

药食同源传统彝族发酵酒发酵过程中风味物质分析

范勇^{1,2}, 杨轶靖², 高瑞廷¹, 陈文浩^{1*}, 李杨^{3*}, 梁寒峭², 李守黔⁴

(1. 宜宾学院固态发酵资源利用四川省重点实验室, 四川宜宾 644000)

(2. 北京城市学院生物医药学部, 北京 100094) (3. 解放军总医院第八医学中心, 北京 100700)

(4. 贵州省金黔果生物科技有限责任公司, 贵州毕节 551700)

摘要: 该研究解析了药食同源传统彝族发酵酒在发酵过程中挥发性成分的变化及其对药效的潜在影响。采用 GC-MS 对发酵酒不同阶段发酵样本进行检测分析其化学成分。通过对发酵过程风味物质的种类和相对含量数据分析, 寻找主要影响风味的主要物质。该研究共检测到 58 个挥发性物质及 17 种氨基酸风味物质。其中挥发性成分共分为 6 大类, 包括 35 种酸类、13 种醇类、3 种酯类、2 种酚类、2 种醛类和 3 种酮类。在发酵过程中, 酸类物质有下降趋势, 从第一个月的 338.03‰ 降到第十个月的 238.21‰, 其他类物质均有先下降后上升的趋势。醇类和酸类物质在第 3 个月最多, 分别达到 113.10‰ 和 232.86‰; 发酵过程中柠檬酸、苹果酸相对含量最高, 是最主要的酸类风味物质, 对彝族发酵酒的风味影响最大。该研究阐明了发酵酒在发酵过程中风味物质及挥发性成分的变化规律, 也为后期发酵工艺的优化与稳定提供了物质依据。

关键词: 药食同源; 气相色谱-质谱法 (GC-MS); 风味成分; 发酵

文章编号: 1673-9078(2025)06-254-262

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0543

Analysis of the Flavor Substances in the Fermentation Process of Traditional Medicine-food Homologous Yi Fermented Liquor

FAN Yong^{1,2}, YANG Yijing², GAO Ruiting¹, CHEN Wenhao^{1*}, LI Yang^{3*}, LIANG Hanqiao², LI Shouqian⁴

(1. Solid-State Fermentation Resource Utilization Key Laboratory of Sichuan Province, Yibin University, Yibin 644000, China) (2. Department of Biomedicine, Beijing City University, Beijing 100094, China)

(3. The Eight Medical Center of PLA General Hospital, Beijing 100700, China)

(4. Guizhou Jinqianguo Biotechnology Co. Ltd., Bijie 551700, China)

Abstract: In this study, the changes of volatile components in the fermentation process of traditional medicine-food homologous Yi fermented liquor and their potential effect on the liquor's medicinal efficacy were analyzed. GC-MS was used to detect and analyze the chemical composition of fermentation samples at different liquor fermentation stages. The main

引文格式:

范勇, 杨轶靖, 高瑞廷, 等. 药食同源传统彝族发酵酒发酵过程中风味物质分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(6): 254-262.

FAN Yong, YANG Yijing, GAO Ruiting, et al. Analysis of the flavor substances in the fermentation process of traditional medicine-food homologous Yi fermented liquor [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 254-262.

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑 [2021] 一般 117); 贵州省科技计划项目 (黔科合成果 [2022] 一般 014); 固态发酵资源利用四川省重点实验室 2022 年度开放基金 (2022GTY04); 大学生创新创业训练计划 (2023 年国家级) (202311418023); 2025 年贵州省科技成果转化及产业化计划项目 (黔科合成果 [2025] 一般 038)

作者简介: 范勇 (1995-), 男, 硕士, 研究方向: 发酵中药成分研究, E-mail: 793763561@qq.com

通讯作者: 陈文浩 (1985-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 生物工程研究, E-mail: 84460462@qq.com; 共同通讯作者: 李杨 (1981-), 女, 硕士, 主治医师, 研究方向: 医疗质量与安全风险研究, E-mail: 13718850256@139.com

substances influencing flavor were found through the analysis of the types and relative content of flavor compounds in the fermentation process. A total of 58 volatile compounds and 17 amino acid flavor compounds were detected in this research. Among them, the volatile components were divided into 6 categories, including 35 acids, 13 alcohols, 3 esters, 2 phenols, 2 aldehydes and 3 ketones. During the fermentation process, the acids showed a downward trend, from 338.03‰ in the first month to 238.21‰ in the tenth month, whilst other substances showed a downward trend then an upward trend. Alcohols and acids were the most abundant in the third month, reaching 113.10‰ and 232.86‰, respectively. During the fermentation process, citric acid and malic acid had the highest relative contents, which were the most important acid flavor substances and had the greatest impact on the flavor of Yi fermented liquor. This study clarified the changes of flavor compounds and volatile components in fermented liquor during the fermentation process, and also provides a material basis for the optimization and stabilization of the fermentation process in the later stage.

Key words: medicinal and edible homologous; gas chromatography-mass spectrometry (gc-ms); flavor components; fermentation

彝族药酒作为一种传统的民族特色酒品，在彝族文化中扮演着至关重要的角色。解本 303 是以传统中医药理论为指导，以多用药食同源原料刺梨、余甘子、椰子、柠檬、核桃、和蜂蜜为主要成分，原料经过粉碎或切片后，加入蜂蜜混合均匀，经微生物于古坛低温 20℃ 固态发酵 300 d 以上，最终制成药食两用的发酵液，其具有改善机体循环，提高身体机能，延缓衰老的作用^[2]。

传统彝族发酵酒通过将多种多用药食同源材料与微生物结合起来进行共同发酵，获得丰富多样化的营养成分，其中有效成分能够抗击癌症、抗氧化、抑制肠道有害菌群以及增强人体免疫力，具备一定的保健作用及疾病防治的作用^[1]。该研究的发酵酒与复合型发酵果酒制作工艺相似，有研究发现，通常不同原料复合发酵果酒的香气成分比单一果酒的香气成分更为丰富，形成了复合发酵果酒独特的风味^[2]。如唐三江等^[3]对苹果海棠复合发酵果酒进行了香气成分的测定，发现了 51 种不同的香气成分。与常规苹果酒相比，这种复合发酵果酒中的酯类和醛酮类化合物的种类和数量有了显著增加，从而使得香气更加丰富多彩。目前大多通过 GS-MS 技术检测食品中的挥发性成分来对其风味的产生加以说明^[4]，如陈林伟等^[5]基于 GC-MS 分析了气血双补酒中的挥发性化学成分明确了其风味物质成分，田红等^[6]对自制药酒的功效及其挥发性成分进行了分析，确定了功效成分主要为黄酮类，主要挥发性成分为酯类。

目前药食同源发酵酒类研究多为原料与产品间的对比，但对其过程的变化研究较少，该研究将按照传统方法制作药酒并对样品进行培养与收集，利用气相色谱质谱联用技术 (GC-MS) 分析药酒样

品，分析各类风味物质，确定关键的挥发性物质成分。此外，通过使用 SPSS 软件进行热点分析，将确定药酒发酵过程中的标志性风味物质，以及稳定时期，为今后提升药酒风味品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

甲醇（色谱纯），上海安谱实验科技股份有限公司；氯仿（色谱级），瑞士阿达玛斯试剂；吡啶（色谱级），瑞士阿达玛斯试剂；L-2- 氯苯丙氨酸（色谱级），上海恒柏生物科技；纯水，屈臣氏；BSTFA（with 1% TMCS，V/V），上海安谱实验科技股份有限公司；饱和脂肪酸甲酯，德国 Dr.Ehrenstorfer 公司；甲氧胺盐（分析纯），梯希爱（上海）化成工业发展有限公司。

1.2 仪器与设备

7890 A 气相色谱仪，美国安捷伦公司；PEGASUS HT 质谱仪，美国力可公司；DB-5 MS 色谱柱，美国安捷伦公司；Heraeus Fresco 17 离心机，美国赛默飞世尔科技公司；Forma 900 series 超低温冰箱，美国赛默飞世尔科技公司；YM-080 S 超声仪，深圳市方奥微电子有限公司；DHG-9023 A 烘箱，上海一恒科学仪器有限公司；LNG-T 98 真空干燥仪，太仓市华美生化仪器厂。

1.3 实验方法

1.3.1 样品采集与提取

解本 303 号（贵州省金黔果生物科技有限责任公司

公司) 定点取自 5 个自然发酵的发酵缸中, 分别于发酵第 1、2、3、4、6、8、10 个月末取样后封装于无菌瓶中至于冰盒, -80 ℃ 保存。

取样本 200 μL 于 2 mL EP 管中, 加入 500 μL 预冷提取 (甲醇, 含内标 L-2- 氯苯丙氨酸), 涡旋 30 s; 冰水浴超声 10 min; 将样本 4 ℃ 离心, 12 000 r/min (离心力 13 800 $\times g$, 半径 8.6 cm) 离心 15 min; 小心移取 20 μL 上清液于 1.5 mL EP 管中, 每个样本各取 40 μL 混合成 QC 样本; 在真空浓缩器中干燥提取物; 向干燥后的代谢物加入 100 μL 甲氧胺盐试剂 (甲氧胺盐酸盐, 溶于吡啶 20 mg/mL), 轻轻混匀后, 放入烘箱中 80 ℃ 孵育 30 min; 向每个样品中加入 100 μL BSTFA (含有 1% TMCS, V/V), 将混合物 70 ℃ 孵育 1.5 h; 冷却至室温, 向混合的样本中加入 5 μL FAMES (溶于氯仿); 随机顺序上机检测, 通过峰面积计算出物质的相对含量。

1.3.2 色谱条件

GC 条件: 色谱柱: Agilent DB-5MS 毛细柱 (30 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μm); 柱箱升温程序: 50 ℃ 保持 1 min, 以 10 ℃ /min 升至 310 ℃, 保持 8 min; 载气 (He) 流速 1 mL/min, 压力 2.4 kPa, 进样量 1 μL ; 分流比 10:1。

MS 条件: 离子化方式: 电子轰击电 EI; 电离电压 -70 eV; 传输线温度 280 ℃; 离子源温度 250 ℃; 质量扫描范围 m/z 50~500; 扫描速率 12.5 spectra/s。

1.3.3 数据处理

使用 ChromaTOF 软件 (V4.3x, LECO) 对

质谱数据进行分析。对物质定性工作中, 使用了 LECO-Fiehn Rtx5 数据库, 包括质谱匹配及保留时间指数匹配。使用 Excel 2010 软件进行数据记录与汇总。使用 SPSS 27 软件进行数据分析, 数据以平均值 $\pm$ 标准误差表示。

2 结果与分析

2.1 不同发酵阶段样品的风味物质分析

样品共检测出 58 种挥发性物质及 17 种氨基酸风味物质。其中挥发性成分共分为 6 大类, 包括 35 种酸、13 种醇类、3 种酯类、2 酚类、2 醛类和 3 种酮类。

随着发酵时间的增加, 氨基酸含量呈现逐渐增加的趋势, 从发酵 1 月的 10.92% 增加到发酵 10 月的 16.00%。这表明发酵时间的延长可能有助于氨基酸的生成或积累。酸类的含量在不同月份间波动较小, 整体上呈现出相对稳定的趋势, 从发酵 1 月的 338.03% 略有下降至发酵 10 月的 238.21% (见表 1)。酯类、酚类、醛类化合物的含量在不同发酵阶段也出现一定的波动, 但没有明显的趋势。其中酯类和酚类在不同发酵阶段波动较大, 而醛类的变化相对较小。醇类、酮类化合物的含量在不同发酵阶段波动较小, 整体上没有明显的趋势。醇能够增强酒的柔和清甜感, 醛能够丰富酒的香气, 酸能够增强酒的清新爽口感, 而适量的酯能够增强品酒时的愉悦体验^[7], 因此这些物质的含量变化对发酵酒的风味有着重要影响。

表 1 不同发酵阶段发酵酒中各类成分含量变化							
Table 1 Changes of the contents of various components in fermented wine at different fermentation stages ($\bar{x}\pm\text{SD}$, %)							
类别	发酵 1 月	发酵 2 月	发酵 3 月	发酵 4 月	发酵 6 月	发酵 8 月	发酵 10 月
氨基酸	10.92 $\pm$ 0.69 ^a	10.95 $\pm$ 0.75 ^a	11.93 $\pm$ 1.64 ^a	13.93 $\pm$ 4.04 ^b	12.48 $\pm$ 3.07 ^{ab}	13.85 $\pm$ 4.91 ^b	16.00 $\pm$ 3.18 ^c
酸类	338.03 $\pm$ 26.91 ^b	221.18 $\pm$ 22.47 ^a	232.86 $\pm$ 32.94 ^a	235.25 $\pm$ 56.16 ^a	236.96 $\pm$ 58.49 ^a	245.39 $\pm$ 75.25 ^a	238.21 $\pm$ 43.64 ^a
醇类	132.30 $\pm$ 16.13	127.40 $\pm$ 8.06	113.10 $\pm$ 54.65	147.46 $\pm$ 44.43	147.33 $\pm$ 36.42	152.5 $\pm$ 42.93	155.57 $\pm$ 40.54
酯类	1.18 $\pm$ 0.60 ^b	0.99 $\pm$ 0.20 ^a	1.00 $\pm$ 0.46 ^{ab}	0.86 $\pm$ 0.24 ^a	0.80 $\pm$ 0.19 ^a	0.79 $\pm$ 0.29 ^a	1.44 $\pm$ 0.32 ^c
酚类	0.52 $\pm$ 0.10 ^b	0.39 $\pm$ 0.02 ^a	0.35 $\pm$ 0.09 ^a	0.51 $\pm$ 0.13 ^b	0.49 $\pm$ 0.10 ^b	0.49 $\pm$ 0.12 ^b	0.48 $\pm$ 0.04 ^b
醛类	0.40 $\pm$ 0.10 ^b	0.31 $\pm$ 0.02 ^a	0.30 $\pm$ 0.03 ^a	0.43 $\pm$ 0.09 ^b	0.42 $\pm$ 0.06 ^b	0.37 $\pm$ 0.08 ^{ab}	0.45 $\pm$ 0.13 ^b
酮类	0.77 $\pm$ 0.13	0.70 $\pm$ 0.04	0.75 $\pm$ 0.15	0.89 $\pm$ 0.23	0.89 $\pm$ 0.27	0.92 $\pm$ 0.33	0.85 $\pm$ 0.22

注: 同一行肩标小写字母不同表示差异性显著 ($P<0.05$)。下表同。

2.2 发酵过程中酸类物质分析

酸类物质是构成发酵酒香气特征的重要因素，其检测出含量最大的柠檬酸（见表 2），发酵第 1 个月其相对含量为 149.15‰，发酵至第 10 个月时含量降 57‰。柠檬酸可以与其他成分相互作用，使得酒品的风味更加丰富多样，呈现出复杂而平衡的口感特点。L-苹果酸在不同发酵阶段其相对含量均在 117.08‰ 以上，其具有强烈的酸味，带有刺激性的

爽口感和轻微的苦涩味。乳酸在整个发酵期间呈上升趋势，在第 8 个月含量达到峰值后略下降，同时可能由一部分糖发酵不完全从而转化为乳酸，使得乳酸含量相对增加^[8]。乳酸的积累可能与特定微生物群落的代谢活性增强有关，如乳酸菌通过糖酵解途径将糖类发酵成乳酸。这些乳酸菌能够在缺氧环境下将葡萄糖和其他可发酵性糖转化为乳酸和其他副产物。乳酸菌的活跃可能在此过程中发挥重要作用。

表 2 不同发酵阶段发酵酒中酸类成分的变化情况

Table 2 Changes of acid components in fermented wine at different fermentation stages (x±SD, ‰)							
名称	第 1 个月	第 2 个月	第 3 个月	第 4 个月	第 6 个月	第 8 个月	第 10 个月
<i>d</i> -半乳糖醛酸	1.06 ± 0.13 ^a	1.47 ± 0.26 ^{ab}	1.66 ± 0.59 ^{bc}	1.85 ± 0.19 ^{bc}	1.80 ± 0.49 ^{bc}	2.06 ± 0.39 ^c	2.11 ± 0.27 ^c
羟基异丙基丁二酸	1.32 ± 0.35	1.24 ± 0.23	1.18 ± 0.52	1.39 ± 0.51	1.26 ± 0.20	1.43 ± 0.58	1.57 ± 0.39
2-酮丁酸	0.26 ± 0.06 ^{ac}	0.20 ± 0.02 ^{ab}	0.19 ± 0.08 ^a	0.28 ± 0.05 ^c	0.25 ± 0.07 ^a	0.22 ± 0.05 ^a	0.31 ± 0.03 ^c
2-酮异戊酸	0.54 ± 0.12 ^{ac}	0.40 ± 0.03 ^{ab}	0.31 ± 0.16 ^b	0.54 ± 0.14 ^{ac}	0.49 ± 0.09 ^{ac}	0.55 ± 0.13 ^a	0.55 ± 0.07 ^c
2-酮戊酸	1.01 ± 0.13 ^{ac}	0.75 ± 0.08 ^{ab}	0.61 ± 0.33 ^b	1.13 ± 0.24 ^{cd}	1.03 ± 0.22 ^{ad}	0.92 ± 0.28 ^{ad}	0.81 ± 0.16 ^{ab}
3,4-羟基苯甲酸	0.00 ± 0.00 ^a	0.06 ± 0.01 ^b	0.05 ± 0.06 ^b	0.05 ± 0.03 ^b	0.06 ± 0.01 ^b	0.05 ± 0.01 ^b	0.07 ± 0.02 ^b
3-氨基异丁酸	0.63 ± 0.11 ^{ab}	0.55 ± 0.05 ^{ab}	0.47 ± 0.10 ^b	0.62 ± 0.09 ^{ab}	0.68 ± 0.26 ^a	0.62 ± 0.14 ^{ab}	0.66 ± 0.11 ^a
3-羟基丙酸	0.19 ± 0.03 ^a	0.24 ± 0.02 ^{ab}	0.26 ± 0.02 ^{ab}	0.36 ± 0.10 ^{bc}	0.32 ± 0.06 ^b	0.29 ± 0.03 ^b	0.41 ± 0.09 ^c
4-乙酰氨基丁酸	0.18 ± 0.02	0.21 ± 0.04	0.18 ± 0.04	0.20 ± 0.01	0.21 ± 0.04	0.20 ± 0.04	0.17 ± 0.08
4-氨基丁酸	0.63 ± 0.06 ^a	0.44 ± 0.06 ^b	0.43 ± 0.07 ^b	0.41 ± 0.09 ^b	0.42 ± 0.13 ^b	0.45 ± 0.17 ^b	0.40 ± 0.10 ^b
4-羟基苯甲酸	0.06 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02
乌头酸	0.74 ± 0.22 ^a	1.38 ± 0.16 ^b	1.55 ± 0.52 ^b	1.73 ± 0.16 ^b	1.74 ± 0.50 ^b	1.47 ± 0.15 ^b	1.36 ± 0.24 ^b
苯甲酸	0.04 ± 0.01 ^a	0.03 ± 0.02 ^{abc}	0.02 ± 0.02 ^{abc}	0.01 ± 0.02 ^c	0.03 ± 0.01 ^{abc}	0.01 ± 0.01 ^c	0.02 ± 0.02 ^{abc}
辛酸	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.00	0.01 ± 0.01	0.02 ± 0.00	0.02 ± 0.00
氨基乙基膦酸	0.15 ± 0.03	0.13 ± 0.01	0.15 ± 0.02	0.15 ± 0.04	0.15 ± 0.05	0.13 ± 0.09	0.16 ± 0.04
柠苣酸	0.02 ± 0.02 ^{ab}	0.03 ± 0.00 ^{ab}	0.03 ± 0.01 ^{ab}	0.03 ± 0.01 ^{ab}	0.03 ± 0.03 ^{ab}	0.01 ± 0.02 ^a	0.03 ± 0.00 ^b
柠檬酸	149.15 ± 20.87 ^a	58.79 ± 7.58 ^c	62.59 ± 13.29 ^{bc}	55.04 ± 5.83 ^{bc}	58.80 ± 3.55 ^{bc}	57.76 ± 10.80 ^{bc}	57.31 ± 2.99 ^{bc}
<i>d</i> -甘油酸	1.10 ± 0.15 ^a	1.07 ± 0.06 ^a	1.01 ± 0.50 ^a	1.40 ± 0.42 ^{ab}	1.25 ± 0.31 ^a	1.34 ± 0.42 ^{ab}	1.70 ± 0.25 ^b
富马酸	0.15 ± 0.01	0.15 ± 0.02	0.18 ± 0.02	0.18 ± 0.06	0.19 ± 0.05	0.19 ± 0.06	0.14 ± 0.01
新构造酸	0.06 ± 0.01 ^a	0.08 ± 0.02 ^{abc}	0.10 ± 0.01 ^{bc}	0.08 ± 0.03 ^{ac}	0.08 ± 0.01 ^{abc}	0.11 ± 0.00 ^b	0.08 ± 0.03 ^{ac}
没食子酸	0.64 ± 0.07 ^a	1.06 ± 0.15 ^b	1.40 ± 0.29 ^c	1.14 ± 0.13 ^{bc}	1.16 ± 0.32 ^{bc}	1.28 ± 0.18 ^{bc}	1.17 ± 0.09 ^{bc}
葡萄糖庚酸	0.04 ± 0.00 ^a	0.07 ± 0.01 ^b	0.09 ± 0.02 ^b	0.08 ± 0.01 ^b	0.08 ± 0.02 ^b	0.08 ± 0.01 ^b	0.07 ± 0.01 ^b
葡萄糖酸	0.62 ± 0.17 ^{ac}	1.13 ± 0.29 ^{bd}	1.17 ± 0.16 ^{bd}	0.87 ± 0.14 ^{abc}	0.95 ± 0.20 ^{bc}	1.38 ± 0.17 ^d	0.83 ± 0.09 ^{cc}
氨基葡萄糖酸	0.62 ± 0.05 ^a	0.33 ± 0.04 ^b	0.36 ± 0.08 ^b	0.36 ± 0.12 ^b	0.37 ± 0.11 ^b	0.39 ± 0.12 ^b	0.32 ± 0.03 ^b
乙醇酸	0.98 ± 0.13 ^{ad}	1.03 ± 0.07 ^{acd}	0.83 ± 0.33 ^a	1.34 ± 0.36 ^{cbd}	1.12 ± 0.21 ^{acc}	1.25 ± 0.38 ^{dc}	1.59 ± 0.13 ^b
胍琥珀酸	0.01 ± 0.01 ^a	0.05 ± 0.01 ^b	0.06 ± 0.01 ^b	0.06 ± 0.02 ^b	0.06 ± 0.02 ^b	0.06 ± 0.01 ^b	0.07 ± 0.01 ^b
衣康酸	0.10 ± 0.02 ^a	0.08 ± 0.02 ^{ab}	0.09 ± 0.02 ^{ab}	0.07 ± 0.01 ^b	0.09 ± 0.02 ^{ab}	0.08 ± 0.01 ^{ab}	0.07 ± 0.01 ^{ab}
乳酸	5.07 ± 1.99	5.23 ± 1.58	4.97 ± 1.33	6.15 ± 1.55	5.68 ± 1.58	6.22 ± 1.83	6.02 ± 1.44
草酸	0.14 ± 0.09 ^a	0.15 ± 0.02 ^{ab}	0.15 ± 0.03 ^{ab}	0.16 ± 0.05 ^{ab}	0.17 ± 0.04 ^{ab}	0.21 ± 0.05 ^b	0.16 ± 0.02 ^a
棕榈酸	2.94 ± 0.72 ^{ab}	2.50 ± 0.22 ^a	2.32 ± 1.03 ^a	3.55 ± 0.96 ^b	3.58 ± 0.46 ^b	3.26 ± 1.04 ^{ab}	3.18 ± 0.09 ^{ab}
壬酸	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.03 ± 0.00	0.04 ± 0.01	0.03 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01

续表 2							
名称	第 1 个月	第 2 个月	第 3 个月	第 4 个月	第 6 个月	第 8 个月	第 10 个月
邻苯二甲酸	1.16 ± 0.15 ^a	0.81 ± 0.03 ^b	0.70 ± 0.43 ^b	1.01 ± 0.26 ^{ab}	1.00 ± 0.09 ^{ab}	0.93 ± 0.33 ^{ab}	0.79 ± 0.22 ^b
丙酮酸	0.19 ± 0.01 ^a	0.22 ± 0.02 ^a	0.22 ± 0.03 ^a	0.24 ± 0.06 ^{ab}	0.25 ± 0.08 ^{ab}	0.24 ± 0.09 ^{ab}	0.31 ± 0.05 ^b
糖酸	0.12 ± 0.01	0.12 ± 0.03	0.15 ± 0.02	0.14 ± 0.04	0.14 ± 0.04	0.16 ± 0.05	0.14 ± 0.05
水杨酸	0.23 ± 0.04 ^a	0.35 ± 0.05 ^{bd}	0.34 ± 0.09 ^b	0.48 ± 0.07 ^c	0.44 ± 0.09 ^{cd}	0.41 ± 0.10 ^{bc}	0.49 ± 0.02 ^c
莽草酸	0.15 ± 0.03 ^a	0.21 ± 0.06 ^{ab}	0.18 ± 0.11 ^{ab}	0.18 ± 0.06 ^{ab}	0.17 ± 0.06 ^{ab}	0.23 ± 0.03 ^b	0.24 ± 0.05 ^b
硬脂酸	0.89 ± 0.25 ^{ab}	0.72 ± 0.06 ^{ab}	0.65 ± 0.39 ^a	0.97 ± 0.26 ^b	1.00 ± 0.13 ^b	0.92 ± 0.26 ^{ab}	0.88 ± 0.04 ^{ab}
琥珀酸	11.77 ± 1.64	11.58 ± 1.16	11.32 ± 6.45	13.00 ± 4.06	13.68 ± 3.89	13.92 ± 4.12	12.91 ± 1.41
硫酸	0.47 ± 0.06 ^{ab}	0.45 ± 0.04 ^{ab}	0.39 ± 0.20 ^a	0.60 ± 0.18 ^b	0.56 ± 0.14 ^{ab}	0.55 ± 0.18 ^{ab}	0.59 ± 0.13 ^b
酒石酸	0.06 ± 0.01 ^{abc}	0.05 ± 0.03 ^{ac}	0.07 ± 0.01 ^c	0.05 ± 0.02 ^{ab}	0.07 ± 0.01 ^{abc}	0.06 ± 0.01 ^{abc}	0.07 ± 0.02 ^{abc}
苏糖酸	1.30 ± 0.34 ^a	1.26 ± 0.24 ^a	1.49 ± 0.30 ^a	1.62 ± 0.42 ^a	1.42 ± 0.41 ^a	1.58 ± 0.61 ^a	2.29 ± 0.51 ^b
L-苹果酸	138.15 ± 19.20	126.23 ± 12.65	134.83 ± 18.80	133.88 ± 30.49	117.08 ± 7.31	141.48 ± 47.90	133.27 ± 23.83

表 3 不同发酵阶段发酵酒中醇类成分的变化情况							
Table 3 Changes of alcohol components in fermented wine at different fermentation stages (x±SD, %)							
名称	第 1 个月	第 2 个月	第 3 个月	第 4 个月	第 6 个月	第 8 个月	第 10 个月
乙醇胺	0.55 ± 0.04 ^a	0.43 ± 0.04 ^{ab}	0.42 ± 0.09 ^b	0.49 ± 0.15 ^{ab}	0.49 ± 0.10 ^{ab}	0.50 ± 0.13 ^{ab}	0.48 ± 0.08 ^{ab}
2-丁炔-1,4-二醇	0.05 ± 0.01	0.06 ± 0.02	0.07 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.06 ± 0.02	0.07 ± 0.02	0.08 ± 0.02
4-羟基苯乙醇	0.15 ± 0.03	0.15 ± 0.04	0.16 ± 0.03	0.15 ± 0.05	0.15 ± 0.04	0.15 ± 0.07	0.14 ± 0.02
环氧导电醇 b	2.34 ± 0.28 ^{ab}	2.21 ± 0.39 ^b	2.60 ± 0.25 ^a	2.23 ± 0.22 ^{ab}	2.25 ± 0.19 ^{ab}	2.40 ± 0.23 ^{ab}	2.31 ± 0.17 ^{ab}
D-红-鞘氨醇	0.09 ± 0.02	0.10 ± 0.02	0.11 ± 0.04	0.11 ± 0.03	0.13 ± 0.03	0.10 ± 0.03	0.13 ± 0.03
二甘油	0.27 ± 0.05 ^c	0.32 ± 0.08 ^{bc}	0.42 ± 0.08 ^{ab}	0.32 ± 0.11 ^{bc}	0.34 ± 0.11 ^{abc}	0.37 ± 0.13 ^{abc}	0.48 ± 0.10 ^a
DL-二氢鞘氨醇	0.05 ± 0.00	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.00	0.05 ± 0.02
雌三醇	0.11 ± 0.03 ^b	0.17 ± 0.03 ^a	0.21 ± 0.03 ^a	0.21 ± 0.05 ^a	0.22 ± 0.06 ^a	0.21 ± 0.05 ^a	0.17 ± 0.02 ^a
半乳糖醇	0.32 ± 0.09 ^b	0.48 ± 0.08 ^a	0.41 ± 0.16 ^{ab}	0.52 ± 0.03 ^a	0.48 ± 0.07 ^a	0.56 ± 0.14 ^a	0.46 ± 0.09 ^{ab}
甘油	128.10 ± 1.77 ^a	126.09 ± 6.42 ^a	126.65 ± 1.92 ^a	124.07 ± 2.84 ^a	127.80 ± 8.63 ^a	129.63 ± 9.19 ^a	133.61 ± 7.66 ^a
山梨醇	0.11 ± 0.03 ^b	0.12 ± 0.03 ^{ab}	0.14 ± 0.01 ^{ab}	0.14 ± 0.04 ^{ab}	0.14 ± 0.04 ^{ab}	0.14 ± 0.03 ^{ab}	0.15 ± 0.04 ^a
苏糖醇	0.08 ± 0.03	0.08 ± 0.02	0.07 ± 0.03	0.07 ± 0.01	0.08 ± 0.03	0.08 ± 0.03	0.08 ± 0.02

2.3 发酵酒发酵过程中醇类物质分析

在发酵酒的生产过程中，醇类物质在香气和口感方面扮演着重要角色，赋予酒品甜香和花果香^[9]。根据表 1 所示，醇类物质的整体变化趋势呈现出先下降后上升并最终趋于稳定的曲线。在发酵的第三个月，醇类物质的相对含量降至最低值，仅为 113.10%。这种变化可能是由于在这一阶段，醇类与酸类发生酯化反应而被消耗所致。随着发酵的继续，醇类含量回升至 147.33%，并在第 4 至第 10 个月间维持相对稳定。

由表 3 可见，甘油作为主要的醇类之一，在发酵过程中能够去除酒中醛类物质产生的不良气味，同时增加产品的甜味^[10,11]。其含量在发酵第 10 个

月达到最高值，为 133.61%，显著提升了发酵酒的口感平衡和顺滑度。尽管乙醇胺味苦，但其在护肝和解毒方面表现出显著的保健功效，因此在发酵过程中也需监控其体积分数以优化发酵酒的质量。2-丁炔-1,4-二醇的增加则表明糖类物质正在有效转化为醇类，这些醇类物质随后可能参与更多的化学反应，如与酸反应形成酯类，从而进一步丰富和增强发酵酒的风味^[12]。整体而言，在发酵酒的发酵过程中，醇类物质的稳定性对保持和提升酒体风味至关重要。

2.4 发酵过程中酯类物质分析

酯类物质对挥发性风味具有显著影响，每种酯类物质都具有独特的气味^[13]。实验数据显示（见

表 4)，在发酵的前 1 至 8 个月，酯类物质的含量略有下降，有些酯类物质被消耗。然而，随着时间的推移，到发酵的第 10 个月时，酯类物质的含量显著增加，从 0.8‰ 升至 1.4‰。这可能是由于酒类物质发生酯化反应所致^[14]，导致酯类体积分数大幅上升。4-羟基丁酸酯的相对含量也有所增加，反映出酯化反应随时间的增强。此后，酯类物质的含量趋于稳定。酯类化合物是酒中重要的芳香成分，能够赋予酒类发酵物花果香味^[15]。D-红内酯和葡萄糖内酯的体积分数也呈上升趋势，表明酯类物质在发酵酒的后期阶段可能积累。这主要与酵母菌和其他微生物的代谢活动以及醇类和酸类的含量变化有关^[16]。醇类和酸类是酯化反应的必需底物，发酵后期醇类浓度的增加为酯化反应提供了更多的底物，促进了酯类物质的合成。

2.5 发酵酒发酵过程中酚类物质分析

酚类物质具有浓烈刺激性气味，尽管酚类化合物在发酵酒中的含量不高，它们却具有复杂的结构，并且在增强白酒香气方面起到了显著的作用。这类物质很容易被嗅觉细胞识别，因此，当把几种不同阈值的香味物质混合在一起时，它们会形成一种新的、复杂的香气，这样的混合作用显著提升了白酒的感官体验^[17-21]。

实验分析（见表 5）表明，酚类物质在发酵酒发酵过程中的浓度呈现波动。起始阶段，酚类物质的体积分数有所下降，但从第四个月开始显著上升，达到 0.51‰，到第十个月时稳定在 0.48‰。酚类物质对于酒体风味和保质期有着关键影响。它们在氧化还原反应中促进物质的氧化，生成影响风味的醛类物质。间苯二酚在初期体积分数较高，随后下降，可能转

化为味道更浓的醛类物质，但在发酵中期后其浓度趋于稳定。这些波动表明，在发酵过程中需密切监控酚类物质的变化，它们不仅调节白酒的口感和风味，还具有保鲜作用，有助于延长发酵酒的保质期。

2.6 发酵过程中醛类物质分析

醛能够丰富酒的香气，也是酒中辛辣味的主要来源^[22]。醛类物质的体积分数较前面几种有明显区别（见表 6），在发酵第 4 个月相对含量达到最高为 0.43‰，随后体积分数逐月下降，到发酵第 10 个月时，相对含量为 0.45‰。第 3 个月含量增加可能是由于一些酸类物质可以再酶的催化下转变成醛类物质。但同时这种催化也是可逆的，所以在达到较高后被消耗导致含量有明显下降，但总体发酵过程中，醛类物质体积分数变化较为平稳，在第四个月之后，相对含量基本维持在 0.42‰~0.45‰。

在发酵酒中，主要提取出两种挥发性醛类成分：戊二醛和反式-3,5-二甲氧基-4-羟基肉桂醛。这两种醛类物质在发酵过程中既被消耗又生成。在发酵第 2~3 个月期间，它们的含量明显下降，而在发酵第 4~10 个月期间，含量有所增加。戊二醛在发酵品中较为常见，具有浓烈的腐烂水果气味。在第 1 个月时，其相对含量为 0.38‰，随后快速下降至第 1 个月末的 0.26‰，到发酵第 10 个月时含量回升至 0.37‰。这种变化是氧化应激的结果，也表明醛类物质在发酵中期可能达到峰值。戊二醛在发酵初期含量较高，可能与原料中存在的前体物质有关，随着发酵过程的进行，被微生物代谢掉，导致浓度下降。反式-3,5-二甲氧基-4-羟基肉桂醛的含量相较于戊二醛则少得多，变化也较为平稳，可能与其特定的生物合成路径有关。

表 4 不同发酵阶段发酵酒中酯类成分的变化情况

Table 4 Changes of ester components in fermented wine at different fermentation stages (x±SD, ‰)							
名称	第 1 个月	第 2 个月	第 3 个月	第 4 个月	第 6 个月	第 8 个月	第 10 个月
4-羟基丁酸酯	0.05 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.02	0.05 ± 0.00
D-红内酯	0.86 ± 0.27 ^{ab}	0.86 ± 0.19 ^{ab}	0.64 ± 0.21 ^b	0.75 ± 0.20 ^b	0.68 ± 0.13 ^b	0.71 ± 0.25 ^b	1.16 ± 0.23 ^a
葡萄糖内酯	0.04 ± 0.02 ^d	0.08 ± 0.03 ^{abc}	0.10 ± 0.03 ^a	0.05 ± 0.01 ^{cd}	0.06 ± 0.01 ^{bc}	0.08 ± 0.01 ^{ab}	0.03 ± 0.01 ^d

表 5 不同发酵阶段发酵酒中酚类成分的变化情况

Table 5 Changes of phenolic components in fermented wine at different fermentation stages (x±SD, ‰)							
名称	第 1 个月	第 2 个月	第 3 个月	第 4 个月	第 6 个月	第 8 个月	第 10 个月
对甲酚	0.32 ± 0.09 ^a	0.23 ± 0.02 ^{bc}	0.21 ± 0.04 ^c	0.31 ± 0.07 ^{ab}	0.29 ± 0.06 ^{abc}	0.30 ± 0.06 ^{ab}	0.31 ± 0.05 ^{ab}
间苯二酚	0.19 ± 0.03	0.16 ± 0.01	0.14 ± 0.05	0.20 ± 0.06	0.20 ± 0.05	0.19 ± 0.06	0.17 ± 0.01

表 6 不同发酵阶段发酵酒中醛类成分的变化情况

Table 6 Changes of aldehydes in fermented wine at different fermentation stages (x±SD, %)

名称	第 1 个月	第 2 个月	第 3 个月	第 4 个月	第 6 个月	第 8 个月	第 10 个月
戊二醛	0.38±0.11 ^a	0.26±0.02 ^{bc}	0.22±0.08 ^c	0.35±0.08 ^{ab}	0.36±0.06 ^a	0.31±0.07 ^{ab}	0.37±0.05 ^a
反式 3,5 二甲氧基 4 羟基肉桂醛	0.03±0.01 ^b	0.05±0.01 ^{ab}	0.05±0.02 ^{ab}	0.06±0.02 ^a	0.05±0.01 ^{ab}	0.05±0.02 ^{ab}	0.05±0.02 ^{ab}

表 7 不同发酵阶段发酵酒中酮类成分的变化情况

Table 7 Changes of ketones in fermented wine at different fermentation stages (x±SD, ‰)

名称	第 1 个月	第 2 个月	第 3 个月	第 4 个月	第 6 个月	第 8 个月	第 10 个月
1,2-环己烷二酮	0.40 ± 0.11	0.44 ± 0.04	0.46 ± 0.12	0.47 ± 0.09	0.54 ± 0.23	0.56 ± 0.21	0.40 ± 0.08
1,4-环己烷二酮	0.21 ± 0.04 ^a	0.14 ± 0.01 ^{bc}	0.14 ± 0.01 ^c	0.19 ± 0.05 ^a	0.20 ± 0.05 ^a	0.17 ± 0.05 ^{abc}	0.20 ± 0.02 ^a
丙酮	0.16 ± 0.01 ^{ab}	0.12 ± 0.02 ^b	0.16 ± 0.04 ^{ab}	0.17 ± 0.02 ^{ab}	0.16 ± 0.03 ^{ab}	0.19 ± 0.08 ^a	0.19 ± 0.04 ^a

表 8 不同发酵阶段发酵酒中氨基酸类成分变化情况

Table 8 Changes of amino acid components in fermented wine at different fermentation stages (x±SD, ‰)

名称	第 1 个月	第 2 个月	第 3 个月	第 4 个月	第 6 个月	第 8 个月	第 10 个月
丙氨酸	1.19 ± 0.26 ^a	0.86 ± 0.04 ^b	0.98 ± 0.36 ^{ab}	1.03 ± 0.10 ^{ab}	0.90 ± 0.14 ^{ab}	1.10 ± 0.31 ^{ab}	1.09 ± 0.12 ^{ab}
天冬氨酸	0.85 ± 0.12 ^c	0.92 ± 0.16 ^{bc}	0.92 ± 0.27 ^{bc}	1.33 ± 0.36 ^a	1.08 ± 0.40 ^{abc}	1.06 ± 0.28 ^{abc}	1.29 ± 0.30 ^{ab}
B- 丙氨酸	0.53 ± 0.13 ^a	0.39 ± 0.04 ^{bc}	0.32 ± 0.13 ^c	0.53 ± 0.14 ^a	0.49 ± 0.12 ^{ab}	0.44 ± 0.13 ^{abc}	0.56 ± 0.06 ^a
环亮氨酸	0.16 ± 0.04 ^{ab}	0.12 ± 0.01 ^b	0.12 ± 0.02 ^b	0.16 ± 0.04 ^a	0.15 ± 0.03 ^{ab}	0.15 ± 0.04 ^{ab}	0.17 ± 0.03 ^a
甘氨酸	0.26 ± 0.02	0.24 ± 0.01	0.27 ± 0.04	0.30 ± 0.10	0.30 ± 0.10	0.30 ± 0.09	0.31 ± 0.05
异亮氨酸	0.19 ± 0.01 ^b	0.23 ± 0.02 ^{ab}	0.26 ± 0.02 ^{ab}	0.31 ± 0.11 ^a	0.28 ± 0.08 ^{ab}	0.30 ± 0.10 ^a	0.32 ± 0.09 ^a
亮氨酸	0.50 ± 0.01 ^b	0.48 ± 0.04 ^b	0.53 ± 0.08 ^{ab}	0.52 ± 0.02 ^{ab}	0.60 ± 0.15 ^{ab}	0.69 ± 0.22 ^a	0.69 ± 0.16 ^a
L-亮氨酸	0.50 ± 0.01 ^b	0.48 ± 0.04 ^b	0.53 ± 0.08 ^{ab}	0.52 ± 0.02 ^{ab}	0.60 ± 0.15 ^{ab}	0.69 ± 0.22 ^a	0.69 ± 0.16 ^a
L-苏氨酸	1.33 ± 0.20 ^b	1.70 ± 0.25 ^{ab}	1.84 ± 0.35 ^{ab}	2.17 ± 0.12 ^a	1.85 ± 0.51 ^{ab}	2.20 ± 0.77 ^a	2.90 ± 0.53 ^a
蛋氨酸	0.18 ± 0.02	0.17 ± 0.01	0.18 ± 0.01	0.16 ± 0.06	0.17 ± 0.07	0.21 ± 0.10	0.14 ± 0.05
O-乙酰丝氨酸	0.15 ± 0.02	0.13 ± 0.02	0.14 ± 0.02	0.15 ± 0.05	0.13 ± 0.02	0.15 ± 0.06	0.15 ± 0.02
O-磷酸丝氨酸	0.25 ± 0.11 ^{ab}	0.28 ± 0.03 ^{ab}	0.34 ± 0.03 ^a	0.18 ± 0.05 ^b	0.26 ± 0.09 ^{ab}	0.28 ± 0.14 ^{ab}	0.35 ± 0.09 ^a
O-脯氨酸	1.39 ± 0.12 ^b	1.74 ± 0.15 ^{ab}	1.71 ± 0.73 ^{ab}	2.01 ± 0.44 ^{ab}	1.94 ± 0.71 ^{ab}	1.72 ± 0.35 ^{ab}	2.18 ± 0.56 ^a
脯氨酸	1.93 ± 0.22	1.54 ± 0.10	1.46 ± 0.61	1.90 ± 0.71	1.67 ± 0.36	2.04 ± 0.66	2.07 ± 0.42
丝氨酸	0.54 ± 0.09 ^a	0.34 ± 0.04 ^b	0.34 ± 0.07 ^b	0.43 ± 0.16 ^{ab}	0.38 ± 0.09 ^b	0.41 ± 0.15 ^{ab}	0.43 ± 0.08 ^{ab}
苏氨酸	0.81 ± 0.08	0.79 ± 0.07	0.72 ± 0.32	1.00 ± 0.37	0.90 ± 0.19	0.97 ± 0.33	0.98 ± 0.18
缬氨酸	0.40 ± 0.04 ^d	0.42 ± 0.04 ^c	0.44 ± 0.07 ^{bc}	0.51 ± 0.03 ^{ab}	0.52 ± 0.12 ^{ab}	0.50 ± 0.05 ^{abc}	0.55 ± 0.01 ^a

2.7 发酵过程中酮类物质分析

丙酮作为一种常见的挥发性有机化合物，其含量属于上升趋势从发酵第 1 个月的 0.16‰ 到后面第 10 个月的 0.19‰ 有所增加（见表 7），但没有显著性差异。其增加可能与酒的成熟和发酵程度有关。丙酮的存在为发酵酒提供了一种清新和轻微的甜味^[23,24]，且具有微刺激感。酮类物质的增加与氧化反应的加剧有关^[25]。在发酵酒发酵过程中，酮类物质由于氧化作用而增加，同时也是酵母代谢的中间产物^[26,27]。

2.8 发酵过程中氨基酸类物质分析

在发酵酒中，氨基酸类物质的含量显示出先下降后上升的趋势（见表 8）。在发酵的第二个月，氨基酸含量达到最低点，可能是由于微生物在发酵过程中消耗了氨基酸，导致其浓度降低，也可能是因为发酵过程中蛋白质的消耗、三羧酸循环（TCA 循环）以及糖酵解途径（EMP 途径）的作用所致^[28]。在发酵过程中，微生物分泌的蛋白酶会将蛋白质水解为氨基酸。氨基酸是微生物生长和代谢的重要营

养物质。某些氨基酸通过脱氨作用（脱去氨基）转变为 α -酮酸，而这些 α -酮酸可以进入TCA循环。例如，缬氨酸和苏氨酸通过复杂的代谢途径，最终生成 α -酮戊二酸。某些氨基酸还可以通过转氨基作用与糖酵解途径的中间产物互相转化。在发酵的第四个月后，氨基酸含量显著增加，随后浓度变化趋于平稳。这种浓度变化主要受氨基酸合成与代谢的影响。此外，有些氨基酸具有特殊的挥发性气味，对发酵酒的风味有显著影响。

2.9 不同发酵阶段发酵酒样品风味物质热图聚类分析

该研究通过热图聚类法（见图1）分析了发酵酒在不同发酵阶段风味物质的变化。研究发现，发酵三个月时，部分氨基酸类物质如环亮氨酸和高丝氨酸的含量达到最高，这可能是由于微生物活动增强导致氨基酸产生增多所致。醇类物质在发酵期间的变化尤为显著，特别是4-羟基苯乙醇、甘油和苏糖醇等物质对发酵酒的风味有重要贡献。其中，4-羟基苯乙醇增添花香味，甘油则调节酒体的浓稠度。酚类物质在发酵后期的含量较高，且挥发性相对稳定。反式-3,5-二甲氧基-4-羟基肉桂醛在第三个月达到高峰，之后含量趋于稳定。

柠檬酸、氨基葡萄糖酸和苏糖酸等酸类物质在发酵初期含量较高，随后逐渐下降，而苏糖酸在发酵末期含量最高。酮和酯类物质在发酵第三个月显著增加，对风味的贡献较大，其中D-红内酯在发酵初期和末期含量较高。发酵第三个月后，大部分物质的相对含量趋于稳定，但部分酸类物质如丙酮酸、柠草酸、苯甲酸等在末期有所提升。发酵过程中，糖类物质逐渐转化为醇类物质，乙醇含量逐渐增加；长链醇类如异戊醇也在发酵中产生，影响发酵酒的香气和风味。酮类和醛类物质浓度的变化与糖类氧化和脂肪酸氧化分解有关^[29]。酯类化合物在发酵过程中通过酸和醇的酯化反应形成，如4-羟基丁酸酯的含量增加，提升了发酵酒的香气。

综上所述，发酵酒的风味物质在发酵过程中发生多种变化，其中微生物起到重要作用。酵母主要负责将糖分转化为酒精和二氧化碳，同时产生一些芳香族化合物，如醇类、酯类和酚类。药材中含有多种活性成分，如生物碱、黄酮类、挥发油等，这些成分在发酵过程中可能会发生化学变化，产生新的风味物质。特别是在发酵三个月时，许多关键风

味物质的含量达到峰值。这些变化整体上对发酵酒的口感和香气有着显著影响。

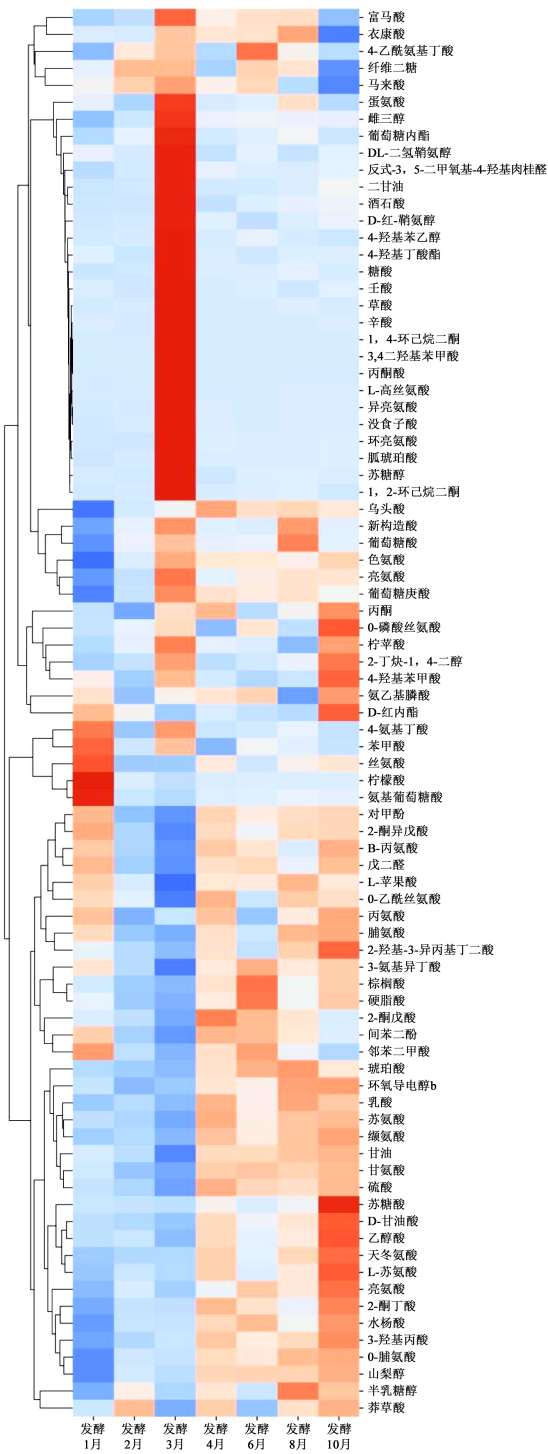


图 1 不同发酵阶段风味物质热图聚类
Fig.1 Heat map clustering of flavor compounds at different fermentation stages

3 结论

该研究通过对发酵酒不同发酵阶段样品的风味物质分析，检测出 58 种挥发性成分和 17 种氨基酸，

挥发性成分包括醇类、酯类、醛类、酸类、酮类和酚类,其中醇类和酯类物质数量丰富,赋予酒体独特的香气和风味。发酵第4~6个月时风味物质最多,占据绝对优势,大部分风味物质变化平缓,多表现为先下降后稳定再缓慢上升的趋势,可能与传统发酵酒不外加水的工艺有关。发酵初期原料快速被微生物利用释放出各类成分,后期原料中水分逐渐释出,风味物质被缓慢稀释并逐渐达到平衡,发酵到4~6个月时各种成分和微生物的相互关系基本稳定。微生物的代谢活动、发酵环境和原料选择在整个过程中起到了至关重要的作用,彝族传统酿酒技艺利用自然环境进行发酵,原料通常为当地特有的刺梨、柠檬等,富含特定的风味物质和营养成分。自然发酵依赖丰富多样的微生物菌群,不同微生物在发酵不同阶段起不同作用,发酵过程中产生的热量也会影响风味物质的浓度和微生物的代谢速率。未来研究可进一步深入分析微生物菌群的动态变化及其与风味物质生成的关系,以优化和稳定发酵工艺,提升发酵酒的品质和风味。

参考文献

- [1] 王玥萱.发酵彝药对小鼠肠道菌群的重建作用[D].兰州:西北师范大学,2021.
- [2] 黄庆,张宿义,苏圆媛,等.不同原料复合果酒酿造的研究进展[J].中国食品添加剂,2023,34(12):265-271.
- [3] 康三江,曾朝珍,张海燕,等.苹果海棠复合果酒香气成分研究[J].酿酒科技,2020,2:40-46.
- [4] 朱烨,陈晓婷,乔琨,等.气相色谱及其联用技术在食品风味中的研究进展[J].食品研究与开发,2022,43(6):200-210.
- [5] 陈林伟,王琴,彭德熹,等.基于GC-MS的气血双补酒挥发性化学成分研究[J].天津中医药,2018,35(11):874-876.
- [6] 田红,梁小燕,杜芬妮,等.一种自制药酒功效及挥发性成分分析[J].湖北民族学院学报(自然科学版),2019,37(1):6-12.
- [7] JIA W, MA R T, HU L B, et al. Synergy of physicochemical reactions occurred during aging for harmonizing and improving flavor [J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100554.
- [8] 向进乐,罗磊,马丽苹,等.木瓜酒和木瓜醋发酵工艺及其有机酸组成分析[J].食品科学,2016,37(23):191-195.
- [9] JIANG X H, LU Y Y, LIU S Q. Effects of pectinase treatment on the physicochemical and oenological properties of red dragon fruit wine fermented with *Torulaspora delbrueckii* [J]. Lwt, 2020, 132: 109929.
- [10] 杨会.白酒中不挥发呈味有机酸和多羟基化合物研究[D].无锡:江南大学,2017.
- [11] 张国英,郭忠鹏,张梁,等.甘油代谢对酿酒酵母酒精发酵的影响[J].酿酒科技,2008,8:20-24.
- [12] ZHU L, WANG X L, SONG X B, et al. Evolution of the key odorants and aroma profiles in traditional Laowuzeng baijiu during its one-year ageing [J]. Food Chemistry, 2020, 310: 125898.
- [13] 蒲领平,黄治国,饶家权,等.川中地区浓香型白酒酒醅风味物质时空差异性比较[J].现代食品科技,2023,39(12):262-269.
- [14] DDEGN Y H, XIONG A, ZHAO K, et al. Mechanisms of the regulation of ester balance between oxidation and esterification in aged baijiu [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 17169.
- [15] XU Y Q, ZHAO J R, LIU X, et al. Flavor mystery of Chinese traditional fermented baijiu: The great contribution of ester compounds [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130920.
- [16] 林彩霞,苏伟,母应春,等.洞酿酱香酒五轮次酿造过程中微生物与挥发性风味物质的相关性[J].食品工业科技,2023,44(21):127-136.
- [17] WANG J S, CHEN H, WU Y S, et al. Uncover the flavor code of strong-aroma baijiu: Research progress on the revelation of aroma compounds in strong-aroma baijiu by means of modern separation technology and molecular sensory evaluation [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 109: 104499.
- [18] WANG L. Research trends in Jiang-flavor baijiu fermentation: From fermentation microecology to environmental ecology [J]. Journal of Food Science, 2022, 87: 1362-1374.
- [19] ZHANG H X, WANG L, WANG H Y, et al. Effects of initial temperature on microbial community succession rate and volatile flavors during baijiu fermentation process [J]. Food Research International, 2021, 141: 109887.
- [20] ZHANG J, LIU S P, SUN H L, et al. Metagenomics-based insights into the microbial community profiling and flavor development potentiality of baijiu daqu and huangjiu wheat qu [J]. Food Research International, 2022, 152: 110707.
- [21] WANG Z, WANG S, LIAO P, et al. HS-SPME Combined with GC-MS/O to analyze the flavor of strong aroma baijiu daqu [J]. Foods, 2022, 11(116): 1-15.
- [22] CAI W, XUE Y, TANG F, et al. The depth-depended Fungal diversity and don-depth-depended aroma profiles of Pit Mud for strong-flavor baijiu [J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 12: 1-16.
- [23] EDUARDO D, ORIOL T, LAURA F, et al. Pineapple (*Ananas comosus* L. Merr.) wine production in angola: Characterisation of volatile aroma compounds and yeast native flora[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 241: 161-167.
- [24] 颜子豪,孟庆芳,陈江魁,等.冰糖红梨酒发酵工艺优化及香气成分分析[J].食品工业科技,2022,43(6):228-235.
- [25] 王家利,辛秀兰,陈亮,等.气相色谱-质谱法分析比较不同酵母发酵红树莓果酒的香气成分[J].食品科学,2014,35(6):107-112.
- [26] 王轩,周健,明红梅,等.樱桃果酒酿酒酵母的筛选及香气成分分析[J].食品与发酵工业,2020,46(3):124-130.
- [27] ELIZA K, KATARZYNA K, DANIEL K, et al. Characteristics of volatile compounds and sensory properties of mixed organic juices based on Kiwiberry fruits [J]. Applied Sciences, 2021, 11: 1-15.
- [28] 于杰,韩菁,张卓睿,等.桉叶唐棣果醋发酵工艺优化及有机酸和挥发性成分分析[J].中国酿造,2021,40(8):145-149.
- [29] 牛佳佳,张柯,崔巍,等.不同品种梨发酵果酒品质评价及挥发性化合物分析[J].食品安全质量检测学报,2022,13(17):5468-5476.