

及祥, 吴彩云, 雷宏杰. 乳酸菌与酵母菌混合发酵羊奶酒的理化特性、抗氧化活性及香气分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 140–150. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020214

Ji Xiang, WU Caiyun, LEI Hongjie. Physicochemical Characterization, Antioxidant Activity and Aroma Analysis of Goat's Milk Wine Fermented with Mixed Lactic Acid Bacteria and Yeasts[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 140–150. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020214

· 生物工程 ·

乳酸菌与酵母菌混合发酵羊奶酒的理化特性、抗氧化活性及香气分析

及 祥, 吴彩云, 雷宏杰*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘 要:本研究以纯山羊奶为原料, 利用六株乳酸菌分别与酿酒酵母混合发酵纯山羊奶制备羊奶酒, 以酿酒酵母单一发酵的羊奶酒为对照, 分析羊奶发酵过程中的理化特性、抗氧化活性以及挥发性成分的变化。结果表明, 与对照组相比, 接种乳酸菌可加快羊奶酒在发酵初期总糖含量的下降, 其中添加发酵乳杆菌的羊奶酒发酵 1 d 后的总糖含量下降最快, 由 469.46 g/L 降低至 210.41 g/L。添加乳酸菌发酵会使羊奶酒的 ABTS⁺自由基清除能力与羟自由基清除能力显著提高 ($P<0.05$), 其中嗜酸乳杆菌发酵羊奶酒的 ABTS⁺自由基清除能力与羟自由基清除能力最高, 分别比对照组高 9.94%、37.75%。此外, 接种嗜酸乳杆菌发酵的羊奶酒挥发性化合物含量最高 (2688.30 mg/L)。乳酸菌与酵母菌混合发酵减少了醇类和酸类物质含量, 使羊奶酒的膻味降低, 同时生成了环戊酮、乳酸乙酯、己酸乙酯等新的挥发性物质, 赋予了羊奶酒新的香气特征。嗜酸乳杆菌和酿酒酵母混合发酵羊奶酒不仅创新了羊奶酒的酿造工艺, 还为羊奶酒的脱膻处理提供了理论依据。

关键词:羊奶酒, 酿酒酵母, 乳酸菌, 发酵, 香气成分

中图分类号: TS252.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)23-0140-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024020214



本文网刊:

Physicochemical Characterization, Antioxidant Activity and Aroma Analysis of Goat's Milk Wine Fermented with Mixed Lactic Acid Bacteria and Yeasts

Ji Xiang, WU Caiyun, LEI Hongjie*

(College of Food Science and Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

Abstract: In this study, goat's milk was fermented by *Saccharomyces cerevisiae* mixed with six strains of *Lactobacillus*, respectively, to produce goat's milk wine, and goat's milk fermented with *Saccharomyces cerevisiae* was used as the control. Changes in the physicochemical properties, antioxidant activity and volatile compounds of goat's milk during fermentation process were studied. The results showed that the addition of lactic acid bacteria accelerated the decrease in total sugar content of goat's milk wine at the early stage of fermentation compared to the control, and the total sugar content of goat's milk wine fermented with *Lactobacillus fermentum* decreased significantly from 469.46 g/L to 210.41 g/L after 1 d of fermentation. The addition of lactic acid bacteria resulted in a significant increase in the scavenging capacity of ABTS⁺ radical and hydroxyl radical in fermented goat's milk wine ($P<0.05$), especially for *Lactobacillus acidophilus*, increasing ABTS⁺ radical scavenging capacity and hydroxyl radical scavenging capacity by 9.94% and 37.75%, respectively, compared to the control. In addition, the content of volatile compounds in goat's milk wine fermented with *Lactobacillus acidophilus* was the highest (2688.30 mg/L). The mixed fermentation of lactic acid bacteria and yeast reduced the content of

收稿日期: 2024-02-27

基金项目: 陕西省重点研发计划一般项目: 开菲尔羊奶酒加工关键技术研究 (2022NY-034)。

作者简介: 及祥 (1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: jixiangs@nwfufu.edu.cn。

* 通信作者: 雷宏杰 (1984-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 酿酒科学与技术, E-mail: leihongjie@nwfufu.edu.cn。

alcohols and acids, reduced the odor of goat's milk wine, and generated new volatile substances such as cyclopentanone, ethyl lactate and ethyl hexanoate, endowing goat's milk wine new aroma characteristics. The mixed fermentation of *Lactobacillus acidophilus* and *Saccharomyces cerevisiae* not only innovated the brewing process of goat's milk wine, but also provided a theoretical basis for the deodorization of goat's milk wine.

Key words: goat's milk wine; brewing yeast; lactic acid bacteria; fermentation; aroma components

奶酒是蒙古、新疆等地区的一种传统饮用酒,是中国食品中唯一以酒命名的民族乳制品^[1]。传统奶酒通常是在马奶或牛奶中加入奶酒酒曲,通过搅拌发酵,得到浊酒后进行蒸馏,最终成为奶酒,这种发酵方式工艺复杂,且风味不稳定。通常利用乳酸菌和酵母菌共同发酵,可以产生一些新的代谢产物,能够改善产品的风味^[2]。近年来,低醇饮料越来越受到年轻消费者的喜爱,这其中就包括奶酒。林少华等^[3]以牛奶和葡萄为原料,添加酵母菌、乳酸菌、曲霉菌混菌发酵制备葡萄汁奶酒,在 25 ℃ 条件下发酵 5 d 后,得到酒精度为 6.8%vol 的葡萄汁奶酒,且其中的天门冬氨酸、谷氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸和脯氨酸含量显著高于牛奶酒和牛奶中的含量。常云鹤等^[4]以玫瑰花和鲜牛乳为主要原料,利用酒曲发酵,得到一种色泽均匀,液体澄清,口感醇香浓厚,有独特的玫瑰和奶酒香味的玫瑰花奶酒,玫瑰花的加入显著提高了奶酒的抗氧化活性。朱俊杰等^[5]以鲜牛乳和核桃为原料,接种酵母菌和乳酸菌进行混菌发酵制备出一种色泽为淡黄色,具有浓郁乳香和核桃香的核桃奶酒,且香气协调,口感醇厚。以上研究均表明乳酸菌与酵母菌混合发酵能显著改善奶酒风味,协调奶酒香气。

目前,大部分研究侧重于以牛奶或马奶为原料,以开菲尔粒或酵母菌为发酵剂制备奶酒,很少有人以羊奶为原料发酵制备羊奶酒。近年来,羊奶因其营养价值高、易消化、矿物质生物利用度高等优点受到越来越多的关注,成为一种重要的功能性食品^[6-9]。羊奶本身具有膻味,部分人难以接受其独特气味。研究表明,羊奶发酵过程中,乳酸菌会分解乳糖、蛋白质和脂类等,产生芳香味化合物,可在一定程度掩盖羊奶膻味^[10-11],改善产品的感官品质。

本研究以纯山羊奶为原料,利用六株乳酸菌:发酵乳杆菌、植物乳植杆菌、干酪乳杆菌、乳双歧杆菌、嗜酸乳杆菌、保加利亚乳杆菌,分别与酿酒酵母混合发酵纯山羊奶制备发酵羊奶酒。以酿酒酵母单一发酵的羊奶酒为对照,对不同羊奶酒的理化特性、抗氧化活性、香气成分进行比较分析,探究不同发酵剂发酵羊奶酒在理化特性、抗氧化活性及香气方面的差异。旨在为开发营养健康、风味良好、香气典型的羊奶酒提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

纯山羊奶 购于陕西西安,已灭菌处理,包装完好无破损,在保质期内;发酵乳杆菌(*Lactobacillus*

fermentans 39, Lf39)、植物乳植杆菌(*Lactiplantibacillus plantarum* 90, Lp90)、干酪乳杆菌(*Lactobacillus casei* 37, Lc37)、乳双歧杆菌(*Bifidobacterium lactis* 68, Ba68)、嗜酸乳杆菌(*Lactobacillus acidophilus* 85, La85)、保加利亚乳杆菌(*Lactobacillus bulgaricus* 57, Lb57) 由上海华朴生命健康科技有限公司提供;酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*, FC9) 购于安琪酵母股份有限公司;白砂糖 广州福正东海食品有限公司;MRS 肉汤培养基 北京陆桥技术股份有限公司;3-辛醇、邻二氮菲、酚酞 上海阿拉丁生化科技股份有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS) 北京索莱宝科技有限公司;其他化学试剂均为国产分析纯。

LRH-250CL 恒温培养箱 上海一恒科学仪器有限公司;GL-10MD 大容量高速冷冻离心机 湖南湘仪仪器开发有限公司;ALC-210.3 电子分析天平 福州华志科学仪器有限公司;SB-500DTY 超声波清洗器 深圳市结盟清洗设备有限公司;DMA 35 酒精计 奥地利安东帕公司;DK-98-IIA 电热恒温水浴锅 金坛市宏华仪器厂;BKQ-B50II 立式高压蒸汽灭菌锅 山东博科生物产业有限公司;SW-CJ-1FD 超净工作台 苏州安泰空气技术有限公司;PB-10 pH 计 上海梅特勒-托利多仪器有限公司;QP2010 气相色谱-质谱联用仪 日本岛津公司;UV1800PC 紫外可见分光光度计 陕西天平仪器设备有限公司;VORTEX-5 混匀器 江苏其林贝尔仪器制造有限公司;CM-5 色差仪 柯尼卡美能达公司;ATAGO 手持式糖度仪 日本岛津公司。

1.2 实验方法

1.2.1 原料的预处理 将 1200 mL 的纯山羊奶在超净台内拆封后置于 2500 mL 锥形瓶,加入 100 g/L 的白砂糖,充分搅拌,使白砂糖在纯羊奶中充分溶解后密封备用。

1.2.2 发酵菌种的活化 称取 Lf39、Lp90、Lc37、Ba68、La85、Lb57 六种乳酸菌的菌粉 0.01 g,分别置于 250 mL MRS 肉汤培养基中,置于恒温培养箱中 37 ℃ 恒温活化 12 h 后,离心弃去上清液,使用生理盐水洗涤菌泥 2 次,得到活化后的乳酸菌悬液。

1.2.3 羊奶酒的发酵 将活化后的乳酸菌按 3% (v/v)的添加量接种至调糖后的纯羊奶中,同时将酿酒酵母按 0.4 g/L 的添加量添加至纯羊奶中。以酿酒酵母单一发酵的羊奶酒为对照,封口后充分摇匀,置于恒温培养箱中 25 ℃ 恒温发酵 5 d,期间每隔

24 h 取一次样, 11000 r/min 离心 20 min 后取上清液得到羊奶酒, 进行相关指标的测定。

1.2.4 理化指标测定 pH: 将待测样品摇匀, 取 30 mL 置于烧杯中, 使用 pH 计在室温下测定 pH, 待数值稳定后读数。

可滴定酸: 采用酸碱滴定法(GB/T 23546-2009 奶酒)测定, 结果以乳酸含量表示^[12]。

可溶性固形物: 在 20 °C 下使用手持糖度仪进行测定, 以蒸馏水为空白, 结果以°Brix 表示。

总糖: 采用苯酚-硫酸法进行测定, 结果以葡萄糖含量计算^[12]。

乙醇含量: 取 50 mL 样品, 倒入 250 mL 蒸馏瓶中, 同时加入 50 mL 去离子水, 加热蒸馏, 收集馏出液, 当馏出液的体积接近 50 mL 时停止蒸馏, 定容至 50 mL。用酒精计测定其乙醇含量。

色值: 使用色差仪在室温条件下进行测定, 测定前先使用黑板和白板对色差仪校正, 再将样品摇匀置于比色皿中, 选取 Hunter Lab 测试系统, 在反射模式下测定 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 其中: L^* 表示亮度; a^* 表示红度值; b^* 表示黄度值; ΔE 表示色差值。色差(ΔE)计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(L_0^* - L^*)^2 + (a_0^* - a^*)^2 + (b_0^* - b^*)^2} \quad \text{式 (1)}$$

式中, L_0^* 表示发酵前样品的亮度, a_0^* 表示发酵前样品的红度值, b_0^* 表示发酵前样品的黄度值。

1.2.5 抗氧化活性测定 DPPH 自由基清除能力的测定: 2 mL 经过稀释的样品与 4 mL 0.045 mg/mL DPPH 甲醇溶液混合后避光反应 30 min, 用紫外分光光度计在 517 nm 处测定溶液吸光度值(A_{sample}), 以溶剂和 DPPH 甲醇溶液混合为对照(A_{control}), DPPH 自由基清除能力计算公式如下^[13]:

$$\text{DPPH 自由基清除能力}(\%) = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

ABTS⁺自由基清除能力的测定: 将 2.45 mmol/L $K_2S_2O_8$ 溶液和 7 mmol/L ABTS 1:1 混合, 避光反应 16 h 制备 ABTS⁺自由基, 所得溶液用 80% 乙醇稀释至 734 nm 处吸光度为 0.700 ± 0.02 即得到 ABTS⁺自由基试剂。将 600 μ L 稀释后的样品与 5.4 mL ABTS⁺自由基试剂混合, 反应 6 min, 用紫外分光光度计测定溶液在 734 nm 处的吸光度值(A_{sample}), 以溶剂和 ABTS⁺自由基试剂混合为对照(A_{control}), ABTS⁺自由基清除能力的计算公式如下^[14]:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除能力}(\%) = \frac{A_{\text{control}} - A_{\text{sample}}}{A_{\text{control}}} \times 100 \quad \text{式 (3)}$$

羟自由基清除能力的测定: 配制 0.75 mmol/L 邻二氨菲无水乙醇溶液, 取 1 mL 于试管中, 依次加入 0.2 mmol/L (pH7.4) 的磷酸缓冲液 2 mL 和蒸馏水 1 mL, 充分混匀, 加 0.75 mmol/L $FeSO_4$ 溶液 1 mL,

混匀, 随后加入 1 mL 0.01% H_2O_2 , 于 37 °C 水浴 1 h, 用紫外分光光度计测定溶液在 536 nm 处的吸光度值 A_p 。用 1 mL 蒸馏水代替 1 mL H_2O_2 测定吸光度值 A_B 。用 1 mL 样品代替 1 mL 蒸馏水, 测定吸光度值 A_s 。羟自由基清除能力按以下公式计算^[15]:

$$\text{羟自由基清除能力}(\%) = \frac{A_s - A_p}{A_B - A_p} \times 100 \quad \text{式 (4)}$$

1.2.6 挥发性化合物测定 采用顶空固相微萃取-气质联用(HS-SPME-GC-MS)对样品中的挥发性化合物进行分析。5 mL 样品添加到含有 2 g NaCl 的进样瓶中, 同时添加 10 μ L 3-辛醇(0.2 mg/mL, 用乙醇配制)作为内标, 上机测定。进样瓶先在 40 °C 环境下平衡 15 min, 再将老化后的萃取头插入进样瓶中顶空吸附 30 min, 然后进行解吸^[12]。

色谱条件: 色谱柱为 DB-17MS 毛细管色谱柱(60 m $\times$ 0.25 mm, 0.25 μ m)。

升温程序: 起始温度 40 °C, 保持 30 min 后以 4 °C/min 的速率升温至 120 °C, 再以 6 °C/min 的速率升温至 240 °C 并保持 9 min; 系统自动进样; 进样口温度 250 °C; 载气为氦气; 压力 112 kPa, 总流速为 17 mL/min, 柱内流速为 1 mL/min; 不分流进样。

质谱条件: 电子电离源; 电子能量 70 eV; 离子源温度 230 °C; 接口温度 230 °C; 质量扫描范围 m/z 35~500。

根据气相色谱-质谱中 NIST 14 质谱数据库、匹配度和保留时间对各物质的检索进行定性。选择匹配度大于 85 的挥发性化合物作为有效香气成分, 根据各物质峰面积分别与内标物峰面积之比进行定量。香气成分含量计算公式如下^[12]:

$$\text{香气物质含量}(\text{mg/L}) = \frac{\text{各物质的峰面积}}{\text{内标物的峰面积}} \times \text{内标质量浓度} \quad \text{式 (5)}$$

1.3 数据处理

所有实验重复三次, 结果以平均值 $\pm$ 标准差表示。采用 Minitab 21 软件进行方差分析, 采用 Origin 2023b 软件制作图表。经 Tukey 检验, $P < 0.05$ 表示样本之间存在显著性差异。

2 结果与分析

2.1 单一和混合菌株发酵羊奶酒理化指标的变化

2.1.1 单一和混合菌株发酵羊奶酒 pH 和可滴定酸含量的变化 如图 1a 所示, 随着发酵时间的延长, 单一和混合菌株发酵羊奶酒的 pH 均呈下降趋势, 且混合发酵羊奶酒的 pH 下降速度显著高于单一发酵羊奶酒($P < 0.05$)。单一菌株发酵羊奶酒的 pH 从发酵初的 6.5 降至 5.1。而所有混合菌株发酵羊奶酒的 pH 均在发酵的第 1 d 大幅下降($P < 0.05$), 其中, La85 发酵羊奶酒的 pH 下降幅度最小, 从 6.5 降至 4.3, Lc37 发酵羊奶酒的 pH 下降幅度最大, 从 6.5 降至 3.7, 说明 La85 在羊奶中的产酸能力较弱, Lc37

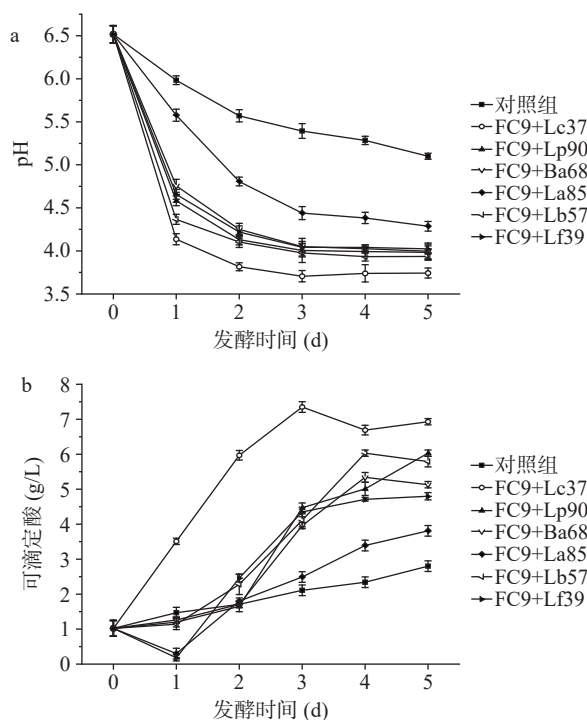


图 1 单一和混合菌株发酵羊奶酒 pH(a)和可滴定酸含量(b)的变化

Fig.1 Changes in pH (a) and titratable acid content (b) of goat's milk wine fermented by single and mixed strains

在羊奶中的产酸能力较强。研究显示,羊奶酒在发酵过程中代谢产生了 L-乳酸、乙酸等酸类物质。本结果与李巧艳等^[16]利用乳酸菌发酵牦牛乳的 pH 变化趋势是相似的,乳酸菌与酿酒酵母混合发酵可以促进羊奶酒酸类化合物的生成。

如图 1b 所示,单一和混合菌株发酵羊奶酒的可滴定酸含量在发酵过程中整体呈上升趋势。单一菌株发酵羊奶酒在发酵过程中,可滴定酸含量由发酵初的 1.02 g/L 增加至 2.80 g/L。混合菌株发酵羊奶酒中,Lc37 发酵羊奶酒的可滴定酸含量增加最多,发酵结束后达 6.93 g/L;La85 发酵羊奶酒的可滴定酸含量增加最少,发酵结束后为 3.81 g/L,这与 pH 的变化趋势相一致。羊奶酒 pH 和可滴定酸的变化主要是因为乳酸菌发酵过程中代谢产生的淀粉酶和脂肪酶等可以将糖类、脂类等物质转化成有机酸和脂肪

酸,最终导致发酵体系的 pH 显著下降、可滴定酸含量显著提高^[17-18]。

2.1.2 单一和混合菌株发酵羊奶酒可溶性固形物和总糖含量的变化 单一和混合菌株发酵羊奶酒在发酵过程中的可溶性固形物含量整体呈下降趋势(图 2)。单一菌株发酵羊奶酒的可溶性固形物含量由发酵前的 14.20°Brix 降至 9.37°Brix。混合菌株发酵羊奶酒的可溶性固形物含量下降程度显著高于单一菌株发酵羊奶酒($P<0.05$),其中,Lc37 发酵羊奶酒在发酵结束后的可溶性固形物含量最高,为 6.43°Brix,Lf39 发酵羊奶酒在发酵结束后的可溶性固形物含量最低,为 5.03°Brix,说明 Lf39 在羊奶中的代谢能力较强。混合菌株发酵羊奶酒的可溶性固形物含量在发酵第 1 d 的下降速度显著高于第 2~5 d,说明在发酵前期,乳酸菌在羊奶中的代谢活动较为强烈。乳酸菌通过消耗糖分来完成增殖代谢活动,同时产生乳酸等酸性代谢物质,使羊奶的 pH 降低,酸度变高,然而,随着有机酸浓度的增高,酸性环境又反过来抑制益生菌的生长代谢活动^[19],因此,在发酵的中后期羊奶酒中的可溶性固形物含量下降变缓。

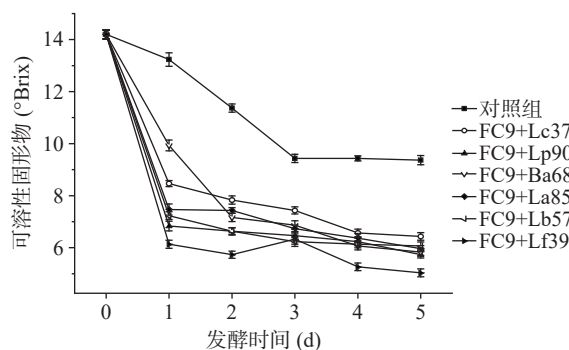


图 2 单一和混合菌株发酵羊奶酒可溶性固形物含量的变化
Fig.2 Changes in soluble solids content of goat's milk wine fermented by single and mixed strains

糖的消耗与微生物的代谢相关^[20]。由图 3 可以看出,单一和混合菌株发酵羊奶酒的总糖含量整体呈下降趋势,说明酵母菌和益生菌的生长增殖消耗糖分。其中,Lc37 发酵羊奶酒发酵结束后的总糖含量最低,为 168.94 g/L,较未发酵下降了 64.01%;Lp90 发

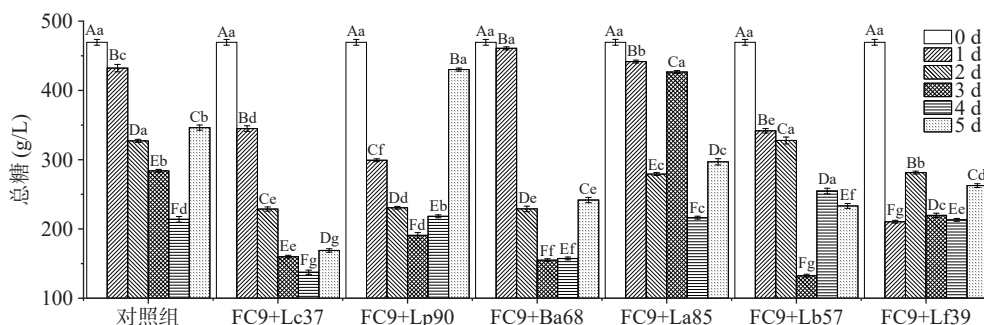


图 3 单一和混合菌株发酵羊奶酒总糖含量的变化

Fig.3 Changes in total sugar content of goat's milk wine fermented by single and mixed strains

注: 相同柱形上不同小写字母表示组间有显著性差异($P<0.05$),大写字母表示组内有显著性差异($P<0.05$);图 4~图 7 同。

酵羊奶酒发酵结束后的总糖含量最高,为 430.12 g/L,较未发酵下降了 8.38%。说明 Lc37 在羊奶中消耗碳源的能力最强。对于发酵后期单一和混合菌株发酵羊奶酒的总糖含量上升的现象,推测是由于发酵后期益生菌受乙醇胁迫,使细胞破裂,导致细胞内糖类物质流出,从而使总糖含量升高^[21]。此外,乳酸菌在生长代谢过程中分泌出的胞外多糖也会使总糖含量升高^[22]。

2.1.3 单一和混合菌株发酵羊奶酒乙醇含量的变化

如图 4 所示,单一和混合菌株发酵羊奶酒的乙醇含量在发酵过程中显著升高($P<0.05$),且在发酵前期乙醇含量增长较快,表明 FC9 在发酵初期增殖迅速,消耗糖分,产生乙醇。单一菌株发酵羊奶酒发酵结束后的乙醇含量达 7.13%vol,混合菌株发酵羊奶酒中, Ba68 发酵羊奶酒和 La85 发酵羊奶酒在发酵结束后的乙醇含量显著高于单一菌株发酵羊奶酒($P<0.05$),

分别为 7.28%vol、7.23%vol。其余混合菌株发酵羊奶酒在发酵结束后的乙醇含量显著低于单一菌株发酵羊奶酒($P<0.05$),其中以 Lc37 发酵羊奶酒最低,为 6.19%vol。这可能是由于乳酸菌发酵产生的丙酮酸未被酵母菌直接利用,而是转化成 L-乳酸等酸类物质,使发酵产生酒精的速度变慢,可滴定酸度升高^[23]。总的来说,单一和混合菌株发酵羊奶酒的乙醇含量均小于 18%vol,符合国家标准中对发酵型奶酒的酒精度要求^[24]。

2.1.4 单一和混合菌株发酵羊奶酒色值的变化

单一和混合菌株发酵羊奶酒在发酵过程中颜色参数(L^* 、 a^* 、 b^*)的变化及总色差(ΔE)变化如表 1 所示。除 Lc37 发酵羊奶酒外,与对照组相比,乳酸菌发酵显著降低了羊奶酒的 a^* 值与 b^* 值($P<0.05$),同时显著提高了其 L^* 值($P<0.05$),表明混菌发酵使羊奶酒的颜色变得明亮透明,红色调和黄色调变弱。有研究

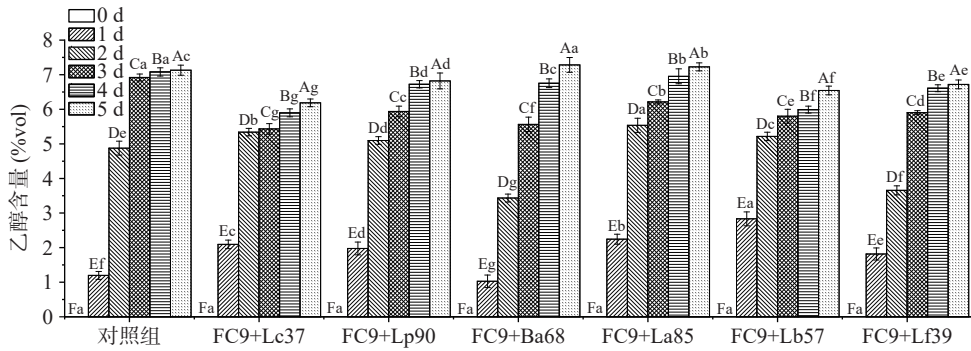


图 4 单一和混合菌株发酵羊奶酒乙醇含量的变化
Fig.4 Changes in alcohol content of goat's milk wine fermented by single and mixed strains

表 1 单一和混合菌株发酵羊奶酒色值的变化

Table 1 Changes in color attributes of goat's milk wine fermented by single and mixed strains

发酵时间(d)	组别	L^*	a^*	b^*	ΔE
0	对照组	2.39±0.14 ^{Fa}	0.00±0.14 ^{Ba}	2.70±0.18 ^{Fa}	—
	对照组	61.45±0.13 ^{Ef}	2.10±0.02 ^{Aa}	14.48±0.05 ^{Aa}	60.26±0.34 ^{Ec}
1	FC9+Lc37	94.63±0.03 ^{Ac}	-0.06±0.10 ^{Db}	5.75±0.11 ^{Eb}	92.29±0.17 ^{Ad}
	FC9+Lp90	97.70±0.05 ^{Bd}	-0.85±0.01 ^{Cf}	4.12±0.02 ^{Ac}	95.32±0.14 ^{Bc}
	FC9+Ba68	98.60±0.02 ^{Cc}	-0.82±0.24 ^{Df}	3.92±0.02 ^{Ac}	96.23±0.14 ^{Db}
	FC9+La85	97.75±0.10 ^{Cd}	-0.39±0.05 ^{Ad}	3.93±0.03 ^{Ac}	95.37±0.24 ^{Bc}
	FC9+Lb57	99.37±0.03 ^{Ab}	-0.48±0.02 ^{Ac}	2.31±0.02 ^{Cd}	96.99±0.17 ^{Aa}
	FC9+Lf39	99.58±0.14 ^{Aa}	-0.26±0.17 ^{Ac}	1.43±0.10 ^{Ce}	97.20±0.23 ^{Aa}
	对照组	85.62±0.08 ^{Df}	-0.21±0.05 ^{Cb}	10.04±0.01 ^{Ba}	83.55±0.13 ^{Dd}
2	FC9+Lc37	90.73±0.01 ^{Bc}	0.45±0.12 ^{Ca}	8.82±0.31 ^{Db}	88.56±0.17 ^{Bc}
	FC9+Lp90	99.02±0.01 ^{Ad}	-0.50±0.07 ^{Ac}	2.53±0.36 ^{Cd}	96.64±0.14 ^{Ab}
	FC9+Ba68	99.10±0.01 ^{Bc}	-0.27±0.08 ^{Ab}	1.86±0.19 ^{Ee}	96.72±0.13 ^{Bc}
	FC9+La85	99.61±0.04 ^{ABa}	-0.65±0.07 ^{Bc}	2.53±0.06 ^{Cd}	97.23±0.14 ^{Aa}
	FC9+Lb57	99.01±0.08 ^{Bd}	-0.54±0.11 ^{ABc}	2.72±0.03 ^{Bc}	96.62±0.21 ^{Bb}
	FC9+Lf39	99.47±0.08 ^{Ab}	-0.30±0.11 ^{Ab}	1.56±0.03 ^{Cf}	97.09±0.14 ^{Aa}
	对照组	86.52±0.04 ^{Cf}	-0.47±0.17 ^{Db}	8.70±0.02 ^{Db}	84.35±0.14 ^{Cd}
3	FC9+Lc37	74.18±0.01 ^{Dg}	1.87±0.03 ^{Ba}	12.74±0.04 ^{Ca}	72.52±0.19 ^{Dc}
	FC9+Lp90	98.82±0.01 ^{Ac}	-0.80±0.14 ^{BCe}	3.88±0.18 ^{ABc}	96.44±0.14 ^{Ac}
	FC9+Ba68	99.47±0.01 ^{Ab}	-0.55±0.01 ^{Bbc}	2.30±0.27 ^{Df}	97.08±0.14 ^{Ab}
	FC9+La85	99.70±0.03 ^{ABa}	-0.66±0.09 ^{Bcd}	2.55±0.04 ^{Ce}	97.31±0.28 ^{Aa}
	FC9+Lb57	99.01±0.04 ^{Bd}	-0.48±0.01 ^{Ab}	2.40±0.02 ^{Cf}	96.63±0.16 ^{Bc}
	FC9+Lf39	99.38±0.16 ^{Ac}	-0.70±0.06 ^{Bde}	2.96±0.02 ^{ABd}	96.99±0.32 ^{ABb}
	对照组	86.52±0.04 ^{Cf}	-0.47±0.17 ^{Db}	8.70±0.02 ^{Db}	84.35±0.14 ^{Cd}

续表 1

发酵时间(d)	组别	<i>L</i> [*]	<i>a</i> [*]	<i>b</i> [*]	Δ <i>E</i>
4	对照组	91.26±0.06 ^{Ac}	-0.82±0.04 ^{Fd}	7.89±0.02 ^{Eb}	89.03±0.14 ^{Ad}
	FC9+Lc37	71.86±0.42 ^{Ed}	2.20±0.02 ^{Aa}	14.04±0.02 ^{Ba}	70.43±0.37 ^{Ec}
	FC9+Lp90	97.25±0.54 ^{Cb}	-0.69±0.04 ^{Bc}	3.70±0.13 ^{Bc}	94.87±0.45 ^{Cc}
	FC9+Ba68	99.38±0.18 ^{Aa}	-0.70±0.03 ^{Cc}	2.79±0.02 ^{Cd}	97.00±0.12 ^{ABab}
	FC9+La85	99.48±0.25 ^{Ba}	-0.71±0.02 ^{BCc}	2.82±0.06 ^{Bcd}	97.10±0.17 ^{Aa}
	FC9+Lb57	98.97±0.18 ^{Ba}	-0.58±0.02 ^{ABb}	2.80±0.03 ^{Bd}	96.59±0.19 ^{Bb}
	FC9+Lf39	99.02±0.25 ^{Ba}	-0.64±0.02 ^{Bc}	2.85±0.05 ^{ABd}	96.64±0.41 ^{Cab}
	对照组	89.73±0.03 ^{Be}	-0.66±0.02 ^{Eb}	9.17±0.15 ^{Cb}	87.59±0.19 ^{Be}
5	FC9+Lc37	75.41±0.04 ^{Cf}	2.16±0.02 ^{Aa}	14.45±0.02 ^{Aa}	74.00±0.16 ^{Cf}
	FC9+Lp90	98.78±0.05 ^{Ac}	-0.88±0.02 ^{Cc}	4.03±0.22 ^{Ac}	96.40±0.28 ^{Ac}
	FC9+Ba68	99.18±0.14 ^{Bb}	-0.72±0.01 ^{Cbc}	3.16±0.17 ^{Be}	96.80±0.15 ^{BCb}
	FC9+La85	99.76±0.21 ^{Aa}	-0.78±0.01 ^{Cbc}	2.90±0.01 ^{Bf}	97.38±0.33 ^{Aa}
	FC9+Lb57	98.45±0.14 ^{Cd}	-0.63±0.23 ^{Bb}	3.45±0.12 ^{Ad}	96.07±0.32 ^{Cd}
	FC9+Lf39	99.13±0.14 ^{Bb}	-0.68±0.01 ^{Bb}	3.09±0.04 ^{Aef}	96.75±0.27 ^{BCb}
	对照组				
	FC9+Lc37				

注: 大写字母表示同一样品不同发酵时间具有显著性差异($P<0.05$), 小写字母表示同一发酵时间不同样品具有显著性差异($P<0.05$)。

表明, 乳酸菌发酵生成的酸类物质会促进蛋白质凝固沉降, 从而使奶酒变得澄清明亮^[25]。发酵结束后, La85 发酵羊奶酒的Δ*E* 值最大, 为 97.38; Lc37 发酵羊奶酒的Δ*E* 值最小, 为 74.00。说明 La85 发酵羊奶酒在发酵前后的颜色变化最大, Lc37 发酵羊奶酒的颜色变化最小。

2.2 单一和混合菌株发酵羊奶酒抗氧化活性的变化

本研究通过测定 ABTS⁺、DPPH 和羟自由基清除能力来进行羊奶酒的抗氧化活性分析。羊奶中的抗氧化活性成分主要有超氧化物歧化酶(SOD)、维生素 A 和生物活性肽^[26]。如图 5、图 6 所示, 单一和混合菌株发酵羊奶酒的 ABTS⁺和羟自由基清除能力整体呈下降趋势, 这可能是由于酿酒酵母发酵过程

产生的酒精抑制了 SOD 的活性^[27]。单一和混合菌株发酵羊奶酒的 ABTS⁺自由基清除能力在发酵的第 1 d 均显著下降($P<0.05$)。所有混合菌株发酵羊奶酒的 ABTS⁺自由基清除能力在发酵的第 3~5 d 显著上升($P<0.05$)。除 Lc37 发酵羊奶酒外, 所有混合菌株发酵羊奶酒在发酵结束后的 ABTS⁺自由基清除能力显著高于单一菌株发酵羊奶酒($P<0.05$)。单一和混合菌株发酵羊奶酒的羟自由基清除能力均在发酵的第 5 d 显著下降($P<0.05$), 且混合菌株发酵羊奶酒的羟自由基清除能力均显著高于单一菌株发酵羊奶酒($P<0.05$), 说明添加乳酸菌发酵有助于提高羊奶酒的 ABTS⁺和羟自由基清除能力。有研究表明, 乳酸菌在发酵动物乳时会水解其中的乳蛋白, 生成抗氧

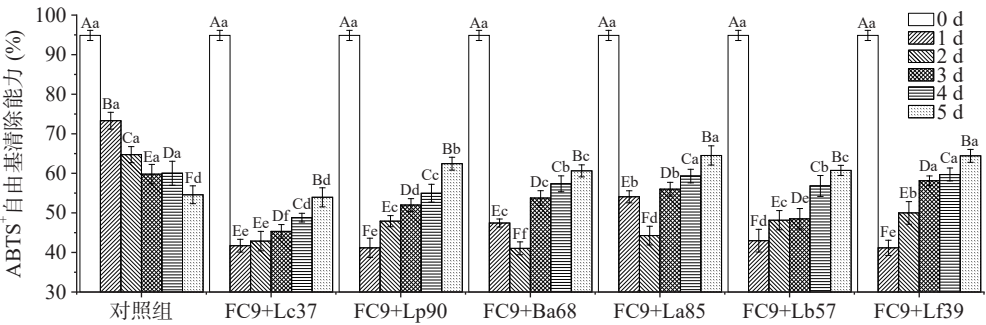


图 5 单一和混合菌株发酵羊奶酒 ABTS⁺自由基清除能力的变化

Fig.5 Changes in ABTS⁺ radical scavenging activities of goat's milk wine fermented by single and mixed strains

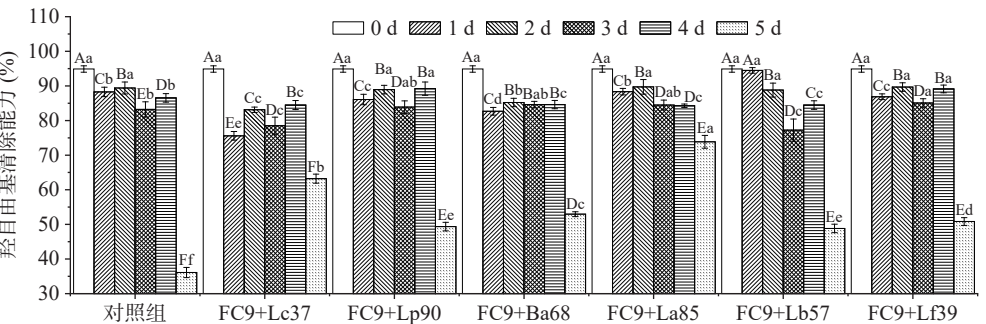


图 6 单一和混合菌株发酵羊奶酒羟自由基清除能力的变化

Fig.6 Changes in hydroxyl radical scavenging activities of goat's milk wine fermented by single and mixed strains

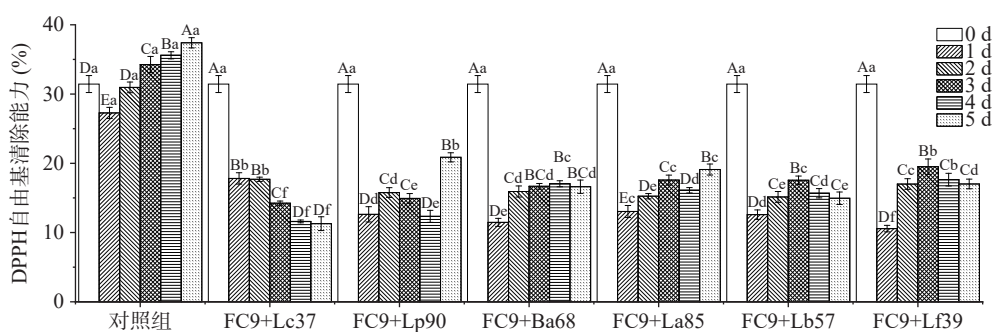


图7 单一和混合菌株发酵羊奶酒 DPPH 自由基清除能力的变化

Fig.7 Changes in DPPH radical scavenging activities of goat's milk wine fermented by single and mixed strains

化肽,从而提高羊奶酒的抗氧化活性^[28]。如图7所示,单一菌株发酵羊奶酒的DPPH自由基清除能力显著高于混合菌株发酵羊奶酒($P < 0.05$),这与ABTS⁺和羟自由基清除能力的测定结果不一致,这可能是不同的抗氧化机制造成的^[29]。

2.3 单一和混合菌株发酵羊奶酒挥发性成分的变化

香气是消费者选择购买一款奶酒的重要特征。酵母菌与乳酸菌共同发酵不仅可以提高发酵速度,加速有益产物的积累,而且会产生丰富的风味物质^[30-32]。本研究在单一和混合菌株发酵羊奶酒中共鉴定出54种挥发性化合物,如表2所示,其中有醇类化合物16种、酸类化合物5种、酮类化合物12种、醛类化合物6种、酯类化合物15种。总挥发性物质含量最高的为单一菌株发酵羊奶酒,为2935.93 mg/L;最低的为Lf39发酵羊奶酒,为1341.75 mg/L。

醇类物质是微生物通过氨基酸代谢产生的^[33],在羊奶酒的挥发性成分中占比最大,约为80%。单一菌株发酵羊奶酒的醇类物质含量最高,达2426.76 mg/L;Lp90发酵羊奶酒的醇类物质含量最低,为1616.00 mg/L。其中,乙醇、异戊醇、2-甲基-1-丁醇和 β -苯乙醇在单一和混合菌株发酵羊奶酒中均有检出,为其中主要的醇类化合物。乙醇的含量最高,赋予羊奶酒刺激辛辣味。异戊醇、2-甲基-1-丁醇和 β -苯乙醇则为羊奶酒提供醇类特有的芳香气息。单一菌株发酵羊奶酒中的醇类物质最多,共有10种,说明添加乳酸菌发酵会减少羊奶酒中醇类物质的种类和含量。但乳酸菌的加入也会使羊奶酒中生成新的醇类物质,如Lb57发酵羊奶酒中鉴定出了(S)-环氧丙醇,为其带来了甜味;Lf39发酵羊奶酒中鉴定出了2-甲基-2,4-戊二醇,赋予其一定的甜香味;Lp90发酵羊奶酒中鉴定出了3-甲基-3-辛醇,可以为羊奶酒提供一种独特的薄荷香气。

膻味一直是影响羊奶产业发展的一个重要因素,它主要与羊奶中的游离短中链脂肪酸,特别是支链脂肪酸的含量有关,如己酸、辛酸和癸酸^[34-37]。在本项研究中,单一和混合菌株发酵羊奶酒中的酸类物质较少,共鉴定出L-乳酸、乙酸、己酸、正庚酸、苯甲酸5种酸性物质。单一菌株发酵羊奶酒酸类物质的

总含量为65.51 mg/L,仅占挥发性物质总含量的2%左右。混合菌株发酵羊奶酒的酸类物质含量均显著低于单一菌株发酵羊奶酒($P < 0.05$),其中以Ba68发酵羊奶酒的含量最低,仅为3.81 mg/L。说明在发酵过程中,乳酸菌的加入能减少羊奶酒中的酸类化合物,进而在一定程度上消除羊奶酒的膻味,改善羊奶酒整体的香气,使其能被更多消费者所接受。

较低浓度的酮类物质就能产生比较强烈的气味^[38]。在单一和混合菌株发酵羊奶酒中鉴定出的酮类化合物共有12种,但整体含量不高。La85发酵羊奶酒和Lb57发酵羊奶酒中的酮类物质含量最高,分别为112.01 mg/L和121.92 mg/L,Lf39发酵羊奶酒中所含有的酮类物质最少,为4.97 mg/L。单一菌株发酵羊奶酒的酮类物质含量为18.86 mg/L。Lb57发酵羊奶酒中共含有7种酮类化合物,其中,羟丙酮、环戊酮、环己酮、2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮(菠萝酮)和2',5'-二羟基苯丙酮为Lb57发酵羊奶酒所特有,羟丙酮可为其提供特殊甜味,环戊酮和环己酮可赋予羊奶酒薄荷香气,菠萝酮则具有复杂的烘焙烹调香和水果香气。其余羊奶酒都仅含有3种酮类物质,说明Lb57的加入可以使羊奶酒在发酵过程中产生更多种类和含量的酮类化合物,使羊奶酒的香气种类更复杂,层次更丰富。La85发酵羊奶酒中鉴定出的酮类化合物为2-甲基-3-羟基- γ -吡喃酮(麦芽酚)、2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮和3,4-二甲基苯乙酮(丁香酮),其中麦芽酚和2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮含量较高,分别为64.15 mg/L和38.70 mg/L,它们能为羊奶酒提供棉花糖和焦糖的甜蜜气味,以及复杂的烘焙烹调香和水果、焦糖香气。3,4-二甲基苯乙酮为La85发酵羊奶酒所特有,能为其提供奶油和丁香的香气。说明La85的加入可以使羊奶酒在发酵过程中产生更多的酮类物质,使其具有更为浓郁和复杂的独特香气。

酯类物质对奶酒的花果香气具有积极贡献^[39],单一和混合菌株发酵羊奶酒中共鉴定出15种酯类物质。单一菌株发酵羊奶酒中有7种酯类化合物,总含量达402.97 mg/L。Lf39发酵羊奶酒中的酯类化合物种类最多,达11种,但其酯类物质总含量最低,为268.75 mg/L。Lc37发酵羊奶酒中的酯类化合

表 2 单一和混合菌株发酵羊奶酒中挥发性化合物的变化(mg/L)

Table 2 Changes in volatile compounds of goat's milk wine fermented by single and mixed strains (mg/L)

序号	挥发性化合物	对照组	FC9+Lc37	FC9+Lp90	FC9+Ba68	FC9+La85	FC9+Lb57	FC9+Lf39
醇类化合物								
1	(S)-环氧丙醇	ND	ND	ND	ND	ND	65.58	ND
2	乙醇	1411.39	1654.60	1104.78	1580.00	1325.82	1160.65	1277.93
3	3-戊醇	ND	ND	ND	ND	52.95	35.08	ND
4	异丁醇	95.28	ND	ND	ND	ND	ND	ND
5	叔戊醇	8.93	2.89	9.95	ND	ND	24.40	5.30
6	异戊醇	612.40	299.17	340.21	374.06	425.65	305.03	321.77
7	2-甲基-1-丁醇	188.58	84.65	94.10	100.89	115.07	88.46	99.08
8	2-甲基-2,4-戊二醇	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.99
9	2,3-丁二醇	7.94	ND	ND	ND	ND	ND	ND
10	(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇	ND	ND	5.43	1.90	ND	ND	2.98
11	2-庚醇	2.98	ND	ND	ND	ND	ND	ND
12	糠醇	ND	ND	ND	ND	5.09	240.97	ND
13	2,2-二甲基丁醇	11.91	12.51	ND	12.37	ND	ND	ND
14	3-甲基-3-辛醇	ND	ND	2.71	ND	ND	ND	ND
15	β -苯乙醇	59.55	26.94	36.19	34.26	53.97	73.21	10.60
16	1-五烯-3-醇	27.79	27.90	22.62	ND	34.62	ND	8.28
	总计	2426.76	2108.65	1616.00	2103.49	2013.17	1993.38	1727.94
酸类化合物								
17	L-乳酸	41.69	ND	ND	ND	ND	ND	ND
18	乙酸	20.84	14.43	24.43	ND	25.82	28.83	28.83
19	己酸	ND	4.81	3.62	ND	5.09	ND	3.31
20	正庚酸	2.98	ND	ND	ND	ND	ND	ND
21	苯甲酸	ND	ND	8.14	3.81	3.60	ND	ND
	总计	65.51	19.24	36.19	3.81	34.52	28.83	32.14
酮类化合物								
22	3-甲基-2-庚酮	1.99	1.92	1.81	1.90	ND	ND	1.66
23	羟丙酮	ND	ND	ND	ND	ND	8.08	ND
24	环戊酮	ND	ND	ND	ND	ND	8.24	ND
25	2-庚酮	ND	2.89	1.81	3.80	ND	ND	2.32
26	环己酮	ND	ND	ND	ND	ND	2.44	ND
27	4-异丁氧基-2-丁酮	11.91	ND	ND	ND	ND	ND	ND
28	苯乙酮	4.96	4.81	4.52	3.81	ND	ND	0.99
29	2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮	ND	ND	ND	ND	ND	3.42	ND
30	2-甲基-3-羟基- γ -吡喃酮	ND	ND	ND	ND	64.15	35.99	ND
31	2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮	ND	ND	ND	ND	38.70	42.40	ND
32	3,4-二甲基苯乙酮	ND	ND	ND	ND	9.16	ND	ND
33	2',5'-二羟基苯丙酮	ND	ND	ND	ND	ND	21.35	ND
	总计	18.86	9.62	8.14	9.51	112.01	121.92	4.97
酯类化合物								
34	乙酸乙酯	197.52	238.57	189.11	167.52	235.23	172.34	127.58
35	乙酸丙酯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.33
36	乙酸异丁酯	ND	ND	ND	ND	ND	22.88	12.92
37	乙酸丁酯	ND	10.58	5.43	5.71	ND	ND	ND
38	乳酸异丁酯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.33
39	丁酸乙酯	11.91	8.66	5.43	5.71	6.11	ND	5.63
40	乳酸乙酯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.99
41	乙酸异戊酯	137.96	149.11	74.20	79.00	165.98	97.61	73.90
42	2-甲基丁基乙酸酯	18.86	21.16	9.95	10.47	20.37	15.25	9.94
43	γ -丁内酯	ND	ND	ND	ND	10.18	ND	ND
44	己酸乙酯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	29.49
45	3-呋喃甲酸甲酯	ND	ND	ND	ND	ND	56.43	ND
46	辛酸乙酯	31.76	67.34	32.57	26.65	35.64	ND	4.97

续表 2

序号	挥发性化合物	对照组	FC9+Lc37	FC9+Lp90	FC9+Ba68	FC9+La85	FC9+Lb57	FC9+Lf39
47	乙酸苯乙酯	1.99	1.92	ND	1.90	5.09	21.35	0.66
48	癸酸乙酯	2.98	11.54	4.52	ND	ND	ND	ND
	总计	402.97	508.88	321.21	296.96	478.60	385.87	268.75
	醛类化合物							
49	异戊醛	ND	ND	ND	0.95	ND	ND	3.65
50	糠醛	ND	ND	ND	ND	ND	7.78	ND
51	苯甲醛	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4.31
52	3,5-二甲基苯甲醛	19.85	20.20	13.57	ND	ND	ND	ND
53	间苯二甲醛	1.99	ND	3.62	ND	ND	ND	ND
54	5-羟甲基糠醛	ND	ND	ND	ND	ND	6.95	ND
	总计	21.84	20.20	17.19	0.95	0.00	14.73	7.95
	共计	2935.93	2666.60	1998.74	2414.72	2688.30	2544.73	1341.75

注: 结果为三个独立重复的平均值; 标准差均小于平均值的10%; “ND”表示未检出。

物含量最高, 为 508.88 mg/L。乙酸乙酯、乙酸异戊酯为单一和混合菌株发酵羊奶酒中的主要酯类物质, 在所有羊奶酒中均有检出, 且含量较高, 此外在所有羊奶酒中均鉴定出 2-甲基丁基乙酸酯, 但含量不高, 它们均能为羊奶酒提供水果香气。在 Lc37 发酵羊奶酒中还含有较高浓度的辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸丁酯、丁酸乙酯, 它们分别赋予羊奶酒白兰地的香甜味、椰子香味、水果香味以及香槟和菠萝的味道。说明在发酵过程中添加 Lc37 可增加羊奶酒的酯类化合物含量, 使羊奶酒的香气更加浓郁剧烈。乙酸丙酯、乳酸异丁酯、乳酸乙酯和己酸乙酯为 Lf39 发酵羊奶酒中特有的酯类化合物, 这些物质均能为羊奶酒提供水果的香味。说明 Lf39 的加入可以丰富羊奶酒中酯类化合物的种类, 使羊奶酒的香气种类更加丰富。

高浓度的醛类物质会带来异味^[40]。单一和混合菌株发酵羊奶酒中的醛类物质共 6 种, 在 La85 发酵羊奶酒中未鉴定出醛类物质, 其余羊奶酒中均含有 1~2 种醛类物质。单一菌株发酵羊奶酒中的醛类化合物含量最高, 达 21.84 mg/L, 为 3,5-二甲基苯甲醛和间苯二甲醛, 均能为羊奶酒提供特殊的香气。Lb57 发酵羊奶酒中的糠醛和 5-羟甲基糠醛均为其所特有, 可以赋予羊奶酒特殊的芳香甜味。总的来说, 乳酸菌的添加降低了羊奶酒中的醛类物质含量。

通过层次聚类分析评估各样品的挥发性香气成分的组成。如图 8 所示, Lb57 发酵羊奶酒为一类, 香气组成与其他羊奶酒有明显差别, 其中含有较为丰富的酮类物质(环丙酮、环戊酮)。Lf39 发酵羊奶酒为一类, 其挥发性成分含量最低, 但含有最丰富的酯类物质(乳酸乙酯、己酸乙酯)。单一菌株发酵羊奶酒为一类, 酒精发酵有利于酸类物质(正庚酸、L-乳酸)的富集。La85 发酵羊奶酒为一类, 其中含有丰富的酮类和酯类物质(3,4-二甲基苯乙酮、 γ -丁内酯)。Lp90、Lc37 和 Ba68 发酵羊奶酒中的酮类物质和酯类物质(3-甲基-2-庚酮、辛酸乙酯)的成分相近, 归为同一类。

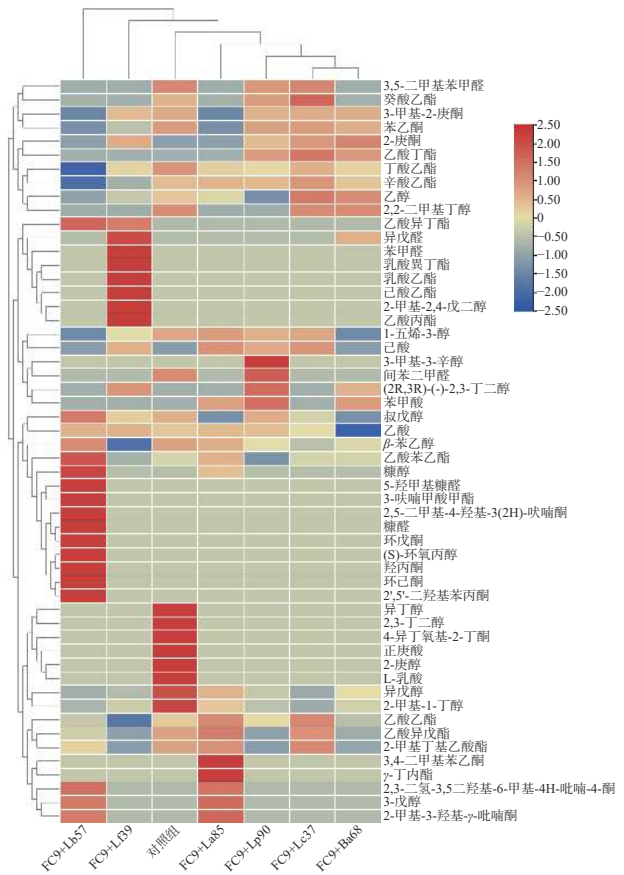


图 8 单一和混合菌株发酵羊奶酒中挥发性化合物热图和聚类分析

Fig.8 Heat map and hierarchical cluster of volatile compounds in goat's milk wine fermented by single and mixed strains

注: 色标表示每个物质的比例浓度, 记为 d^2 (欧几里得度量的平方), 红色表示高浓度, 蓝色表示低浓度。

3 结论

本研究探究了单一酿酒酵母发酵和酿酒酵母与乳酸菌混合发酵羊奶酒在发酵过程中各项理化指标、抗氧化活性及风味成分的变化。由结果可知, 单一和混合菌株发酵羊奶酒的乙醇含量在 6.19%vol~7.28%vol 之间, 符合国家标准中对发酵型奶酒的酒精度要求。乳酸菌和酿酒酵母混合发酵可加快羊奶

酒中的糖分消耗以及酸类物质的积累,使羊奶酒的 pH 显著降低($P<0.05$)。混合发酵使羊奶酒颜色整体变得透亮澄清。此外,乳酸菌的添加会提高羊奶酒的 ABTS⁺自由基清除能力与羟自由基清除能力,表明接种乳酸菌对羊奶酒的抗氧化能力有积极影响。醇类物质是羊奶酒最主要的挥发性物质,主要为乙醇、异戊醇和 2-甲基-1-丁醇。乳酸菌的加入会显著降低羊奶酒中的挥发性物质总量($P<0.05$),但生成了 29 种新的挥发性化合物,表明添加乳酸菌发酵可以赋予羊奶酒新的风味,提高羊奶酒香气的复杂程度,同时一定程度上消除了羊奶酒的膻味,使其具有独特的奶酒香气。乳酸菌和酿酒酵母混合发酵羊奶酒不仅创新了羊奶酒的酿造工艺,还为羊奶酒的脱膻处理提供了理论依据。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 申慧杰, 辛博, 罗红霞, 等. 奶酒功效探究与展望[J]. 中国乳业, 2018(8): 76–78. [SHEN H J, XIN B, LUO H X, et al. Milk wine efficacy exploration and prospect[J]. China Dairy, 2018(8): 76–78.]
- [2] 杨同香, 吴孔阳, 李希琳, 等. 羊乳酒在发酵过程中主要参数变化的研究[J]. 中国酿造, 2017, 36(11): 88–90. [YANG T X, WU K Y, LI X L, et al. Changes of major parameters of goat milk wine during fermentation process[J]. China Brewing, 2017, 36(11): 88–90.]
- [3] 林少华, 李星宇, 罗红霞. 葡萄汁奶酒发酵工艺研究[J]. 中国奶牛, 2020(2): 55–59. [LIN S H, LI X Y, LUO H X. Study on fermentation technology of grape juice milk wine[J]. China Dairy Cattle, 2020(2): 55–59.]
- [4] 常云鹤, 邢敏, 焦超芹, 等. 玫瑰花奶酒的研制及其抗氧化活性[J]. 食品工业, 2021, 42(8): 106–110. [CHANG Y H, XING M, JIAO C Q, et al. Development of rose milk wine and its antioxidant activity[J]. The Food Industry, 2021, 42(8): 106–110.]
- [5] 朱俊杰, 吴天祥, 兰洋, 等. 核桃奶酒的工艺优化[J]. 中国酿造, 2016, 35(3): 156–159. [ZHU J J, WU T X, LAN Y, et al. Optimization of walnut milk wine technology[J]. China Brewing, 2016, 35(3): 156–159.]
- [6] GALDINO O D P C K I, OLIVEIRA M M, OLIVEIRA T A, et al. Fermentative behavior of native Lactobacilli in goat milk and their survival under *in vitro* simulated gastrointestinal conditions[J]. LWT, 2021, 135: 901–905.
- [7] FENG C J, WANG B N, ZHAO A Q, et al. Quality characteristics and antioxidant activities of goat milk yogurt with added jujube pulp[J]. Food Chemistry, 2019, 277: 238–245.
- [8] STERGIADIS S, NØRSKOV P N, PURUP S, et al. Comparative nutrient profiling of retail goat and cow milk[J]. Nutrients, 2019, 11(10): 2282–2282.
- [9] RANADHEERA C S, EVANS C A, BAINES S K, et al. Probiotics in goat milk products: Delivery capacity and ability to improve sensory attributes[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(4): 867–882.
- [10] 苏伟丽. 乳酸菌对羊奶酸奶脱膻效果的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2015. [SU W L. Study on the effect of lactic acid bacteria on the deodorization of goat milk yogurt[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2015.]
- [11] 王明礼, 秦兰霞, 姜云庆, 等. 羊乳中膻味形成机制及脱膻方法的研究进展[J]. 中国乳品工业, 2021, 49(3): 29–36. [WANG M L, QIN L X, JIANG Y Q, et al. Research progress on the formation mechanisms of the odor of goat milk and the methods of deodorization[J]. China Dairy Industry, 2021, 49(3): 29–36.]
- [12] WU C Y, LI T L, QI J, et al. Effects of lactic acid fermentation-based biotransformation on phenolic profiles, antioxidant capacity and flavor volatiles of apple juice[J]. LWT, 2020, 122: 109064–109064.
- [13] KWAU E, MA Y K, TCHABO W, 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.
- [14] TAO Y, SUN D, GÓRECKI A, et al. A preliminary study about the influence of high hydrostatic pressure processing in parallel with oak chip maceration on the physicochemical and sensory properties of a young red wine[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 545–554.
- [15] GOHIL K, MOY R K, FARZIN S, et al. mRNA expression profile of a human cancer cell line in response to *Ginkgo biloba* extract: Induction of antioxidant response and the Golgi system[J]. Free radical research, 2000, 33(6): 38–49.
- [16] 李巧艳, 李思宁, 赵佳莹, 等. 添加瑞士乳杆菌对发酵牦牛乳抗氧化能力的影响[J]. 中国乳品工业, 2023, 51(6): 14–20. [LI Q Y, LI S Y, ZHAO J Y, et al. Effect of *Lactobacillus helveticus* on antioxidant capacity of fermented yak milk[J]. China Dairy Industry, 2023, 51(6): 14–20.]
- [17] 陈树俊, 石玥, 胡洁, 等. 响应面法优化萌发麦芽乳发酵工艺[J]. 食品科学, 2017, 38(16): 64–70. [CHEN S J, SHI Y, HU J, et al. Process optimization by response surface methodology for the development of a beverage based on lactic acid fermentation of quinoa malt[J]. Food Science, 2017, 38(16): 64–70.]
- [18] 曹晶晶. 乳酸菌发酵甘薯淀粉加工浆液饮料的制备及品质特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2022. [CAO J J. Study on preparation and quality characteristics of sweet potato starch processed slurry beverage fermented by lactic acid bacteria[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2022.]
- [19] LI T L, JIANG T, LIU N, et al. Biotransformation of phenolic profiles and improvement of antioxidant capacities in jujube juice by select lactic acid bacteria[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 127859–127859.
- [20] JULIA S, DANIELA G, IGA R, et al. Controlled fermentation of curly kale juice with the use of autochthonous starter cultures[J]. Food Research International, 2021, 149: 110674–110674.
- [21] 王婷婷, 李春, 李佳栋, 等. 乙醇胁迫对植物乳杆菌膜生理及黏附性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 63–69. [WANG T T, LI C, LI J D, et al. Effect of ethanol stress on membrane physiology and adhesion of *Lactobacillus plantarum*[J]. Food Science, 2019, 40(18): 63–69.]
- [22] 赵婧, 高永娇, 孙靖辰, 等. 乳酸菌胞外多糖的研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2023, 35(5): 51–56, 105. [ZHAO J, GAO Y J, SUN J C, et al. Research progress of exopolysaccharide from lactic acid bacteria[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2023, 35(5): 51–56, 105.]

- [23] 杜磊, 张光杰, 王景华. 两种发酵方式制作猕猴桃酸奶酒的工艺优化及对比[J]. *保鲜与加工*, 2018, 18(6): 135-138. [DU L, ZHANG G J, WANG J H. Process optimization and comparison of two fermentation ways for produce the kiwi fruit yoghurt wine[J]. *Storage and Process*, 2018, 18(6): 135-138.]
- [24] 中国国家标准化管理委员会. GB/T 23546-2009 奶酒[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009. [Standardization Administration of China (SAC). GB/T 23546-2009 milk wine[S]. Beijing: China Standard Press, 2009.]
- [25] 孙冰玉, 郑欣茹, 刘琳琳, 等. 凝固剂及加工条件对豆腐凝胶形成及品质影响研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(3): 388-396. [SUN B Y, ZHENG X R, LIU L L, et al. Research progress on the influence of coagulants and processing conditions on the formation and quality of tofu gel[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(3): 388-396.]
- [26] 潘琪浩, 仁青措姆, 高腾云, 等. 羊奶的营养价值、生物学功能及应用[J]. *动物营养学报*, 2023, 35(12): 7584-7594. [PAN Q H, RENQING C M, GAO T Y, et al. Nutritional value, biological functions and application of goat and sheep milk[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(12): 7584-7594.]
- [27] 董振南, 贾兴旺, 原新红. 酒精对脂质过氧化及超氧化物歧化酶的影响[C]. 中国生物物理学会自由基生物学与自由基医学专业委员会. 第五届全国自由基生物学与自由基医学学术讨论会论文摘要汇编. 301 医院生化科, 2000: 1. [DONG Z N, JIA X W, YUAN X H. Effect of alcohol on lipid peroxidation and superoxide dismutase[C]. Committee on Free Radical Biology and Free Radical Medicine of the Chinese Biophysical Society. Compilation of abstracts of the fifth national symposium on free radical biology and free radical medicine. 301 Hospital biochemistry department, 2000: 1.]
- [28] 孟凡博. 乳酸菌发酵牛羊乳产抗氧化肽和 ACE 抑制肽的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022. [MENG F B. Study on antioxidant and ACE peptides from bovine, goat and sheep milk fermented by lactic acid bacteria[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2022.]
- [29] RATCHADAPORN K, ORAPIN K, NATTA L, et al. Changes in physico-chemical, astringency, volatile compounds and antioxidant activity of fresh and concentrated cashew apple juice fermented with *Lactobacillus plantarum*[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(10): 3979-3990.
- [30] GADAGA H T, MUTUKUMIRA N A, NARVHUS A J. The growth and interaction of yeasts and lactic acid bacteria isolated from Zimbabwean naturally fermented milk in UHT milk[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2001, 68(1): 21-32.
- [31] NARVHUS A J, GADAGA H T. The role of interaction between yeasts and lactic acid bacteria in African fermented milks: A review[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2003, 86(1-2): 51-60.
- [32] 尹艳军, 夏文水, 王玉良, 等. 牛乳经酵母菌和乳酸菌发酵生产低醇乳酒的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2005(7): 117-121. [YIN Y J, XIA W S, WANG Y L, et al. A low-alcohol milk beer fermented by a mixed culture of yeast and lactic bacteria[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2005(7): 117-121.]
- [33] 阮文权, 陈坚, 孙胜利, 等. 酯类风味物质微生物代谢机理研究[J]. *生物技术*, 1996(6): 31-34. [RUAN W Q, CHEN J, SUN S L, et al. Mechanism of esters synthesis by *G. penicillatum*[J]. *Biotechnology*, 1996(6): 31-34.]
- [34] 艾对, 张富新, 李延华, 等. 羊奶短中链脂肪酸与羊奶膻味关系的研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(6): 113-116, 121. [AI D, ZHANG F X, LI Y H, et al. Study on correlation between short-medium chain fatty acid and goaty flavor[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(6): 113-116, 121.]
- [35] 贾茹, 刘占东, 马利杰, 等. 电子鼻对山羊奶中致膻游离脂肪酸的识别研究[J]. *中国乳品工业*, 2015, 43(3): 18-21. [JIA R, LIU Z D, MA L J, et al. Recognition of electronic nose for the free fatty acids responsible for goat odour in the goats' milk[J]. *China Dairy Industry*, 2015, 43(3): 18-21.]
- [36] STEFANIE K, YASEMIN K, CAROLINA H, et al. Concentrations of volatile 4-alkyl-branched fatty acids in sheep and goat milk and dairy products[J]. *Journal of Food Science*, 2014, 79(11): 9-14.
- [37] EKNÆS M, HAVREVOLL Ø, VOLDEN H, et al. Fat content, fatty acid profile and off-flavours in goats milk-Effects of feed concentrates with different fat sources during the grazing season[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2009, 152(1-2): 112-122.
- [38] CHEN C, LU Y Q, YU H Y, et al. Influence of 4 lactic acid bacteria on the flavor profile of fermented apple juice[J]. *Food Bioscience*, 2018, 27: 30-36.
- [39] 杨学山, 李洁春, 杨柳, 等. 酿酒酵母抗氧化活性与发酵香气化合物研究[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(9): 423-430. [YANG X S, LI J C, YANG L, et al. Antioxidant activity and fermentation aroma compounds of *saccharomyces cerevisiae* in simulated wine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(9): 423-430.]
- [40] CAGNO D R, FILANNINO P, GOBBETTI M. Lactic acid fermentation drives the optimal volatile flavor-aroma profile of pomegranate juice[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2017, 248: 56-62.