

乳酸菌发酵南酸枣汁的有机酸代谢及产香特征分析

于海燕, 刘炜炜, 陈潜, 陈臣, 田怀香*

(上海应用技术大学香料香精技术与工程学院, 上海 201418)

摘要: 为分析发酵乳杆菌 (*L. fermentum*) 菌株在发酵南酸枣汁时的有机酸降解及其产香特征。采用高效液相色谱和气相色谱-质谱联用技术测定乳酸菌发酵前、后南酸枣汁有机酸和主要香气物质变化。经过 *L. fermentum* 菌株的发酵处理, 南酸枣汁中的柠檬酸含量显著降低, 从 $4.91 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.90 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 苹果酸含量从 $4.94 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $4.61 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, 同时, 发酵过程中产生了较多的乳酸 (约为 $6.18 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) 以及少量的乙酸 (约为 $0.18 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$)。 *L. fermentum* 菌株发酵过程中产生的乙酸乙酯、2-辛酮、苯甲酸乙酯、芳樟醇和香叶醇等香气物质增强了南酸枣汁青草、柑橘和玫瑰等花果香气, 使得发酵后的南酸枣汁的香气层次丰富、柔和, 通过多元统计分析方法确定了 6 种 *L. fermentum* 菌株发酵南酸枣汁的差异挥发性香气成分。由此可见, *L. fermentum* 菌株在发酵南酸枣汁时不仅能够降解柠檬酸和苹果酸, 还表现出良好的产香能力, 为乳酸菌发酵果汁的品质提升和新产品的开发提供了重要思路。

关键词: 发酵乳杆菌; 降解; 有机酸代谢; 香气特征

文章编号: 1673-9078(2026)2-305-313

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1721

Organic Acid Metabolism and Aroma-producing Characteristics of *Lactobacillus*-fermented *Choerospondias axillaris* Juice

YU Haiyan, LIU Weiwei, CHEN Qian, CHEN Chen, TIAN Huaixiang*

(School of Perfume and Aroma Technology, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: The degradation in the organic acid levels and aroma-producing characteristics of *Lactobacillus fermentum* strains during the fermentation of *Choerospondias axillaris* juice remain unknown; thus, high-performance liquid chromatography (HPLC) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were employed to measure such changes before and after fermentation. The results showed significant reductions in the citrate (from $4.91 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ to $0.90 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) and malate (from $4.94 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ to $4.61 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) contents of the juice following fermentation with *L. fermentum*, and a considerable amount of lactic acid (approximately $6.18 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) and small amount of acetic acid (approximately $0.18 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$) were produced during the fermentation process. Aroma compounds such as ethyl acetate, 2-octanone, ethyl benzoate, linalool, and geraniol, which were generated during fermentation, enhanced the grassy, citrusy, and rosy floral-fruit aromas of the *C. axillaris* juice, resulting in a rich and mellow aroma profile, with multivariate statistical analysis indicating six differential volatile aroma components in the *L. fermentum*-fermented *C. axillaris* juice. The findings thus suggest that *L. fermentum* degrades citrate and malate, as well as exhibiting strong aroma-producing capabilities during fermentation. The results of this study are expected to provide key approaches for improving the quality of *Lactobacillus*-fermented fruit juices and developing new products.

Key words: *Lactobacillus fermentum*; acid degradation; organic acid metabolism; aroma characteristics

引文格式:

于海燕, 刘炜炜, 陈潜, 等. 乳酸菌发酵南酸枣汁的有机酸代谢及产香特征分析[J]. 现代食品科技, 2026, 42(2): 305-313.

YU Haiyan, LIU Weiwei, CHEN Qian, et al. Organic acid metabolism and aroma-producing characteristics of *Lactobacillus*-fermented *Choerospondias axillaris* juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 305-313.

收稿日期: 2024-11-19; 修回日期: 2025-01-23; 接受日期: 2025-02-14

作者简介: 于海燕 (1979-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味分析技术及其应用, E-mail: hyyu@sit.edu.cn

通讯作者: 田怀香 (1976-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品风味化学, E-mail: tianhx@sit.edu.cn

南酸枣 (*Choerospondias axillaris*), 为漆树科, 南酸枣属, 主产于安徽、浙江、江西等产地^[1]。南酸枣产品因其独特的口感、丰富的营养价值和生物活性^[2]而受到消费者的喜爱。但南酸枣中柠檬酸和苹果酸含量较高^[3], 使得鲜果口感酸涩, 目前大多采用加糖的方式来掩盖酸涩味。随着消费者健康消费观念的提升, “控糖”成为食品行业产品开发新趋势, 因此, 亟需寻找一种减少产品中糖添加量且能改善南酸枣汁酸涩口感的方法。

常用的降酸手段包括化学降酸、生物降酸以及物理降酸^[4]。目前, 生物降酸越来越受到关注, 其不仅能降低果汁中过量的有机酸, 还能改变果汁中的香气物质含量, 使得果汁的风味品质得到提升^[5,6]。苹果酸-乳酸发酵 (*Malolactic fermentation*, MLF) 是一种生物降酸手段, 通过乳酸菌 (*Lactic acid bacteria*, LAB) 中特有的苹果酸-乳酸酶 (*Malolactic enzyme*, MLE) 的催化作用, 可将苹果酸转化为口感更为柔和的乳酸^[7], 同时 LAB 也可以通过 MLF 过程代谢柠檬酸^[8]。有学者对 LAB 代谢柠檬酸途径研究发现, 柠檬酸可以通过柠檬酸的转运、裂解和丙酮酸途径进行代谢^[9]。有研究表明, LAB 可以在不代谢糖类的环境下, 代谢有机酸, 生成乙酸和乳酸^[10,11], 乳酸可以使得果汁风味更加圆润, 适量的乙酸也可以增加水果香气^[11], LAB 也可以在含有一定量的碳水化合物的情况下代谢柠檬酸使其生物量增加^[12,13]。宁志雪等^[14]通过复合降酸乳酸菌发酵, 改善了沙棘汁酸涩的口感。陈彦辉等^[15]通过乳酸菌发酵赋予了枸杞酒柑橘类水果香气, 口感柔和、酸甜适宜。

然而南酸枣汁 pH 值过低, 大部分乳酸菌在此环境中难以生存, 因此直接使用生物降酸技术难以获得理想风味。离子交换树脂法可以在降低果汁酸度的同时, 不仅获得较好的果汁风味, 还能保留果汁中一定的功能成分。张杰^[16]采用树脂将蓝莓酒中总酸降低至原汁的 35.5%, 使得果酒口感适宜, 且对果酒品质无较大影响。基于此, 本文以南酸枣汁为基质, 先采用离子交换树脂法将果汁 pH 值提升, 再加入具有降酸性能的乳酸菌菌株进行果汁发酵, 分别采用气相色谱-质谱联用和高效液相色谱分析乳酸菌发酵对南酸枣汁挥发性香气成分的影响及其有机酸代谢情况, 以期获得风味品质较好的南酸枣乳酸菌果汁。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

南酸枣果肉, 购自赣州市赣县区洛乡; D354-FD 大孔弱碱性阴树脂 (食品级), 购自浙江争光股份

有限公司; 果胶酶 (食品级), 山东隆科特有限公司; 发酵乳杆菌 (*L. fermentum*) 从酸萝卜中分离获得, 于中国典型培养物保藏中心保藏, 编号为 CCTCC M 2023006; 甲醇、2-辛醇、正构烷烃 (C_7-C_{30})、柠檬酸、苹果酸、酒石酸、草酸、乳酸、乙酸 (色谱纯), 均购自上海探索平台试剂公司; 磷酸二氢钾、磷酸、氢氧化钠、邻苯二甲酸氢钾 (分析纯), 均购自上海探索平台试剂公司。

1.2 仪器与设备

G7115A 高效液相色谱仪, 美国安捷伦公司; 7890A GC、5977B MSD 气相色谱-质谱联用仪, 美国安捷伦科技公司; 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头, Sigma-Aldrich (上海) 贸易有限公司; GZX9070MBE 电子天平, 上海博讯有限公司; HHS 水浴锅, 金坛市国瑞实验仪器厂; JJ-2 2003-61 组织捣碎匀浆机, 南京科航实验仪器有限公司。

1.3 南酸枣汁降酸试验方法

1.3.1 南酸枣汁的制备

南酸枣果肉与水按照 1:1.5 (m/m) 的料液比混合, 捣碎混匀, 得到南酸枣果泥, 取一定量果泥加入 0.25% (m/V) 的果胶酶, 于 55 $^{\circ}\text{C}$ 酶解 2 h, 离心 (4 500 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 15 min) 过滤, 于 90 $^{\circ}\text{C}$ 灭酶 1 min, 获得南酸枣汁, 备用。

1.3.2 协同降酸试验

1.3.2.1 离子交换树脂降酸

南酸枣汁 pH 值为 2.97, 采用离子交换树脂法调节果汁的 pH 值, 为 3.41 ± 0.01 , 提高乳酸菌在此环境中的生存率。

树脂活化^[17]: 取适量 D354-FD 树脂, 去离子水浸泡 24 h, 清洗后交替用 4 wt.% NaOH 和 4% (φ) HCl 溶液 (2~4 倍树脂体积) 浸泡 4 h, 再用 4 wt.% NaOH 转型, 期间振摇, 最后蒸馏水洗至中性, 得活化树脂, 备用。

样品处理: 树脂与南酸枣果汁按照 1:7 (V/V) 的比例装入离子交换柱中, 控制流速为 2.5 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$, 待果汁流出完毕后, 测定流出液的总酸和有机酸含量。

1.3.2.2 乳酸菌发酵降酸

乳酸菌活化: 量取 0.2 mL 菌悬液于 10 mL 的 MRS 培养基中, 37 $^{\circ}\text{C}$ 下活化 2 次, 每次 12 h。将培养好的菌悬液进行离心, 再用生理盐水清洗 2~3 次后备用。

发酵降酸: 以总酸含量为指标, 通过正交试验确定发酵乳杆菌发酵南酸枣汁的最佳条件为 8% (V/V)、37 $^{\circ}\text{C}$ 和 4 d。将菌悬液充分混合均匀后, 以 8% (V/V) 接种量接入灭菌后的南酸枣汁中, 在 37 $^{\circ}\text{C}$ 条件下发酵

4 d。定期取样测定南酸枣汁中有机酸和挥发性香气成分含量。

1.4 有机酸含量测定

采用高效液相色谱法测定发酵前后南酸枣汁中有机酸含量，参照何丹等^[18]的方法并略作修改。色谱条件：色谱柱，Agilent ZORBAX SB-C₁₈ 色谱柱（4.6 mm×250 mm，5 μm）；检测器：紫外检测器（DAD）；流动相，0.05% KH₂PO₄-H₃PO₄ 缓冲溶液（pH 值为 2.2）：甲醇=98:2；检测波长：210 nm；流量：0.8 mL·min⁻¹；柱温：20 ℃；进样量：10 μL。

1.5 南酸枣汁挥发性香气成分的测定

参照王炳文等^[19]的方法分析发酵过程中南酸枣汁香气物质含量及其变化。

HS-SPME 法萃取香气物质：取 5 g 样品、5 μL 内标（2-辛醇，220 mg·L⁻¹）和 0.5 g NaCl 于 20 mL 顶空瓶中。在 50 ℃ 下平衡 10 min 后插入经过 250 ℃ 老化 30 min 的固相微萃取头，于 600 r·min⁻¹ 下萃取 40 min，再将萃取头插入 GC 进样口，解析 5 min。待测组分在 HP-INNOWax 色谱柱（60 m×0.25 mm×0.25 μm）中实现分离。进样口温度 250 ℃，载气为氦气，流速 1 mL·min⁻¹。气相色谱的程序升温条件为：初始温度 50 ℃ 保持 5 min，以 6 ℃·min⁻¹ 升温至 90 ℃，保持 2 min，4 ℃·min⁻¹ 升温至 160 ℃，保持 2 min，最后以 15 ℃·min⁻¹ 的速率升至 230 ℃，保持 7 min，检测器温度 250 ℃。质谱分析条件为：EI 电离源，电子能量 70 eV，扫描范围 30~450 u，离子源温度 230 ℃，接口温度 250 ℃。进样口为 250 ℃，设置不分流模式，3 min 的溶剂延迟，解析 5 min。每组样品进行三次平行检测。基于 NIST 20 标准谱库检索结果和保留指数（Retention index, RI）对香气物质定性；采用 220 mg·L⁻¹ 的 2-辛醇为内标物进行挥发性化合物含量的计算。

关键挥发性香气成分分析：将 OAV 值最大的挥发性成分视为对样品整体风味贡献最大的成分，并将其 ROAV 设定为 100。其他挥发性成分的 ROAV 依据公式（1）计算得出。ROAV 值越高，表示该挥发性成分对样品整体风味的贡献越大。当 ROAV 值达到或超过 1 时，该挥发性成分即为样品的主要挥发性成分，也就是关键挥发性香气成分；而 ROAV 值在 0.1 到 1 之间的挥发性成分，则对样品整体风味具有重要的修饰作用^[20]。香气成分的阈值来自《化合物嗅觉阈值汇编》^[21]。

$$B=100\times\frac{C}{C_{\text{stan}}}\times\frac{T_{\text{stan}}}{T}$$

(1)

式中：
B——挥发性香气成分对样品整体风味的贡献值（ROAV）；
C——化合物的含量，μg·kg⁻¹；
T——化合物的阈值；
C_{stan}——对样品贡献最大（即 OAV 最大）的挥发性香气成分的含量，μg·kg⁻¹；
T_{stan}——对样品贡献最大的挥发性香气成分无味基质中的阈值，μg·kg⁻¹。

1.6 总酸含量的测定

参考 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》，采用酸碱滴定法测定发酵南酸枣汁中的总酸^[22]。

1.7 感官评价

南酸枣汁感官评价依据 GB 7101-2022《食品安全国家标准 饮料》^[23]，采用定量描述法对南酸枣汁香气、滋味、组织状态和整体平衡性进行感官评价。在 20 ℃ 左右下，由 16 名被训练过的感官评价成员（男女各 8 名）对南酸枣汁进行感官品评。将南酸枣汁样本随机编号，依照拉丁方试验设计方法将样品呈递给评价员，每组样品间评价员使用纯净水进行漱口，并暂缓 3~5 min。评价标准如表 1 所示。

表 1 南酸枣汁感官评分标准
Table 1 Sensory evaluation criteria for *Choerospondias axillaris* juice

感官	定义	分数
香气 (30分)	具有南酸枣特有的果香，无刺激性气味，香气丰富且协调	21~30
	具有南酸枣特有的果香，有一定的刺激性气味，香气较协调	11~20
	无南酸枣特有的果香，且有刺激性气味，香气单一且不协调	≤10
滋味 (30分)	具有南酸枣果味，无涩味，酸甜适宜，且有回甘	21~30
	南酸枣果味较淡，无明显涩味，较酸，有回甘	11~20
	南酸枣果味较淡，有涩味，有刺激性酸味，无回甘	≤10
色泽 (20分)	令人愉悦的果蔬汁色泽，有光泽	16~20
	颜色较淡或较浓，略有光泽	11~15
	颜色极淡，无光泽	≤10
组织 状态 (20分)	分布均匀，且澄清	16~20
	分布均匀，但较为浑浊	11~15
	有少许沉淀物，且浑浊	≤10

1.8 数据分析

使用 IBM SPSS Statistics 21 软件进行显著性方差分析,以 $P<0.05$ 为差异显著;使用 SIMCA 14.1 进正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)及预测变量重要性投影分析(VIP),结果以平均值 $\pm$ 标准差表示,每次试验重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 发酵乳杆菌发酵对南酸枣汁感官属性的影响

对南酸枣汁发酵前后(发酵前及发酵后第 1、2、3 和 4 天果汁)的组织状态、口感、色泽和香气进行评分,结果如表 2 所示。以树脂吸附后的南酸枣汁作为发酵基质进行 *L. fermentum* 菌株发酵发现,随着发酵天数的增加,南酸枣汁总体评分得以提升,其中,发酵至第 4 天的南酸枣汁感官评分值最高,为 81.83 分。经过发酵后,果汁组织状态良好,未发现沉淀或絮状物。发酵果汁与未发酵果汁相比,其香气和滋味有显著变化,评价员认为果汁随着发酵天数的增加,南酸枣汁的香气愈加浓郁,口感愈加圆润且柔。实验结果表明:*L. fermentum* 菌株发酵改善了南酸枣汁香气寡淡和口感酸涩等风味缺点。

2.2 发酵乳杆菌发酵南酸枣汁有机酸代谢分析

南酸枣原汁总酸含量为 $98.59\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,D354-FD 树脂吸附后的南酸枣汁总酸含量降至 $49.72\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,降酸率为 62.18%。以树脂吸附后的南酸枣汁作为 *L. fermentum* 菌株发酵基质,其发酵结果如表 3 所示。表中共测得 6 种有机酸(琥珀酸未检出),其中柠檬酸和苹果酸含量变化显著,*L. fermentum* 菌株发酵南酸枣汁 4 d 后,柠檬酸含量从 $4.91\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $0.90\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,苹果酸含量从 $4.94\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $4.61\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,总酸含量从 $49.72\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 降至 $23.63\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,降酸率为 49.72%。同时 *L. fermentum* 菌株发酵代谢产生了 $6.18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的乳酸和 $0.18\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的乙酸。

南酸枣中主要有机酸为柠檬酸和苹果酸,其具有

较高的含量^[3]。较高含量的柠檬酸具有刺激性酸味,而乳酸口感柔和^[24]。有机酸测定结果表明柠檬酸在 *L. fermentum* 菌株发酵的过程中大量代谢,乳酸在 *L. fermentum* 菌株发酵的过程中大量生成。发酵前柠檬酸含量为 $4.91\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,乳酸含量为 $0.19\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,此时滋味感官评分值最低,为 15.21 分,南酸枣汁口感较酸且果味较淡,通过 *L. fermentum* 菌株发酵后,柠檬酸含量为 $0.90\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,乳酸含量为 $6.37\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,此时滋味感官评分值升高至 23.17 分,南酸枣汁酸甜适宜且果味浓郁,*L. fermentum* 菌株发酵可以使得乳酸含量增加,从而改善果汁的风味。王媛等^[25]的研究发现柠檬酸是山楂汁中的主要有机酸,经过乳酸菌混菌发酵后将口感酸涩刺激的柠檬酸转化为口感柔和的乳酸,使山楂汁口感适宜。

L.Fermentum 菌株发酵南酸枣汁可以有效降解柠檬酸和苹果酸。苹果酸含量减少可能是因为 MLE 的存在,使得 L-苹果酸直接脱羧转化为口感圆润的乳酸^[7];然而,苹果酸降解量远低于柠檬酸,且发酵 4 d 后,苹果酸仅消耗 $0.33\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,推测可能是因为果汁中柠檬酸和酒石酸等与苹果酸结构相似的有机酸的存在,与苹果酸竞争 MLE 的活性位点,从而抑制苹果酸乳酸发酵,使得 L-苹果酸转化为 L-乳酸途径受阻^[26],除此之外,果汁 pH 值较低、 SO_2 、糖含量和中链脂肪酸等均会对 MLF 产生抑制^[27]; *L. fermentum* 菌株发酵对柠檬酸降解效果显著,分析其原因可能是一部分柠檬酸在柠檬酸裂解酶(CL)的作用下转化为草酰乙酸和乙酸,前者脱羧为丙酮酸,进而生成乳酸,另一部分则转化生成乙酸^[9]。在发酵过程中,柠檬酸和苹果酸含量趋于稳定,而乳酸含量继续增加,说明还有其它物质参与乳酸的形成,如葡萄糖经过糖酵解(EMP)途径产生乳酸。草酸在树脂吸附后的南酸枣汁中含量较少,在发酵过程中含量基本保持不变,说明 *L. fermentum* 菌株发酵对草酸的影响较小。*L. fermentum* 菌株发酵生成较少的乙酸,且草酸含量基本维持稳定,这也是 *L. fermentum* 菌株具有较好的降酸能力的主要原因之一。试验结果说明, *L. fermentum* 菌株发酵可以有效降低南酸枣汁中的有机酸。

表 2 发酵南酸枣果汁感官评分结果

Table 2 Sensory evaluation results of fermented *Choerospondias axillaris* juice

感官评价	色泽 (20 分)	组织状态 (20 分)	香气 (30 分)	滋味 (30 分)	总体评分 (100 分)
SZ	14.00 $\pm$ 1.34 ^a	9.33 $\pm$ 0.98 ^a	13.34 $\pm$ 1.09 ^a	15.21 $\pm$ 1.11 ^a	51.88 $\pm$ 3.11 ^a
FJ1	15.11 $\pm$ 2.13 ^a	13.33 $\pm$ 1.05 ^b	20.00 $\pm$ 1.01 ^b	18.33 $\pm$ 1.07 ^b	66.77 $\pm$ 4.38 ^b
FJ2	15.56 $\pm$ 1.87 ^a	15.23 $\pm$ 1.09 ^{bc}	22.66 $\pm$ 1.78 ^{bc}	21.19 $\pm$ 1.57 ^c	74.64 $\pm$ 4.55 ^{bc}
FJ3	16.89 $\pm$ 1.99 ^a	15.44 $\pm$ 1.37 ^{bc}	24.11 $\pm$ 1.81 ^c	22.03 $\pm$ 1.21 ^c	78.47 $\pm$ 5.19 ^{bc}
FJ4	17.33 $\pm$ 2.01 ^a	16.67 $\pm$ 1.09 ^c	24.66 $\pm$ 1.27 ^c	23.17 $\pm$ 1.05 ^c	81.83 $\pm$ 4.93 ^c

注: 根据 Duncan 检验, 同一行中具有不同字母的值存在显著差异 ($P<0.05$)。

表 3 发酵前后南酸枣果汁有机酸含量 (g·L⁻¹)

Table 3 Content of organic acids in juice of <i>Choerospondias axillaris</i> before and after fermentation						
有机酸	柠檬酸	苹果酸	乳酸	酒石酸	乙酸	草酸
SZ	4.91 ± 0.00 ^a	4.94 ± 0.04 ^a	0.19 ± 0.01 ^c	0.30 ± 0.01 ^a	0.50 ± 0.01 ^c	0.17 ± 0.00 ^a
FJ1	4.05 ± 0.10 ^b	4.77 ± 0.08 ^b	1.89 ± 0.03 ^d	0.21 ± 0.00 ^b	0.51 ± 0.02 ^c	0.15 ± 0.00 ^b
FJ2	0.88 ± 0.00 ^c	4.61 ± 0.03 ^c	5.32 ± 0.02 ^c	0.21 ± 0.01 ^b	0.54 ± 0.04 ^{bc}	0.15 ± 0.01 ^b
FJ3	0.91 ± 0.01 ^c	4.60 ± 0.03 ^c	5.76 ± 0.01 ^b	0.20 ± 0.01 ^b	0.60 ± 0.03 ^b	0.15 ± 0.01 ^b
FJ4	0.90 ± 0.03 ^c	4.61 ± 0.03 ^c	6.37 ± 0.02 ^a	0.20 ± 0.00 ^b	0.68 ± 0.04 ^a	0.13 ± 0.00 ^c

注: 根据 Duncan 检验, 同一列中具有不同字母的值存在显著差异 ($P<0.05$)。表中 SZ、FJ1、FJ2、FJ3、FJ4 分别为发酵前果汁、发酵第 1、2、3 和 4 天果汁, 下同。

2.3 发酵乳杆菌发酵南酸枣汁挥发性香气成分的影响

香气是评判饮料品质的重要指标之一, *L. fermentum* 菌株不仅具有很好的降酸能力, 而且经其发酵获得的南酸枣汁口感会更加柔和, 香气更浓郁丰厚。研究采用 GC-MS 测定了发酵过程中香气成分的含量变化, 结果见表 4。经 *L. fermentum* 菌株发酵获得的南酸枣汁中共检测出 34 种挥发性香气成分, 分别包括醛类物质 9 种、酯类物质 8 种、醇类物质 6 种、酸类 3 种、酮类物质 3 种、酚类 2 种、其它类 3 种。在南酸枣发酵过程中, 香气物质发生了显著的变化, 经 *L. fermentum* 菌株发酵后获得的南酸枣汁中共检测出 12 种新的香气物质, 其中, 醛类 3 种、酯类 2 种、醇类 3 种、酸类 2 种、其他类 2 种, 且各物质在南酸枣汁中的含量也随之发生了显著变化。随着发酵天数的增加, 香气丰富度提升, 发酵第 1 天仅有 12 种香气物质, 发酵第 2 天和第 3 天为 14 种香气物质, 发酵第 4 天香气物质最为丰富, 共有 23 种香气物质。之后通过实验筛选发现乙酸乙酯、苯甲酸乙酯、芳樟醇、香叶醇和 2-辛酮共计 5 种香气物质是发酵南酸枣汁的关键香气物质 (ROAV>1), 经菌株发酵后其含量显著增加。酯类物质的生成主要有两种途径: 一是由 *L. fermentum* 菌株催化的酶促反应, 另外是南酸枣汁中有机酸与醇类的非酶促酯化^[28]。其中, 乙酸乙酯含量由 13.69 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 16~22 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 具有葡萄和樱桃等水果香气, 增强了南酸枣汁中的果香气味, 这与感官评价结果一致。苯甲酸乙酯含量由 50.36 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 61~86 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 文献表明该物质呈现茴香气味^[29,30]。发酵南酸枣汁中醇类物质可通过脂肪酸降解、氨基酸酶作用和酮类的还原反应产生^[31]。芳樟醇为发酵南酸枣汁中新产生的香气物质, 含量为 18.71 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 具有青草和柑橘的香气^[30]。香叶醇含量由 2.78 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 3.7~17 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 具有玫瑰花香^[32]。在 Ling 等^[33]的研究中发现, 乳酸菌发酵苹果汁中存在的香叶醇和芳樟醇, 使得苹果汁呈现花果香气, 这可能也是南酸枣汁产生果香气味的原因。2-辛酮具有奶酪香气, 其含量由 145.61 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 增加至 230~250 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 2-辛

酮含量的增加可能归因于 *L. fermentum* 菌株发酵导致酸类物质发生脱羧或氧化反应^[34]。此 5 种物质共同增强了南酸枣汁的发酵风味, 说明 *L. fermentum* 菌株的添加能有效改善南酸枣汁的香气物质和感官品质, 使其口感更加柔和, 香气更浓郁。此外, 研究发现具有不愉快气味的 3-戊烯-2-酮香气物质逐渐减少直至含量为 0 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 可能是此物质含量的减少使得感官评价中的刺激性气味有所降低。试验结果表明: 经过 *L. fermentum* 菌株发酵后, 具有果香气味的乙酸乙酯、芳樟醇等关键香气物质含量显著增加, 呈现刺激性气味的香气物质逐渐降低, 增强了南酸枣汁香气浓郁程度, 改善和提升了整体风味。

2.4 发酵过程中南酸枣汁挥发性香气成分的多元统计分析

OPLS-DA 是一种多变量统计分析方法, 能有效筛选发酵南酸枣汁中关键标志性差异物质^[35,36]。对 34 种挥发性香气成分及发酵南酸枣汁样品进行 OPLS-DA 和 VIP 分析, 其可以更好的获取不同阶段样品的差异信息。如图 1a 所示, *L. fermentum* 菌株发酵过程中的 5 种样品内部具有较好的聚集性, 本自变量拟合指数 R^2x 为 0.994, 因变量拟合指数 R^2y 为 0.974, 模拟预测指数 Q^2 为 0.925, R^2 和 Q^2 均超过 0.5 说明模拟拟合结果较好, 其 $R^2x[1]$ 方差贡献率为 82.4%, $R^2y[2]$ 方差贡献率为 3.44%, 累计方差贡献率为 85.84%, 说明发酵前后的南酸枣汁样品具有显著性差异。经过 200 次置换检验, Q^2 回归线与垂直轴 (左侧) 在 0 点以下相交 (图 1b), 且 Q^2 左侧值均低于右侧的原始点, 说明模型不存在过拟合, 强有力地表明了原模型的有效性, 认为结果可用于 *L. fermentum* 菌株发酵南酸枣汁过程挥发性香气成分的鉴定。通过计算南酸枣汁样品中挥发性香气成分的变量重要性投影 (Variable Importance in the Projection, VIP), 进一步评估发酵时间对发酵南酸枣汁样的影响程度。由表 5 结果所示, 可以在发酵前后的南酸枣汁样品中共筛选出 6 种差异物质 (同时满足 VIP 值 >1 和 $P<0.05$), 分别是乙酸、棕榈酸甲酯、2,5-二甲酰基呋喃、反式肉桂醛、苯甲酸甲酯和苯甲酸乙酯。

表 4 *L. fermentum* 菌株发酵南酸枣汁发酵过程中的香气成分变化

Table 4 Changes in aroma components during fermentation of <i>Choerospondias axillaris</i> juice by <i>L. fermentum</i> strain															
序 号	物质名称	阈值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	RI 值		SZ		FJ1		FJ2		FJ3		FJ4		香气描述
			计算	文献	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	
1	乙酸乙酯	5	901	894	13.69 ± 2.59^c	21.70	21.30 ± 0.98^a	24.73	16.33 ± 0.88^b	13.44	16.35 ± 1.36^b	9.43	17.99 ± 0.76^b	4.24	果味、甜、葡萄、樱桃
2	苯甲酸甲酯	73	1 620	1 641	38.24 ± 4.15^a	4.15	4.49 ± 0.41^d	0.36	8.71 ± 0.41^c	0.45	7.26 ± 0.31^c	0.29	15.50 ± 1.71^b	0.00	樱桃核、樟脑
3	苯甲酸乙酯	55.56	1 661	1 681	50.36 ± 7.78^d	7.18	61.46 ± 0.97^c	6.42	65.78 ± 5.71^c	4.42	74.18 ± 3.03^{bc}	3.85	85.77 ± 12.17^{ab}	2.00	甜、薄荷、茴香
4	水杨酸甲酯	40	1 771	1 786	ND	ND	0.72 ± 0.04^c	0.10	1.29 ± 0.07^c	0.12	3.44 ± 0.02^b	0.25	10.16 ± 1.58^a	0.33	甜味、香草、肉桂味
5	3-苯丙酸甲酯	ND	1 831	1 866	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	5.61 ± 0.11	ND	蜂蜜、水果、花香
6	异丁酸丁酯	93.6	1 762	ND	1.76 ± 0.13	0.15	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	甜、果味、苹果、草莓、香蕉、葡萄酒、奶酪
7	肉桂酸甲酯	120	2 051	2 051	10.45 ± 0.86	0.69	5.26 ± 0.23	0.25	ND	ND	ND	ND	ND	ND	奇异果、苹果、荔枝、草莓、香蕉
8	棕榈酸甲酯	2 000	2 200	2 218	28.08 ± 2.49	0.11	ND	ND	66.70 ± 1.47	0.12	ND	ND	ND	ND	蜡质油、鸢尾花
9	异戊醇	4	1 173	1 183	2.84 ± 0.07	5.62	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	发酵、水果、香蕉、干邑
19	2-乙基乙醇	800	1 481	1 490	15.65 ± 1.50^b	0.16	6.62 ± 0.01^c	0.05	ND	ND	ND	ND	22.65 ± 2.38^a	0.04	甜、油脂、果味
11	芳樟醇	0.22	1 581	1 581	2.78 ± 0.35^c	100	3.79 ± 0.19^d	100	5.89 ± 0.47^c	100	7.63 ± 1.11^{bc}	100	16.95 ± 2.08^a	100	柑橘、橙子、青草、花香
12	糠醇	4 500	1 656	1 671	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.82 ± 0.03	0.00	甜、焦糖味
13	香叶醇	1.1	1 831	1 856	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	18.71 ± 0.54	22.07	花香、玫瑰、桃子
14	苯甲醇	2 546.21	1 501	1 530	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	5.82 ± 0.82	0.00	水果味、樱桃、杏仁、香醋、苦味
15	壬醛	1.1	1 382	1 387	4.89 ± 0.11	35.21	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	果酸、柑橘、黄瓜和甜瓜的果皮味、生土豆、油性坚果和椰子
16	糠醛	4 500.5	1 431	1 439	4.39 ± 0.17	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	甜、木质、面包香、坚果、焦糖般略带苦涩
17	苯甲醛	750.89	1 500	1 530	10.11 ± 1.17^b	0.11	7.82 ± 1.05^b	0.06	6.98 ± 0.52^b	0.03	7.15 ± 1.51^b	0.03	22.98 ± 3.32^a	0.04	甜、杏仁、樱桃、坚果、木质
18	5-甲基呋喃醛	ND	1 551	1 558	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.40 ± 0.91	ND	甜、焦糖、枫糖
19	柠檬醛	28	1 267	1 265	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	7.43 ± 0.05	0.24	柠檬皮、柑橘、酸橙、木质、草本
20	反式肉桂醛	6 000	1 267	1 270	14.22 ± 0.86^c	0.02	ND	ND	ND	ND	55.36 ± 4.69^a	0.03	22.22 ± 1.20^b	0.00	肉桂、辛辣

续表4

序 号	物质名称	阈值/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	RI 值		SZ		FJ1		FJ2		FJ3		FJ4		香气描述
			计算	文献	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	物质含量/ ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	ROAV 值	
21	肉桂醛	750	2 041	2 043	14.32 ± 0.95^b	0.15	ND	ND	14.67 ± 2.37^b	0.07	10.37 ± 1.82^c	0.04	30.04 ± 1.05^a	0.05	甜、蜂蜜、桂皮、树脂
22	顺式肉桂醛	69	1 260	1 223	10.08 ± 0.18	1.16	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	肉桂
23	5-羟甲基糠醛	1 000 000	2 500	2 487	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	83.92 ± 6.34	0.00	草本
24	3-戊烯-2-酮	1 200	1 112	1 137	1.32 ± 0.04	0.01	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	霉味、不新鲜的水、鱼、 贝类
25	2-辛酮	230	1 291	1 296	145.61 ± 17.53^b	5.02	231.31 ± 22.45^a	5.84	235.28 ± 18.30^a	3.82	240.11 ± 16.33^a	3.01	247.95 ± 4.15^a	1.40	奶制品、奶酪、木质
26	苯乙酮	65	1 601	1 627	10.11 ± 1.17^b	1.23	11.05 ± 0.98^b	0.97	10.82 ± 1.05^b	0.62	6.51 ± 0.80^c	0.29	19.00 ± 1.67^a	0.40	櫻桃核、香豆素、果味
27	苯酚	58 585.25	2 010	2 032	6.63 ± 1.17	0.00	ND	ND	ND	ND	ND	ND	21.10 ± 1.13	0.00	塑料橡胶、甜味
28	2,4-二叔丁基 苯酚	ND	2 300	2 315	36.40 ± 2.51^c	0.58	37.73 ± 1.14^c	0.44	76.90 ± 5.92^b	0.57	67.94 ± 11.50^b	0.39	152.09 ± 5.92^a	0.40	酚醛、树脂
29	乙酸	99 000	1 401	1 427	94.02 ± 7.45^c	0.01	130.80 ± 4.95^d	0.01	730.29 ± 7.90^c	0.03	831.25 ± 36.94^b	0.02	$3\ 540.70 \pm 30.75^a$	0.05	香醋、过熟水果
30	辛酸	3 000	2 031	2 039	ND	ND	ND	ND	ND	ND	22.18 ± 4.38	0.02	52.28 ± 12.85	0.02	奶酪味
31	苯甲酸	1 000	2 441	2 448	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	46.05 ± 1.14	0.06	清新的芳香
32	苯乙烯	3.6	1 263	1 267	2.13 ± 0.07	4.69	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	香脂花、橘香味、塑料
33	茴香脑	15	1 289	1 286	ND	ND	ND	ND	3.08 ± 0.09	0.23	ND	ND	10.02 ± 0.17	0.26	甜味、茴香、甘草、药 草香
34	2,5-二甲酰基 呋喃	ND	1 971	1 991	ND	ND	ND	ND	ND	ND	54.01 ± 6.16	ND	ND	ND	烤面包

注：ND 为未检出物质；根据 Duncan 检验，同一行中具有不同字母的值存在显著差异（ $P < 0.05$ ）；阈值为阈值数据库《化合物嗅觉阈值汇编》^[21]报道的气味阈值；香气描述参考 <http://www.perflavory.com/search.php>

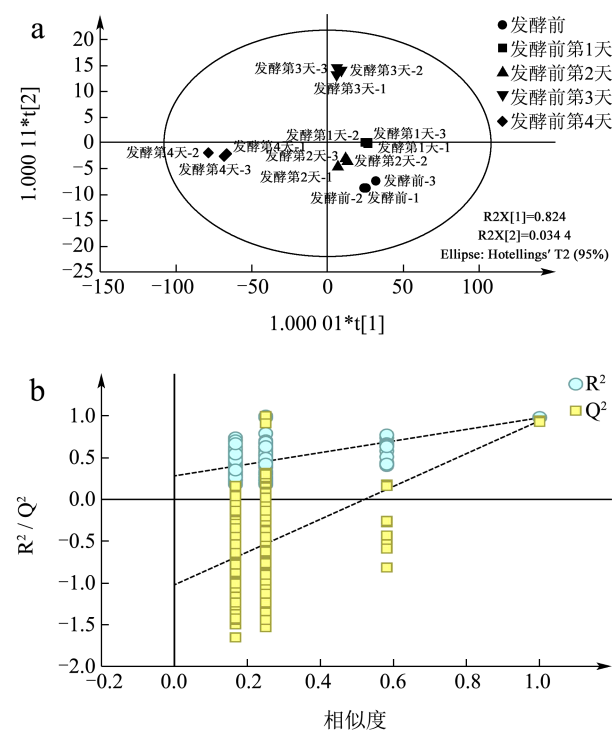


图 1 发酵南酸枣汁样品的挥发性香气成分 OPLS-DA 相关性分析
Fig.1 Correlation analysis of aroma components OPLS-DA in fermented *Choerospondias axillaris* juice samples

表 5 基于OPLS-DA筛选发酵南酸枣果汁差异香气物质
Table 5 Screening of differential aroma compounds in fermented *Choerospondias axillaris* juice based on OPLS-DA

序号	化合物	CAS	VIP 值
1	乙酸	C64-19-7	4.28
2	棕榈酸甲酯	C112-39-0	1.87
3	2,5-二甲酰基呋喃	C823-82-5	1.43
4	反式肉桂醛	C14371-10-9	1.40
5	苯甲醛甲酯	C93-58-3	1.15
6	苯甲酸乙酯	C93-89-0	1.07

3 结论

L. fermentum 菌株乳酸菌发酵有效改善了南酸枣汁中不良的风味属性，使得果汁整体平衡性得到提升。*L. fermentum* 菌株乳酸菌发酵降解南酸枣汁中的有机酸，效果显著，柠檬酸含量从 4.91 g·L⁻¹ 降至 0.90 g·L⁻¹，苹果酸含量从 4.94 g·L⁻¹ 降至 4.61 g·L⁻¹，生成了较多的乳酸和少量的乙酸。发酵后的南酸枣汁中产生了 12 种新的香气物质，其中主要呈香物质为乙酸乙酯、苯甲酸乙酯、芳樟醇、香叶醇和 2-辛酮，赋予南酸枣汁青草、柑橘和玫瑰等花果香气。对发酵过程中的南酸枣汁进行 OPLS-DA 分析及 VIP 值的计算，发现 *L. fermentum* 菌株发酵的南酸枣汁样品具有显著性差异，筛选出了 6 种差异物质，分别是乙酸、棕榈酸甲酯、2,5-二甲酰

基呋喃、反式肉桂醛、苯甲醛甲酯和苯甲酸乙酯，这些香气化合物被认为是 *L. fermentum* 菌株发酵南酸枣汁的差异挥发性香气成分。本研究明晰了乳酸菌发酵前后南酸枣汁中的有机酸香气化合物变化情况，为发酵南酸枣汁产品开发提供了基础数据，后续可进一步研究南酸枣汁中微生物关键酶系对有机酸代谢的影响，以便更好地解析南酸枣汁中有机酸的代谢机理。

参考文献

[1] MANN S, CHAKRABORTY D, BISWAS S. An alternative perspective of an underutilized fruit tree *Choerospondias axillaries* in health promotion and disease prevention: a review [J]. Food Bioscience, 2022, 47: 101609.

[2] MANN S, SARKAR A, SHARMA A, et al. Antitumor activity of *Choerospondias axillaris* fruit extract by regulating the expression of SNCAIP and SNCA on MDA-MB-231 cells [J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2022, 23(5): 1577-1586.

[3] 李傲,戴涛涛,程超,等.南酸枣及其枣糕有机酸组成与分析[J].食品与机械,2015,31(6):17-20.

[4] 王龙瑞,周连玉,孙文娟,等.果酒有机酸变化及复合降酸技术的研究进展[J].酿酒科技,2024,1:90-94,101.

[5] JIANG Y, LUO T, TANG Y, et al. Isolation of a novel characterized *Issatchenkia terricola* from red raspberry fruits on the degradation of citric acid and enrichment of flavonoid and volatile profiles in fermented red raspberry juice [J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(4): 1018-1027.

[6] GARDONI E, BENITO S, SCANSANI S, et al. Biological deacidification strategies for white wines [J]. South African Journal of Enology and Viticulture, 2021, 42(2): 114-122.

[7] MARKKINEN N, LAAKSONEN O, YANG B. Impact of malolactic fermentation with *Lactobacillus plantarum* on volatile compounds of sea buckthorn juice [J]. European Food Research and Technology, 2021, 247(3): 719-736.

[8] 王媛.冻融联合乳酸发酵制备山楂发酵汁工艺研究及品质分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.

[9] 王金玲,晏雨辰,李巧月,等.生物降解柠檬酸及其影响因素的研究进展[J].现代食品科技,2022,38(2):347-357.

[10] YUASA M, SHIMADA A, MATSUZAKI A, et al. Chemical composition and sensory properties of fermented citrus juice using probiotic lactic acid bacteria [J]. Food Bioscience, 2021, 39: 100810.

[11] WOJDYO A, SAMOTICHA J, CHMIELEWSKA J. The influence of different strains of *Oenococcus oeni* malolactic bacteria on profile of organic acids and phenolic compounds of red wine cultivars Rondo and Regent growing in a cold region [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 1070-1081.

[12] MORTERA P, PUDLIK A, MAGNI C, et al. Ca²⁺-citrate uptake and metabolism in *Lactobacillus casei* ATCC 334 [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2013, 79(15): 4603-4612.

[13] LIU B, YUAN D X, LI Q Y, et al. Changes in organic acids, phenolic compounds, and antioxidant activities of lemon juice fermented by *Lssatchenkia terricola* [J]. Molecules, 2021, 26(21): 6712.

[14] 宁志雪,朱立斌,朱丹,等.复合乳酸菌发酵沙棘汁降酸的工艺优

- 化及特性分析[J].食品工业科技,2023,44(18):235-243.
- [15] 陈彦辉,董建方,朱银龙,等.乳酸菌发酵改良枸杞酒风味工艺研究[J].酿酒科技,2021,11:45-52.
- [16] 张杰.蓝莓酒主发酵工艺优化及酶促增香、树脂降酸工艺研究[D].雅安:四川农业大学,2022.
- [17] 王晓婷,康明丽,宋丽君,等.大孔吸附树脂法纯化黑玉米花青素工艺[J].食品工业,2022,43(5):19-24.
- [18] 何丹,马欣娟,康强,等.有机酸含量对葡萄酒发酵的影响[J].中国酿造,2022,41(10):62-67.
- [19] 王炳文,杨延花,焦斐,等.发酵对啤特果汁挥发性风味物质的影响[J].现代食品,2022,28(15):183-188,193.
- [20] 杨羽婧,俞乐,金俊,等.6种食品专用油脂的风味特征研究[J].中国油脂,2023,48(12):45-50.
- [21] 范海默特 荷.化合物嗅觉阈值汇编[M].第二版.北京:科学出版社,2018.
- [22] 中华人民共和国国家卫生健康委员会;国家市场监督管理总局.GB 12456-2021,食品安全国家标准 食品中总酸的测定[S].北京:中国标准出版社,2021.
- [23] 中华人民共和国国家卫生健康委员会,国家市场监督管理总局.GB 7101-2022,食品安全国家标准 饮料[S].北京:中国标准出版社,2022.
- [24] OUATTARA H D, OUATTARA H G, DROUX M, et al. Lactic acid bacteria involved in cocoa beans fermentation from Ivory Coast: Species diversity and citrate lyase production [J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 256: 11-19.
- [25] 王媛,韩艳秋,吕连营,等.降解山楂汁中柠檬酸乳酸菌的筛选及工艺优化[J].辽宁农业科学,2023,4:17-24.
- [26] AITOR B, ALBERT B, CRISTINA R, et al. Non-saccharomyces in wine: effect upon *Oenococcus oeni* and malolactic Fermentation [J]. Front in Microbiology, 2018, 9: 534.
- [27] BALMASEDA A, ROZES N, BORDONS A, et al. Modulation of a defined community of *Oenococcus oeni* strains by *Torulaspora delbrueckii* and its impact on malolactic fermentation [J]. Australian Journal of Grape and Wine Research, 2022, 28(3): 374-382.
- [28] QUE Z L, JIN Y, HUANG J, et al. Flavor compounds of traditional fermented bean condiments: classes, synthesis, and factors involved in flavor formation [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 133: 160-175.
- [29] XU Y, ZHAO J, LIU X, et al. Flavor mystery of Chinese traditional fermented Baijiu: the great contribution of ester compounds [J]. Food Chemistry, 2021, 7: 130920.
- [30] 李薇.传统发酵永川豆豉和速成豆豉增香发酵关键香气物质基础比较研究[D].重庆:西南大学,2022.
- [31] 刘仪璇,李晓雷,胡航伟,等.不同乳酸菌发酵对红枣山茱萸复合酵素香气成分的影响[J].食品安全质量检测学报,2024,15(19): 235-243.
- [32] 陈劫.复合香型青脆李果酒增香工艺及陈酿期品质稳定性研究[D].雅安:四川农业大学,2023.
- [33] LIANG J R, DENG H, HU C Y, et al. Vitality, fermentation, aroma profile, and digestive tolerance of the newly selected *Lactiplantibacillus plantarum* and *Lacticaseibacillus paracasei* in fermented apple juice [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1045347.
- [34] QI J, HUANG H, WANG J, et al. Insights into the improvement of bioactive phytochemicals, antioxidant activities and flavor profiles in Chinese wolf berry juice by select lactic acid bacteria [J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101264.
- [35] SU D, HE J, ZHOU Y, et al. Aroma effects of key volatile compounds in Keemun black tea at different grades: HS-SPME-GC-MS, sensory evaluation, and chemometrics [J]. Food Chemistry, 2022, 373(PB): 131587.
- [36] LIU W, CHEN Y, LIAO R, et al. Authentication of the geographical origin of Guizhou green tea using stable isotope and mineral element signatures combined with chemometric analysis [J]. Food Control, 2021, 125: 107954.