

药桑酵素的制备及品质分析

曹云, 袁保泰, 艾力塔比尔·艾尼完, 龙碧秀, 李瞻君, 侯旭杰*

(塔里木大学食品科学与工程学院, 南疆特色农产品深加工兵团重点实验室, 新疆阿拉尔 843300)

摘要: 药桑是新疆古老的果树品种之一, 药桑甚是珍贵的保健水果、维吾尔族的民间药材。该研究以新疆和田药桑葚为原料, 研制药桑酵素产品, 并对其品质及抗氧化活性进行综合评价, 为药桑葚的开发利用提供理论依据。结果表明, 药桑发酵的酵素产品中总酚、总黄酮、总游离氨基酸 (Total Amino Acids, TAA) 及超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 活力均有显著提升, 总酚含量由 7.21 mg/g 增加到 15.84 mg/g, 总黄酮含量由 5.50 mg/g 增加到 15.86 mg/g, 花色苷含量由 5.17 mg/g 减少到 3.54 mg/g, TAA 由 230.05 mg/100 g 增加到 518.47 mg/100 g, SOD 活力由 1 928.57 U/mL 增加到 2 532.86 U/mL, DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率分别提高到 70.85% 和 88.83%, 并且总酚、SOD 活力与抗氧化活性呈显著正相关 ($P<0.05$)。酵素产品挥发性风味物质由 35 种增加到 40 种, 通过气味活力值 (Odour Activity Value, OAV) 和主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 明确了药桑酵素的关键挥发性特征风味物质, 为癸酸乙酯、十四酸乙酯、月桂酸乙酯和芳樟醇, 表现为“果香”、“甜香”、“草本香”, 使药桑酵素口感更加协调、醇厚。研究表明, 经过发酵的药桑在营养成分、风味及抗氧化能力方面均得到了明显改善, 为药桑的开发利用提供理论依据。

关键词: 药桑酵素; 活性物质; 挥发性成分; 抗氧化活性

文章编号: 1673-9078(2025)02-253-261

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.2.0094

Preparation and Quality Analysis of Medicinal Mulberry Jiaosu (Ferment)

CAO Yun, YUAN Baotai, AILITABIER·Ainiwan, LONG Bixiu, LI Zhanjun, HOU Xujie*

(College of Food Science and Engineering, Tarim University/Southern Xinjiang Special Agricultural Products Deep Processing Corps Key Laboratory, Alar 843300, China)

Abstract: Medicinal mulberry is one of the ancient fruit tree species in Xinjiang, and is regarded as a precious health fruit and folk medicine of the Uyghur people. In this study, the medicinal mulberry in Hotan, Xinjiang was used as the raw material to develop the medicinal mulberry Jiaosu. Comprehensive evaluation of its quality and antioxidant activity was conducted to establish a theoretical foundation for the development and utilisation of medicinal mulberry. The results showed that the total phenols, total flavonoids, total amino acids (TAA) and superoxide dismutase (SOD) activity in the Jiaosu products obtained via fermentation of medicinal mulberry increased significantly, with the total phenols increasing from 7.21 mg/g to 15.84 mg/g, total flavonoids increasing from 5.50 mg/g to 15.86 mg/g, anthocyanin content decreasing from 5.17 mg/g to 3.54 mg/g, TAA increasing from 230.05 mg/100 g increased to 518.47 mg/100 g, SOD activity increasing from 1 928.57 U/mL to 2 532.86 U/mL, and DPPH and ABTS⁺ radical scavenging rates increasing to 70.85% and 88.83%,

引文格式:

曹云,袁保泰,艾力塔比尔·艾尼完,等.药桑酵素的制备及品质分析[J].现代食品科技,2025,41(2):253-261.

CAO Yun, YUAN Baotai, AILITABIER·Ainiwan, et al. Preparation and quality analysis of medicinal mulberry Jiaosu (ferment) [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(2): 253-261.

收稿日期: 2024-01-20

基金项目: 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助药桑蒸馏酒技术转化与示范项目 (CARS-18-SY24); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系资助项目 (CARS-18-SYZ24); 塔里木大学食品科学与工程学院研究生创新项目

作者简介: 曹云 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1550585910@qq.com

通讯作者: 侯旭杰 (1968-), 男, 硕士, 教授, 研究方向: 食品加工与贮藏技术, E-mail: houxujie@sina.com

respectively. Total phenols and SOD activity showed a significant positive correlation with antioxidant activity ($P < 0.05$). The number of volatile flavour substances in the Jiaosu products increased from 35 to 40. According to the Odor Activity Value (OAV) and Principal Component Analysis (PCA) results, the key volatile characteristic flavor substances of the medicinal mulberry Jiaosu were identified as ethyl caprate, ethyl tetradecanoate, ethyl laurate, and linalool, which give “fruity”, “sweet” and “herbal” flavors, making the Jiaosu to be more harmonious and mellow. The study showed that the nutrient composition, flavor and antioxidant capacity of the fermented medicinal mulberry were significantly improved, which provides a theoretical basis for the development and utilization of medicinal mulberry.

Key words: medicinal and mulberry Jiaosu; active substance; volatile components; antioxidant activity

新疆药桑 (Medicine Mulberry), 属黑桑种, 主要分布于新疆和田, 喀什等地区。因其生长环境及特殊染色体倍性^[1], 成为了国内极为罕见的种质资源, 是新疆维吾尔族传统民间药食两用型食品。药桑含有丰富的花青素、多酚、氨基酸等活性物质以及维生素、矿物质、游离酸等营养成分, 具有延缓衰老、降血糖、抗炎镇痛等功效^[2]。由于药桑采后不易贮存, 因此将其加工为附加值产品显得十分重要, 目前市面上主要以果酱、果汁、果酒等产品为主。

随着我国酵素产业的快速发展, 将药桑开发为酵素类功能性食品具有很高的经济价值。药桑酵素是以新疆药桑为原料, 经过微生物发酵而成的功能性发酵产品。在发酵过程中, 微生物通过自身的生长和代谢作用, 使药桑产生一系列生物化学变化, 不仅能保留原料的活性成分, 提高生物利用率^[3,4], 而且也符合消费者追求绿色健康食品的理念。目前, 关于药桑酵素的相关研究主要围绕药桑酵素的制备。研究表明, 药桑中酚酸^[5]、花青素^[6]、氨基酸等物质均高于其他桑葚, 这些物质不仅具有免疫调节功能^[7], 而且能够表现出良好的抗氧化活性^[8], 且其本身具有独特的风味物质^[9]。桑葚酵素中具有特殊的“酒香味”(醇类物质), 这是通过发酵过程中糖酵解途径和氨基酸分解代谢而产生^[10]。然而, 国内外对药桑酵素发酵的关键香气成分研究较少。

因此, 本研究以新疆药桑为原料研制药桑酵素, 研究其活性物质、挥发性成分、抗氧化活性的变化, 对药桑酵素进行综合评价, 以期新疆药桑的开发利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

药桑, 新疆和田蚕桑研究所 (-20 °C 保藏); 果胶酶 (食品级; 1×10^5 U/g), 河南甘淳食品有限公司;

果蔬酵素发酵剂 (植物乳杆菌 N3、保加利亚乳杆菌、瑞士乳杆菌、肠膜明串珠菌肠膜亚种、嗜热链球菌), 安琪酵母股份有限公司; 白砂糖 (食品级), 菏泽市大厨商贸有限公司; 所有试剂均为国产分析纯。

1.2 仪器与设备

TSQ9000 气相色谱 - 三重四极杆质谱联用仪, 赛默飞世尔科技; LA8080 全自动氨基酸分析仪, 日立高新公司; UV-2450 紫外可见分光光度计, 日本岛津; SB-5200DT 超声波清洗器, 宁波新芝生物科技股份有限公司; Synergy H1 多功能酶标仪, 美国 BioTek 仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 药桑酵素的制备

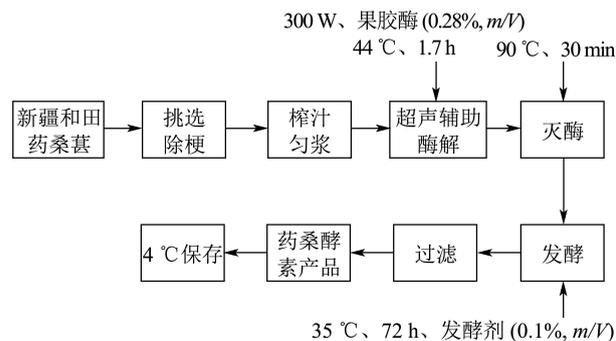


图 1 工艺流程

Fig.1 Process flow

1.3.2 活性成分测定

游离氨基酸测定: 参考林华嗣等^[11]的方法, 稍作修改。取 1 mL 样品, 加 9 mL 碘基水杨酸 (1%, V/V) 定容至 10 mL, 离心 (10 000 r/min, 10 min), 取上清液用 0.22 μ m 微孔滤膜过滤。测定过程中柱箱温度范围 30~70 °C, 流速 250 μ L/min, 进样体积 20 μ L, 反应器温度 110 °C, 检测波长 570 nm。

总酚测定: 参照 Kwaw 等^[12]的方法, 稍作修改。

取 2 mL 样品于 10 mL 棕色容量瓶中, 加入 1 mL 福林福试剂和 0.8 mL 碳酸钠溶液 (75 g/L), 摇匀后蒸馏水定容至刻度线, 暗处反应 1 h, 在 760 nm 波长下测定吸光度。使用没食子酸为标准品绘制标准曲线 $y=1.299x+0.0039$ ($R^2=0.9995$)。

总黄酮测定: 参照 Liu 等^[13]的方法, 使用芦丁为标准品绘制标准曲线 $y=0.1647x-0.0014$ ($R^2=0.9989$)。

花色苷的测定: 采用 pH 示差法^[14]。

超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 活力的测定: 利用 SOD 酶活力检测试剂盒进行检测。

1.3.3 抗氧化活性测定

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 和 2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑) [2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS] 自由基清除率采用总抗氧化能力 (T-AOC) 试剂盒法。

1.3.4 挥发性风味化合物测定

参考 Gao 等^[15]的方法, 稍作修改。采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法 (Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 法, 将 2 g 氯化钠、5 mL 样品、10 μ L 环己酮置于 20 mL 顶空瓶中。将老化的萃取头插入在 60 $^{\circ}$ C 平衡 10 min 的顶空瓶中, 并在 60 $^{\circ}$ C 恒温萃取 30 min 后, 插入进样口, 250 $^{\circ}$ C 条件下解析 4 min。

气相色谱条件如下: 采用 EI 电离模式, 电子能量 70 eV, 灯丝流量 0.3 μ A, 检测器电压为 350 V, 扫描范围为 50~550 u, 离子源温度 250 $^{\circ}$ C, 传输线温度 250 $^{\circ}$ C。升温程序为初始温度 50 $^{\circ}$ C, 保持 2 min 后以 3.5 $^{\circ}$ C/min 的速度升温至 120 $^{\circ}$ C/min, 保持 2 min 再以 6 $^{\circ}$ C/min 的速度升温至 240 $^{\circ}$ C/min, 保持 6 min。以 He 作为载气, 流量恒定为 1 mL/min。通过比较质谱数据库 NIST 2017 检索定性, 匹配度大于 70% 作为鉴定依据, 利用所得化合物的峰面积作为定量依据。

1.3.5 香气活度值

香气活度值 (Odour Activity Value, OAV), 即风味化合物在样品中的相对含量与该化合物的嗅觉阈值之比^[16]。一般认为, $OAV > 1$, 表明该物质对总体香气有直接贡献。通过《化合物香味阈值汇编》与文献检索查询上述挥发性成分在果酒类阈值并计算得每种 OAV, 公式如下:

$$B = \frac{P_i}{T} \quad (1)$$

式中:

B ——香气活度值 (OAV);

P_i ——待测组分相对含量, mg/L;

T ——挥发性成分的香气阈值, mg/L。

1.4 数据分析

本实验每个处理设置 3 个重复, 结果用均值 \pm 标准差 (Mean \pm SD) 表示。GraphPad Prism8、Origin 2021 绘图, SPSS 26.0 进行相关性分析和主成分分析。

2 结果与分析

2.1 药桑酵素游离氨基酸的组成及含量

表 1 药桑酵素中游离氨基酸的组成及含量

Table 1 Composition and content of total amino acids in the Jiaosu of mulberry

游离氨基酸	药桑原浆/(mg/100 g)	药桑酵素/(mg/100 g)
赖氨酸 (Lys)*	10.88 \pm 1.17 ^b	65.05 \pm 7.45 ^a
天冬氨酸 (Asp)	7.12 \pm 1.13 ^b	18.59 \pm 2.0 ^a
谷氨酸 (Glu)	94.39 \pm 5.80 ^b	110.16 \pm 5.51 ^a
苏氨酸 (Thr)*	4.43 \pm 0.72 ^b	26.34 \pm 3.57 ^a
丝氨酸 (Ser)	5.45 \pm 0.58 ^a	5.94 \pm 0.81 ^a
甘氨酸 (Gly)	0.15 \pm 0.08 ^b	6.92 \pm 1.61 ^a
脯氨酸 (Pro)	56.19 \pm 5.91 ^b	102.84 \pm 10.39 ^a
丙氨酸 (Ala)	17.20 \pm 2.12 ^a	24.35 \pm 4.18 ^a
组氨酸 (His)*	1.39 \pm 0.31 ^b	4.23 \pm 0.91 ^a
缬氨酸 (Val)*	3.85 \pm 0.58 ^b	33.57 \pm 3.68 ^a
亮氨酸 (Leu)*	3.58 \pm 0.99 ^b	34.90 \pm 6.69 ^a
异亮氨酸 (Ile)*	4.10 \pm 1.05 ^b	29.40 \pm 3.51 ^a
蛋氨酸 (Met)*	0.30 \pm 0.15 ^b	0.40 \pm 0.09 ^a
精氨酸 (Arg)	1.27 \pm 0.27 ^b	2.09 \pm 0.46 ^a
苯丙氨酸 (Phe)*	5.65 \pm 1.40 ^b	25.38 \pm 5.64 ^a
酪氨酸 (Tyr)	2.59 \pm 0.63 ^b	12.11 \pm 1.73 ^a
胱氨酸 (Cys)	11.50 \pm 1.57 ^b	16.22 \pm 2.92 ^a
总含量 TAA	230.05 \pm 11.37 ^b	518.47 \pm 31.97 ^a
鲜味氨基酸	112.94 \pm 6.57 ^b	193.79 \pm 13.79 ^a

注: * 表示必需氨基酸; 不同小写字母表示同种氨基酸之间差异显著 ($P < 0.05$)。

由表 1 知, 发酵前后的药桑共检测出 17 种游离氨基酸 (Total Amino Acids, TAA), 其中包括 8 种必需氨基酸, 9 种非必需氨基酸。药桑酵素总游离氨基酸较原浆增加了 288.42 mg/100 g, 其中谷氨酸、脯氨酸、赖氨酸含量最高; 由谷氨酸、天冬氨酸、丙氨酸、甘氨酸、苯丙氨酸和酪氨酸组成的鲜味氨基酸, 含量由 112.94 mg/100 g 增加到 193.79 mg/100 g, 在乳酸菌的作用下能够一定程度转化为风味挥发物质^[17]。付小琴^[18]以菠萝、百香果、苦荞芽为原料制备复合酵素, 乳酸菌利用糖类代谢导致氨基酸含量均较大幅度增加, 特别是鲜味氨基酸增加了 1.75 倍, TAA 含量增加了 1.55 倍。张倩茹等^[19]在探究红树莓发酵果汁中由于微生物和原料细胞自溶产生的氨基酸及氨基酸之间的相互转化作用, 游离氨基酸 16 种, 天冬氨酸由发酵前的 84.11 mg/kg 增至 143.78 mg/kg, 谷氨酸含量由发酵前的 118.69 mg/kg 增至 139.57 mg/kg, 两者是发酵液中含有最高的氨基酸, 是鲜味物质形成的前提。这与本文研究结果一致。

2.2 药桑酵素的活性成分含量分析

药桑酵素活性物质的含量分析见表 2, 酵素总酚含量由 7.21 mg/g 增加到 15.84 mg/g, 总黄酮含量由 5.50 mg/g 增加到 15.86 mg/g, SOD 活力由 1 928.57 U/mL 增加到 2 532.86 U/mL; TAA 是药桑中重要的品质成分之一, 其含量直接影响口感滋味, 含量为 518.47 mg/100 g, 约是原浆的 2.3 倍; 而花色苷含量由发酵前 5.17 mg/g 降至 3.54 mg/g。韦仕静^[20]在桑葚酵素的研究中发现在乳酸菌的作用下, 桑葚酵素 SOD 活力升高, 花色苷因受外界环境影响转化为酚酸和醛类物质, 含量明显降低。Sher 等^[21]发现用乳酸菌发酵龙眼干, 随着发酵的进行, 某些大分子酚类物质逐渐被微生物分解为小分子酚类化合物, 使总酚和总黄酮含量不断增加。这与本文研究结果一致。

表 2 药桑酵素活性物质的含量

Table 2 Content of active substances of mulberry Jiaosu

处理条件	总酚/(mg/g)	总黄酮/(mg/g)	花色苷/(mg/g)	TAA/(mg/100 g)	SOD 活力/(U/mL)
药桑酵素	15.84 ± 0.14 ^a	15.86 ± 0.12 ^a	3.54 ± 0.03 ^a	518.47 ± 31.97 ^a	2 532.86 ± 102.05 ^a
药桑原浆	7.21 ± 0.02 ^b	5.50 ± 0.07 ^b	5.17 ± 0.06 ^b	230.05 ± 11.37 ^b	1 928.57 ± 58.92 ^b

注: 不同小写字母表示同列之间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 药桑酵素抗氧化活性分析

由图 2 可以看出, 药桑酵素和原浆的 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除能力均有所差异。酵素的 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率分别为 70.85%、88.93%, 相比原浆均显著提高。说明经过发酵的药桑酵素, 具有更强的抗氧化活性。陈小伟等^[22]在探究草莓酵素发酵过程中抗氧化能力的变化, 发现随着发酵时间的延长, 草莓酵素的 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除能力均呈上升趋势。易媛等^[23]研究桑葚酵素的抗氧化活性中, DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率分别为 69.37%、70.85%, 较发酵前均有显著升高。

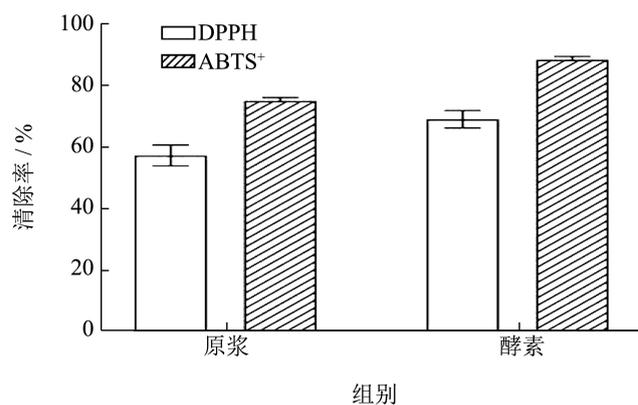


图 2 药桑原浆和酵素的 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基清除率
Fig.2 DPPH and ABTS⁺ free radical clearance of mulberry Jiaosu

2.4 药桑酵素活性物质与抗氧化活性的相关性分析

采用皮尔逊 (Pearson) 相关性分析药桑酵素的抗氧化能力与活性物质含量之间的相关性结果见图 3。DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率与总酚、SOD 活力呈显著正相关 ($P < 0.05$); 总黄酮与 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率呈正相关性, TAA 与 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率呈正相关性, 花色苷与 DPPH、ABTS⁺ 自由基清除率呈显著负相关。

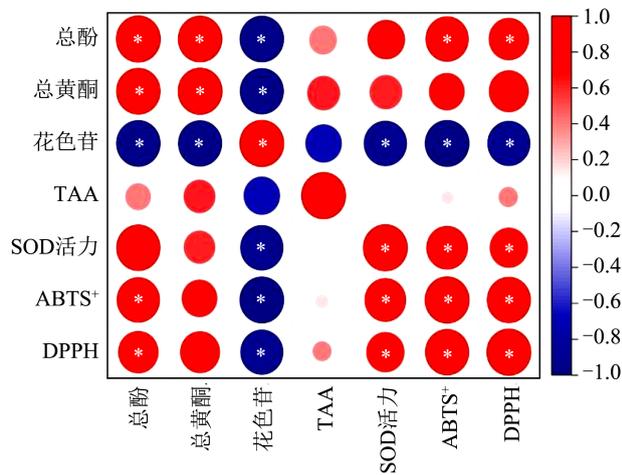


图3 药桑酵素活性物质和抗氧化活性之间的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis between active substances and antioxidant activities of medicinal mulberry jiaosu

注: *表示 $P < 0.05$ 。

结果表明,总酚、SOD可能是药桑酵素发酵过程中重要的抗氧化物质,微生物发酵能够增加总酚、总黄酮、TAA等物质含量和SOD活力,从而提高抗氧化能力。相关性分析中总酚、总黄酮、SOD、TAA均与药桑酵素的抗氧化能力呈正相关,表明这些物质含量的增加有利于提高药桑酵素的抗氧化能力。黄庆等^[24]在研究铁皮石斛发酵汁相关性分析中发酵液的总酚含量与自由基清除率显著正相关,在抗氧化能力中发挥主要作用。张海燕等^[25]对沙棘酵素活性物质与抗氧化活性进行相关性分析,SOD、总酚、黄酮均存在极显著相关性($P < 0.01$)。而花色苷在发酵过程中含量降低,与药桑酵素的抗氧化能力呈显著负相关,前人研究表明花色苷在发酵过程中发生了生物转化^[20]。

2.5 药桑酵素挥发性风味化合物特征分析

2.5.1 药桑酵素挥发性风味化合物成分分析

由表3可知,药桑酵素检测出40种挥发性化合物,包括25种酯类,5种醇类,5种酸类,3种醛类,酮类2种,烯炔类1种;其中26种风味物质与原浆相同,新增14种风味化合物,减少9种风味化合物,增加的风味化合物以酯类为主;减少的风味化合物以醛类、酸类为主;总含量较原浆增长了64.31%,以酯类物质为主。药桑原浆和药桑酵素的挥发性风味化合物总离子流图见图4。

酵素和原浆的风味化合物组成虽然相似,但

含量存在显著差异。药桑酵素酯类物质较原浆增加了256.55 mg/L,其中十四酸乙酯、棕榈酸乙酯、癸酸乙酯、月桂酸乙酯含量最高;醇类物质增加了53.13 mg/L,苯乙醇含量最高;醛类物质降低了0.56 mg/L;酸类物质增加了9.30 mg/L。说明经过微生物发酵能够丰富药桑原浆挥发性风味化合物的种类及含量。牛佳佳等^[26]在探究发酵酥梨汁挥发性成分中发现,随着发酵时间的延长,挥发性物质的种类和含量增加,酥梨原汁共有7种挥发性成分,发酵50 h的挥发性成分增加至46种,且产生了大量的高级醇、高级酯等物质赋予乳酸菌酥梨汁酸甜口感和独特的风味。

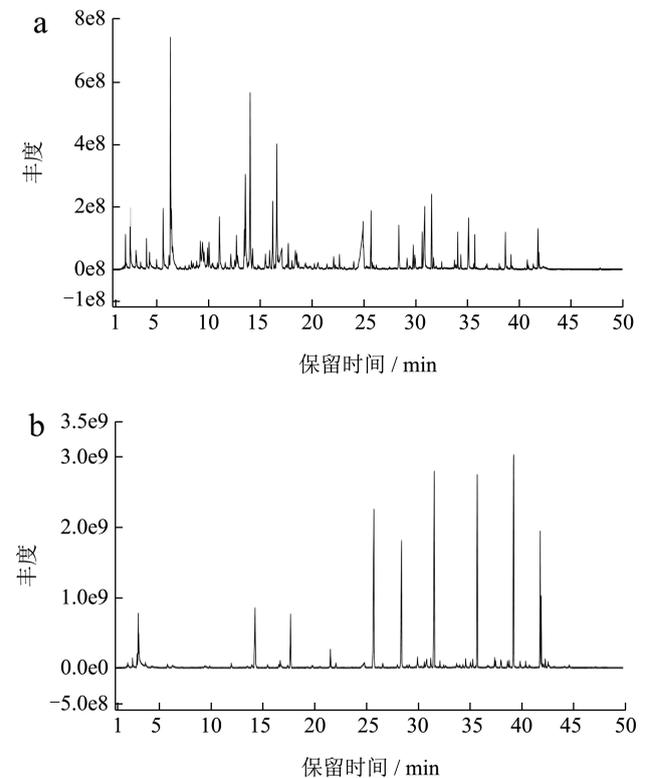


图4 药桑原浆(a)和药桑酵素(b)的挥发性风味化合物总离子流图

Fig.4 Total ion flow diagram of volatile flavor compounds of the original pulp (a) and the Jiaosu (b) of the mulberry

2.5.2 药桑酵素OAV分析

由表3可知,发酵前后共有27种挥发性成分OAV > 1,包括酯类、醇类、酸类和醛类。其中药桑酵素有24种挥发性成分OAV > 1,癸酸乙酯、十四酸乙酯、月桂酸乙酯、亚油酸乙酯和癸醛的OAV较高,表现为“果香”和“甜香”。而1-辛烯-3-醇、壬醛OAV降低,说明经过发酵,减少了药桑本身的“生青味”、“草本味”等风味。

表 3 药桑酵素挥发性风味物质含量及OAV分析
Table 3 Content and OAV analysis of volatile flavor substances in mulberry Jiaosu

类别	名称	CAS 编号	保留时间/min	阈值/(mg/L)	含量/(mg/L)		OAV 值		香气描述	
					药桑原浆	药桑酵素	药桑原浆	药桑酵素		
酯类	亚油酸乙酯	544-35-4	41.810	0.45	0.38 ± 0.04	32.95 ± 3.48	<1	73.22	脂肪气味	
	月桂酸乙酯	106-33-2	31.545	0.5	0.16 ± 0.05	35.03 ± 3.11	<1	70.06	甜味, 花香, 水果香, 奶油	
	壬酸乙酯	123-29-5	21.568	0.89	ND	4.77 ± 0.55	ND	5.36	水果, 玫瑰, 蜡味	
	棕榈酸乙酯	628-97-7	39.248	1.0	0.03 ± 0.01	45.62 ± 10.78	ND	45.62	轻度的蜡质	
	水杨酸甲酯	119-36-8	17.445	0.071	ND	0.79 ± 0.05	ND	11.18	冬青油香、药草味	
	乙酸异戊酯	123-92-2	5.833	0.03	ND	0.95 ± 0.11	ND	31.74	苹果, 菠萝	
	辛酸乙酯	106-32-1	17.721	0.6	0.07 ± 0.03	14.13 ± 1.55	<1	23.56	果香	
	9-十六碳烯酸乙酯	54546-22-4	38.822	ND	ND	1.74 ± 0.21	ND	ND		
	油酸乙酯	111-62-6	41.897	0.87	ND	15.81 ± 0.69	ND	18.18	花果香气	
	苯甲酸乙酯	93-89-0	16.585	0.5	0.53 ± 0.15	1.27 ± 0.28	1.06	2.54	甜香、果香、薄荷香	
	十四酸乙酯	124-06-1	35.733	0.5	0.07 ± 0.03	55.21 ± 4.61	<1	110.41	鸚尾油香	
	癸酸乙酯	110-38-3	25.763	0.2	0.16 ± 0.08	39.43 ± 10.80	<1	180.50	水果香, 脂肪, 蜡味	
	己酸乙酯	123-66-0	9.904	0.014	0.10 ± 0.02	0.77 ± 0.21	6.92	55.08	水果香, 梨, 樱桃	
	棕榈酸甲酯	112-39-0	38.051	ND	ND	1.45 ± 0.36	ND	ND		
	癸酸异戊酯	2306-91-4	32.682	ND	ND	0.57 ± 0.13	ND	ND		
	十五酸乙酯	41114-00-5	37.501	ND	ND	1.46 ± 0.10	ND	ND		
	乙酸乙酯	141-78-6	2.006	15	0.08 ± 0.03	0.69 ± 0.15	<1	<1		
	甲酸甲酯	107-31-3	1.191	ND	0.01 ± 0.00	0.29 ± 0.03	ND	ND		
	硬脂酸乙酯	111-61-5	42.300	0.5	ND	1.75 ± 0.04	ND	3.51	略呈蜡香	
	月桂酸甲酯	111-82-0	29.754	ND	0.06 ± 0.02	0.44 ± 0.07	ND	ND		
	十一酸乙酯	627-90-7	28.949	0.1	ND	0.61 ± 0.06	ND	6.12		
	苯甲酸甲酯	93-58-3	13.556	ND	0.45 ± 0.10	0.64 ± 0.07	ND	ND		
	肉豆蔻酸甲酯	124-10-7	34.352	ND	0.03 ± 0.01	0.91 ± 0.07	ND	ND		
	癸酸甲酯	110-42-9	22.634	0.0043	0.05 ± 0.01	0.19 ± 0.02	11.73	45.32		
	γ-壬内酯	104-61-0	20.006	0.021	0.04 ± 0.01	0.21 ± 0.02	1.69	9.87	椰子香	
	Σ(酯类)					2.21 ± 0.58	258.76 ± 20.31			
	醇类	苯乙醇	60-12-8	14.247	10	0.09 ± 0.01	20.52 ± 2.81	<1	2.06	蜂蜜, 甜香, 丁香花
		月桂醇	112-53-8	28.429	1.001	ND	16.63 ± 4.76	ND	16.61	月桂油, 松木香
壬醇		143-08-8	16.722	0.31	ND	2.83 ± 0.28	ND	8.63	生青味, 玫瑰, 橙	
异戊醇		123-51-3	2.996	ND	0.04 ± 0.01	13.77 ± 0.47	ND	ND		
正己醇		111-27-3	5.642	ND	0.18 ± 0.03	ND	ND	ND		
1-辛烯-3-醇		3391-86-4	9.210	0.02	0.15 ± 0.03	ND	7.52	ND	草本香	
芳樟醇		78-70-6	13.828	0.006	ND	0.89 ± 0.05	ND	148.33	铃兰香	
正庚醇		111-70-6	8.855	ND	0.03 ± 0.01	ND	ND	ND		
Σ(醇类)					0.62 ± 0.11	53.75 ± 3.21				

续表 3

类别	名称	CAS 编号	保留时间/min	阈值/(mg/L)	含量/(mg/L)		OAV 值		香气描述
					药桑原浆	药桑酵素	药桑原浆	药桑酵素	
酸类	正癸酸	334-48-5	24.854	1.000	0.17 ± 0.04	3.21 ± 0.82	<1	2.74	
	十四酸	544-63-8	35.080	ND	0.17 ± 0.06	1.81 ± 0.26	ND	ND	
	辛酸	124-07-2	16.913	0.500	0.23 ± 0.02	0.67 ± 0.22	<1	1.21	
	棕榈酸	57-10-3	38.661	ND	0.12 ± 0.02	2.01 ± 0.37	ND	ND	
	月桂酸	143-07-7	30.794	ND	0.16 ± 0.03	2.47 ± 0.78	ND	ND	
	亚油酸	60-33-3	41.327	ND	0.03 ± 0.01	ND	ND	ND	
	Σ(酸类)					0.87 ± 0.16	10.17 ± 1.86		
醛类	正己醛	66-25-1	4.019	ND	0.10 ± 0.01	ND	ND	ND	
	壬醛	124-19-6	13.996	0.015	0.74 ± 0.16	0.41 ± 0.04	49.09	27.33	生青味
	癸醛	112-31-2	18.057	0.01	0.03 ± 0.01	0.15 ± 0.03	2.70	15.00	甜香、花香
	月桂醛	112-54-9	26.189	0.006	0.01 ± 0.00	ND	ND	ND	
	E-2-壬醛	18829-56-6	16.196	0.01	0.21 ± 0.04	ND	357.10	ND	
	正辛醛	124-13-0	10.048	ND	0.11 ± 0.04	ND	7.33	ND	
	2,5-二甲基苯甲醛	5779-94-2	18.335	ND	0.04 ± 0.01	0.11 ± 0.03	ND	ND	
Σ(醛类)					1.23 ± 0.23	0.67 ± 0.04			
其他	苯乙烯	100-42-5	6.262	ND	ND	0.56 ± 0.13	ND	ND	
	2-壬酮	821-55-6	13.462	ND	0.13 ± 0.04	0.45 ± 0.06	ND	ND	
	2-庚酮	110-43-0	6.182	ND	0.04 ± 0.01	ND	ND	ND	
Σ(其他)					0.17 ± 0.05	1.01 ± 0.19			
Σ(总含量)					4.98 ± 1.11	325.25 ± 21.92			

注: ND 表示未检出。

2.6 药桑酵素 OAV 主成分分析

药桑酵素 OAV > 1 的挥发性风味化合物主成分分析见图 5。由图 5 可知, PC1 和 PC2 的方差贡献率分别为 64.5% 和 20.2%, 提取出的前两个主成分对整体方差的累计贡献率达到 84.7%, 能够将药桑原浆和药桑酵素中香气成分清晰区分。

药桑酵素的 3 组重复和大多数酯类 (D 类) 香气成分分布在 PC1 的正半轴即坐标轴的第一、四象限, 说明 PC1 的正半轴主要反映了酵素的香气特征; 另外癸酸乙酯 (D11)、十四酸乙酯 (D10)、月桂酸乙酯 (D2)、芳樟醇 (B5) 等距离酵素组较近, 是酵素的关键香气成分, 能够赋予“果香”、“甜香”、“草本香”和“脂肪香”, 原浆的 3 组重复和大多数醛类 (G 类) 和酸类 (E 类) 分布在第二象限, 说明第二象限主要反映了原浆的香气特征。正

辛醛 (G3)、壬醛 (G4)、1-辛烯-3-醇 (B4) 距离原浆组较近, 是原浆的关键香气成分, 赋予“花香”、“甜香”、“生青香”, 贾漫丽等^[27]研究表明壬醛的荷载权数为 0.635, 是桑葚的主体香气成分。李静静等^[28]同样利用主成分分析不同发酵阶段沙棘发酵饮料挥发性香气物质的差异, 发现沙棘汁与发酵沙棘汁之间的特征风味物质具有显著性差异 ($P < 0.05$), 即通过酵母菌发酵使得沙棘汁中的物质发生化学反应, 从而生成新物质, 如酯类等具有果香甜香的物质, 有助于丰富沙棘汁的香气, 提高酵母发酵沙棘饮料的风味和品质。这与本研究结果相近。

综上, 表明药桑酵素发酵过程有利于酯类香气的形成, “果香”、“甜香”、“草本香”和“脂肪香”为酵素的風味特征。

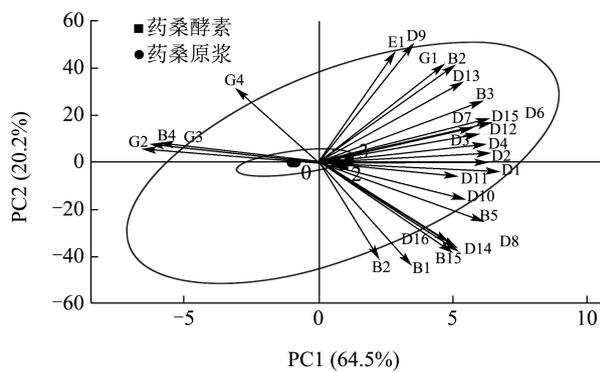


图5 药桑酵素挥发性风味化合物 (OAV > 1) 的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of volatile flavor compounds (OAV > 1) of mulberry jiaosu

注: D1~D16 分别代表亚油酸乙酯、月桂酸乙酯、壬酸乙酯、棕榈酸乙酯、水杨酸甲酯、乙酸异戊酯、辛酸乙酯、油酸乙酯、苯甲酸乙酯、十四酸乙酯、癸酸乙酯、己酸乙酯、硬脂酸乙酯、十一酸乙酯、癸酸甲酯、 γ -壬内酯; B1~B5 分别代表苯乙醇、月桂醇、壬醇、1-辛烯-3-醇、芳樟醇; E1、E2 分别代表正癸酸、辛酸; G1~G4 分别代表癸醛、E-2-壬醛、正辛醛、壬醛。

3 结论

本研究以新疆和田药桑葚为原料, 研制药桑酵素, 对活性物质、挥发性风味化合物及抗氧化活性进行分析比较。发现药桑酵素中总酚、总黄酮、TAA、SOD 活力、抗氧化活性较原浆均有所提高, 并且总酚、SOD 与抗氧化活性呈显著正相关, 说明药桑酵素抗氧化与总酚、SOD 活力密切相关。此外, 相较于药桑原浆, 药桑酵素的挥发性风味化合物种类和含量均有所增加, 同时明确了癸酸乙酯、十四酸乙酯、月桂酸乙酯、芳樟醇等物质是药桑酵素的关键香气成分, 赋予药桑酵素“果香”、“甜香”、“草本香”和“脂肪香”, 口感更加协调、醇厚, 以上研究表明, 经过发酵药桑在营养保健及风味方面得到了一定程度的改善与提高, 同时也为药桑的开发利用提供理论依据。

参考文献

- [1] 杜晓童, 刘凡, 沈维治, 等. 新疆药桑椹主要营养活性成分分析及体外抗炎作用[J]. 蚕业科学, 2020, 46(3): 306-312.
- [2] 崔夏. 药桑椹有效部位抗炎物质基础及作用机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022.
- [3] AXELLE S M, FABIENNE R, PATRICK P. Fruits and vegetables, as a source of nutritional compounds and vegetables, as a source of nutritional compounds and

phytochemicals: Changes in bioactive compounds during lactic fermentation [J]. Food Research International, 2018, 104: 86-99.

- [4] XIAO X W, LI S Y, ZHOU X B, et al. The anti-obesogenic effects and underpinning mechanisms of fermented plant-based foods: A review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 136: 1-10.
- [5] 樊子微, 杨璐, 程平, 等. 不同品种桑葚营养品质分析及综合评价[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(1): 127-139.
- [6] 马乐, 吕云皓, 江英. 新疆药桑有效成分及其功能研究进展[J]. 中国果菜, 2023, 43(2): 55-60.
- [7] 万娟, 塔及古丽·牙库甫, 刘志飞. 新疆不同品种的桑葚营养品质及产品开发价值分析 [J]. 食品安全导刊, 2022, 6: 121-123, 128.
- [8] WANG R S, DONG P H, SHUAI X X, et al. Evaluation of different black mulberry fruits (*Morus nigra* L.) based on phenolic compounds and antioxidant activity [J]. Foods, 2022, 11(9): 1252.
- [9] HWANG I S, KIM M K. Influence of processing conditions on the flavor profiles of mulberry (*Morus alba* L.) fruits using instrumental flavor analysis and descriptive sensory analysis [J]. Foods, 2020, 9(5): 581.
- [10] WANG K H, QI J, JIN Y, et al. Influence of fruit maturity and lactic fermentation on physicochemical properties, phenolics, volatiles, and sensory of mulberry juice [J]. Food Bioscience, 2022, 48: 101782.
- [11] 林华嗣, 黄庆, 田胜兰, 等. 乳酸菌发酵前后铁皮石斛汁中功能活性物质与风味成分的比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 253-261.
- [12] EMMANUEL K, MA Y K, WILLIAM T, et al. Effect of lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented mulberry juice [J]. Food Chemistry, 2018, 250: 148-154.
- [13] LIU G M, SUN J, HE X M, et al. Fermentation process optimization and chemical constituent analysis on longan (*Dimocarpus longan* Lour.) wine [J]. Food Chemistry, 2018, 256: 268-279.
- [14] 赵永丽, 蒲云峰, 武逸凡, 等. 基于模糊数学评价的药桑提取功能饮料研制及抗氧化性研究[J]. 食品科技, 2023, 48(5): 120-126.
- [15] GAO G W, ZHANG X N, ZHEN Y, et al. Monitoring volatile organic compounds in different pear cultivars during storage using HS-SPME with GC-MS [J]. Foods, 2022, 11(23): 3778.
- [16] 赵彩, 孙金奎, 李甜, 等. HS-SPME-GC-MS/MS结合ROAV值鉴定新疆库车小白杏的关键香气物质[J]. 现代食品科技, 2023, 39(8): 228-236.
- [17] 戴宇樵, 罗学尹, 刘亚兵, 等. 灵芝菌固态发酵夏秋梅占红茶风味特征分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(1): 10-19.
- [18] 付小琴. 苦荞芽果味酵素产品及其品质评价研究[D]. 成

- 都:成都大学,2023.
- [19] 张倩茹,尹蓉,王俊宇,等.乳酸菌发酵红树莓山楂复合果汁品质分析[J].中国酿造,2023,42(1):53-57.
- [20] 韦仕静.桑葚酵素发酵工艺及花青素生物转化的研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [21] SHER A K, LIU L, LAI T, et al. Phenolic profile, free amino acids composition and antioxidant potential of dried longan fermented by lactic acid bacteria [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(12): 4782-4791.
- [22] 陈小伟,程勇杰,范昊安,等.草莓酵素发酵过程中氨基酸成分分析和蛋白质营养评价[J].食品工业科技,2018, 39(17):64-70,78.
- [23] 易媛,赵敏惠,左勇,等.桑葚酵素发酵过程中活性物质与抗氧化能力的相关性研究[J].食品与发酵工业,2022, 48(9):117-122.
- [24] 黄庆,林华嗣,王国鑫,等.乳酸菌发酵铁皮石斛活性成分与抗氧化功能动态分析[J].南昌大学学报(理科版),2022, 46(4):473-480.
- [25] 张海燕,康三江,袁晶,等.不同菌种组合对沙棘酵素发酵过程中理化指标及活性物质变化的影响[J].食品安全质量检测学报,2023,14(16):268-276.
- [26] 牛佳佳,赵彪,崔巍,等.酥梨汁乳酸菌发酵工艺优化及挥发性成分分析[J].食品工业科技,2023,44(14):171-181.
- [27] 贾漫丽,李娜,王彬彬,等.9个品种桑果营养、香气成分与抗氧化活性评价[J].果树学报,2022,39(2):221-231.
- [28] 李静静.酵母发酵沙棘饮料生产过程中香气成分和主要代谢物变化研究[D].石河子:石河子大学,2023.