

乳酸菌发酵蜜桃果酱制作过程中理化性质和 关键香气成分演化研究

胡航伟¹, 高翠娟¹, 孙杰², 冷鹏², 彭善丽¹, 王亮³, 刘云国^{1*}

[1. 临沂大学生命科学学院, 临沂 276000; 2. 浙江大学山东(临沂)现代农业研究院, 临沂 276000;
3. 新疆大学生命科学与技术学院, 乌鲁木齐 830002]

摘要: 目的 探究乳酸菌发酵蜜桃果酱制作过程中的品质特性及挥发性香气化合物变化情况, 筛选关键呈香物质。**方法** 采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法测定乳酸菌发酵蜜桃果酱挥发性风味物质变化。同时, 测定样品的总多酚、总黄酮、有机酸、色泽等理化指标, 并对其进行感官评价。**结果** 共检测到 53 种挥发性有机化合物, 其中醛类、酯类、醇类在蜜桃果酱中较丰富。结合气味活度值(odor activity value, OAV>1)初步筛选出苯甲醛、芳樟醇、1-辛烯-3-醇、壬醛等 10 种关键呈香物质。在乳酸菌发酵过程中, 果酱样品总黄酮含量显著增加 ($P<0.05$), 2,2-联苯基-1-苦基胍基(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH)自由基清除能力有所提高。但是, 浓缩(NS)和后杀菌(GZ)过程对热敏性物质破坏严重, 颜色接受度下降, 色泽参数(L^* 、 a^* 、 b^*)出现明显变化。在发酵过程中, 乳酸-苹果酸含量变化具有相关性。对不同制作时期果酱的挥发性风味物质进行偏最小二乘回归分析, 各时期得以很好的区分, 且模型可靠。**结论** 乳酸菌发酵改善了蜜桃果酱的风味, 明显提高活性物质的含量。

关键词: 蜜桃果酱; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法; 乳酸菌; 风味物质; 气味活度值

Study on evolution of physicochemical properties and key aroma components in honey peach jam with lactic acid bacteria fermentation

HU Hang-Wei¹, GAO Cui-Juan¹, SUN Jie², LENG Peng², PENG Shan-Li¹,
WANG Liang³, LIU Yun-Guo^{1*}

[1. College of Life Sciences, Linyi University, Linyi 276000, China; 2. Zhejiang University-Shandong (Linyi) Modern Agricultural Research Institute, Linyi 276000, China; 3. College of Life Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830002, China]

ABSTRACT: Objective To explore the quality characteristics and changes of volatile aroma compounds in the production process of honey peach jam fermented by lactic acid bacteria, further screen the key aroma compounds. **Methods** Headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry technology was used to determine the changes of volatile flavor compounds in honey peach jam fermented by lactic acid bacteria. At the same time, the total polyphenols, total flavonoids, organic acids, color properties and other physical and chemical indexes of the samples were determined, and sensory evaluation was carried out. **Results** A total of 53 kinds of volatile organic

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2019YYSP026)、浙江大学山东(临沂)现代农业研究院服务地方经济发展项目(开放课题)(ZDNY-2020-FULY02014)

Fund: Supported by the Key Research and Development Program in Shandong Province (2019YYSP026), and the Zhejiang University-Shandong (Linyi) Modern Agricultural Research Institute Service Local Economic Development Project (Open Project) (ZDNY-2020-FULY02014)

*通信作者: 刘云国, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品精深加工及贮藏保鲜。E-mail: yguoliu@163.com

*Corresponding author: LIU Yun-Guo, Ph.D, Professor, College of Life Sciences, Linyi University, Linyi 276000, China. E-mail: yguoliu@163.com

compounds were detected, among which, aldehydes, esters and alcohols were abundant in honey peach jam. Combined with the odor activity value (OAV>1), 10 kinds of key aroma compounds were preliminarily screened out, such as benzaldehyde, linalool, 1-octene-3-ol and nonaldehyde. During lactic acid bacteria fermentation, the content of total flavonoids in fruit jam samples increased significantly ($P<0.05$), and 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) scavenging ability was improved. However, the process of concentration (NS) and post-sterilization (GZ) seriously damaged the heat-sensitive substances, the color acceptance decreased, and the color parameters (L^* , a^* , b^*) changed obviously. During the fermentation process, the change of lactic acid-malic acid content had a correlation. Partial least square regression analysis of volatile flavor compounds in honey peach jam during different production periods showed that different periods were well distinguished and the model was reliable. **Conclusion** Lactic acid bacteria fermentation improved the flavor of honey peach jam, and the content of active substances obviously.

KEY WORDS: honey peach jam; headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; lactic acid bacteria; flavor substance; odor activity value

0 引言

桃(*Amygdalus persica* L.)属蔷薇科,落叶果树。目前,世界上有超过 3000 个品种^[1]。我国是世界上最大的桃果生产国,统计数据显示,2019 年国内桃种植面积 89.0 万 hm^2 ,产量达 1599.3 万 t^[2]。根据形状、质地和果皮特征,桃的品种可分为 6 种,包括甜桃、脆桃、蜜桃、黄桃、扁桃和油桃。蜜桃因其独特的风味、质地、多汁性和营养价值而深受消费者的喜爱。但是,蜜桃属于呼吸跃变型果实,采后呼吸活动仍在进行,容易出现腐烂、霉菌侵染、失水皱缩等品质不良的问题,不耐贮藏,严重影响鲜桃品质,桃果深加工处理是一种有效的解决方法。桃果可制作成果酒、果汁、果醋、果酱等较高附加值产品,进而延长保质期,满足市场消费人群的多样需求。其中,果酱是焙烤类、酸奶等食品的重要辅料,在生活快节奏的发展状况下,果酱的口味多样、便捷使用特点更为凸显。

目前,果酱的研究多数集中在增稠剂使用种类、不同储藏条件的品质变化,以及微生物发酵果酱工艺优化等,如赵雷等^[3]采用海藻酸钠和低甲氧基果胶复合增稠剂,探讨不同制备体系对荔枝果酱焙烤特性的影响;TOUATI 等^[4]研究杏子酱在 3 种温度下 60 d 贮藏期间感官和理化性质变化;申光辉等^[5]研究乳酸菌(嗜热链球菌、保加利亚乳杆菌)发酵桑葚、番茄和胡萝卜复合果酱工艺条件。鼠李糖乳杆菌、干酪乳杆菌、植物乳杆菌等乳酸菌(lactic acid bacteria, LAB)具有调节肠道菌群、增强免疫力等保健功效^[6-7],LAB 发酵不仅能够延长食品保质期、提高营养价值、降解不期望化合物,还能改善食品的口感和风味等^[8]。风味影响着消费者的偏好程度。已有研究对各类果酱在贮藏、烘焙加工过程中的风味物质变化进行分析,如刘哲等^[9]对红树莓果酱贮藏过程中风味物质进行分析,共鉴定出 42 种化合物,醇类和酮类含量最丰富;鲍杰等^[10]采用 2 种方式对笃斯越橘果酱香气物质进行萃取,结合气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)和气相色谱-嗅闻

(gas chromatography-olfactometry, GC-O)技术鉴定果酱中风味成分。刘希涛^[11]对浓缩前后、焙烤后 3 个加工阶段复合荔枝果酱的香气成分进行测定。然而关于益生菌发酵制作果酱的不同阶段挥发性风味物质变化情况的研究报道较少。

本研究以山东省临沂市特色品种“映霜红”蜜桃为实验原料,用鼠李糖乳杆菌和干酪乳杆菌混合发酵制备蜜桃果酱,研究不同制作阶段果酱的理化性质和感官特性的变化情况。通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)揭示制酱过程中风味成分的变化,结合化学计量学的偏最小二乘回归分析(partial least squares discriminant analysis, PLS-DA)对不同时期进行差异性分析。使用气味活度值,确定乳酸菌发酵蜜桃果酱中关键呈香物质,为解析桃果资源深加工过程的优良风味提供一定依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜、个体均匀的蜜桃(品种为映霜红)于 2021 年 9 月购自山东省临沂市沂水县当地农户。在果实成熟季节,采摘后立即转运到实验室,4 °C 冷藏备用。

鼠李糖乳杆菌(*Lactobacillus rhamnosus* ATCC 7469)、干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei* ATCC 334)(国家菌种保藏中心);琥珀酸(CAS 110-15-6,纯度>99%)、L-苹果酸(CAS 97-67-6,纯度>99%)、柠檬酸(CAS 77-92-9,纯度>99%)、2,2-联苯基-1-苦基肼基(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH)、无水碳酸钠(纯度 $\geq 99.5\%$)、福林酚试剂、芦丁(CAS250249-75-3,纯度 $\geq 95\%$)(北京索莱宝科技有限公司);氢氧化钠(纯度 $\geq 96\%$)、硝酸铝(纯度 $\geq 99\%$)、亚硝酸钠(纯度 $\geq 99\%$)(上海凇恩科技发展有限公司);2-辛醇(纯度 $\geq 99.5\%$)(上海源叶生物科技有限公司);MRS 肉汤培养基(北京陆桥技术股份有限公司);抗坏血酸、果胶(食品级,河南万邦化工科技有限公司);蔗糖(食品级,云南滇鹏糖业有限公司)。

1.2 仪器与设备

XY-8608 破壁机(广东德玛仕智能厨房设备有限公司); NR10QC 通用色差计(深圳市三恩驰科技有限公司); TD-45 数显糖度计(浙江托普云农科技股份有限公司); PHS-3C pH计(上海仪电科学仪器有限公司); 752 紫外可见分光光度计(上海光学仪器一厂); LC-LX-H185C 台式高速离心机(上海力辰邦西仪器科技有限公司); LDZX-50KBS 立式高压蒸汽灭菌锅(上海申安医疗器械厂); 65 μm PDMS/DVB 顶空固相微萃取头(美国 Supelco 公司); TSQ8000 三重四极杆气相色谱质谱联用仪(美国赛默飞世尔科技公司); DB-5MS 毛细管色谱柱(30 mm \times 0.25 mm, 0.25 μm)、ZORBAX SB-C₁₈ 色谱柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μm)(美国安捷伦公司)。

1.3 果酱制作工艺

工艺流程: 桃果 \rightarrow 切块、去核 \rightarrow 打浆(DJ) \rightarrow 巴氏杀菌(NF) \rightarrow 乳酸菌分别发酵 24、30 h (FJ-24, FJ-30) \rightarrow 浓缩调味(NS) \rightarrow 灌装灭菌 \rightarrow 冷却 \rightarrow 成品(GZ)。

蜜桃果酱的制作,参考王晨^[12]的方式,稍做修改,具体如下:

(1)桃子清洗、切块、去核,按桃果重计,加入 0.04%抗坏血酸(溶于 20 mL 水中),置于高速破壁机中,打浆待用。

(2)加入 4%蔗糖,不断搅拌,混合均匀,80 $^{\circ}\text{C}$ 杀菌 15 min,冷却。

(3)鼠李糖乳杆菌、干酪乳杆菌于-80 $^{\circ}\text{C}$ 保存在冻存管中。划线 2~3 代,挑取单菌落,接入到 MRS 液体培养基中,37 $^{\circ}\text{C}$ 培养 18 h,吸取 2 mL 菌悬液,10000 r/min 离心 2 min,沉淀物用 0.9%无菌生理盐水清洗 2 次,重悬,调整至菌浓度达到约 5×10^6 CFU/mL。按照 1.0%的接菌量(鼠李糖乳杆菌:干酪乳杆菌=2:3),加入到灭菌好的待发酵桃浆中。37 $^{\circ}\text{C}$ 恒温静态发酵 24、30 h。

(4)发酵液按比例加入 0.2%果胶、12%蔗糖,混合均匀,在 90 $^{\circ}\text{C}$ 水浴下浓缩 15 min。

(5)分装到 200 mL 无菌玻璃瓶中,距离瓶口预留 1~2 cm 空隙,90 $^{\circ}\text{C}$ 杀菌 15 min,冷却至室温。

1.4 指标测定

1.4.1 pH 测定

称取 2 g 样品,加入 20 mL 三级水,振荡混匀,测试在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下进行。

1.4.2 可溶性固形物

以三级水调零,使用手持式数显糖度计测定,含量用 $^{\circ}\text{Brix}$ 表示。

1.4.3 总多酚和总黄酮含量测定

准确称取 5 g 样品,置于 50 mL 离心管中,加入 20 mL 65%乙醇溶液,涡旋 20 s。500 W 超声 20 min,随后转移到离心机中,8000 r/min 离心 5 min,获得的上清液待用。

(1)总多酚

总多酚(total phenolics, TP)含量测定参考 PEREIRA 等^[13]

方法,稍作修改。吸取上清液 0.5 mL,与 2.5 mL 福林酚溶液(10%, V:V)混合均匀,避光静置 5 min 后,加入 2 mL 75 g/L 碳酸钠溶液,避光反应 30 min。加水定容到 10 mL,三级水替代上清液作为空白组,以没食子酸溶液(0~200 mg/L)绘制标准曲线($Y=0.0042X+0.0221$, $r^2=0.9932$)。在 765 nm 下,测定其吸光度值。含量用 mg 没食子酸当量(GAE)/100 g 表示。

(2)总黄酮

总黄酮(total flavonoids, TF)含量测定参考 KAWA 等^[14]方法,并加以改动。0.5 mL 上清液与 100 μL 5%亚硝酸钠溶液(m:V)混合均匀,避光 5 min。随后,量取 2 mL 三级水、100 μL 10%硝酸铝溶液(m:V)加到混合物中,静置 6 min。最后,加入 3 mL 1 mol/L 氢氧化钠溶液,避光 15 min。在 510 nm 下,测定其吸光度值。以芦丁为标准品(0~200 mg/L)进行标准曲线绘制($Y_1=0.0009X_1+0.0031$, $r^2=99.53\%$),含量用 mg 芦丁当量(RE)/100 g 表示。

1.4.4 DPPH 自由基清除率

参考 MUHIALDIN 等^[15]方法,并加以改动。将 11.8 mg DPPH 溶解在 300 mL 无水乙醇中,制备 0.1 mmol/L DPPH 反应液。吸取 0.5 mL 的上清液或无水乙醇,加入到 3 mL DPPH 反应液中,振荡混匀。混合物置于室温下避光反应 30 min。使用紫外-可见分光光度计在 517 nm 下测定其吸光度值。每组平行测定 3 次,用无水乙醇调零。DPPH 自由基清除率按照公式(1)进行计算:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中, A_1 表示上清液与 DPPH 溶液反应; A_0 表示无水乙醇与 DPPH 溶液反应。

1.4.5 有机酸组分测定

准确称取 5 g 样品,与 20 mL 超纯水混合,涡旋 30 s。混匀后,500 W 超声处理 20 min 后,8000 r/min 离心 5 min,获得上清液。吸取上清液过 0.22 μm 滤膜,收集到 2 mL 棕色进样瓶。使用有机酸标准品(苹果酸、乳酸、柠檬酸和琥珀酸 4 种),配制 5 个浓度的标准溶液。蜜桃果酱样品中有机酸组成及含量测定,参考 PEREIRA 等^[16]的方法,稍作修改。样品组分的分离是在柱温 30 $^{\circ}\text{C}$ 的 ZORBAX SB-C₁₈ 色谱柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μm)上实现的。进样量为 10 μL ,流动相为 3.6 mmol/L 的稀硫酸溶液,流速设定为 0.8 mL/min。通过对比标准品和样品的出峰时间和峰面积来进行有机酸的定量分析,结果表示为 mg/100 g。

1.4.6 色泽

样品填充到圆柱形透明玻璃杯(直径 \times 高=20 mm \times 30 mm)中,使用色差仪,在 D65 光源和 10 $^{\circ}$ 观察角下,测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值,用标准白板进行标样测量($L^*=98.65$ 、 $a^*=-0.08$ 、 $b^*=0.45$)。转换角(hue)、色度(chroma)的计算参考 HOJJATPANAH 等^[17]方法,计算按照公式(2)和(3)计算:

$$\text{chroma} = \sqrt{(a^{*2} + b^{*2})} \quad (2)$$

$$\text{hue}=\tan^{-1}(b^*/a^*) \quad (3)$$

褐变指数(brown index, BI)代表褐变的程度,参考 PALOU 等^[18]的报道,根据公式(4)和(5)来计算:

$$X=\frac{(a^*+1.75L^*)}{(5.645L^*+a^*-3.012b^*)} \quad (4)$$

$$\text{BI}=\frac{100(X-0.31)}{0.17} \quad (5)$$

1.4.7 挥发性风味物质测定

通过顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析果酱制作过程中挥发性风味物质。风味物质的提取参考 BUVE 等^[19]的方法,并加以改动。称取 2 g 样品于 20 mL 顶空瓶,加入 2 mL 饱和氯化钠溶液,10 μL 0.2 mg/mL 2-辛醇(内标物)。样品随顶空瓶置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 恒温水浴锅中,平衡 30 min 后,顶空瓶插入萃取头萃取 30 min。然后,进样针插入气相色谱进样口,250 $^{\circ}\text{C}$ 解吸 5 min。以氦气(纯度>99.99%)作为载气,流速 1 mL/min,采用不分流模式。使用 DB-5MS 毛细管色谱柱(30 m \times 0.25 mm, 0.25 μm)分离挥发性化合物。

程序升温条件为:GC 色谱初始柱温 40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 5 min,5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 线性升高到 200 $^{\circ}\text{C}$,6 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 线性升高到 230 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min。质谱数据在 70 eV 的电离模式下获得,扫描范围为 35~500 m/z 。离子源和四极杆温度分别为 250、280 $^{\circ}\text{C}$ 。

定性分析:质谱数据与 NIST14.0 标准谱库进行匹配,选择匹配度>80%的鉴定结果,并与文献报道的化合物保留指数比对,作为化合物确定的依据。

定量分析:内标物为 0.2 mg/mL 2-辛醇,挥发性有机化合物含量按照公式(6)计算如下:

$$C_x=\frac{C_0 \times V_0 \times S_x}{m \times S_0} \quad (6)$$

其中, C_x 为检测到挥发性成分的含量, $\mu\text{g}/\text{kg}$; C_0 为内标物挥发性成分的含量, $\mu\text{g}/\text{kg}$; V_0 为内标物进样体积, μL ; S_x 为检测到挥发性成分的峰面积; S_0 为内标物的峰面积; m 为试样的质量,kg。

1.4.8 气味活度值

气味活度值(odour activity value, OAV)的计算,按照公式(7)计算:

$$\text{OAV}=C_i/C_{\text{water}} \quad (7)$$

其中, C_i 为化合物 i 的浓度, $\mu\text{g}/\text{kg}$; C_{water} 为化合物 i 在水中的气味阈值, $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.4.9 感官评价

根据 SULEJMANI 等^[20]描述的方式,进行果酱的感官评价,略有改动。简单地说,由 10 名不同年龄段的训练人员组成(22~40 岁,6 名女性和 4 名男性)组成感官评价小组。在品尝每个样品后及时漱口。从样品的色泽、质地、酸味、甜度、香气和总可接受度 6 个方面采用 9 分制进行定量描述分析(1=极其不喜欢; 2=非常不喜欢; 3=稍微不喜欢; 4=不喜欢; 5=喜欢也不喜欢; 6=喜欢; 7=有点喜欢; 8=非常喜欢; 9=极其喜欢)。

1.5 数据处理

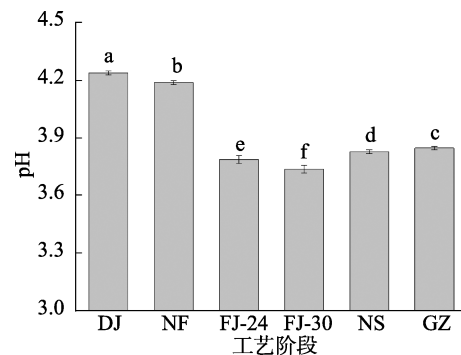
所有的测量过程均为 3 次,结果用平均值 \pm 标准偏差表示。使用 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析,并通过邓

肯多重检验来表示组间显著性差异($P<0.05$)。使用 SIMCA 13.0 软件,对挥发性物质进行偏最小二乘回归分析,进而解释制作过程中风味物质的相关性。

2 结果与分析

2.1 果酱制作过程中理化性质变化

pH 是衡量乳酸菌发酵过程的重要参数,影响发酵产品的风味。有研究发现,较高的初始 pH 能够促进菌株的活性和代谢能力^[21]。图 1 显示蜜桃果酱制作不同时期 pH 的变化情况,发酵前(DJ 阶段)的 pH 为 4.24,发酵后(FJ-24 和 FJ-30 阶段)果酱的 pH 明显下降,在发酵 30 h 时, pH 为 3.74,达到最低,且随着发酵时间增加, pH 变化显著($P<0.05$)。可能是 LAB 在发酵过程中通过其生理代谢活动分解糖类,有利于有机酸(如乳酸、葡萄糖酸等)的产生,这与 RICCI 等^[22]的报道是一致的。



注:不同小写字母表示组间差异显著, $P<0.05$,下同。

图 1 蜜桃果酱制作过程中 pH 变化($n=3$)

Fig.1 pH changes of honey peach jam during production process ($n=3$)

作为食品品质的重要指标之一,可溶性固形物(total soluble solid, TSS)含量经乳酸菌混合发酵后(FJ-24 阶段)较发酵前(NF 阶段)差异不显著($P>0.05$)(如图 2)。在浓缩过程中(NS 阶段),较多蔗糖的加入显著改变了蜜桃果酱的 TSS 含量($P<0.05$),有研究显示,酸-糖-果胶存在的体系有利于形成致密的网络结构,维持果酱的凝胶特性^[23]。

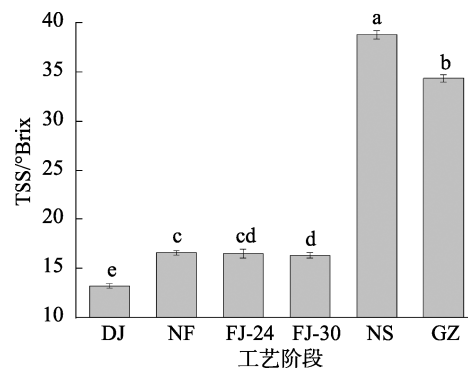


图 2 蜜桃果酱制作过程中可溶性固形物含量变化($n=3$)

Fig.2 Total soluble solid content changes of honey peach jam during production process ($n=3$)

酚类化合物可以向自由基提供氢或电子, 有抗氧化和抗炎作用, 蔬菜和水果是酚类化合物的主要来源^[24]。LAB 发酵过程可以将多酚类物质转化为其他分子量更低、生物利用度更高的化合物(如原儿茶酸、对香豆酸等), 还能破坏发酵基质的细胞壁完整性进而释放出活性物质^[25-26]。如图 3 所示, 发酵过程中蜜桃果酱的总多酚和总黄酮含量均有所增加, 但是总多酚含量变化不显著($P>0.05$)。与 FJ-24 时期相比, FJ-30 时期的总多酚含量和总黄酮含量更高, 分别是(43.99±0.42) mg/100 g、(29.21±2.45) mg/100 g, 这在一定程度上说明延长发酵时间有利于活性物质的释放。较 FJ-30 而言, NS 和 GZ 阶段较长时间的高温处理对于水分的蒸发是有利的, 但对黄酮类物质有明显的破坏, 含量降低约 40%, 且差异性显著($P<0.05$), 从而加速果酱的褐变^[4]。POIANA 等^[27]研究发现, 酸樱桃、甜樱桃、草莓和越桔热加工成的低热量果酱总多酚含量分别降低 25% ($P<0.05$)、31% ($P<0.01$)、42% ($P<0.01$)和 42-51% ($P<0.05$), 这与本研究的变化趋势一致。

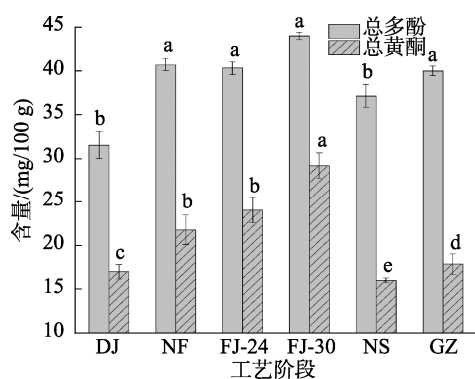


图 3 果酱制作过程中总多酚和总黄酮含量变化($n=3$)

Fig.3 Changes of total polyphenols and total flavonoids content in fruits jam during processing ($n=3$)

体外抗氧化活性的测量可以初步评价果酱品质的好坏, 可作为后续开展体内研究的参考。抗氧化活性主要归因于抗坏血酸、花青素、类胡萝卜素等生物活性化合物的存在, 但它们的结构通常稳定性较差^[28]。在发酵过程中, 释放或合成的抗氧化物质可以作为单线态氧猝灭剂、金属螯合剂、自由基的氢供体和自由基终止子, 进而提高产品的抗氧化能力^[29-30]。如图 4 所示, 在发酵过程中蜜桃果酱的抗氧化活性有所提高, DPPH 自由基清除率从 44.6%~46.3% 增加到 63.4%~68.7%, 且差异性显著 ($P<0.05$)。获得的果酱成品的 DPPH 自由基清除率有所降低, 但是差异性不显著 ($P>0.05$), 这可能是在热加工过程中一些美拉德反应产物(如还原酮等抗氧化类似物)的形成^[31-32], 其结构也能获得电子或者结合自由基。BOF 等^[33]发现, 热处理造成无花果和草莓果酱抗氧化能力下降, 但是变化不显著 ($P>0.05$), 这与本研究结果基本一致。

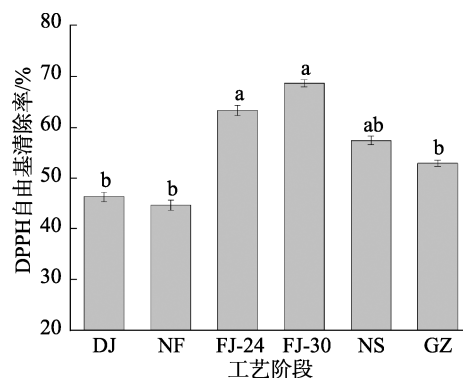


图 4 果酱制作过程中体外抗氧化能力($n=3$)

Fig.4 Antioxidant capacities *in vitro* of fruits jam during processing ($n=3$)

2.2 有机酸组分

有机酸在发酵水果制品的感官特性和稳定性方面至关重要^[34]。表 1 为乳酸菌发酵蜜桃果酱制作过程中有机酸的变化情况。在蜜桃果酱制作过程中, 不同时期的苹果酸含量有不同程度的变化, 特别在乳酸菌发酵过程中降低明显 ($P<0.05$), 这可能是由于苹果酸-乳酸发酵引起的, 在乳酸菌的作用下酸性较强的苹果酸脱羧形成酸性较为温和的乳酸^[35-36]。乳酸菌的加入使样品中乳酸含量明显升高, 其中, FJ-30 阶段含量最高, 达 886.2 mg/100 g。柠檬酸含量在果酱制作过程中有所降低, 经 LAB 代谢为二乙酰、乙酸等^[37]。随着发酵时间的延长, 从 59.2 mg/100 g 显著降低到 56.2 mg/100 g ($P<0.05$)。琥珀酸在 LAB 发酵初期积累较多(FJ-24 达 350.6 mg/100 g), 随着时间延长, 含量显著减少 ($P<0.05$)。

表 1 果酱制作过程中有机酸含量变化(mg/100 g, $n=3$)

Table 1 Changes of organic acid content of fruits jam during processing (mg/100 g, $n=3$)

有机酸	柠檬酸	苹果酸	乳酸	琥珀酸
DJ	55.7±0.1 ^b	207.3±0.7 ^b	-	101±0.6 ^d
NF	59.2±1.1 ^a	270.5±0.9 ^a	-	252.3±1.9 ^b
FJ-24	57.2±0.7 ^{ab}	10.4±0.2 ^c	856.1±4.5 ^a	350.6±7.7 ^a
FJ-30	56.2±0.2 ^b	10.1±0.2 ^c	886.2±15.2 ^a	104.5±4.8 ^d
NS	51.4±1.7 ^c	34.6±1.3 ^c	863.2±140.8 ^a	121.5±1.3 ^c
GZ	55.1±2.6 ^b	28.3±0.2 ^d	684.7±4.2 ^b	118.6±3.1 ^c

注: 同列不同小写字母表示不同处理之间差异性显著 ($P<0.05$), 下同;“-”表示未检出。

2.3 色泽

色泽被认为是消费者选择食物时重要的特征之一, 它提供了关于食物品质的基本信息。表 2 显示了蜜桃果酱在不同

加工时期的色泽性质(L^* 、 a^* 、 b^* 、BI、色度和转换角)。在整个制酱过程中, L^* 、 a^* 、 b^* 、BI、色度和转换角存在显著变化。将桃果实加工成果酱时,颜色变为黄色(色度较高),色度值不太强烈(转换角较小),加工后期变化更为显著($P<0.05$)。在 LAB 发酵过程中,与初始原料相比,BI 值降低近 10%,说明 LAB 发酵对果酱色泽的改善是有利的,并且成品的 BI 值也低于初始原料。而水果加工过程中 a^* 的稳定性被解释为花青素等在加工过程中从水果扩散到凝胶中^[38]。益生菌发酵果蔬产品的色泽会受到物料抗氧化能力和生物活性物质含量的影响^[39-40],蜜桃果酱的浓缩过程需要长时间的高温处理,加速抗氧化物质的损失。与此同时,果酱失去原有颜色。改进果酱的制备工艺、提高热能利用率、缩短加工时间、实现良好的护色,将成为未来果酱加工的热点问题。

2.4 挥发性风味物质分析

风味是水果制品的一个重要的感官特性^[41]。由表 3 可知,在蜜桃果酱中共检测到 53 种挥发性有机化合物,包括 12 种醛类、8 种酮类、11 种醇类、6 种酯类、3 种烯类、7 种烷烃类、1 种酸类、2 种内酯和 3 种其他类。其中,醛类、酮类、酯类和醇类是果酱中种类最为丰富的挥发性风味物质。酯类是果酱加工过程中主要芳香类物质之一。在果酱制作过程,DJ 阶段含有 5 种、NF 阶段含有 3 种、FJ-24 阶段含有 3 种、FJ-30 阶段含有 2 种。大部分酯类化合物含量减少,如乙酸己酯、(E)-2-己烯基己酸酯,可能是酯类水解或者挥发量大于酯类的形成所致^[42]。酮类化合物的特

点是阈值相对较低,易被感知^[42]。6-甲基-5-庚烯-2-酮、香叶基丙酮和 2-壬酮在果酱中含量较高。在检测到的酮类中,2-庚酮、2-癸酮和 2-壬酮仅仅在发酵过程中产生。醛类是果酱制作过程中重要挥发性物质。其中,苯甲醛、(E)-2-己烯醛、壬醛、癸醛、2-十一烯醛、(Z)-2-癸烯醛、4-丙基苯甲醛含量较高。(E)-2-己烯醛具有青草味^[43],在 DJ 阶段含量最高。醛类有明显的脂肪气味,但高浓度的醛类可能会导致异味^[44]。在 FJ-24 阶段,大多数醛,如壬醛、苯乙醛和(E)-2-己烯醛含量有所减少。因为醛类是不稳定的化合物,在微生物作用下可以将部分醛类还原为醇或氧化为有机酸,并释放结合的酚类化合物^[45-46]。与发酵前(DJ 和 NF 两个阶段)相比,发酵后(FJ-24 和 FJ-30 阶段)酸类和醇类化合物数量有所增加,这之前报道的研究是一致的。果酱制作过程中,不同阶段风味物质组成存在明显差异。其中,发酵前(DJ 阶段)含有醛类 9 种、酮类 4 种、醇类 5 种、酯类 5 种、烷烃类 3 种、内酯 2 种和其他类 2 种。发酵后(FJ-24 阶段)含有醛类 8 种、酮类 4 种、醇类 7 种、酯类 3 种、烯类 1 种、烷烃类 5 种、酸类 1 种、内酯 1 种和其他类 2 种。少量醇类化合物可产生淡淡的香气,并可作为其他香气物质的良好溶剂^[47]。本研究中鉴定到 11 种醇类,分别是(E)-2-己烯-1-醇、1-辛烯-3-醇、2-乙基己醇、(Z)-2-辛烯醇、芳樟醇、2-丁基辛醇、苯乙醇、十一醇、壬醇、(+)- β -香茅醇和苯甲醇。其中,乳酸菌发酵后新形成的有 3 种(苯甲醇、1-辛烯-3-醇和壬醇),赋予发酵蜜桃果酱浓郁的果香味。

表 2 果酱制作过程中色泽参数($n=3$)
Table 2 Color parameters of fruits jam during processing ($n=3$)

色泽参数	DJ	NF	FJ-24	FJ-30	NS	GZ
L^*	52.48±0.44 ^c	52.75±0.25 ^c	56.01±0.30 ^a	54.93±0.30 ^b	53.01±0.09 ^c	53.07±0.63 ^c
a^*	4.01±0.25 ^a	4.00±0.35 ^a	2.60±0.16 ^c	2.52±0.09 ^c	2.20±0.44 ^c	3.21±0.23 ^b
b^*	11.59±0.54 ^{ab}	12.00±0.47 ^a	12.34±0.50 ^a	11.99±0.10 ^a	10.17±1.85 ^b	11.78±0.93 ^{ab}
BI	30.13±1.37 ^a	30.93±1.42 ^a	27.82±1.14 ^{ab}	27.52±0.44 ^{ab}	23.99±4.89 ^b	29.08±2.18 ^a
色度	12.26±0.59 ^a	12.65±0.54 ^a	12.61±0.52 ^a	12.25±0.11 ^a	10.40±1.90 ^b	12.21±0.96 ^a
转换角	1.24±0.01 ^c	1.25±0.02 ^c	1.36±0.01 ^a	1.36±0.01 ^a	1.36±0.01 ^a	1.30±0.01 ^b

注:同行不同小写字母表示不同处理之间差异性显著($P<0.05$),下同

表 3 鉴定和定量不同时期蜜桃果酱中挥发性化合物($n=3$)
Table 3 Volatile compounds identified and quantified in honey peach jam during different periods ($n=3$)

中文名称	CAS#	化合物含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)					
		DJ	NF	FJ-24	FJ-30	NS	GZ
醛类							
(E)-2-己烯醛	C6728-26-3	3.19±0.35	2.21±0.39	1.68±0.24	2.89±0.32	-	-
苯甲醛	C100-52-7	103.82±6.95	168.07±19.15	249.88±11.88	293.16±23.31	262.61±22.34	323.17±15.51
苯乙醛	C122-78-1	0.28±0.07	0.77±0.09	-	-	-	-
(E)-2-辛烯醛	C2548-87-0	0.93±0.16	5.57±0.88	3.74±0.83	4.29±1.13	38.79±2.44	24.33±1.65
壬醛	C124-19-6	5.63±0.26	7.48±0.87	4.57±0.69	5.83±0.26	13.43±0.30	11.82±0.88
癸醛	C112-31-2	2.99±0.33	2.21±0.20	1.00±0.23	4.57±0.85	4.39±0.76	3.54±0.87
2,4-二甲基苯甲醛	C15764-16-6	1.09±0.24	0.85±0.22	1.88±0.56	2.24±0.24	1.12±0.23	-
(Z)-2-癸烯醛	C2497-25-8	-	-	-	-	6.11±0.78	3.64±0.15
(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	C141-27-5	1.13±0.21	0.73±0.21	1.53±0.15	-	2.02±0.27	1.23±0.25

表3(续)

中文名称	CAS#	化合物含量/($\mu\text{g}/\text{kg}$)					
		DJ	NF	FJ-24	FJ-30	NS	GZ
4-丙基苯甲醛	C28785-06-0	-	-	-	1.47 \pm 0.41	2.69 \pm 0.48	5.64 \pm 0.23
2-十一烯醛	C2463-77-6	-	0.76 \pm 0.19	0.62 \pm 0.27	1.45 \pm 0.22	8.92 \pm 0.45	4.99 \pm 0.19
月桂醛	C112-54-9	0.34 \pm 0.05	-	-	1.18 \pm 0.20	-	-
酮类							
2-庚酮	C110-43-0	-	-	-	1.58 \pm 0.24	-	-
1-辛烯-3-酮	C4312-99-6	-	-	-	-	5.75 \pm 0.34	-
6-甲基-5-庚烯-2-酮	C110-93-0	1.45 \pm 0.52	8.36 \pm 0.68	21.94 \pm 2.36	15.91 \pm 0.61	38.58 \pm 7.76	24.62 \pm 3.43
2-壬酮	C821-55-6	-	-	4.36 \pm 0.41	3.29 \pm 0.64	-	-
2-癸酮	C112-12-9	-	-	2.55 \pm 0.16	-	-	-
二氢- β -紫罗酮	C17283-81-7	1.54 \pm 0.37	0.72 \pm 0.09	-	-	-	-
香叶基丙酮	C3796-70-1	2.52 \pm 0.54	5.15 \pm 0.93	8.7 \pm 1.21	6.29 \pm 0.58	16.49 \pm 2.79	9.19 \pm 0.79
β -紫罗酮	C14901-07-6	1.66 \pm 0.45	0.79 \pm 0.21	-	-	-	-
醇类							
(E)-2-己烯-1-醇	C928-95-0	93.53 \pm 2.16	96.86 \pm 4.25	-	-	6.84 \pm 1.04	-
1-辛烯-3-醇	C3391-86-4	-	-	9.35 \pm 2.57	8.77 \pm 2.34	-	43.56 \pm 3.23
2-乙基己醇	C68526-83-0	-	-	-	-	-	7.32 \pm 1.54
苯甲醇	C100-51-6	-	-	86.96 \pm 5.60	86.23 \pm 3.83	45.97 \pm 4.59	30.74 \pm 3.61
(Z)-2-辛烯醇	C26001-58-1	-	5.24 \pm 0.56	4.52 \pm 0.32	3.59 \pm 0.59	19.64 \pm 0.82	9.08 \pm 0.35
芳樟醇	C78-70-6	10.17 \pm 0.62	6.77 \pm 0.62	8.84 \pm 0.54	4.46 \pm 0.40	0.53 \pm 0.12	0.52 \pm 0.10
苯乙醇	C60-12-8	0.86 \pm 0.21	-	4.32 \pm 0.37	0.66 \pm 0.14	-	-
2-丁基辛醇	C3913-02-8	2.05 \pm 0.24	-	-	-	-	-
十一醇	C112-42-5	-	2.24 \pm 0.81	-	-	-	-
壬醇	C143-08-8	-	-	13.59 \pm 1.28	10.26 \pm 1.21	5.34 \pm 0.41	4.21 \pm 0.42
(+)- β -香茅醇	C1117-61-9	2.69 \pm 0.69	1.13 \pm 0.25	2.96 \pm 0.32	-	-	0.45 \pm 0.06
酯类							
甲酸庚酯	C112-23-2	-	-	6.04 \pm 0.99	2.78 \pm 0.46	-	-
乙酸己酯	C142-92-7	9.64 \pm 0.52	4.74 \pm 0.91	4.13 \pm 0.34	2.72 \pm 0.61	-	-
(E)-2-己烯基己酸酯	C53398-86-0	0.39 \pm 0.07	-	-	-	-	-
苯甲酸苄酯	C120-51-4	0.39 \pm 0.08	-	-	-	-	-
邻苯二甲酸-4-庚基异丁酯	NA	1.23 \pm 0.32	0.28 \pm 0.04	-	-	-	-
邻苯二甲酸二丁酯	C84-74-2	4.21 \pm 0.37	1.89 \pm 0.76	3.75 \pm 0.34	-	-	-
烯类							
3-乙基-1,4-己二烯	C2080-89-9	-	0.62 \pm 0.07	-	-	7.13 \pm 1.02	5.24 \pm 0.56
2,6-二甲基-2,6-辛二烯	C2792-39-4	-	-	-	-	17.66 \pm 2.62	-
3,5-二甲基-1-己烯	C7423-69-0	-	-	6.09 \pm 0.25	3.11 \pm 0.29	-	-
烷烃类							
月桂烷	C112-40-3	3.16 \pm 0.34	2.12 \pm 0.58	2.46 \pm 0.38	-	-	-
2,6,11-三甲基十二烷	C31295-56-4	-	0.36 \pm 0.05	-	1.93 \pm 0.69	0.84 \pm 0.21	-
十六烷	C544-76-3	0.89 \pm 0.27	0.69 \pm 0.23	1.73 \pm 0.14	-	-	-
2,6,11,15-四甲基十六烷	C504-44-9	0.88 \pm 0.23	3.02 \pm 0.52	2.82 \pm 0.22	4.97 \pm 0.26	3.18 \pm 0.22	0.44 \pm 0.07
2,6,10-三甲基十四烷	C14905-56-7	-	0.32 \pm 0.05	0.52 \pm 0.09	0.96 \pm 0.04	-	-
2,6,10,14-四甲基十六烷	C638-36-8	-	0.33 \pm 0.07	-	-	-	-
2-甲基二十烷	C1560-84-5	-	2.44 \pm 0.11	4.59 \pm 0.36	1.76 \pm 0.59	-	-
酸类							
2-乙基己酸	C149-57-5	-	-	13.91 \pm 0.20	38.26 \pm 0.81	11.13 \pm 0.25	22.44 \pm 0.47
内酯							
γ -己内酯	C695-06-7	2.51 \pm 0.31	-	-	-	-	-
丙位癸内酯	C706-14-9	11.61 \pm 0.69	8.83 \pm 0.43	12.44 \pm 0.46	10.61 \pm 0.70	6.63 \pm 0.29	5.32 \pm 0.52
其他类							
(Z)-2-己烯-醋酸盐	C56922-75-9	23.18 \pm 1.57	12.32 \pm 2.43	9.86 \pm 1.06	6.24 \pm 0.87	-	-
正己酸酐	C2051-49-2	-	1.35 \pm 0.22	2.22 \pm 0.28	1.47 \pm 0.11	-	-
茶香螺烷	C36431-72-8	1.82 \pm 0.21	0.83 \pm 0.09	-	-	-	-

注: -该化合物未检出。

2.5 香气活度值

风味感知不仅取决于挥发性化合物的含量,而且还与挥发性化合物的阈值有关。OAV 是结合这两个参数来评估挥发性化合物贡献率的指标。通常来说,当 $OAV \geq 1$ 时,该化合物在食物的整体气味中发挥着重要作用^[48]。表 4 列出了蜜桃果酱中 $OAV > 1$ 的挥发性有机化合物及其气味描述。如表 4 所示,10 种关键风味物质在整个果酱制作过程

中具有重要贡献。特别是,苯甲醛、1-辛烯-3-酮、1-辛烯-3-醇、芳樟醇、壬醇和壬醛的 OAV 大于 5。ZHU 等^[49]通过 GC-MS-O 结合 OAV 分析鉴定出 5 种桃中关键香气化合物。其中,己醛(呈青草味、脂肪味)、(E)-2-己烯醛、 γ -癸内酯(甜味、椰子味)、芳樟醇(花香、薰衣草味)和苯乙醛(蜂蜜味、甜味)的香气活度值最高,这与本研究的结果基本相似。

表 4 不同时期蜜桃果酱关键挥发性成分的气味活性值

Table 4 Odour activity values of key volatile compounds of honey peach jam during different periods

化合物	气味描述	阈值 ^a /($\mu\text{g}/\text{kg}$)	DJ	NF	FJ-24	FJ-30	NS	GZ
苯甲醛	甜味、水果味、杏仁味	24	4.32	7	10.41	12.22	10.94	13.47
1-辛烯-3-酮	草本、蘑菇、土腥味	0.01	-	-	-	-	575	-
1-辛烯-3-醇	蘑菇味	1	-	-	9.35	8.77	-	43.56
乙酸己酯	甜味、果香	2	4.82	2.37	2.05	1.36	-	-
芳樟醇	蜡质、橙子味、玫瑰花味	1.49	6.83	3.56	5.9	2.99	<1	<1
壬醇	花香味	2	-	-	6.795	5.13	2.65	2.105
癸醛	果香、脂肪味、玫瑰花味	3.02	<1	<1	<1	1.51	1.45	1.17
月桂醛	柑橘味、花香味	1.07	<1	-	-	1.1	-	-
β -紫罗酮	花香味	0.461	3.6	1.71	-	-	-	-
壬醛	脂肪味、柑橘味	1	5.63	7.48	4.57	5.83	13.43	11.8

注:^a化合物的阈值参考 HU 等^[50]和 WEN 等^[51]的报道,香气描述根据 <http://www.thegoodscentscompany.com>。

2.6 偏最小二乘回归分析

本研究以 53 种挥发性风味物质为自变量(X),以不同制酱阶段为因变量(Y)进行模型分析。从图 5 可以看出,不同制作过程的蜜桃果酱被很好地区分开来。依据偏最小二乘法判别分析结果,以 6 个主成分作为模型拟合结果最优,模型的 $R^2X(\text{cum})$ 自变量拟合指数值是 0.989,表示当模型以 6 个主成分拟合自变量时,其可反映总自变量中的 98.9%;同时,因变量(Y)的拟合指数 $R^2Y(\text{cum})$ 值是 0.988,表示当模型以 6 个主成分拟合自变量时,可反映总因变量中的 98.8%;模型预测指标 $Q^2(\text{cum})=0.912$,对于不同制作过程中蜜桃果酱风味物质相关性的预测率为 91.2%。证明模型结果是可靠的。如图 5 所示,6 个制酱时期被分成 3 个组,第 1 组(DJ 和 NF 阶段)位于 $t(1)$ 正向区域,第 2 组(FJ-24 和 FJ-30 阶段)位于 $t(1)$ 反向和 $t(2)$ 正向区域,第 3 组(NS 和 GZ 阶段)位于 $t(1)$ 反向和 $t(2)$ 反向区域。

2.7 感官性质

对蜜桃果酱制作过程的感官评价,围绕色泽、香气、甜度、酸味、质地和总可接受度 6 个方面,结果如图 6 所示。感官评价小组的成员更喜欢发酵后的酸味和甜度,这可能是 LAB 发酵前原料中甜度偏高,酸味不明显。经 LAB 发酵后,部分糖类被代谢转换,甜度和酸味更加适口,有机酸含量(特别是乳酸)有所增加,味道逐渐被消费者接受。此外,由于苹果酸的减少,乳酸在有机酸中的比例不断增加,导致口感越来越柔和,酸甜度也越来越高。经过乳酸菌发酵,提高了品评人员对色泽的喜好程度,这与仪器测

试的色差结果一致,将有利于产品的市场推广。同时,添加增稠剂有助于改善产品的质地,质地的感官得分明显增加,赋予果酱产品应有的凝胶特性。

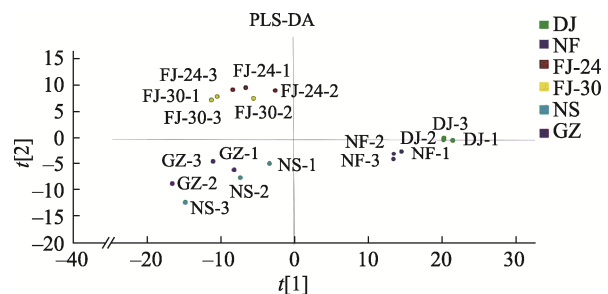


图 5 不同加工过程蜜桃果酱的 PLS-DA 图

Fig.5 PLS-DA diagram of honey peach jam in different periods

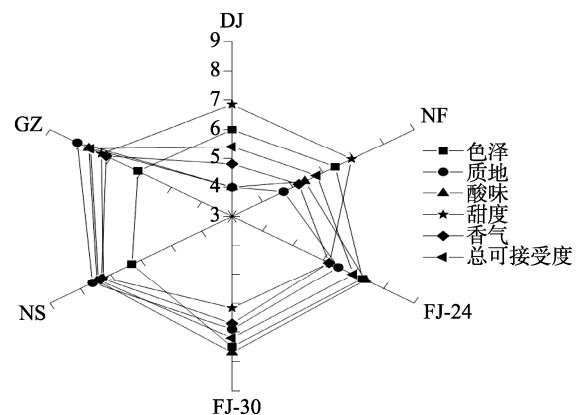


图 6 蜜桃果酱制作过程中感官评价

Fig.6 Sensory evaluation of honey peach jam during production process

3 结 论

本研究采用 HS-SPME-GC-MS、OAV 和 PLS-DA 化学计量学手段,对蜜桃果酱制作过程中挥发性风味物质进行系统分析,检测到 53 种挥发性风味物质,包括醛类、酯类、酸类、烯类、醇类、酮类、内酯和其他。其中,苯甲醛、1-辛烯-3-酮、1-辛烯-3-醇、乙酸己酯、芳樟醇、壬醇、癸醛、月桂醛、 β -紫罗酮和壬醛对香气的贡献程度最大(OAV>1)。对检测到的挥发性风味物质进行 PLS-DA 分析,结果表明,果酱不同制作阶段得以很好地区分开来,且模型的可信度高。相比未发酵(DJ 和 NF 阶段),乳酸菌发酵明显提高了总多酚、总黄酮的含量,降低 pH 产生较多酸性物质,并且具有较高的 DPPH 自由基清除能力,而 TSS 含量变化不明显。但是,NS 和 GZ 过程不可避免的发生美拉德反应、焦糖化反应、化合物热降解,对成品的色泽(L^* 、 a^* 、 b^*)有明显改变。乳酸作为乳酸菌代谢糖类的特征产物,在发酵过程中,含量变化明显($P<0.05$);而柠檬酸和琥珀酸均随发酵时间延长而降低。本研究后续将围绕果酱的护色、非热杀菌(微波、高压脉冲电场等)、不同增稠剂对果酱凝胶性质的影响,以及体外模拟消化过程品质变化情况,进行深入细致的研究,为果蔬产业深加工提供理论参考。

参考文献

- FAUST M, TIMON B. Origin and dissemination of peach [J]. *Hortic Rev*, 1995, 17: 331-379.
- 王力荣. 我国桃产业现状与发展建议[J]. *中国果树*, 2021, (10): 1-5.
WANG LR. Current situation and development suggestions of peach industry in China [J]. *China Fruits*, 2021, (10): 1-5.
- 赵雷, 刘希涛, 杨诗妮, 等. 食品胶对荔枝果酱焙烤特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(15): 265-269, 328.
ZHAO L, LIU XT, YANG SN, *et al.* Effects of hydrocolloids on the baking properties of the litchi jam [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(15): 265-269, 328.
- TOUATI N, TARAZONA-DIAZ M, AGUAYO E, *et al.* Effect of storage time and temperature on the physicochemical and sensory characteristics of commercial apricot jam [J]. *Food Chem*, 2014, 145: 23-27.
- 申光辉, 冯孟, 张志清, 等. 乳酸菌发酵低糖桑葚复合果酱工艺优化及其风味成分分析[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(1): 158-165.
SHEN GH, FENG M, ZHANG ZQ, *et al.* Optimization of process conditions and volatile flavor components analysis of low-sugar complex mulberry jam fermented by lactic acid bacteria [J]. *Jiangsu J Agric Sci*, 2018, 34(1): 158-165.
- HASHEMI S, KHANEGHAH A, BARBA F, *et al.* Fermented sweet lemon juice (*Citrus limetta*) using *Lactobacillus plantarum* LS5: Chemical composition, antioxidant and antibacterial activities [J]. *J Funct Foods*, 2017, 38: 409-414.
- SEPTEMBRE-MALATERRE A, REMIZE F, POUCHERET P. Fruits and vegetables, as a source of nutritional compounds and phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation [J]. *Food Res Int*, 2018, 104: 86-99.
- KAPRASOB R, KERDCHOECHUEN O, LAOHAKUNJIT N, *et al.* Fermentation-based biotransformation of bioactive phenolics and volatile compounds from cashew apple juice by select lactic acid bacteria [J]. *Process Biochem*, 2017, 59: 141-149.
- 刘哲, 周建中, 杨海燕, 等. 红树莓果酱的加工工艺及其贮藏性研究[J]. *新疆农业大学学报*, 2019, 42(4): 283-292.
LIU Z, ZHOU JZ, YANG HY, *et al.* Study on processing technology and storage property of red raspberry jam [J]. *J Xinjiang Agric Univ*, 2019, 42(4): 283-292.
- 鲍杰, 李莹灿, 刘雅冉, 等. 笃斯越橘果酱特征香气成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(6): 255-262.
BAO J, LI YC, LIU YR, *et al.* Characterization of aromatic compounds from wild bog bilberry jam products [J]. *Food Ferment Ind*, 2017, 43(6): 255-262.
- 刘希涛. 焙烤型复合荔枝果酱加工工艺研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
LIU XT. Study on the processing of baking composite litchi jam [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- 王晨. 五味子皮渣乳酸发酵复合果酱发酵工艺及品质特性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
WANG C. Study on fermentation technology and quality characteristics of the lactic acid fermentation from schisandra chinensis residue to compound jam [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2017.
- PEREIRA M, TAVANO O. Use of different spices as potential natural antioxidant additives on cooked beans (*Phaseolus vulgaris*) increase of DPPH radical scavenging activity and total phenolic content [J]. *Plant Food Hum Nutr*, 2014, 69: 337-343.
- KWAW E, MA Y, TCHABO W, *et al.* Effect of fermentation parameters and their optimization on the phytochemical properties of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. *J Food Meas Charact*, 2017, 11: 1462-1473.
- MUHALDIN B, HUSSIN A, SAPAWI C, *et al.* Effects of sugar sources and fermentation time on the properties of tea fungus (*kombucha*) beverage [J]. *Int Food Res J*, 2019, 26(2): 481-487.
- PEREIRA E, BARROS L, CALHELHA R, *et al.* Bioactivity and phytochemical characterization of *Arenaria montana* L [J]. *Food Funct*, 2014, 5(8): 1848-1855.
- HOJJATPANAH G, FAZAEI M, EMAM-DJOMEH Z. Effects of heating method and conditions on the evaporation rate and quality attributes of black mulberry (*Morus nigra*) juice concentrate [J]. *J Food Sci Technol*, 2013, 50(1): 35-43.
- PALOU E, LOPEZ-MALO A, BARBOSA-CANOVAS G, *et al.* Polyphenoloxidase activity and color of blanched and high hydrostatic pressure treated banana puree [J]. *J Food Sci*, 2010, 64: 42-45.
- BUVE C, NECKEBROECK B, HAENEN A, *et al.* Combining untargeted, targeted and sensory data to investigate the impact of storage on food volatiles: A case study on strawberry juice [J]. *Food Res Int*, 2018, 113: 382-391.
- SULEJMANI E, BORAN O, HUPPERTZ T, *et al.* Rheology, microstructure and sensory properties of low-fat milk jam: Influence of inulin type, sucrose content, sodium bicarbonate and calcium chloride [J]. *Int Dairy J*, 2021, 123: 105162.
- WEI M, WANG S, GU P, *et al.* Comparison of physicochemical indexes, amino acids, phenolic compounds and volatile compounds in bog bilberry juice fermented by *Lactobacillus plantarum* under different pH conditions [J]. *J Food Sci Technol*, 2018, 55(6): 2240-2250.
- RICCI A, CIRLINI M, LEVANTE A, *et al.* Volatile profile of elderberry juice: Effect of lactic acid fermentation using *L. plantarum*, *L. rhamnosus* and *L. casei* strains [J]. *Food Res Int*, 2018, 105: 412-422.
- LI Z, TENG J, LYU Y, *et al.* Enhanced antioxidant activity for apple juice fermented with *Lactobacillus plantarum* ATCC14917 [J]. *Molecules*, 2018, 24: 51-63.
- QI J, HUANG H, WANG J, *et al.* Insights into the improvement of bioactive phytochemicals, antioxidant activities and flavor profiles in Chinese wolfberry juice by select lactic acid bacteria [J]. *Food Biosci*,

2021. DOI: 10.1016/j.fbio.2021.101264
- [24] CAGNO R, FILANNINO P, CAVOSKI I, *et al.* Bioprocessing technology to exploit organic palm date (*Phoenix dactylifera* L. cultivar Siwi) fruit as a functional dietary supplement [J]. *J Funct Foods*, 2017, 31: 9–19.
- [25] CAGNO R, FILANNINO P, GOBBETTI M. Lactic acid fermentation drives the optimal volatile flavor-aroma profile of pomegranate juice [J]. *Int J Food Microbiol*, 2017, 248: 56.
- [26] POIANA M, MOIGRADEAN D, DOGARU D, *et al.* Processing and storage impact on the antioxidant properties and color quality of some low sugar fruit jams [J]. *Rom Biotech Lett*, 2011, 16(5): 6504–6512.
- [27] SHINWARI K, RAO P. Stability of bioactive compounds in fruit jam and jelly during processing and storage: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, 75: 181–193.
- [28] KACHOURI F, KSONTINI H, KRAIEM M, *et al.* Involvement of antioxidant activity of *Lactobacillus plantarum* on functional properties of olive phenolic compounds [J]. *J Food Sci Technol*, 2015, 52(12): 7924–7933.
- [29] ZHENG J, WITTOUCK S, SALVETTI E, *et al.* A taxonomic note on the genus *Lactobacillus*: Description of 23 novel genera, emended description of the genus *Lactobacillus* Beijerinck 1901, and union of *Lactobacillaceae* and *Leuconostocaceae* [J]. *Int J Syst Evol Micr*, 2020, 70(4): 2782–2858.
- [30] CAGNO R, MINERVINI G, RIZZELLO C, *et al.* Effect of lactic acid fermentation on antioxidant, texture, color and sensory properties of red and green smoothies [J]. *Food Microbiol*, 2011, 28(5): 1062–1071.
- [31] SHINWARI K, RAO P. Stability of bioactive compounds in fruit jam and jelly during processing and storage: A review [J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, 75: 181–193.
- [32] BOF C, FONTANA R, PIEMOLINI-BARRETO L, *et al.* Effect of freezing and processing technologies on the antioxidant capacity of fruit pulp and jelly [J]. *Braz Arch Biol Technol*, 2012, 55: 107–114.
- [33] YAN Y, ZHANG F, CHAI Z, *et al.* Mixed fermentation of blueberry pomace with *L. rhamnosus* GG and *L. plantarum*-1: Enhance the active ingredient, antioxidant activity and health-promoting benefits [J]. *Food Chem Toxicol*, 2019, 131: 110541.
- [34] LI T, JIANG T, LIU N, *et al.* Biotransformation of phenolic profiles and improvement of antioxidant capacities in jujube juice by select lactic acid bacteria [J]. *Food Chem*, 2021, 339: 127859.
- [35] TKACZ K, CHMIELEWSKA J, TURKIEWICZ 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 Chem*, 2020, 332: 127382.
- [36] CIRLINI M, RICCI A, GALAVERNA G, *et al.* Application of lactic acid fermentation to elderberry juice: Changes in acidic and glucidic fractions [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2020, 118: 108779.
- [37] HOLZWARTH M, KORHUMMEL S, SIEKMANN T, *et al.* Influence of different pectins, process and storage conditions on anthocyanin and colour retention in strawberry jams and spreads [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2013, 52(2): 131–138.
- [38] KWAW E, MA Y, TCHABO W, *et al.* Impact of ultra-sonication and pulsed light treatments on phenolics concentration and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2018, 92: 61–66.
- [39] KWAW E, MA Y, TCHABO W, *et al.* Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. *Food Chem*, 2018, 250: 148–154.
- [40] LEE P, SAPUTRA A, YU B, *et al.* Effects of pure and mixed-cultures of *Saccharomyces cerevisiae* and *Williopsis saturnus* on the volatile profiles of grape wine [J]. *Food Biotechnol*, 2012, 26(4): 307–325.
- [41] CHEN C, LU Y, YU H, *et al.* Influence of 4 lactic acid bacteria on the flavor profile of fermented apple juice [J]. *Food Biosci*, 2019, 27: 30–36.
- [42] LIU X, DENG J, BI J, *et al.* Cultivar classification of cloudy apple juices from substandard fruits in China based on aroma profile analyzed by HS-SPME/GC-MS [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2019, 102: 304–309.
- [43] YUAN B, ZHAO C, YAN M, *et al.* Influence of gene regulation on rice quality: Impact of storage temperature and humidity on flavor profile [J]. *Food Chem*, 2019, 283: 141–147.
- [44] CAGNO R, FILANNINO P, GOBBETTI M. Lactic acid fermentation drives the optimal volatile flavor-aroma profile of pomegranate juice [J]. *Int J Food Microbiol*, 2017, 248: 56–62.
- [45] GOSWAMI R, JAYAPRAKASHA G, SHETTY K, *et al.* *Lactobacillus plantarum* and natural fermentation-mediated biotransformation of flavor and aromatic compounds in horse gram sprouts [J]. *Process Biochem*, 2018, 66: 7–18.
- [46] LAAKSONEN O, KULDJARV R, PAALME T, *et al.* Impact of apple cultivar, ripening stage, fermentation type and yeast strain on phenolic composition of apple ciders [J]. *Food Chem*, 2017, 233: 29–37.
- [47] OLIVARES A, NAVARRO J, FLORES M. Establishment of the contribution of volatile compounds to the aroma of fermented sausages at different stages of processing and storage [J]. *Food Chem*, 2009, 115: 1464–1472.
- [48] ZHU J, XIAO Z. Characterization of the key aroma compounds in peach by gas chromatography-olfactometry, quantitative measurements and sensory analysis [J]. *Eur Food Res Technol*, 2018, 245(1): 129–141.
- [49] HU Y, LI Y, LI X, *et al.* Application of lactic acid bacteria for improving the quality of reduced-salt dry fermented sausage: Texture, color, and flavor profiles [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2022, 154: 112723.
- [50] WEN R, YIN X, HU Y, *et al.* Technological properties and flavour formation potential of yeast strains isolated from traditional dry fermented sausages in Northeast China [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2022, 154: 112853.

(责任编辑: 郑丽韩晓红)

作者简介

胡航伟, 硕士研究生, 主要研究方向为果蔬加工与贮藏。

E-mail: 2392133865@qq.com

刘云国, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品精深加工及贮藏保鲜。

E-mail: yguoliu@163.com