

益生菌发酵软枣猕猴桃汁活性成分、抗氧化性及其差异代谢物的影响

刘龙雪¹, 郭昊鑫¹, 雷雨声¹, 刘德江^{2,3*}, 杨成君^{1,3*}

(1. 东北林业大学林学院, 黑龙江哈尔滨 150040) (2. 佳木斯大学生物与农业学院, 黑龙江佳木斯 154007)
(3. 中-乌农林技术开发与应用国际合作联合实验室, 黑龙江佳木斯 154007)

摘要: 为了开发具有更高营养价值和抗氧化功能的新功能食品, 本研究采用益生菌发酵软枣猕猴桃汁, 探究发酵对其主要活性成分、抗氧化活性和代谢物的影响规律。实验结果表明: 益生菌发酵能显著提升软枣猕猴桃的生物活性成分含量, 总酚、黄酮、抗坏血酸含量在发酵 48 h 达到峰值, 分别为 4.52 mg·g⁻¹、4.12 mg·g⁻¹、80.38 mg/100 g, 较发酵前分别提升 25.91%、32.90%、36.24%; 其抗氧化性能同步增强, DPPH 自由基清除率提升至 87.55%, 羟基自由基清除率与 ABTS⁺ 自由基清除率较发酵前均提高 50% 以上; 代谢组学分析共检测到 446 个显著差异代谢物, 主要是脂质和类脂质分子、有机氧化物和有机酸化合物, 脂类分子可以被人体菌群有效吸收并提供能量, 有机酸可促进微量元素的吸收, 对提高食欲和消化有积极作用。软枣猕猴桃作为嗜热链球菌发酵的基质, 不仅增强了其抗氧化能力, 还通过代谢产物优化了风味和营养成分, 为开发益生菌发酵果汁的高品质提供科学方法, 为其工业化生产提供理论基础。

关键词: 益生菌; 发酵; 软枣猕猴桃; 抗氧化活性; 代谢组学; 差异代谢物

文章编号: 1673-9078(2026)07-48-58

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0565

Effect of Probiotic Fermentation of Kiwiberry (*Actinidia arguta*) Juice on Aactive Ingredients, Antioxidant Properties, and Differential Metabolites

LIU Longxue¹, GUO Haoxin¹, LEI Yusheng¹, LIU Dejiang^{2,3*}, YANG Chengjun^{1,3*}

(1.College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)
(2.College of Biology and Agriculture, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)(3.China-Ukraine Agriculture & Forestry
Technology Development and Application International Cooperation Joint Lab, Jiamusi 154007, China)

Abstract: To develop new functional foods with higher nutritional value and antioxidant function, this paper performed probiotic fermentation on *Actinidia arguta* juice to investigate its effects on major bioactive components, antioxidant activity, and metabolites. The results showed that probiotic fermentation significantly increased bioactive components in *A. arguta*: total phenols (4.52 mg·g⁻¹), flavonoids (4.12 mg·g⁻¹), and ascorbic acid (80.38 mg/100 g) all peaked at 48 h, representing increases of by 25.91%,

引文格式:

刘龙雪,郭昊鑫,雷雨声,等.益生菌发酵软枣猕猴桃汁活性成分、抗氧化性及其差异代谢物的影响[J].现代食品科技,2026,42(7):48-58.

LIU Longxue, GUO Haoxin, LEI Yusheng, et al. Effect of probiotic fermentation of kiwiberry (*Actinidia arguta*) juice on aactive ingredients, antioxidant properties, and differential metabolites [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(7): 48-58.

收稿日期: 2025-04-22; 修回日期: 2025-07-09; 接受日期: 2025-07-12

基金项目: 黑龙江省省教育厅基本科研业务费基础研究项目 (22KYYWF0655); 中央支持地方高校改革发展资金优秀青年人才项目 (2020YQ09); 黑龙江省国家重点保护野生植物调查 (ZQTYB240100013)

作者简介: 刘龙雪 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 森林植物资源开发与利用, E-mail: 13354388804@163.com

通讯作者: 杨成君 (1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 森林植物资源开发与利用, E-mail: nxycj@163.com; 共同通讯作者: 刘德江 (1980-), 男, 硕士, 正高级实验师, 研究方向: 寒地植物资源、生态、栽培及其提取物的研究, E-mail: Liudejiang2004@163.com

32.90%, and 36.24%, respectively, compared with pre-fermentation levels. Antioxidant properties were also enhanced, with the DPPH radical scavenging rate increasing to 87.55%, and both the hydroxyl radical and ABTS⁺ scavenging rates increasing to more than 50% compared with pre-fermentation levels. Metabolomics analysis identified 446 significant differential metabolites, mainly lipid and lipid-like molecules, organic oxides, and organic acids. Lipid molecules can be efficiently absorbed by human microflora and used as an energy source, while organic acids promote trace-element absorption and improve appetite and digestion. Using *A. arguta* as a substrate for probiotic fermentation enhances antioxidant capacity and improves flavor and nutritional composition through metabolites production. This provides a scientific method for developing high-quality probiotic-fermented juices and a theoretical basis for their industrial production.

Key words: probiotics; fermentation; *Actinidia arguta*; antioxidant activity; metabolomics; differential metabolites

软枣猕猴桃 (*Actinidia arguta*) 又名软枣子, 是猕猴桃科、猕猴桃属大型藤本植物, 主要种植于华北、西北、东北等地^[1]。软枣猕猴桃中既富含蛋白质、维生素 C 及多种矿物质元素等营养成分, 又含有三萜类、多酚类、生物碱类等活性物质, 具有抗菌消炎、抗肿瘤、调节血糖血脂及增强免疫力等多种功效^[2]。随着人们生活水平提高, 软枣猕猴桃因其丰富的营养价值而受到广泛关注, 近年来, 其加工产品如果酒、复合饮料、果酱及果冻等不断出现。因此, 软枣猕猴桃是集药用价值、经济价值、营养价值于一体的珍贵树种^[3]。

当前, 益生菌广泛应用于发酵乳制品、功能性饮料、保健食品及婴幼儿食品等领域。益生菌通过合成和释放短链脂肪酸等代谢产物, 调节肠道 pH 值, 抑制有害菌生长, 能有效缓解多种疾病^[4,5]。益生菌在代谢过程中产生的有机酸、酯类和醇类等物质可丰富食品的香气, 改善口感。有机酸能够阻止病菌和腐败菌的生长, 同时提升食品安全性, 延长食品保质期^[6]。发酵产品的菌群复杂, 传统分析手段难以系统性分析发酵时产生的不同代谢物对食品风味、质地、营养及色泽的影响。在此背景下, 代谢组学凭借高通量、无偏地的检测特点, 逐渐成为研究发酵食品的重要工具。代谢组学通过研究发酵食品中风味代谢物的形成机制, 优化发酵工艺, 提升食品的感官质量。因此, 代谢组学技术可用于分析微生物在发酵食品中的作用机制及其对产品质量的影响。

软枣猕猴桃成熟采摘期集中, 易腐烂, 不易贮藏运输。将软枣猕猴桃榨汁并经乳酸菌发酵, 以发酵汁为原料可以生产果酒及果醋等产品, 有助于解决软枣猕猴桃的储藏问题^[7]。益生菌发酵果汁可有效保持其抗坏血酸、总酚等理化性质, 提高抗氧化活性以及色泽和气味特征。因此, 本文探究软枣猕猴桃汁发酵后的理化性质、抗氧化活性及代谢产物的动态变化, 为开发和生产高质量发酵软枣猕猴桃果汁提供有价值的

见解, 为其工业化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

1.1.1 材料

嗜热链球菌 (CICC20368): 中国工业微生物菌种保藏管理中心。

软枣猕猴桃: 黑龙江省佳木斯市沐禾生物有限公司。

1.1.2 试剂

MRS 培养基, 青岛海博生物技术有限公司; 总糖试剂盒, 北京索莱宝生物科技有限公司; 福林酚、1,1-二苯基-2-苦基肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazide, DPPH)、2,2'-联-(乙基苯并噻唑啉-6-磺酸) 二铵 (Diammonium 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate), ABTS), 北京博奥拓达科技有限公司; 果胶酶、纤维素酶、没食子酸、三氯化铁、硝酸铝, 上海麦克林生化科技有限公司; 甲醇 (>99.9%)、乙腈 (>99.95%)、甲酸 (>99.0%), 赛默飞世尔科技公司; 亚硝酸钠、碳酸钠、过氧化氢, 天津市永大化学试剂有限公司; L-2-氯苯丙氨酸 (>98.0%), 上海恒创生物科技有限公司; 琥珀酸-d4 (>98.0%), sigma; 芦丁标准品、水杨酸、L-缬氨酸-d8 (>98.0%)、胆酸-D4 (>98.0%)、D-虫荧光素游离酸 (>99.0%), 上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

Tu1901 型分光光度计, 北京普析通用仪器有限责任公司; AXTG16 型高速离心机, 安信实验仪器有限公司; YXQ-70A 型蒸汽灭菌锅、Centrifuge 5427R 冷冻离心机, 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司; 液相色谱-质谱联用仪、液相色谱柱, 赛默飞世尔科技公司。

1.3 实验方法

1.3.1 菌种活化

在无菌条件下,取适量嗜热链球菌粉与 MRS 肉汤培养基充分混合,并传代两次进行菌种活化,无菌滴管吸取菌液接种该培养基,于 37 ℃ 培养 48 h,其菌液 $15\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 3 min,无菌生理盐水洗涤,得到种子液,期间每隔 4 h 测一次活菌数,使其达到 $10^8\ \text{CFU/mL}$,冷藏备用。

1.3.2 软枣猕猴桃汁制备与发酵

新鲜软枣猕猴桃去皮榨汁后,加入适量果胶酶和纤维素酶,酶解后 90 ℃ 水浴灭菌 15 min,冷却至室温,于超净工作台接种(接种量为体积分数 2% 嗜热链球菌),恒温培养箱中进行发酵,每隔 12 h 取样测定相关指标。

1.3.3 理化指标测定

pH 值:采用 pH 计测量;总酸:GB 12456-2021《食品中总酸的测定》pH 计电位滴定法;总糖:总糖含量检测试剂盒,单位: $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。

1.3.4 生物活性成分含量测定

总酚含量 (TPC) 测定:采用福林酚法^[8]。以没食子酸为标准物质测定总酚含量,称取 25 mg 没食子酸,去离子水溶解,定容至 25 mL,得到 $1\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的标准溶液。基于此溶液配置一系列梯度质量浓度标准溶液 (0、20、60、100、150、200、300、400、500、600、800、1 000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)。取 50 μL 标准液与 200 μL 去离子水混合,加入 50 μL 福林酚试剂,6 min 后加入 0.5 mL 7% Na_2CO_3 溶液和 0.4 mL 去离子水,避光放置 90 min,在 760 nm 处测定吸光度,并绘制没食子酸标准曲线。标准曲线回归方程: $y=0.001\ 7x+0.135\ 3$ ($R^2=0.992\ 8$)。样品测定按照标准曲线方法进行,其余操作同上。总酚含量 ($F, \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 计算公式 (1) 如下:

$$F = \frac{C \times V}{M \times 1000} \quad (1)$$

式中:

F —总酚含量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;

C —根据标准曲线查得的样品总酚质量浓度, $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$;

V —提取液体积, mL;

M —样品的质量, g。

黄酮含量 (TFC) 测定:参考文献^[9,10]的研究方法,用硝酸铝比色法测定黄酮含量。以芦丁为标准品,分别取 2.0、1.0、0.8、0.4、0.2、0.1、0.05、0.025 mL 芦丁标准溶液,分别加入 0.0、1.0、1.2、1.6、1.8、1.9、1.95、1.975 mL 的 $\varphi=60\%$ 乙醇溶液混匀,加入 $5\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 0.5 mL

NaNO_2 混匀,静置 5 min,再加入 $10\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 0.5 mL $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 混匀,室温静置 5 min,最后加入 $4\ \text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 4 mL NaOH 溶液, $\varphi=60\%$ 的乙醇溶液定容至 10 mL,静置 15 min,在波长 510 nm 处测定吸光度,并绘制标准曲线。标准曲线回归方程: $y=0.512\ 7x+0.016\ 9$ ($R^2=0.993\ 7$)。样品测定按照标准曲线方法进行,总黄酮含量按 ($T, \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) 计算公式 (2) 如下:

$$T = \frac{C \times V}{M} \quad (2)$$

式中:

T —总黄酮含量, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$;

C —根据标准曲线查得的样品黄酮质量浓度, $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$;

V —提取液体积, mL;

M —样品的质量, g。

抗坏血酸 (ASA) 测定:参照文献^[11]的方法,采用 2,6-二氯靛酚滴定法测定维生素 C 含量。取 10 mL 发酵软枣猕猴桃汁,用 2% 草酸溶液定容至 50 mL 容量瓶中,摇匀后过滤。准确吸取 10 mL 滤液于 50 mL 锥形瓶中,用标定过的 2,6-二氯靛酚溶液滴定,直至溶液呈粉红色 30 s 内不褪色,此处为滴定终点,所消耗溶液体积 (V);并用 10 mL 草酸溶液作空白试验,所消耗体积 (V_0)。样品中维生素 C 含量 (V_c , $\text{mg}/100\ \text{g}$) 计算公式 (3) 如下:

$$V_c = \frac{(V - V_0) \times T}{m} \times 100 \quad (3)$$

式中:

V_c —维生素 C 含量, $\text{mg}/100\ \text{g}$;

V —滴定样品所消耗的 2,6-二氯靛酚溶液体积, mL;

V_0 —滴定空白所消耗的 2,6-二氯靛酚溶液体积, mL;

T —2,6-二氯靛酚溶液的滴定度, $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$;

m —滴定时样品体积, g。

1.3.5 抗氧化能力的测定

DPPH 自由基清除能力:参考文献^[12]方法并调整,测定 DPPH 自由基清除率。配置 $1\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ DPPH 溶液,量取 39.4 mg DPPH, 95% 无水乙醇溶解定容至 100 mL。2 mL 样液与 1 mL DPPH 溶液混合,避光室温静置 30 min,在波长 517 nm 处测定吸光度 (A_i);以无水乙醇代替 DPPH 溶液,避光室温静置 30 min,在波长 517 nm 处测定吸光度 (A_j)。以无水乙醇代替样品溶液,避光室温静置 30 min,在波长 517 nm 处测定吸光度 (A_c);DPPH 自由基清除率 ($Y, \%$) 计算公式 (4) 如下:

$$Y = \left(1 - \frac{A_i - A_j}{A_c}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中:

Y —DPPH 自由基清除率, %;

A_i —发酵软枣猕猴桃汁与 DPPH 溶液的吸光度;

A_j —发酵软枣猕猴桃汁与无水乙醇的吸光度;

A_c —无水乙醇与 DPPH 溶液的吸光度。

羟基自由基清除能力: 参照文献^[13]的方法并调整测定羟基自由基清除率。配置不同质量浓度益生菌发酵果汁, 在 1 mL 工作液中分别加入硫酸亚铁、水杨酸和过氧化氢溶液 (各 2 mmol·L⁻¹、1 mL), 充分混合后 37 °C 下放置 60 min, 测定其在 510 nm 处的吸光度 (A_j); 空白对照组以去离子水代替发酵软枣猕猴桃汁为样液, 测定吸光度值 (A_0); 以去离子水代替 H₂O₂ 溶液测定吸光度值 (A_i), 羟基自由基清除率 (H , %) 计算公式 (5) 如下:

$$H = \frac{A_i - A_j}{A_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

H —羟基自由基清除率, %;

A_i —不加 H₂O₂ 样品的吸光度;

A_j —加入样品后的吸光度;

A_0 —空白对照的吸光度。

ABTS⁺ 清除能力: 参考文献方法^[14]。配置 ABTS 工作液 (等体积混合 7 mmol·L⁻¹ ABTS⁺ 溶液与 2.45 mmol·L⁻¹ K₂S₂O₈ 溶液, 避光静置 16 h, 使其在 735 nm 处吸光值为 0.7±0.02), 吸取 0.5 mL 发酵果汁, 去离子水补至 1 mL, 加入 4 mL ABTS⁺ 工作液后振荡混匀, 避光放置 30 min, 在波长 734 nm 处测定吸光度值为 (A_1); 以去离子水替代样品测得吸光度值为 (A_0)。ABTS⁺ 清除率 (R , %) 计算公式 (6) 如下:

$$R = (A_0 - \frac{A_1}{A_0}) \times 100\% \quad (6)$$

式中:

R —ABTS⁺ 清除率, %;

A_0 —对照的吸光度值;

A_1 —样品与 ABTS⁺ 溶液反应的吸光度值。

1.3.6 代谢组学差异代谢物筛选

色谱条件: ACQUITY UPLC HSS T3 (100 mm×2.1 mm, 1.8 μm); 柱温: 45 °C; 流动相: A-水 (含 0.1% 甲酸), B-乙腈; 流速: 0.35 mL·min⁻¹; 进样体积: 3 μL。质谱条件: 使用 Thermo Q Exactive Focus 质谱检测器, 电喷雾离子源 (ESI) 以正负离子模式分别采集数据。正离子喷雾电压为 3.8 kV, 负离子喷雾电压为 -3.0 kV, 毛细管温度为 320 °C, 辅助气体加热器温度 350 °C, 鞘

气流速 35 Arb, 辅助气体流量 8 Arb, 以分辨率 70 000 进行一级全扫描, 一级离子扫描范围为 70~1 050 m/z , 二级分辨率为 17 500。

本次实验的分析仪器为 Waters ACQUITY UPLC I-Class plus/Thermo QE 超高效液相串联高分辨质谱仪组成的液质联用系统。

1.4 数据处理

本研究为探究添加嗜热链球菌发酵软枣猕猴桃值理化指标、生物活性成分及抗氧化能力测定采用 Excel 2016 进行数据整理与计算; 统计分析基于 SPSS 16.0 进行单因素方差分析 (ANOVA), 并采用 Duncan 检验进行差异显著性分析; 采用 Origin 2022 软件绘图; 代谢组学分析采用欧易云平台进行代谢组学数据的多元统计分析, 对样品进行主成分分析 (PCA) 观察各样本之间的总体分布和整个分析过程的稳定性, 然后用有监督的偏最小二乘法分析 (PLS-DA) 及正交偏最小二乘法分析 (OPLS-DA) 来区分组间代谢轮廓的总体差异, 找到组间的差异代谢物。将 p 值、FC (Fold Change) 和 VIP 值相结合的方法筛选差异代谢物。利用 KEGG 数据库对差异代谢物通路类型进行分类、KEGG 富集分析。

2 结果与分析

2.1 益生菌发酵软枣猕猴桃汁基本理化性质的分析

由图 1 所示, 经益生菌发酵的软枣猕猴桃汁随着发酵时间的增长其 pH 值呈下降趋势, 软枣猕猴桃汁发酵 12 h 时的 pH 值为 4.86, 而发酵 72 h 时其 pH 值下降至 4.07, 降低了 16.26%。因此, 可以合理推断软枣猕猴桃汁经益生菌发酵后其口感变酸。随着发酵时间的增长, 经益生菌发酵的软枣猕猴桃汁总酸含量呈增加趋势, 由发酵 12 h 时的 8.61 mg·mL⁻¹ 增加至发酵 72 h 时 13.02 mg·mL⁻¹, 增加了 51.22%。益生菌随着发酵时间增长代谢了大量乳酸、乙酸和氨基酸导致酸度增加^[15], 后续配方优化时, 需加入白砂糖使其口感丰富。糖是发酵过程中乳酸菌生长代谢的重要碳源^[16]。发酵 12 h 时总糖含量为 49.87 mg·mL⁻¹, 随着发酵时间的延长总糖含量呈下降趋势, 72 h 时下降至 31.53 mg·mL⁻¹, 下降了 36.78%。糖类作为益生菌发酵软枣猕猴桃主要碳源, 产生有机酸、多酚及黄酮等活性物质^[17]。有研究表明^[18], 益生菌利用糖类进行生理代谢活动, 产生了乳酸、乙酸等代谢产物。

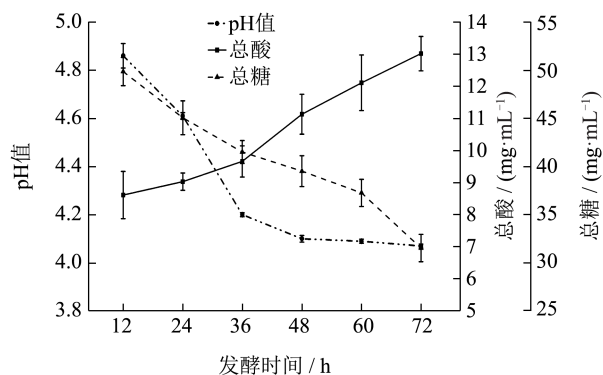


图1 益生菌发酵软枣猕猴桃汁过程中其基本理化性质的变化

Fig.1 Changes in the basic physicochemical properties of probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

2.2 益生菌发酵软枣猕猴桃活性成分的分析

软枣猕猴桃中含有丰富的多酚类化合物,是重要的功能活性物质。如图2所示,在发酵初期(12~24 h),TPC由 $3.59 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $3.76 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,TFC含量由 $3.10 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 增加至 $3.53 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,ASA由 $59 \text{ mg}/100 \text{ g}$ 增加至 $63.63 \text{ mg}/100 \text{ g}$,呈显著上升趋势;发酵中期(36~48 h)均平稳增长,在发酵第48 h,TPC、TFC、ASA含量达到峰值,TPC最大值为 $4.52 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,TFC最大值为 $4.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$,ASA最大值为 $80.38 \text{ mg}/100 \text{ g}$,相比于发酵前TPC、TFC和ASA分别增加25.91%、32.90%和36.24%。由于益生菌在发酵软枣猕猴桃过程中酸度增加,导致细胞壁破坏,软枣猕猴桃细胞中的多酚类、黄酮类化合物溶出,导致其多酚类和黄酮类化合物含量增加^[19]。许多研究表明,益生菌发酵不仅能使原有产品的营养成分得到提升,还能通过益生菌在发酵中分解或转化某些物质,生成一些新的有生物活性的化合物,这些新物质对人体有益,能增强免疫系统、改善肠道健康、促进消化^[20-21]。

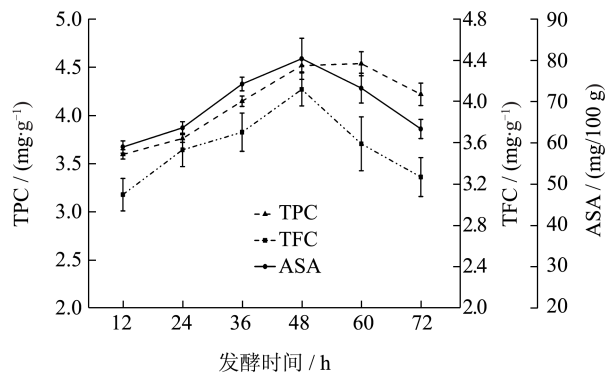


图2 益生菌发酵软枣猕猴桃汁活性成分含量变化

Fig.2 Changes in active ingredient content of probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

2.3 益生菌发酵软枣猕猴桃抗氧化性能的分析

运用ABTS⁺自由基、DPPH自由基及羟基自由基清除能力评估益生菌发酵软枣猕猴桃汁的抗氧化能力。由图3可知,DPPH自由基、羟基自由基清除能力随发酵时间发展规律相似,均呈先增长后下降趋势。第36小时DPPH自由基清除率达到最大值,由发酵前72.75%增加至87.55%,较发酵初期提高20.34%。同时,羟基自由基清除率也达到峰值,由41.60%增加至65.80%,与发酵前提升58.17%。发酵前期和中期的ABTS⁺自由基清除能力平稳增长,第48 h达到峰值52.91%,随后逐渐下降。羟基自由基、ABTS⁺自由基、DPPH自由基的清除能力与多酚含量有关,多酚含量越高其DPPH自由基清除能力越强^[22]。软枣猕猴桃中的黄酮物质对DPPH自由基清除率在80%以上,具有较好的抗氧化活性。益生菌发酵软枣猕猴桃汁的羟基自由基清除能力与ABTS⁺自由基清除能力较发酵前提高50%以上,微生物水解过程中产生的类黄酮和多酚类物质能增强抗氧化能力^[23]。发酵还促使细胞壁结构的分解,释放或合成多种抗氧化物质,这些物质有助于中和体内自由基,减缓氧化损伤。

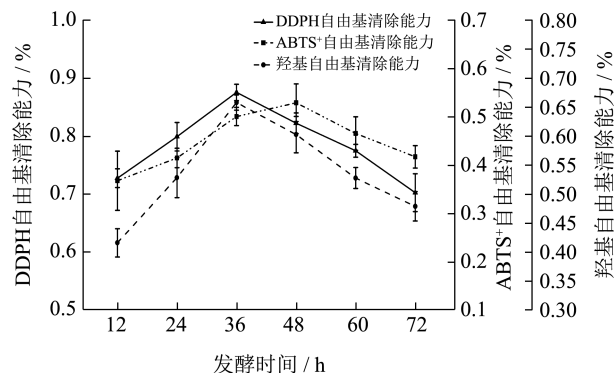


图3 益生菌发酵软枣猕猴桃汁抗氧化活性变化

Fig.3 Changes in antioxidant activity of probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

2.4 发酵前后差异代谢物分析

2.4.1 差异代谢物的筛选

差异筛选基于数据矩阵中全部代谢物,计算比较组中的P-value、FC(FoldChange)、VIP等参数。筛选的标准为: $P < 0.05$ 、 $FC \geq 1.2$ 或 $FC \leq 1/1.2$ 。从添加嗜热链球菌的软枣猕猴桃发酵果汁中共检测出4359个代谢物,显著差异代谢物446个。火山图可用于可视化P值和FC值,用于筛选差异代谢物。图中每点代表一个代谢物,横轴为样本比对的 $\log_2(FC)$ 值,纵轴为 $-\log_{10}(P)$ 值。其中, $P < 0.05$ 且 $FC < 1$ 为

代谢物上调, 红点; $P < 0.05$ 且 $FC < 1$ 为代谢物下调, 蓝点; 代谢产物不显著, 灰点。图 4 为益生菌发酵软枣猕猴桃汁的代谢物差异水平, 其中上调 228 个, 下调 218 个。

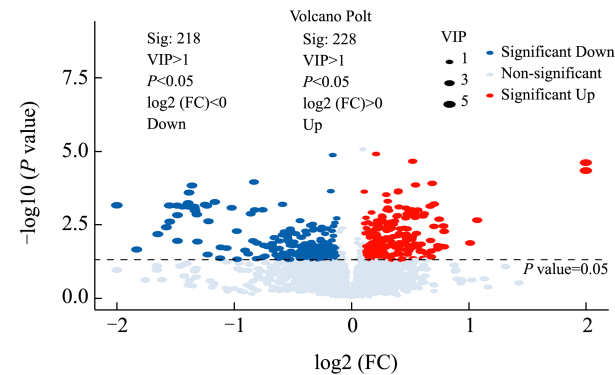


图 4 益生菌发酵软枣猕猴桃汁代谢物火山图

Fig.4 Volcanic diagram of metabolites in probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

2.4.2 差异代谢物的分类

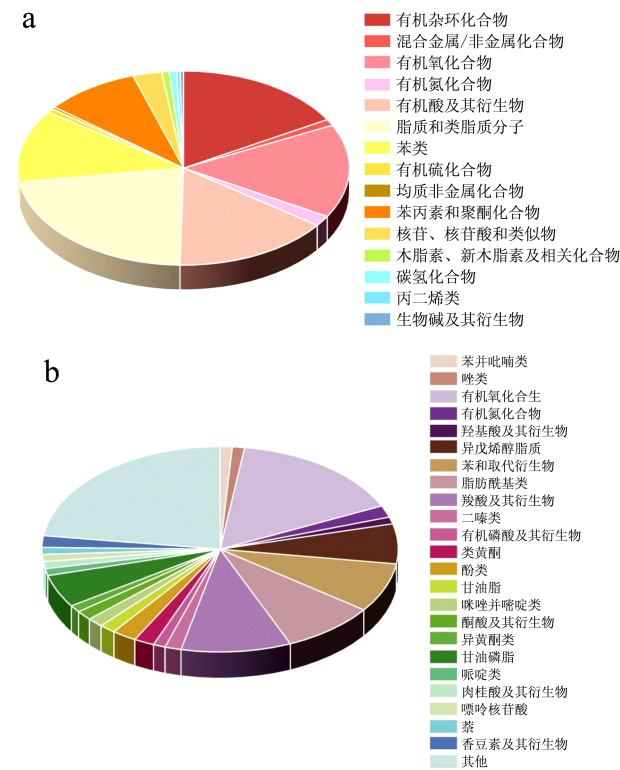


图 5 益生菌发酵软枣猕猴桃汁差异代谢物分类构成

Fig.5 Classification and composition of metabolites in probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

注: a-HMDB 顶级分类; b-HMDB 分类。

从含有嗜热链球菌的软枣猕猴桃汁中检测出的上调代谢物为 282 个。图 5 为益生菌发酵软枣猕猴桃汁差异代谢物分类构成, 每一种颜色代表一类物质, 同

一类代谢产物数量越多颜色占比越大。图 5a HMDB 顶级分类比重前五的为: 脂质和类脂质分子 22.34%、有机杂环化合物 16.67%、有机氧化合物 15.60%、有机酸及其衍生物 15.25%、苯类 12.06%, 占总代谢物的 81.92%; 图 5b HMDB 分类上占比前五的为: 其他 21.99%、有机氧化合物 15.25%、羧酸及其衍生物 9.57%、脂肪酰基类 8.16%、苯和取代衍生物 7.45%, 占比为 62.42%。

2.4.3 差异代谢物的分析

聚类分析图能直观显示不同代谢物在是否添加益生菌的软枣猕猴桃汁中的相对表达量聚类关系, 并揭示了代谢物在不同样本中的表达差异。颜色从蓝到红逐渐变化, 表示代谢物表达从低到高, 红色表示较高的表达水平。图 6 为 P 值最小的 Top50 代谢产物表达量聚类热图。横轴为样本名称, 纵轴为代谢物。根据图 6 和表 1 信息可知, CK 组中黄酮苷、1-羟基-2-甲基-2-丁烯-4-基-4-二磷酸 (HDMAPP) 等脂质和类脂质分子, 磷酸单 (4-氰基苯基) 单甲酯、DMABA-d4 NHS 酯等苯类, 以及丝氨酸谷氨酰胺等有机酸及其衍生物的代谢物相对含量较多。SR 组中 4-氨基马尿酸、甲戊灵-D5、2, 6-二碘-4-硝基苯酚、邻苯二甲酸氢叔丁酯等苯类, 二氢脱氧-8-表油二醇等有机杂环化合物, 庚酮糖等有机氧化合物, 谷氨酰胺酰缬氨酸、磷酸精胺酸等有机酸及其衍生物的差异代谢物表达丰度较高。

黄酮苷属于脂质和类脂质分子, 脂质又叫脂类。它是人体必需重要营养成分之一, 与蛋白质、碳水化合物构成三大主要产能营养素。益生菌发酵过程中分泌的 β -葡萄糖苷酶可特异性水解黄酮糖苷的 β -糖苷键, 释放出具有更高生物活性的黄酮苷元 (如槲皮素、山奈酚)^[24]。这一酶促反应是发酵过程中苷元含量显著增加的关键机制。软枣猕猴桃富含槲皮素-3-O-芸香糖苷 (芦丁) 等糖苷, 与大豆异黄酮 (染料木苷、大豆苷) 的糖苷键构型类似, 均能被 β -葡萄糖苷酶水解^[25]。黄酮苷可在人体肠道的微生物作用下将其转化为黄酮苷元, 便于人体吸收。

苯类化合物具有良好的抗氧化特性, 能够减少发酵过程中产生的自由基, 保护软枣猕猴桃中维生素和矿物质等活性物质免受氧化损伤。4-氨基马尿酸等苯类化合物可以通过清除自由基, 维持软枣猕猴桃中的营养成分。苯类化合物对发酵食品的风味有影响, 尤其是在芳香族化合物的形成方面, 苯类物质能够与其他代谢产物反应, 提升软枣猕猴桃发酵后的香气。

谷氨酰胺酰缬氨酸属于有机酸及其衍生物。它在人体血液中, 起到保护肝脏及蛋白质合成的作用。有机酸是水果中主要风味营养物质。它能软化血管, 促

进 Ca、Fe 等微量元素的吸收，具有提高食欲、促进消化功能。发酵过程中乳酸过多会抑制糖类相关酶，进而激活氨基酸酶，使其精氨酸、缬氨酸的水平降低。因此，缬氨酸含量会影响软枣猕猴桃发酵过程中的 pH 值变化，以此影响发酵饮料的品质^[26]。在发酵饮料中，有机酸不仅能增加食品的风味和香气，还有效抑制发酵中不良微生物生长，防止病原微生物的滋生，保障发酵食品的质量与安全^[27-28]。

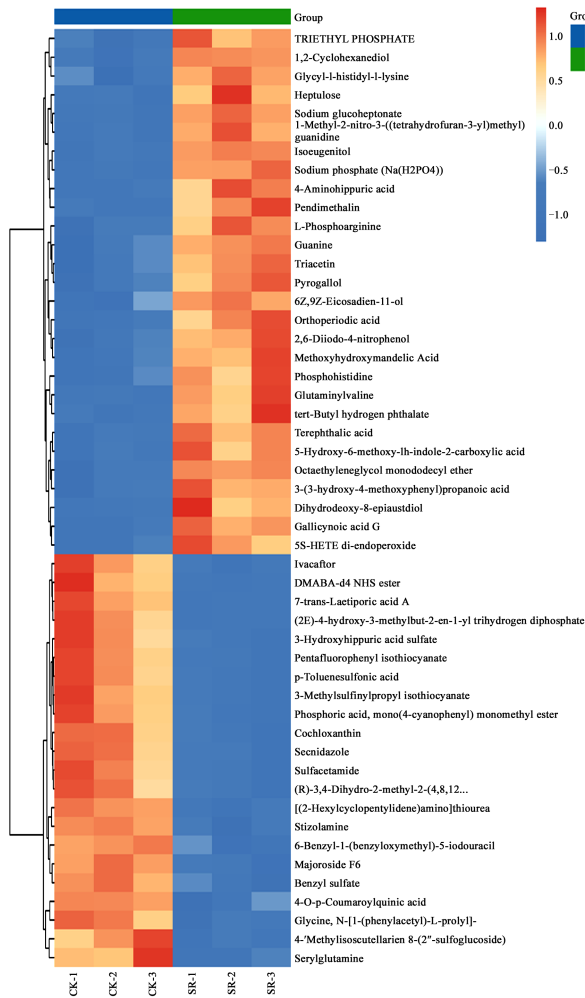


图 6 益生菌发酵软枣猕猴桃汁聚类分析图
Fig.6 Cluster heatmap of probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

图 7 为益生菌发酵软枣猕猴桃汁差异代谢物棒棒糖图 (Lolipopmap)，横坐标为 log₂ (FC)，纵坐标为差异代谢物，分别取上调和下调差异代谢物中 P 值最小的 10 个差异代谢物，共计 20 个绘制图形。红色表示上调，蓝色表示下调，星号表示差异代谢物的显著性。显著上调代谢物以有机氧化合物为主，显著下调代谢

物主要以脂质和类脂质分子为主。庚酮糖等有机氧化合物可能作为益生菌的碳源，支持益生菌生长从而提高发酵效率，发酵中的氧化反应可有助提高益生菌的代谢能力和发酵产物的多样性。

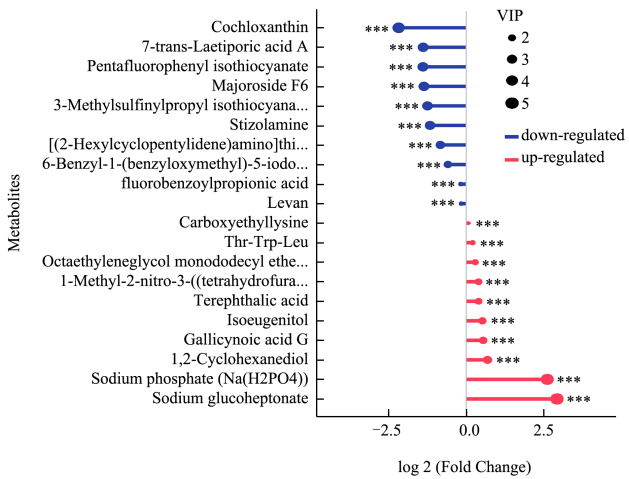


图 7 益生菌发酵软枣猕猴桃汁差异代谢物棒棒糖图
Fig.7 Lollipop plot of 1 metabolites in probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

注：图中差异显著性为：* $P<0.05$ ；** $P<0.01$ ；*** $P<0.001$ 。

2.5 显著差异代谢物KEGG通路分析

2.5.1 KEGG气泡图

图 8 是显著性 top20 的通路 KEGG 分析气泡图，用二维坐标和气泡属性展示通路富集情况。图中横坐标 Enrichment Score 为富集分值，纵坐标为 top20 的通路信息。气泡越大的通路包含的差异代谢物越多，气泡颜色由蓝 - 红变化，其富集 p 值越小，显著程度越大。富集分数较高的主要由赖氨酸生物合成 (Lysine Biosynthesis)、丙 / 天冬 / 谷氨酸代谢 (Alanine, Aspartate and Glutamate Metabolism)、抗坏血酸代谢 (Ascorbate and Aldarate Metabolism)、C5- 支链二元酸代谢、戊糖和葡萄糖醛酸互变、TCA 循环 (Citrate Cycle) 组成。关键代谢通路主要有氨基酸代谢主导 (Lysine、Alanine、Aspartate and Glutamate、Arginine、Histidine)、能量枢纽 (TCA cycle) 和应激响应通路 (Ascorbate and Aldarate Metabolism)、风味物质生成 (Terpenoid Backbone Biosynthesis)。添加嗜热链球菌发酵软枣猕猴桃汁提升游离氨基酸含量，并分解柠檬酸、苹果酸提供能量，同时产生挥发性萜类，增加果汁的营养和发酵特有的花果香气；但嗜热链球菌会部分降解抗坏血酸，同时激活抗氧化通路，以维持氧化平衡^[29]。

表 1 益生菌发酵软枣猕猴桃汁的Top50代谢产物

Table 1 Top 50 metabolites of probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

代谢物名称	顶级分类	分类	本体	质荷比	VIP 值	P 值
Sodium glucoheptonate	有机氧化合物	有机氧化合物	碳水化合物和碳水化合物结合物	287.01	5.25	0.000 05
Sodium phosphate (Na(H ₂ PO ₄))	混合金属 / 非金属化合物	碱金属氧阴离子化合物	碱金属磷酸盐	158.92	4.97	0.000 02
Cochloxanthin	脂质和类脂质分子	异戊烯醇脂质	三萜类化合物	462.28	4.49	0.000 70
Secnidazole	有机杂环化合物	唑类	咪唑类	208.07	3.80	0.000 71
(2E)-4-hydroxy-3-methylbut-2-en-1-yl trihydrogen diphosphate	脂质和类脂质分子	异戊烯醇脂质	类异戊二烯磷酸酯	245.00	3.71	0.000 71
(R)-3,4-Dihydro-2-methyl-2-(4,8,12-trimethyl-3,7,11-tridecatrienyl)-2H-1-benzopyran-6-ol	脂质和类脂质分子	异戊烯醇脂质	二萜类化合物	421.25	3.69	0.001 51
Ivacaftor	苯类	苯和取代衍生物	苯胺类	393.22	3.65	0.000 77
7-trans-Laetiporic acid A	脂质和类脂质分子	脂肪酰基类	脂肪酸和结合物	438.27	3.60	0.000 26
Pentafluorophenyl isothiocyanate	苯类	苯和取代衍生物	卤代苯	243.00	3.60	0.000 58
Phosphoric acid,mono(4-cyanophenyl) monomethyl ester	苯类	苯和取代衍生物	苯甲腈类	196.02	3.50	0.000 77
Majoroside F6	脂质和类脂质分子	异戊烯醇脂质	三萜类化合物	945.54	3.57	0.000 15
p-Toluenesulfonic acid	苯类	苯和取代衍生物	苯磺酸及其衍生物	195.01	3.52	0.000 78
DMABA-d4 NHS ester	苯类	苯和取代衍生物	苯甲酸及其衍生物	284.16	3.52	0.000 88
Sulfacetamide	苯类	苯和取代衍生物	苯磺酰胺类	274.99	3.51	0.001 06
3-Hydroxyhippuric acid sulfate	苯类	苯和取代衍生物	苯甲酸及其衍生物	258.01	3.48	0.001 43
3-Methylsulfinylpropyl isothiocyanate	有机硫化合物	亚砷		201.98	3.40	0.000 67
Benzyl sulfate	苯类	苯和取代衍生物		211.00	3.38	0.000 72
Stizolamine	有机杂环化合物	二嗪类	吡嗪类	215.13	3.29	0.000 54
4-O-p-Coumaroylquinic acid	有机氧化合物	有机氧化合物	醇和多元醇	675.19	3.07	0.000 85
Serylglutamine	有机酸及其衍生物	羧酸及其衍生物	氨基酸、肽和类似物	465.19	2.81	0.001 35
[(2-Hexylcyclopentylidene) amino]thiourea	有机氮化合物	有机氮化合物	胍及其衍生物	280.12	2.80	0.000 11
4'-Methylisoscuteallarein 8-(2''-sulfoglucoside)	苯丙素和聚酮化合物	类黄酮	黄酮苷	525.07	2.76	0.001 01
Glycine, N-[1-(phenylacetyl)-L-prolyl]-	有机酸及其衍生物	羧酸及其衍生物	氨基酸、肽和类似物	329.09	2.64	0.000 99
4-Aminohippuric acid	苯类	苯和取代衍生物	苯甲酸及其衍生物	233.03	2.56	0.000 63
1,2-Cyclohexanediol	有机氧化合物	有机氧化合物	醇和多元醇	155.05	2.55	0.000 12
Pendimethalin	苯类	苯和取代衍生物	苯胺和取代苯胺	281.14	2.50	0.000 75
Heptulose	有机氧化合物	有机氧化合物	碳水化合物和碳水化合物结合物	257.04	2.39	0.001 36
Phosphohistidine	有机酸及其衍生物	羧酸及其衍生物	氨基酸、肽和类似物	253.07	2.37	0.001 62
6-Benzyl-1-(benzyloxymethyl)-5-iodouracil	有机杂环化合物	二嗪类	嘧啶和嘧啶衍生物	431.03	2.33	0.000 65
2,6-Diiodo-4-nitrophenol	苯类	酚类	硝基酚类	390.82	2.29	0.001 01
Gallicynoic acid G	有机酸及其衍生物	羧基酸及其衍生物	中链羧基酸及其衍生物	228.14	2.27	0.000 14
6Z, 9Z-Eicosadien-11-ol	脂质和类脂质分子	脂肪酰基类	脂肪醇	312.33	2.23	0.001 32

续表1						
代谢物名称	顶级分类	分类	本体	质荷比	VIP 值	P 值
Isoeugenitol	有机杂环化合物	苯并吡喃类	1-苯并吡喃类	207.07	2.22	0.000 02
L-Phosphoarginine	有机酸及其衍生物	羧酸及其衍生物	氨基酸、肽和类似物	237.08	2.21	0.001 53
Methoxyhydroxymandelic Acid	苯类	酚醚类	苯甲醚	199.06	2.20	0.001 04
Orthoperiodic acid	均质非金属化合物	卤素有机物	卤氧化物	250.90	2.19	0.000 99
Triacetin	脂质和类脂质分子	甘油脂	三自由基甘油	201.08	2.18	0.001 35
Glycyl-l-histidyl-l-lysine	有机酸及其衍生物	羧酸及其衍生物	氨基酸、肽和类似物	323.18	2.16	0.001 37
tert-Butyl hydrogen phthalate	苯类	苯和取代衍生物	苯甲酸及其衍生物	223.10	2.13	0.001 15
Pyrogallol	苯类	酚类	苯三醇及其衍生物	127.04	2.08	0.001 40
TRIETHYL PHOSPHATE	有机酸及其衍生物	有机磷酸及其衍生物	磷酸酯类	183.08	2.08	0.000 87
5-Hydroxy-6-methoxy-1h-indole-2-carboxylic acid	有机杂环化合物	吲哚及其衍生物	吲哚羧酸及其衍生物	190.05	1.94	0.000 80
Terephthalic acid	苯类	苯和取代衍生物	苯甲酸及其衍生物	149.02	1.94	0.000 22
1-Methyl-2-nitro-3-((tetrahydrofuran-3-yl)methyl)guanidine	有机氮化合物	有机氮化合物	胍类	241.07	1.93	0.000 25
Guanine	有机杂环化合物	咪唑并嘧啶类	嘌呤和嘌呤衍生物	152.06	1.90	0.001 55
Dihydrodeoxy-8-epiaustdiol	有机杂环化合物	氮杂苯酮类		205.09	1.72	0.001 05
Glutaminylvaline	有机酸及其衍生物	羧酸及其衍生物	氨基酸、肽和类似物	284.10	1.70	0.000 51
5S-HETE di-endoperoxide	有机酸及其衍生物	羟基酸及其衍生物	中链羟基酸及其衍生物	425.21	1.70	0.000 85
Octaethyleneglycol monododecyl ether	有机氧化合物	有机氧化合物	醚类	556.44	1.67	0.000 30
3-(3-hydroxy-4-methoxyphenyl)propanoic acid	苯丙素和聚酮化合物	苯丙酸		179.07	1.66	0.000 99

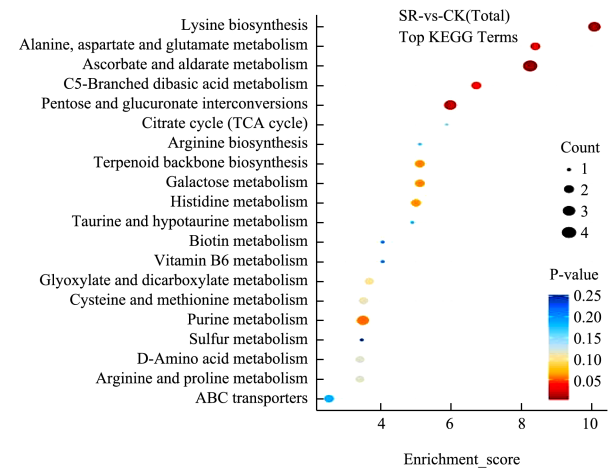


图 8 益生菌发酵软枣猕猴桃汁 KEGG 气泡图

Fig.8 KEGG Bubble Chart of probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

2.5.2 KEGG富集分析圈图

图 9 选取 *P* 值最小的 20 个通路，绘制 KEGG 富集分析圈图，圈图从外到内共 4 圈，第一圈为富集的分类，圈外为代谢物数目的坐标尺，不同的颜色代表

不同分类；第二圈为背景代谢中该分类的数目以及 *P* 值。代谢物越多条形越长，值越小颜色越红，越大越蓝；第三圈为上下调代谢比例条形图，浅红色代表上调代谢物比例，浅蓝色代表下调代谢物比例；下方显示具体的数值；第四圈为各分类的 RichFactor 值，背景辅助线每个小格表示 0.2。Ascorbate and aldarate metabolism（aew00053）为最强通路富集且上调显著，嗜热嗜热链球菌可促进抗坏血酸代谢，增强软枣猕猴桃汁的抗氧化能力，延缓果汁褐变；Vitamin B6 metabolism、Biotin metabolism（aew00750、aew00780）显著富集且上调，B 族维生素等提高果汁营养价值；Arginine and proline metabolism、Histidine metabolism（aew00330、aew00340）该类氨基酸影响风味，其代谢变化改善果汁口感；TCA cycle（aew00020）使得发酵中有机酸代谢活跃，乳酸菌通过 TCA 循环提供能量^[30]。该圈图揭示了嗜热链球菌发酵主要影响氨基酸代谢、能量转化、维生素合成及抗氧化通路。发酵后代代谢物的变化与风味提升、营养强化及功能性物质生成密切相关。

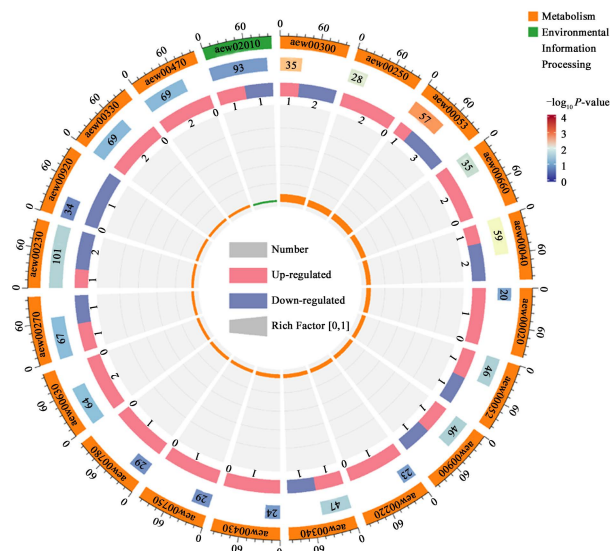


图9 益生菌发酵软枣猕猴桃汁 KEGG 富集分析圈图

Fig.9 KEGG enrichment analysis circle plot of probiotic-fermented *Actinidia arguta* juice

3 结论

嗜热链球菌发酵软枣猕猴桃汁过程中 pH 值、总糖随着发酵时间的增加而降低, pH 值和总糖较发酵前分别下降了 16.26% 和 36.78%。而总酸含量增加, 相较于发酵前增加了 51.22%; TPC、TFC、ASA 含量在第 48 h 达到最大值, 分别为 $4.52 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $4.12 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 、 $80.38 \text{ mg}/100 \text{ g}$, 较发酵前提升 25.91%、32.90%、36.24%; 黄酮含量的增加可以有效提高 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 清除能力和 DPPH 自由基清除能力, 软枣猕猴桃中的黄酮物质对 DPPH 自由基清除率在 80% 以上, 具有较好的抗氧化活性, 羟基自由基清除能力与 $\text{ABTS}^{\cdot+}$ 清除能力较发酵前均提高 50% 以上; 代谢组学检测该嗜热链球菌发酵软枣猕猴桃汁显著差异代谢物共 446 个, 主要有脂质和类脂质分子、有机杂环化合物、有机氧化物、有机酸及其衍生物、苯类等五大类物质, 共占总体差异代谢物的 81.92%。差异代谢物中脂类分子可被人体菌群有效吸收利用, 有机酸可促进微量元素吸收, 具有提高食欲和消化功能。通过代谢通路富集分析, 表明嗜热链球菌发酵软枣猕猴桃汁的差异代谢物主要富集在氨基酸代谢主导、能量枢纽和应激响应通路、风味物质生成等途径中。

综上所述, 软枣猕猴桃汁可以作为益生菌发酵的良好基质。益生菌发酵软枣猕猴桃能有效改变其化学成分, 促进酸性物质释放, 多酚类物质含量增加, 进而提高了其风味营养物质及抗氧化能力, 改善软枣猕猴桃的营养价值和健康效益, 这为开发功能性发酵果蔬饮料提供理论基础。该文为开发和生产高质量发酵

软枣猕猴桃果汁提供有价值的见解, 为工业化生产提供理论依据, 对其工艺优化具有重要意义。

参考文献

- [1] 丁玉萍,王梦泽,刘宇欣,等.软枣猕猴桃产品开发及利用研究进展[J].食品与发酵工业,2023,49(6):308-314,323.
- [2] 牛强,申健,刘悦,等.软枣猕猴桃主要活性成分及药理活性研究进展[J].食品工业科技,2019,40(3):333-338,344.
- [3] 唐艺宁,田密霞,李奕莹,等.软枣猕猴桃的开发利用研究进展[J].保鲜与加工,2023,23(8):76-80.
- [4] DAHIYA D, NIGAM P S. Probiotics, prebiotics, synbiotics, and fermented foods as potential biotics in nutrition improving health via microbiome-gut-brain axis [J]. Fermentation, 2022, 8(7): 303.
- [5] DAHIYA D, NIGAM P S. The gut microbiota influenced by the intake of probiotics and functional foods with prebiotics can sustain wellness and alleviate certain ailments like gut-inflammation and colon-cancer [J]. Microorganisms, 2022, 10(3): 665.
- [6] CHEN R Z, XU Y, WU P, et al. Transplantation of fecal microbiota rich in short chain fatty acids and butyric acid treat cerebral ischemic stroke by regulating gut microbiota [J]. Pharmacological Research, 2019, 148: 104403.
- [7] 刘晓翠,李仲巧,朱慧君,等.乳酸菌发酵猕猴桃汁的工艺优化[J].西华大学学报(自然科学版),2023,42(3):1-9.
- [8] 杨小兰,袁娅,郭晓晖,等.超高压处理对不同品种猕猴桃浆多酚含量及其抗氧化活性的影响[J].食品科学,2013,34(1):73-77.
- [9] 姚佳琪.软枣猕猴桃黄酮提取工艺优化及其降血糖活性研究[D].沈阳:辽宁大学,2023.
- [10] 何艳丽,温锦丽,秦红艳,等.不同软枣猕猴桃资源果实抗氧化活性比较分析[J].食品研究与开发,2024,45(12):35-42.
- [11] 徐朝阳.2,6-二氯酚靛酚滴定法与碘量法测定蔬菜水果中维生素 C 方法的准确度比较[J].食品安全导刊,2021,(25):100-101.
- [12] 郭丽丽,李小兰,田小丽,等.黄芪茎叶总皂苷的响应面提取工艺优化及抗氧化活性研究[J].中国食品添加剂,2023,34(4):158-167.
- [13] 郑若宇.益生菌发酵苹果汁工艺优化及发酵过程中风味物质和功能性成分的变化[D].沈阳:沈阳农业大学,2020.
- [14] 李瑞娟,梁锦,王丹,等.不同品种猕猴桃汁抗氧化成分及体外抗氧化活性比较[J].食品工业科技,2022,43(2):311-318.
- [15] ALROSAN M, TAN T C, EASA A M, et al. Improving the functionality of lentil-casein protein complexes through structural interactions and water kefir-assisted fermentation [J]. Fermentation, 2023, 9(2): 194.
- [16] YANG X X, ZHOU J C, FAN L Q, et al. Antioxidant properties of a vegetable-fruit beverage fermented with two *Lactobacillus plantarum* strains [J]. Food Science and Biotechnology, 2018, 27: 1719-1726.
- [17] 袁晶,康三江,曾朝珍,等.益生菌发酵对苹果浆理化性质、抗氧化活性及挥发性风味的影响[J].食品安全质量检测学报,2023,14(18):288-295.
- [18] 吴江娜.乳酸菌发酵梨汁的品质变化及其代谢途径分析[D].保定:河北农业大学,2022.
- [19] ZHANG Y, ZHONG C H, LIU Y F, et al. Agronomic trait

- variations and ploidy differentiation of kiwiberries in Northwest China: implication for breeding [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 711.
- [20] YOON K Y, WOODAMS E E, HANG Y D. Production of probiotic cabbage juice by lactic acid bacteria [J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(12): 1427-1430.
- [21] ZHANG H, GAO S M, ZHANG X Y, et al. Fermentation characteristics and the dynamic trend of chemical components during fermentation of *Massa Medicata Fermentata* [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2022, 15(1): 103472.
- [22] 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 Biochemistry*, 2017, 59: 141-149.
- [23] LI X Y, GAO J, SIMAL-GANDARA J, et al. Effect of fermentation by *Lactobacillus acidophilus* CH-2 on the enzymatic browning of pear juice [J]. *Lwt*, 2021, 147: 111489.
- [24] 罗悦,刘瑞山,王志远,等.不同 β -葡萄糖苷酶活性乳酸菌发酵豆乳特性分析[J]. *食品科学*, 2023, 44(20): 155-164.
- [25] HONG Y X, LERTPHADUNGKIT P, LV Y K, et al. Recent advances in microbial synthesis of polyphenols [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2025, 93: 103308.
- [26] YI R K, TAN F, LIAO W, et al. Isolation and identification of *Lactobacillus plantarum* HFY05 from natural fermented yak yogurt and its effect on alcoholic liver injury in mice [J]. *Microorganisms*, 2019, 7(11): 530.
- [27] MORTERA P, ZULJAN F A, MAGNI C, et al. Multivariate analysis of organic acids in fermented food from reversed-phase high-performance liquid chromatography data [J]. *Talanta*, 2018, 178: 15-23.
- [28] SMID E J, KLEEREBEZEM M. Production of aroma compounds in lactic fermentations [J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2014, 5(1): 313-326.
- [29] LIU Y, ZHENG J H, GE L J, et al. Integrated metabolomic and transcriptomic analyses reveal the roles of alanine, aspartate and glutamate metabolism and glutathione metabolism in response to salt stress in tomato [J]. *Scientia Horticulturae*, 2024, 328: 112911.
- [30] YANG Y J, SONG X, WANG H, et al. Transcriptomics of *Streptococcus thermophilus* S-3: Patterns of nutrient requirements and metabolic responses under high-density fermentation conditions [J]. *Food Bioscience*, 2025, 69: 107001.