；Decanal，癸醛；Benzaldehyde，苯甲醛；oxidized Latia luciferin， β -二氢紫罗兰酮；Beta-ionone， β -紫罗酮；Hexyl acetate，乙酸己酯；3-Hexen-1-yl acetate，乙酸叶醇酯；Trans-2-hexenyl acetate，反-2-乙酸己烯酯；Ethyl caprylate，辛酸乙酯；Gamma-Decanolactone， γ -癸内酯；Delta-Decalactone， δ -癸内酯；Linalool，芳樟醇；2,6,10,10-Tetramethyl-1-oxaspiro[4.5]dec-6-ene，茶螺烷；1-Octen-3-one，1-辛烯-3-酮；Beta-damascenone， β -大马士酮；Alpha-Terpineol， α -松油醇。

通过主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）进一步了解关键香气物质在不同杀菌方式中的差异。如图 11A 所示，其中两个主成分可以解释 70.20%的变异性，可认为基本上代表了所有样品中挥发性物质的大部分信息。蟠桃鲜汁明显区别于杀菌果汁，表明在加工过程中果汁的香气特征发生了变化，PS 和 US 处理组之间存在明显的分离，表明这两种杀菌方式对蟠桃汁的挥发性成分具有明显不同的影响。图 11B 显示，基于 GC-MS 分析引起样品之间差异的挥发性物质可能是己醛、乙酸己酯、乙酸叶醇酯、苯甲醛和乙酸反-2-己烯酯。

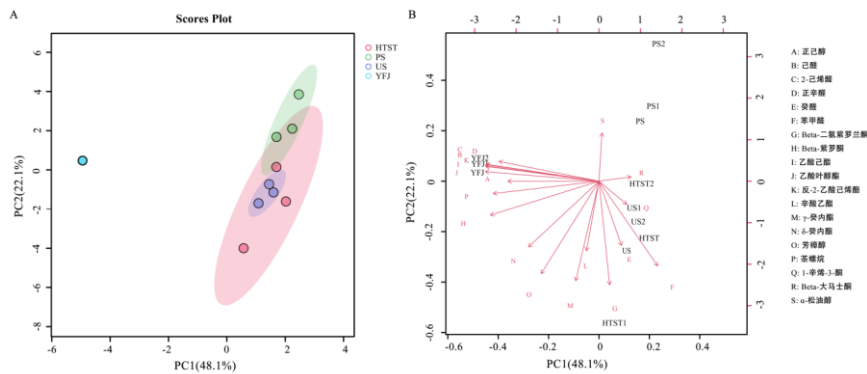


图 11 16 种关键香气化合物及主要异味物质含量的 PCA 图 (A) 和 Biplot (B) 图

Fig.11 PCA (A) and Biplot plots (B) of 16 key aroma compounds and main off-flavor substances

2.4 挥发性与非挥发性风味物质相关性分析

基于不同杀菌方式处理的蟠桃汁中可溶性糖、有机酸、氨基酸和挥发性香气化合物数据，使用 Pearson 相关性分析和 Mantel 检验来探索非挥发性风味物质与关键香气组分及主要异味物质之间的相关性(图 12)。具体而言，

P 值越小，显著性越大，表明非挥发性物质对蟠桃汁关键香气化合物的影响越强。结果表明，有机酸与正辛醛、1-辛烯-3-酮呈显著正相关，可溶性糖与 1-辛烯-3-酮呈显著正相关，可溶性糖（ $r=0.66$, $P=0.03$ ）和有机酸对 1-辛烯-3-酮（ $r=0.48$, $P=0.03$ ）的影响较大。水果中糖和有机酸对果实香气化合物的合成具有重要作用^[44]。此外，还原糖已被证实可以通过复杂的化学反应网络与氨基酸反应生成风味化合物^[45]。

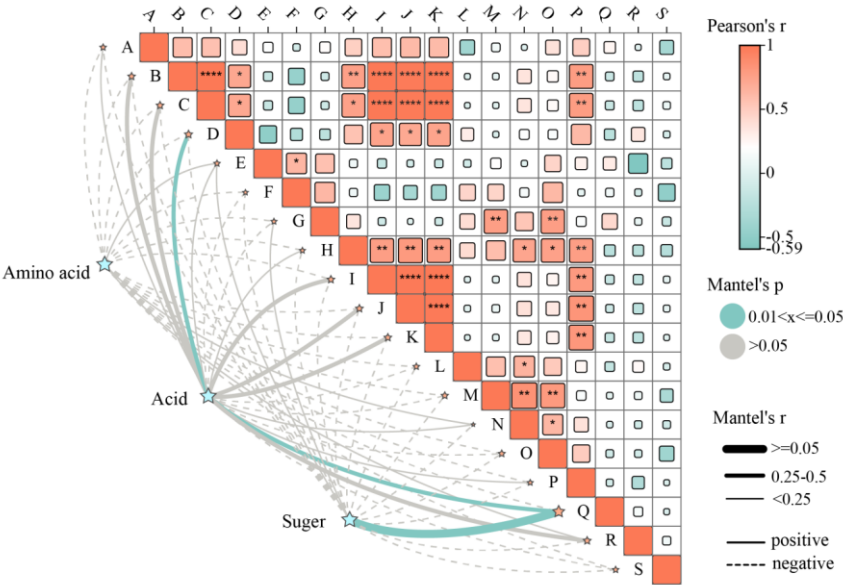


图 12 可溶性糖、有机酸、氨基酸与关键香气化合物的相关性分析

Fig.12 Correlation analysis of soluble sugar, organic acid, amino acid and key aroma compounds

注：A，正己醇；B，己醛；C，2-己烯醛；D，正辛醛；E，癸醛；F，苯甲醛；G， β -二氢紫罗兰酮；H， β -紫罗酮；I，乙酸己酯；J，乙酸叶醇酯；K，乙酸反-2-己烯酯；L，辛酸乙酯；M， γ -癸内酯；N， δ -癸内酯；O，芳樟醇；P，茶螺烷；Q，1-辛烯-3-酮；R， β -大马士酮；S， α -松油醇；Amino acid，氨基酸；Acid，酸；Sugar，糖。

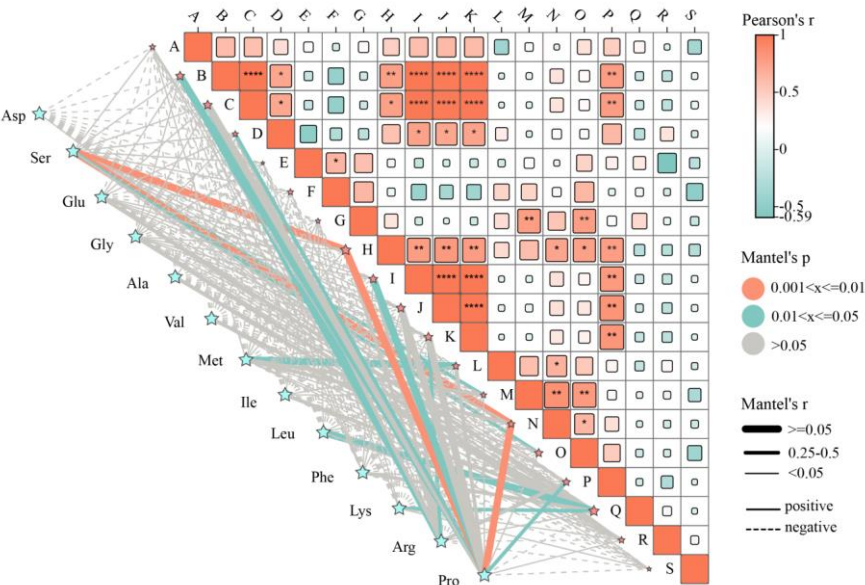


图 13 13 种主要氨基酸与关键香气化合物的相关性分析

Fig.13 Correlation analysis between 13 amino acids and key aroma compounds

注：Asp，天冬氨酸；Ser，丝氨酸；Glu，谷氨酸；Gly，甘氨酸；Ala，丙氨酸；Val，缬氨酸；Met，甲硫氨酸（蛋氨酸）；Ile，异亮氨酸；Leu，亮氨酸；Phe，苯丙氨酸；Lys，赖氨酸；Arg，精氨酸；Pro，脯氨酸；A，正己醇；B，己醛；C，2-己烯醛；D，正辛醛；E，癸醛；F，苯甲醛；G， β -二氢紫罗兰酮；H， β -紫罗酮；I，乙酸己酯；J，乙酸叶醇酯；K，乙酸反-2-己烯酯；L，辛酸乙酯；M， γ -癸内酯；N， δ -癸内酯；O，芳樟醇；P，茶螺烷；Q，1-辛烯-3-酮；R， β -大马士酮；S， α -松油醇。

已发现氨基酸被脱氨并转化为 α -酮酸,然后脱羧成醛,最终降解或氧化成醇或酸,并被认为是合成香料成分的主要前体^[46]。对杀菌过程中所有蟠桃汁样品中均检测到的13种氨基酸和关键香气化合物进行相关性分析,结果如图13所示。丝氨酸、脯氨酸分别与 β -紫罗兰酮、 γ -癸内酯均呈极显著正相关关系($P<0.01$),相关系数分别为0.58、0.51和0.69、0.70。脯氨酸与I呈显著正相关($P<0.01$),表明脯氨酸对 β -紫罗兰酮、乙酸己酯的合成具有贡献。亮氨酸、赖氨酸与1-辛烯-3-酮呈显著正相关($P<0.05$),研究表明,脯氨酸,亮氨酸和异亮氨酸是水果香气成分中甲基支链酯合成的关键前体^[47]。蛋氨酸与L呈显著正相关($P<0.05$),表明蛋氨酸对L的形成具有重要作用,有研究报道水果中的蛋氨酸在蛋氨酸裂解酶的作用下产生硫和非硫香气挥发物的前体^[48]。精氨酸与己醛、2-己烯醛呈显著正相关,苯丙氨酸与1-辛烯-3-酮具有正相关关系。苯丙氨酸通过转氨、脱羧等作用形成苯甲醛或苯乙醛,之后形成各种酯类、醇类^[49]。杀菌蟠桃汁中苯甲醛含量增加可能是由苯丙氨酸的生物合成和代谢以及葡萄糖等糖代谢引起的。据报道,含硫氨基酸,包括蛋氨酸和半胱氨酸,通过热分解形成几种含硫挥发性化学物质,如二甲基三硫醚和扁硫氨酸^[50]。此外,酪氨酸和苯丙氨酸也是数千种重要和特殊化合物的前体物质^[51]。挥发性风味化合物与氨基酸或可溶性糖的显著相关性可以用两个原因来解释。首先,氨基酸和可溶性糖促进挥发性风味化合物或其前体的形成。其次,氨基酸或可溶性糖降解形成的化学键对挥发性风味化合物的形成有很大影响。杀菌过程各种挥发性化合物、氨基酸和可溶性糖类发生变化的原因非常复杂,这是因为它们彼此相互作用,以及与美拉德反应、热降解和加热氧化反应中涉及的其他前体相互作用,以在最终果汁产品中形成组合风味。

2.5 特征香气物质回补验证

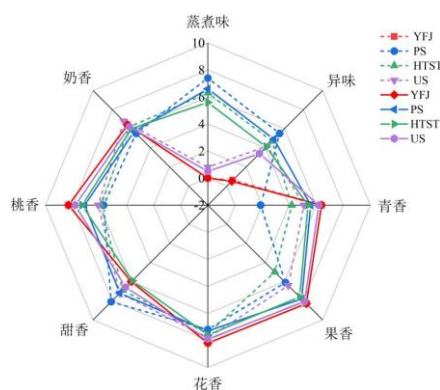


图 14 特征香气物质回补前后蟠桃汁风味轮廓图

Fig.14 Flavor profile of flat peach juice before and after the supplementation of characteristic aroma substances

注: 虚线表示杀菌处理的蟠桃汁, 实线表示经特征香气物质回补后的蟠桃。

基于蟠桃果实中关键香气化合物的实际定量浓度及杀菌蟠桃汁香气物质的损失,对杀菌处理后蟠桃汁中的关键香气物质进行回补,并将特征香气物质调整后的蟠桃汁与杀菌蟠桃汁作感官评价(图14)。与杀菌处理蟠桃汁相比,经特征香气化合物回补后的果汁获得了与新鲜蟠桃汁比较接近的感官评分,且果汁中蒸煮味(PS处理组从7.38分降至6.53分,HTST处理组从6.29分降至5.57分,US处理组从0.75降至0.52)及异味(PS处理组从5.41分降至4.89分,HTST处理组从4.59分降至4.12分,US处理组从4.15降至3.38)的感官评分明显降低。具体来说,香气回补的热杀菌蟠桃汁青香、果香属性均得到显著提升,这是由于表征青香味的C6醇类、醛类化合物含量的增加使其感官属性增强,酯类化合物(乙酸己酯、乙酸叶醇酯、乙酸反-2-己烯酯)也能提升蟠桃汁的清新果香味,由酯类赋予的果香和甜味对其他气味属性的呈现具有遮蔽作用。热杀菌处理导致蟠桃花香属性的下降,这与 β -紫罗兰酮和芳樟醇含量的变化相一致,通过补充表征花香味的 β -紫罗兰酮和芳樟醇等关键香气物质能够有效提升果汁的花香味。香气调整后的PS处理组蟠桃汁青香属性感官评分显著提高,其次是HTST组。US杀菌处理后蟠桃汁的酯类物质含量比热杀菌组下降更为显著,因此,经过香气回补的US处理组,果香味明显增强,其他香气属性也更加接近果实风味。此外,在杀菌过程中产生的蒸煮味以及异味强度也有所降低,可能是青香型和果香型化合物的补充使得蟠桃鲜果风味增加,掩盖了部分异味。

3 结论

与新鲜蟠桃汁相比,热杀菌处理后蟠桃汁整体香气属性明显减弱,产生强烈的蒸煮味及令人不愉快的异味,非热杀菌能够更好的保持果汁的天然特征风味。与蟠桃原汁相比,加热杀菌导致蟠桃汁可溶性固形物的下降和有机酸不同程度的上升。其中,PS和HTST处理蟠桃汁中总可溶性糖含量分别下降1.73%和3.59%。PS、HTST和US处理分别使奎宁酸提高了10.57%、4.68%和3.83%。蟠桃汁样品中共检测出17种氨基酸,PS处理组和HTST处理组中氨基酸总含量分别增加了 2.52 g kg^{-1} 和 1.03 g kg^{-1} ,US处理组降低了 0.89 g kg^{-1} 。经不同杀菌处理后,黄蟠桃汁挥发性化合物总含量显著降低。其中,醇类在PS组和US组中分别增加了1.38%和0.71%,HTST组降低了0.21%,醛类下降率均超过9%。正己醇,己醛,苯甲醛,乙酸己酯和乙酸叶醇酯等大部分关键香气物质的含量显著下降,而1-辛烯-3-酮、 β -大马士酮和 α -松油醇等主要异味物质大量积累。对杀菌处理后蟠桃汁中的关键香气物质进行回补,获得了与新鲜蟠桃汁比较接近的感官评分,蟠桃汁蒸煮味、异味显著降低,有效改善了热杀菌蟠桃汁风味。本研究明确了不同杀菌方式对蟠桃汁风味物质的影响规律,揭示了热加工风味损失的原因,为蟠桃加工产品风味强化提供了理论依据和技术支撑。所建立的香气回补方法基于特征风味指纹图谱,可为其他热敏性水果加工产品的风味保持提供参考。

参考文献

- [1] 于成哲,宗学普,吕增仁,等.桃属的新变种和新变型[J].园艺学报,1980,2:57-58.
- [2] 彭新媛,车凤斌,吴忠红,等.蟠桃采收贮藏前后香气成分变化的研究[J].新疆农业科学,2012,49(10):1824-1833.
- [3] 谭凤玲.蟠桃汁关键香气物质解析及杀菌汁呈香品质异化机制研究[D].西安:陕西师范大学,2022.
- [4] 王贵章,王贵禧,梁丽松,等.桃果实芳香挥发物及其生物合成研究进展[J].食品科学,2014,35(17):278-284.
- [5] 宋方圆,邓小蓉,李冀新,等.不同冷藏处理对蟠桃生理品质的影响[J].食品工业科技,2017,38(11):324-328.
- [6] 王鹏,田洪磊,张海轮,等.基于GC-MS结合化学计量学方法的蟠桃鲜果指纹图谱的构建及应用[J].现代食品科技,2016,32(5):258-263+282.
- [7] 谭凤玲,詹萍,王鹏,等.基于感官评价及GC-MS结合OPLS-DA分析热杀菌对蟠桃汁呈香品质的影响[J].中国农业科学,2022,55(12):2425-2435.
- [8] 王鹏,田洪磊,詹萍,等.采用GC-MS技术分析新疆蟠桃鲜果及其果汁制品中的挥发性物质[J].食品与发酵工业,2016,42(11):199-205.
- [9] LUO D S, PANG X L, XU X X, et al. Identification of cooked off-flavor components and analysis of their formation mechanisms in melon juice during thermal processing [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66(22): 5612-5620.
- [10] 邓红,刘旻昊,马婧,等.UHP与HTST杀菌处理的猕猴桃NFC果汁贮藏期品质变化[J].食品工业科技,2020,41(9):269-277.
- [11] FONTELE V T, COSTA M G M, JESUS D T L A, et al. Power ultrasound processing of cantaloupe melon juice: Effects on quality parameters [J]. Food Research International, 2012, 48(1): 41-48.
- [12] BAKAR M F A, MOHAMED M, RAHMAT A, et al. Phytochemicals and antioxidant activity of different parts of bambangan (*Mangifera pajang*) and tarap (*Artocarpus odoratissimus*) [J]. Food Chemistry, 2009, 113(2): 479-483.
- [13] LIU C F, LI M X, REN T, et al. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and non-*Saccharomyces* strains on alcoholic fermentation behavior and aroma profile of yellow-fleshed peach wine [J]. Food Science and Technology, 2022,155: 112993.
- [14] ZHANG L Z, ZHAO S Q, XU Z M, et al. Molecular weight and aggregation of heavy petroleum fractions measured by Vapor Pressure Osmometry and a hindered stepwise aggregation model [J]. Energy Fuels, 2014, 28(10): 6179-6187.
- [15] LIU G G, CHEN Q Q, GOU M, et al. Formation of key aroma-active and off-flavor components in concentrated peach puree [J]. Food Chemistry, 2023, 439:138105.
- [16] PANG X L, ZHANG Y Z, QIU J, et al. Coupled multidimensional GC and odor activity value calculation to identify off-odors in thermally processed muskmelon juice [J]. Food Chemistry, 2019, 301(C): 125307.
- [17] 魏利军,王菊侠,侯丽芳,等.西瓜汁热变性的研究及其解决方法探讨[J].食品工程,2013,2:40-42+52.
- [18] JIA X, REN J N, FAN G, et al. Citrus juice off-flavor during different processing and storage: Review of odorants, formation pathways, and analytical techniques [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 64(10): 21-26.
- [19] WHITFIELD B F, MOTTRAM S D. Volatiles from interactions of Maillard reactions and lipids [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2009, 31(1-2): 1-58.
- [20] O. OLADUNJOYE O, U. AWANI-AGUMA E. Effect of thermosonication on physicochemical, bioactive, sensory and microbiological

- qualities of African mango fruit (*Irvingia gabonensis*) juice [J]. *Measurement: Food*, 2023, 11: 100103.
- [21] OLIVEIRAL D H S, CAMBOIM F R, VELOSO G S, 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.
- [22] RATTANATHANALERK M, CHIEWCHAN N, SRICHUMPOUNG W. Effect of thermal processing on the quality loss of pineapple juice [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 66(2): 259-265.
- [23] 李佳秀,张春岭,刘慧,等.不同果汁中有机酸的组成及差异性分析[J].*果树学报*,2017,34(9):1192-1203.
- [24] CHOO Y X, TEH L K, TAN C X. Effects of sonication and thermal pasteurization on the nutritional, antioxidant, and microbial properties of noni juice [J]. *Molecules*, 2023, 28(1): 313.
- [25] TKACZ K, CHMIELEWSKA J, TURKIEWICZ P I, et al. Dynamics of changes in organic acids, sugars and phenolic compounds and antioxidant activity of sea buckthorn and sea buckthorn-apple juices during malolactic fermentation [J]. *Food Chemistry*, 2020, 332(prepublish): 127382.
- [26] YIKMIŞ S. Sensory, physicochemical, microbiological and bioactive properties of red watermelon juice and yellow watermelon juice after ultrasound treatment [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 14(prepublish): 1-10.
- [27] RODRIGUEZ E C, BUSTAMANTE A C, BUDDE O C, et al. Peach fruit development: a comparative proteomic study between endocarp and mesocarp at very early stages underpins the main differential biochemical processes between these tissues [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 715.
- [28] 翟金亮.桑椹果汁微波杀菌工艺及花色苷稳定性研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [29] ZHAO W, YANG R, WANG M, et al. Effects of pulsed electric fields on bioactive components, colour and flavour of green tea infusions [J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2009, 44(2): 312-321.
- [30] CHENG L Z, WANG Y F, ZHANG J R, et al. Dynamic changes of metabolic profile and taste quality during the long-term aging of Qingzhuan Tea: The impact of storage age [J]. *Food Chemistry*, 2021, 359: 129953.
- [31] 刘新,刘政芳,张彦,等.基于游离氨基酸和感官鲜度评价的复合鲜味产品的呈味特征分析[J].*食品工业科技*,2023,44(7):287-293.
- [32] SUN Y J, PENG W, ZENG L, et al. Using power ultrasound to release glycosidically bound volatiles from orange juice: A new method [J]. *Food Chemistry*, 2020, 344: 128580.
- [33] JOUQUAND C, DUCRUET V, GIAMPAOLI P. Partition coefficients of aroma compounds in polysaccharide solutions by the phase ratio variation method [J]. *Food Chemistry*, 2003, 85(3): 467-474.
- [34] CHEN Q Q, SONG J X, BI J F, et al. Characterization of volatile profile from ten different varieties of Chinese jujubes by HS-SPME/GC-MS coupled with E-nose [J]. *Food Research International*, 2018, 105: 605-615.
- [35] HASHIZUME M, OKUGAWA T, GORDON H M, et al. Light-induced off-flavour in cloudy apple juice [J]. *Developments in Food Science*, 2006, 43: 273-276.
- [36] NIKFARDJAM P M, MAIER D. Development of a headspace trap HRGC/MS method for the assessment of the relevance of certain aroma compounds on the sensorial characteristics of commercial apple juice [J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(4): 1926-1933.
- [37] ZHANG S L, ZHAO H Y, TANG Z W, et al. Flavor characteristics of key aroma compounds in bayberry juice, fruit, and thinning fruit using HS-SPME coupled with GC/Q-TOF-MS [J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2024, 128: 106032.
- [38] PÉREZ-LÓPEZ J A, SAURA D, LORENTE J, et al. Limonene, linalool, α -terpineol, and terpinen-4-ol as quality control parameters in mandarin juice processing [J]. *European Food Research and Technology*, 2006, 222(3-4): 281-285.
- [39] CHENG Y J, HAN L, HUANG L H, et al. Association between flavor composition and sensory profile in thermally processed mandarin juices by multidimensional gas chromatography and multivariate statistical analysis [J]. *Food Chemistry*, 2023, 419: 136026.
- [40] LIU G G, CHEN Q Q, GOU M, et al. Formation of key aroma-active and off-flavor components in concentrated peach puree [J]. *Food Chemistry*, 2023, 439: 138105.
- [41] CHENG Y J, HAN L, HUANG L H, et al. Association between flavor composition and sensory profile in thermally processed mandarin juices by multidimensional gas chromatography and multivariate statistical analysis [J]. *Food Chemistry*, 2023, 419: 136026.
- [42] FEDERICA B, EINAT B, FABIENNE M, et al. Study of 'Redhaven' peach and its white-fleshed mutant suggests a key role of CCD4 carotenoid dioxygenase in carotenoid and norisoprenoid volatile metabolism [J]. *BMC Plant Biology*, 2011, 11(1): 24.
- [43] PUGLISI J C, ELSEY M G, PRAGER H R, et al. Identification of a precursor to naturally occurring β -damascenone [J]. *Tetrahedron*

- Letters, 2001, 42(39): 6937-6939.
- [44] 程帅旗,王丽娟,高铁楠.草莓果实香气物质研究进展[J].山东农业科学,2023,55(1):157-164.
- [45] HONG J C, YUN T M Y, MIN S D O, et al. Comparison of the molecular properties and volatile compounds of Maillard reaction products derived from animal- and cereal-based protein hydrolysates [J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132609.
- [46] SUN L B, ZHANG Z Y, XIN G, et al. Advances in umami taste and aroma of edible mushrooms [J]. Trends in Food Science Technology, 2020, 96(C): 176-187.
- [47] LUKIĆ I, MILIČEVIĆ B, TOMAS S, et al. Relationship between volatile aroma compounds and sensory quality of fresh grape marc distillates [J]. Journal of the Institute of Brewing, 2012, 118(3): 285-294.
- [48] ITAY G, EINAT B, VITALY P, et al. Branched-chain and aromatic amino acid catabolism into aroma volatiles in Cucumis melo L. fruit [J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61(4): 1111-1123.
- [49] 郝亚冬,刘敏欣,李景明.青梅果实芳香族特征香气的形成分析[J].农业机械学报,2024,55(1):379-385.
- [50] ERTEN S E, CADWALLADER R K. Identification of predominant aroma components of raw, dry roasted and oil roasted almonds [J]. Food Chemistry, 2017, 217: 244-253.
- [51] HEEJIN Y, JOSHUA R W, QIAN Y C, et al. An alternative pathway contributes to phenylalanine biosynthesis in plants via a cytosolic tyrosine: phenylpyruvate aminotransferase [J]. Nature Communications, 2013, 4(1): 2833.