不同酿酒酵母发酵菠萝酒的品质与风味差异比较

顾英婕，陈雪雪，许文静，尹艳艳，胡建锋，路虎，范奇高*

（贵州习酒股份有限公司，贵州遵义 564622）

摘要：为了筛选适合菠萝酒生产的酿酒酵母，该研究利用 SY、D254、DV10、EC1118、K1 共 5 株商业酵母分别发酵菠萝酒，分析比较了不同发酵酒的理化指标、总酚质量浓度、抗氧化活性、有机酸、氨基酸及挥发性风味化合物质量浓度。结果表明：SY 酵母发酵酒中总酚质量浓度（423.49 mg GAE eq.L^{-1}）、还原力（436.33 mg Vc eq.L^{-1}）、DPPH 自由基清除活性（361.92 mg Vc eq.L^{-1}）及 $ABTS^{+}$ 自由基清除活性（219.06 mg Vc eq.L^{-1}）均最高，是其余 4 种酒样的 1.1~1.2 倍。同时，SY 酵母对菠萝浆中的多种优质氮源表现出最高的利用度（消耗率为 61.62%~91.79%）。挥发性风味物质分析显示，SY 发酵酒中化合物种类（70 种）及总相对质量浓度（10 925.05 μg·L^{-1}）最高，分别为其余 4 种酒样的 1.2~1.3 倍、1.2~1.5 倍。偏最小二乘判别及香气活性值（OAV）分析表明，苯乙醛（OAV=388.89）、辛酸乙酯（OAV=472.42）、癸酸乙酯（OAV=9.45）在 SY 发酵酒中贡献最为显著，可作为区分该酒样风味特征的关键标志物。综上，采用 SY 酵母发酵可提升菠萝酒的综合品质与风味表现，以上结果可为菠萝酒的品质评价提供理论依据。

关键词：菠萝果酒；酿酒酵母；抗氧化活性；氨基酸；挥发性风味物质

文章编号：1673-9078(2026)10-311-321 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.10.1139

Comparison of Quality and Flavor Differences in Pineapple Wine Fermented using Different Yeasts

GU Yingjie, CHEN Xuexue, XU Wenjing, YIN Yanyan, HU Jianfeng, LU Hu, FAN Qigao*

(Guizhou Xijiu Co. Ltd., Zunyi 564622, China)

Abstract: To screen for the most suitable yeast for pineapple wine production, five commercial yeasts (SY, D254, DV10, EC1118, and K1) were used for fermentation. The physicochemical properties, total phenolic concentration, antioxidant activity, organic acid composition, amino acid profile, and volatile compounds of the fermented wines were systematically analyzed. The results indicated that SY-fermented wine exhibited the highest total phenolic concentration (423.49 mg GAE eq. L^{-1}), reducing power (436.33 mg Vc eq. L^{-1}), DPPH radical scavenging activity (361.92 mg Vc eq. L^{-1}), and $ABTS^{+}$ radical scavenging activity (219.06 mg Vc eq. L^{-1}), which were 1.1~1.2 times higher than those of the other four wine samples. Furthermore, SY showed the highest utilization efficiency for multiple high-quality nitrogen sources in pineapple, with consumption rates ranging from 61.62% to 91.79%. Analysis of volatile flavor compounds revealed that SY-fermented wine contained the highest number of compounds (70) and total relative mass concentration (10 925.05 μg·L^{-1}), which were 1.2~1.3 times and 1.2~1.5 times higher than those of the other four wine samples, respectively. Partial least squares-discriminant analysis and odor activity value (OAV) analysis identified phenylacetaldehyde (OAV=388.89), ethyl octanoate (OAV=472.42), and ethyl decanoate (OAV=9.45) as the major contributors to the flavor of SY-fermented wine and key markers distinguishing its flavor characteristics. In summary, SY fermentation enhanced the overall quality and flavor profile of pineapple wine. These findings provide a theoretical foundation for evaluating the quality of pineapple wine.

Key words: pineapple wine; *Saccharomyces cerevisiae*; antioxidant activity; amino acid; volatile flavor compounds

收稿日期：2025-08-12；修回日期：2025-10-14；接受日期：2025-11-04

基金项目：贵州省技术创新中心（黔科合平台 JSZX [2025] 002）

作者简介：顾英婕（1998-），女，硕士研究生，研究方向：产品开发，E-mail：18892333852@163.com

通讯作者：范奇高（1995-），男，硕士研究生，工程师，研究方向：产品开发，E-mail：1354326886@qq.com

引文格式：
顾英婕,陈雪雪,许文静,等.不同酿酒酵母发酵菠萝酒的品质与风味差异比较[J].现代食品科技,2026,42(10):311-321.
GU Yingjie, CHEN Xuexue, XU Wenjing, et al. Comparison of quality and flavor differences in pineapple wine fermented using different yeasts [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(10): 311-321.

菠萝为被子植物凤梨科凤梨属植物，明代后期由巴西传入中国，是我国主要南亚热带水果之一。菠萝富含维生素 C（20~40 mg/100 g）、矿物质、菠萝蛋白酶、膳食纤维等多种有益成分，兼具低热量（约 184 kJ/100 g）、低脂肪（＜0.2 g/100 g）的低能量属性，是现代健康饮食的理想选择[1]。我国菠萝主产区集中于广东、海南。目前，菠萝产业仍主要以鲜果销售和初级加工（传统罐头、果汁等）为主，加工形式单一、产品附加值较低[2]。

发酵果酒是以水果或果汁为原料，通过微生物发酵作用将糖类物质转化为酒精及其他风味成分的一类酿造酒。发酵不仅可以对水果原料中的营养成分进行保留与增效，还可以赋予酒体独特的风味特征[3]。菠萝发酵酒的研究主要集中于复配发酵工艺[4]、酒体稳定性[5]、菠萝皮渣加工利用[6]及单一理化指标测定[7]。姜永超等[8]利用 8 株商业酿酒酵母对菠萝汁进行发酵，监测了发酵过程中酒体的糖、酸等理化指标及发酵前后的香气成分变化。结果表明，CECA 酵母菌株发酵速率较快，所得酒液总酸含量较低、多酚保留率较高且酯类物质含量较多，更适用于菠萝果酒酿造，但未对不同酵母发酵酒样的风味物质差异进行系统比较。庞惟俏等[9]分析了 6 株商业酵母发酵菠萝酒的香气组成，发现酯类与醇类为主要挥发性成分，酸类、酚类和醛酮类含量较少，但未进一步阐明不同酒样之间的关键差异性风味物质。贾言言等[10]研究了混菌发酵的接种顺序对菠萝浓缩汁发酵酒香气成分的影响，发现先接种非酿酒酵母 P3-3、再接种酿酒酵母 D254 的发酵方式，能更好地保留原果香的典型特征，但未评估单菌发酵对酒体风味的贡献。

目前，仍缺乏关于不同酿酒酵母发酵菠萝酒综合品质及风味差异性的系统研究。因此，本研究选取 5 株商业酿酒酵母对菠萝浆进行发酵，综合分析 5 种发酵酒的理化指标、总酚质量浓度、体外抗氧化活性、有机酸质量浓度、氨基酸质量浓度及挥发性风味化合物质量浓度，并采用多元统计分析方法及香气活性值（OAV）解析风味差异，结合感官评价筛选出发酵性能优良的酿酒酵母，以期为菠萝深加工产业的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

巴厘菠萝鲜果于 2024 年 7 月购自贵州遵义当地鲜果批发市场，选取无机械损伤、无病害，成熟度适中的优质果实用于制备菠萝浆（清洗、削皮、去眼，再经物理破碎后形成的含有果肉纤维、汁液的浆状物）。研究所用菌株为市售酿酒酵母：SY（安琪酵母股份有限公司）、D254、DV10、EC1118、K1（均购自法国 Lallemand 集团），共计 5 株酵母。

果胶酶，沧州夏盛酶生物技术有限公司；甲醇、2-辛醇（均为色谱级），Sigma-Aldrich 公司；氯化钠（分析纯），成都金山化学试剂有限公司；三氯乙酸（分析纯），上海源叶生物科技有限公司；L-酒石酸、L-苹果酸、L-乳酸、无水柠檬酸、琥珀酸（均为分析标准品，HPLC≥98%），上海源叶生物科技有限公司；乙酸（≥98%，GC），上海麦克林生化科技股份有限公司；Na 系统缓冲液 A、Na 系统缓冲液 B、Na 系统再生液（D）、Na/K 缓冲液、维生素 C、茚三酮、氨基酸标样 17AA/18AA（货号：S000029），赛卡姆（北京）科学仪器有限公司。

1.2 仪器与设备

8890-5977B 型气相色谱－质谱联用，美国 Agilent 公司；Multiskan SkyHigh 1530 型全波长酶标仪，美国赛默飞公司；DMA 4501 型全酒分析仪，安东帕（上海）商贸有限公司；S-433 Dup 型全自动氨基酸分析仪，赛卡姆（北京）科学仪器有限公司；1260 Infinity 型高效液相色谱仪，美国 Agilent 公司。

1.3 研究方法

1.3.1 发酵工艺

将菠萝浆与水以 5:1 的质量比（菠萝浆 : 水）混合制备发酵基质，添加白砂糖调整发酵基质的初始含糖量至 220 g·kg^{-1} 左右，果胶酶添加量为 2 mL·kg^{-1}、焦亚硫酸钾添加量为 100 mg·kg^{-1}。将商业酿酒酵母按 1×10^{7} CFU/mL 的接种量接入处理后的菠萝浆，发酵

温度为 20 ℃。发酵结束后将菠萝原酒于 4 ℃冰箱陈酿 3 个月，再经无菌过滤后获得菠萝发酵酒。5 种菠萝发酵酒均以酵母菌株命名（即 SY、D254、DV10、EC1118、K1）。

1.3.2 理化指标的测定

菠萝发酵酒酒精度采用全酒分析仪进行测定；总糖（以葡萄糖计）、总酸（以酒石酸计）、干浸出物质量浓度测定方法参考 GB/T 15038-2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》[11]；甲醇质量浓度测定方法参考 GB 5009.266-2016《食品安全国家标准 食品中甲醇的测定》[12]。

1.3.3 总酚及抗氧化活性的测定

菠萝发酵酒总酚质量浓度采用福林酚比色法，参考 Cujic 等[13]的方法略作修改。菠萝发酵酒的体外抗氧化活性，即 DPPH 自由基清除活性、$ABTS^+$ 自由基清除活性、还原力参照 Du 等[14]的方法略作修改。

1.3.4 有机酸的测定

采用高效液相色谱法对菠萝酒样中 6 种不同有机酸进行检测[15]。色谱条件：色谱柱 Venusil ASB C18（4.6 mm×250 mm，5.0 μm），KH_2PO_4 缓冲液（pH 值 2.0）为水相，甲醇溶液为有机相，水相和有机相以体积比 95:5 混合，紫外检测波长 210 nm，流速 0.8 $mL·min^{-1}$，进样量 10 μL，柱温 30 ℃，二极管阵列检测器。

1.3.5 氨基酸的测定

取 1.0 mL 酒样，加入 4.0 mL 质量浓度为 100 $g·L^{-1}$ 的三氯乙酸（TCA）溶液，混合均匀，室温静置 1 h，然后于 10 000 $r·min^{-1}$ 离心 10 min，取上清液过 0.22 μm 水系膜上机，采用全自动氨基酸分析仪进行检测[16]。

1.3.6 挥发性风味物质的测定

根据 Tian 等[17]的方法稍作修改，准确移取 6 mL 样品至 20 mL 顶空瓶中，加入 3 g 氯化钠至饱和状态，再加入 20 μL 内标 2-辛醇（质量浓度为 30 $μg·L^{-1}$）。

顶空固相微萃取条件：样品配制完成后进行萃取分析（50 μm/30 μm CAR/DVB/PDMS 的 SPME 纤维萃取头用于风味物质的萃取），样品先在孵化器中 50 ℃条件下孵化 5 min，并将转速设置为 250 $r·min^{-1}$，萃取时间设置为 30 min，搅拌萃取结束后，在 250 ℃的进样口解吸附 5 min。

GC 条件：采用不分流模式，载气为氦气（纯度≥99.999%），流量为 1.5 $mL·min^{-1}$，色谱柱为 DB-FFAP（60 m× 0.25 mm×0.25 μm，J&W Scientific 公司）。升温程序如下：初始温度 50 ℃，保持 2 min，再升温（15 ℃$·min^{-1}$）至 230 ℃，保持 15 min。

MS 条件：采用扫描模式采集数据，扫描范围为 30.00~350.00 u；以 EI 为电离源，电离能量为 70 eV，离子源温度 260 ℃。

化合物鉴定：采用 MassHunter 未知物分析工作站进行数据分析，将色谱峰的具体质谱信息与 NIST 23 谱库检索信息进行比较，筛选匹配因子大于 70 的化合物。用工作站计算保留指数，再与 NIST 数据库中报道的保留指数进行对比，筛选差值在 50 以内的物质，最后进行挥发性风味物质相对质量浓度及 OAV 值的计算。

1.3.7 感官评价方法

参照 GB/T 15038-2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》[11]，由 10 名（5 男 5 女）经过培训的具有一定感官评定经验的评价员，按照发酵酒感官评分标准的要求，从色泽、澄清度、香气、滋味、典型性五个方面对各酒样进行感官评定，根据感官评价标准打分，结果经标准化处理后用雷达图进行分析。

表 1 菠萝果酒感官评分标准

Table 1 The sensory scoring criteria for pineapple wine

项目	评价指标	分数(分)
色泽（5）	金黄色、明亮	4~5
	金黄色、不透亮	3~4
	没有菠萝酒特有的黄色	<2
澄清度（5）	澄清透亮、无明显悬浮物	4~5
	不透明，轻微有悬浮物	3~4
	酒体浑浊，有明显悬浮物	<2
香气（30）	具有协调的菠萝香和酒香	25~30
	仅有果香或菠萝香	20~25
	无正常香气	<20
滋味（40）	酒体丰满、酸甜适口、柔细轻快	30~40
	酒体较酸或较涩	20~30
	酒体很酸、涩	<20
典型性（20）	具有菠萝和果酒风格	15~20
	典型性不明显	10~15
	不具有典型性	<10

1.4 数据处理

所有试验数据以 $\bar{x}\pm s$ 表示（n=3），通过 SPSS Statistics 26.0 软件进行实验数据的显著性分析，$P<0.05$ 表示差异显著。利用 Origin 2021 软件绘制富集弦图、雷达图、总离子流色谱图，利用 Graphpad Prism 9.0 软件绘制其他图，利用 SIMCA 14.1 软件对数据进行偏最小二乘判别分析。

表 2 不同酵母发酵菠萝酒理化指标

Table 2 Physicochemical indexes of pineapple wine fermented with different yeasts

发酵酒类型	酒精度/(% vol)	总酸/(g·L^{-1})	总糖/(g·L^{-1})	甲醇/(mg·L^{-1})	干浸出物/(g·L^{-1})
SY	12.89 ± 0.11^{a}	8.74 ± 0.07^{a}	2.37 ± 0.01^{b}	4.49 ± 0.01^{bc}	24.93 ± 0.12^{a}
D245	12.99 ± 0.11^{a}	8.16 ± 0.06^{b}	2.48 ± 0.03^{b}	4.47 ± 0.01^{c}	24.53 ± 0.46^{a}
DV10	11.69 ± 0.10^{b}	7.82 ± 0.07^{c}	2.75 ± 0.08^{a}	4.55 ± 0.02^{b}	21.70 ± 0.66^{b}
EC1118	11.81 ± 0.10^{b}	8.29 ± 0.06^{b}	2.74 ± 0.05^{a}	4.76 ± 0.02^{a}	25.20 ± 0.17^{a}
K1	11.74 ± 0.10^{b}	8.69 ± 0.07^{a}	2.33 ± 0.05^{b}	4.51 ± 0.01^{bc}	22.33 ± 0.12^{b}

注：同列不同小写字母表示不同酵母发酵酒之间差异显著（P<0.05）。

2 结果与讨论

2.1 不同酵母发酵菠萝酒理化指标分析

不同酵母发酵菠萝酒的理化指标如表 2 所示。结果显示，5 种菠萝发酵酒的酒精度在 11.69~12.99% vol 之间，总酸质量浓度在 7.82~8.74 g·L^{-1} 之间；总糖残留量均低于 4 g·L^{-1}，即基本完成发酵；同时，所有菠萝酒中甲醇质量浓度均远低于国标 GB/T 15037-2006《葡萄酒》[18]限值（红葡萄酒≤400 mg·L^{-1}，白、桃红葡萄酒≤250 mg·L^{-1}）。5 种菠萝发酵酒中干浸出物质量浓度在 21.70~25.20 g·L^{-1} 之间，其中，SY、D254、EC1118 发酵酒的干浸出物质量浓度显著高于 DV10、K1 发酵酒。发酵酒中干浸出物的含量受到原料中含糖量、有机酸、酚类物质等的影响，对酒体口感及风味有重要作用，可作为评价风味浓郁度和品质稳定性的关键指标[19]。

2.2 不同酵母发酵菠萝酒的总酚质量浓度和抗氧化活性

酚类化合物作为果酒中的天然抗氧化成分，对色泽、香气、涩味和苦味等感官品质起关键作用，是衡量果酒生物活性成分的重要指标之一[20]。图 1a 显示，5 种发酵菠萝酒中总酚质量浓度在 393.02~423.49 mg GAE eq.L^{-1} 范围之间，不同酿酒酵母发酵酒的总酚质量浓度有显著性差异。其中，SY 发酵酒中总酚质量浓度最高（423.49 mg GAE eq.L^{-1}），是其余 4 种发酵酒的 1.1 倍。选取还原力、ABTS^{+} 自由基清除活性、DPPH 自由基清除活性三个指标对 5 种菠萝发酵酒的抗氧化活性进行评价。5 种菠萝发酵酒的还原力在 368.07~436.33 mg Vc eq.L^{-1} 之间；DPPH 自由基清除活性在 288.83~361.92 mg Vc eq.L^{-1} 之间；ABTS^{+} 自由基清除活性在 185.06~219.06 mg Vc eq.L^{-1} 之间。总体来说，5 种菠萝发酵酒的还原力和 DPPH 自由基清除活性要高于 ABTS^{+} 自由基清除活性，这可能与菠萝自身维生素 C 含量较高以及菠萝发酵酒中酚酸类物质的组成有关[21]。其中，SY 发酵酒的还原力（436.33 mg Vc eq.L^{-1}）、DPPH 自由基清除活性（361.92 mg Vc eq.L^{-1}）、ABTS^{+} 自由基清除活性（219.06 mg Vc eq.L^{-1}）均最高，是其余 4 种发酵酒的 1.1~1.2 倍。

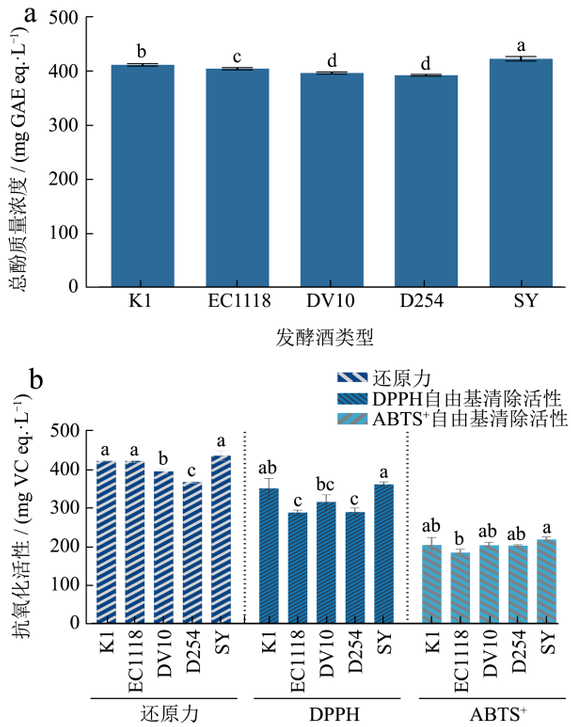


图 1 不同酵母发酵菠萝酒的总酚质量浓度和抗氧化活性

Fig.1 Total phenolic concentration and antioxidant activity of pineapple wine fermented with different yeasts

注：图中不同小写字母表示不同酵母发酵酒之间差异显著（P<0.05）。下图同。

2.3 不同酵母发酵菠萝酒的有机酸质量浓度

有机酸是影响发酵果酒风味和品质的关键因素之一，其作为果酒酸度的主要贡献者，对果酒口感的平衡性有直接影响。由图 2 可知，菠萝（5.61 g·L^{-1}）及其 5 种发酵酒（5.74~6.78 g·L^{-1}）的主体有机酸是柠檬酸。柠檬酸是许多热带、亚热带水果中的主要有机酸，可以赋予发酵酒明亮、清爽的酸感。但相比以苹果酸

为主的水果原料，酵母代谢柠檬酸的效率更低，发酵速度较慢[22]。发酵前后酒石酸、乳酸的质量浓度较为稳定，这可能是因为酒石酸难以被微生物代谢，且酿酒酵母在发酵过程中几乎不产生乳酸[23]。研究表明[24]，酵母通过糖代谢（糖酵解、三羧酸循环等）、氨基酸代谢可产生一定量的琥珀酸；柠檬酸则作为三羧酸循环的中间产物，在发酵后也会有轻微增加。发酵后 5 种菠萝发酵酒中苹果酸的质量浓度显著降低，可能是因为酿酒酵母在发酵过程中可通过苹果酸－天冬氨酸穿梭系统和细胞质苹果酸酶两条代谢路径，将苹果酸高效转化为能量或代谢中间物[25]。此外，不同酵母发酵菠萝酒中乙酸质量浓度存在显著性差异，EC1118、K1 菠萝发酵酒中乙酸质量浓度较高，分别为 1.56、1.14 g·L^{-1}。乙酸作为酵母糖代谢过程的副产物，其形成会受到酵母菌株、糖质量浓度、pH 值及发酵原料等因素的影响。当发酵酒中乙酸质量浓度较高时，表现为醋酸味、刺激感增强、风味失衡，可能会对酒体产生负面影响[26]。

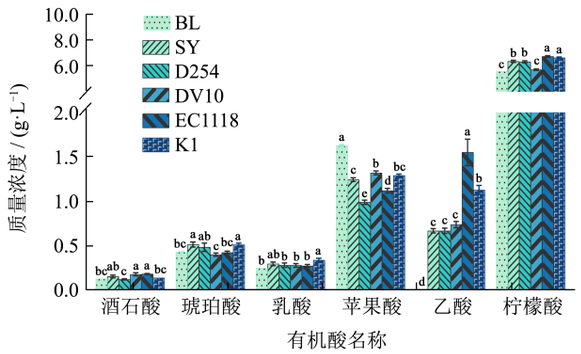


图 2 不同酵母发酵菠萝酒的有机酸质量浓度

Fig.2 Organic acid concentration of pineapple wine fermented with different yeasts

注：“BL”为菠萝原浆与水以 5:1 的质量比（菠萝：水）混合后的发酵基质。

2.4 不同酵母发酵菠萝酒的氨基酸质量浓度

对菠萝及其 5 种发酵酒中 17 种氨基酸（天冬氨酸均未检出）的质量浓度进行了测定。图 3 显示，不同酵母发酵菠萝酒的氨基酸质量浓度差异显著，这可能是由于不同酵母菌株具有不同的代谢途径和酶系，导致它们在氨基酸合成和降解能力上有差异[27]。发酵前，菠萝中苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸、丙氨酸的质量浓度较高，分别为 89.88、392.27、67.56、75.09 mg·L^{-1}；发酵后，菠萝中的苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸、丙氨酸、缬氨酸、蛋氨酸被大量消耗（平均消耗率在 42.52%~88.84% 之间，EC1118 发酵酒除外），脯氨酸则大量生成（平均生成率为 94.36%）。这是由于酵母菌在生长代谢过程中会启动氮代谢调控机制，优先消耗容易利用的优质氮源（如苏氨酸、丝氨酸等）来快速繁殖；在发酵中后期，酒体中的酒精浓度及渗透压不断升高，脯氨酸的大量积累则可帮助酵母细胞在高压环境下维持细胞活性和结构稳定性[28]。研究表明，酿酒酵母能够通过 Ehrlich 途径等特定生化代谢机制，将果酒中的氨基酸转化为高级醇、酯类等风味物质及其前体。例如，亮氨酸可被转化为异戊醇，缬氨酸可转化为异丁醇，苯丙氨酸则可作为苯乙醇的合成前体[29]。在 5 种发酵酒样中，SY 酵母对菠萝发酵基质中的多种可同化氮源（苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸、丙氨酸、缬氨酸）表现出最高的利用程度（消耗率在 61.62%~91.79% 之间），这预示着其具有更高的氮代谢活性、更强的发酵能力和风味物质产生潜力[30]。

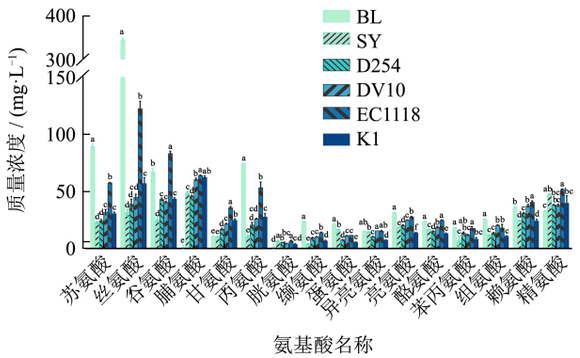


图 3 不同酵母发酵菠萝酒的氨基酸质量浓度

Fig.3 Amino acid concentration of pineapple wine fermented with different yeasts

注：“BL”为菠萝原浆与水以 5:1 的质量比（菠萝：水）混合后的发酵基质。

2.5 不同酵母发酵菠萝酒挥发性风味化合物的差异分析

采用顶空固相微萃取－气相色谱－质谱（Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS）联用仪测定了 5 种菠萝发酵酒样挥发性风味化合物的种类及质量浓度，不同酵母发酵菠萝酒挥发性风味化合物的总离子流色谱图见图 4a。5 种酒样中共检测到 87 种挥发性风味化合物，包括酯类 43 种、醇类 12 种、酸类 9 种、醛酮类 6 种、萜烯类 4 种、内酯类 4 种、酚类 5 种及其他类化合物 4 种；菠萝发酵酒的香气以酯类和醇类为主，其中辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸乙酯、己酸乙酯、异戊醇化合物质量浓度均较高，表现出以浓郁热带果香、醇厚发酵酒香为主导的风味特征[31]。不同酿酒酵母对菠萝酒中挥发性风味化合物的种类和数量有显著影响，SY 发酵酒的挥发性风味化合物有 70 种（图 4b），是其余 4 种菠萝酒样的 1.2~1.3 倍；同时，其总相对质量浓

度为 10 925.05 μg·L^{-1}（图 4c），为 5 种菠萝酒样中最高。此外，5 种菠萝酒样中主体酯类（辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸乙酯、己酸乙酯）在SY发酵酒中检测到最高含量，其四大酯的总相对质量浓度为 5 938.82 μg·L^{-1}，是其余 4 种酒的 1.4~2.4 倍。

采用偏最小二乘判别分析（Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA）评价模型探究不同酿酒酵母发酵菠萝酒挥发性风味化合物的差异，图 5a 的 PLS-DA 得分图显示，不同菠萝酒的样本点呈现出清晰的分离趋势；由 200 次置换检验评价结果可知（图 5b），模型预测指数（Q^2）为 0.679，Q^2＞0.5 且其截距＜0，表示该模型可靠、有强预测能力、且不存在过拟合[32]。变量在投影中的重要性（Variable Importance in Projection, VIP）可用于筛选 PLS-DA 模型中对区分组别贡献最大的关键变量。对不同酵母发酵菠萝酒的挥发性风味化合物进行差异筛选，共鉴定出 47 种 VIP＞1 的关键化合物（表 3），包括酯类 26 种、醇类 6 种、酸类 4 种、醛酮类 4 种、萜烯类 2 种、内酯类 2 种、酚类 2 种及其他类化合物 1 种。

挥发性风味化合物的气味活性值（Odor Activity Value, OAV）与发酵果酒的香气品质密切相关，OAV ≥1 的化合物对香气特征具有重要贡献；而 0.1≤OAV≤1 且气味属性相近的化合物，可通过协同效应共同影响果酒的整体香气轮廓[33]。为了进一步分析不同酿酒酵母发酵菠萝酒的差异香气成分，根据 VIP＞1、OAV≥0.1 的标准，共筛选出 14 种不同菠萝发酵酒样的特征挥发性风味化合物，包括酯类 13 种、醛类 1 种（表 3 中编号为 1~14）。5 种菠萝发酵酒样中辛酸乙酯、辛酸异戊酯的 OAV 均高于 100，表明上述两种化合物可能是菠萝酒中的关键香气成分；庚酸乙酯、肉桂酸乙酯、棕榈酸乙酯、癸酸乙酯、3-甲硫基丙酸乙酯、乙酸异丁酯的 OAV 均高于 1，表明这些差异化合物可能对区分不同酵母发酵菠萝酒的香气特征有重要作用；月桂酸乙酯、乙酸异戊酯、丁酸甲酯、乳酸乙酯、乙酸乙酯的 OAV 在 0.1~1 之间，表明这些化合物对增强菠萝酒果香、丰富酒体香气轮廓具有一定的积极贡献。酯类具有独特的挥发性特征和低感知阈值属性，能够赋予酒体丰富而愉悦的花果香，是构建果酒复杂香气轮廓的核心成分[34]。菠萝酒四大主体酯类中辛酸乙酯（OAV=472.42）、癸酸乙酯（OAV=9.45）的 OAV 值在 SY 发酵酒中最为突出，分别是其他 4 种酒样的 1.3~1.9、1.2~1.8 倍。上述两类物质多具有强烈、圆润的果香（菠萝、香蕉等），可赋予酒体浓郁、饱满的热带水果香气特征。此外，仅在 SY 发酵酒中检测到苯乙醛（OAV=388.89）化合物。研究表明，醛酮类物质对果酒的香气特征、氧化风味和陈酿潜力具有关键影响，苯乙醛独特的杏仁香和花香则可在一定程度上提升 SY 发酵酒样的香气复杂性[35]。

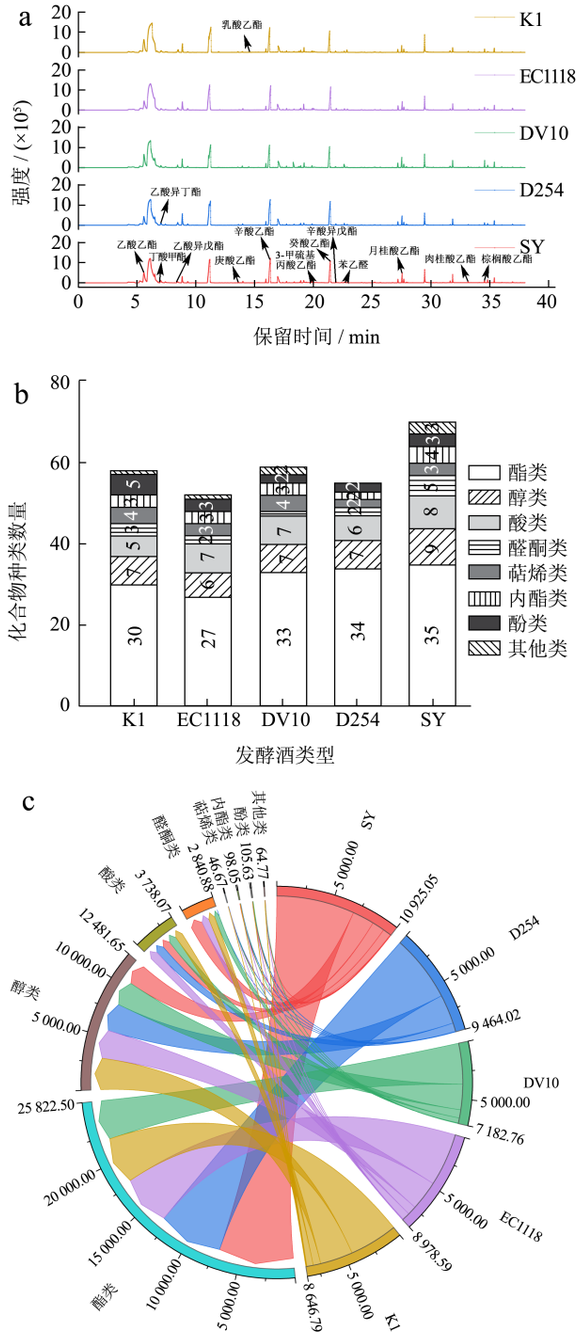


图 4 不同酵母发酵菠萝酒总离子流色谱图及挥发性风味化合物分析

Fig.4 Total ion chromatograms and analysis of volatile compounds in pineapple wine fermented with different yeasts

注：（a）总离子流色谱图；（b）挥发性化合物种类柱状图；（c）挥发性化合物相对质量浓度富集和弦图，不同色带面积表示该处理组在各挥发性化合物中相对质量浓度（μg·L^{-1}）。

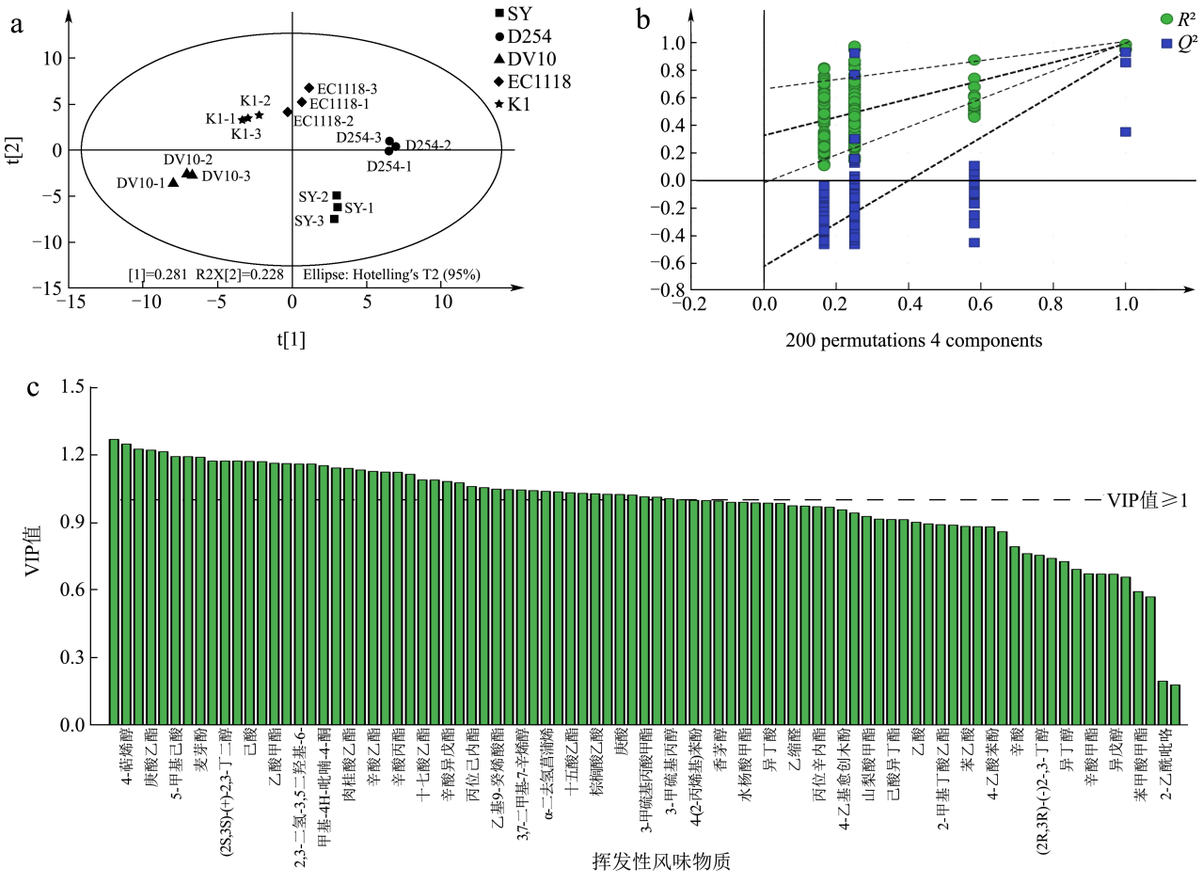


图 5 不同酵母发酵菠萝酒的挥发性风味化合物 PLS-DA 分析

Fig.5 PLS-DA analysis of volatile compounds in pineapple wine fermented with different yeasts

注:(a) PLS-DA 得分图;(b) 模型交叉验证结果;(c) 变量重要性投影 VIP 图。

2.6 不同酵母发酵菠萝酒的感官评价

5 种菠萝发酵酒的感官评价结果如图 6 所示。外观方面(色泽、澄清度),5 种发酵酒的酒体均澄清透明、呈金黄色,无明显差异;香气品质方面,SY 发酵酒的果香、酒香、花香纯正优雅、愉悦协调,可能与其挥发性风味物质在种类和质量浓度上的显著优势密切相关。研究表明,酯类、高级醇、醛酮类等物质是果酒香气的重要组成部分,SY 酒样中辛酸乙酯(OAV=472.42)、癸酸乙酯(OAV=9.45)、苯乙醛(OAV=388.89)等关键香气活性物质的较高积累,显著增强了其酒体中水果甜香与花香的复合表现[35];滋味方面,SY 发酵酒样酒体丰满、口感清爽、微酸,其余 4 种酒样则口感略不协调、回味较苦。这可能与发酵过程中高级醇等副产物的积累有关,SY 发酵酒中异戊醇、异丁醇的总相对质量浓度(1 751.33 μg·L^{-1})显著低于其余 4 种发酵酒,降低了高级醇给酒体带来的刺激感、粗糙感和苦味[34];典型性方面,SY 发酵酒风格突出、菠萝香最典型,可能与其香气轮廓中检测到较高水平的菠萝特征香气成分(辛酸乙酯、癸酸乙酯、乙酸乙酯、己酸乙酯等)有关[40]。综合评价结果显示,SY 发酵酒感官评价得分最高(85.43),其感官品质最佳。

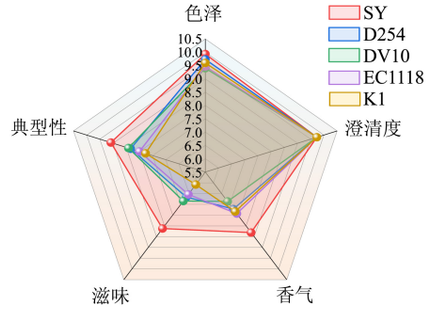


图 6 不同酵母发酵菠萝酒的感官评价结果

Fig.6 Sensory evaluation results of pineapple wine fermented with different yeasts

注:图中结果是经标准化处理后再用雷达图进行绘制而成。

表 3 不同酵母发酵菠萝酒的差异挥发性风味化合物筛选

Table 3 Screening of different volatile compounds in pineapple wine fermented with different yeasts

编号	挥发性风味化合物	保留时间/min	保留指数 *	香气阈值/(μg·L^{-1})[32,36-39]	香气描述	SY	D254	DV10	EC1118	K1	VIP 值
1	苯乙醛	22.73	1 646	0.006 3	花香、甜香、杏仁味	2.45 ± 0.34	/	/	/	/	1.168 89
2	辛酸乙酯	16.33	1 435	5	甜润果香（梨、菠萝）	2 362.08 ± 169.67^{a}	1 688.18 ± 180.33^{b}	1 228.34 ± 15.80^{c}	1 752.87 ± 61.65^{b}	1 328.23 ± 176.05^{c}	1.126 04
3	辛酸异戊酯	21.91	1 670	0.125	果香、皂香	24.70 ± 2.82^{c}	46.19 ± 9.02^{ab}	28.28 ± 4.75^{c}	49.69 ± 6.53^{a}	31.78 ± 6.57^{bc}	1.081 31
4	庚酸乙酯	13.62	1 341	0.3	新鲜果香	12.25 ± 2.55^{ab}	22.05 ± 7.35^{a}	11.2 ± 0.52^{b}	11.28 ± 1.13^{ab}	13.90 ± 4.30^{ab}	1.220 18
5	肉桂酸乙酯	33.17	2 156	1.45	果香、油脂感、略带肉桂香	19.71 ± 1.61^{ab}	20.1 ± 3.53^{ab}	21.12 ± 1.09^{ab}	23.84 ± 2.02^{a}	18.35 ± 0.41^{b}	1.139 36
6	棕榈酸乙酯	34.55	2 288	1.5	微弱脂肪味	50.71 ± 13.26^{b}	80.61 ± 38.96^{ab}	111.32 ± 39.26^{a}	57.40 ± 7.09^{ab}	57.66 ± 21.33^{ab}	1.026 46
7	乙酸异丁酯	7.04	1 018	30	成熟水果香、熟透香蕉味	/	59.47 ± 7.35	/	/	/	1.224 87
8	癸酸乙酯	21.42	1 648	200	浓郁果香（菠萝、香蕉）、甜香、油脂香	1 890.75 ± 121.06^{a}	1 237.92 ± 65.88^{bc}	1 118.18 ± 77.35^{c}	1 528.29 ± 155.22^{bc}	1 061.89 ± 184.89^{c}	1.213 39
9	3-甲硫基丙酸乙酯	19.89	1 570	7	洋葱、大蒜样气味	29.33 ± 1.72^{b}	32.40 ± 2.84^{ab}	39.02 ± 3.67^{a}	39.07 ± 1.21^{a}	31.91 ± 3.73^{ab}	1.122 66
10	月桂酸乙酯	27.54	1 856	500	花果香、蜡香	314.75 ± 15.31^{ab}	419.36 ± 121.20^{a}	319.06 ± 9.67^{ab}	311.68 ± 27.53^{ab}	200.12 ± 29.17^{b}	1.171 6
11	乙酸异戊酯	8.84	1 126	860	强烈的香蕉、菠萝香气	254.34 ± 20.57^{c}	542.08 ± 87.12^{a}	280.61 ± 4.47^{bc}	392.99 ± 13.99b	326.29 ± 63.01^{bc}	1.158 39
12	丁酸甲酯	6.68	983	81	苹果、菠萝、果香	13.39 ± 3.54	14.60 ± 1.67	10.49 ± 1.03	/	/	1.131 92
13	乳酸乙酯	14.48	1 345	14	甜香、奶油香	/	/	/	/	4.04 ± 0.06	1.044 74
14	乙酸乙酯	5.58	900	7 500	强烈果香、明显溶剂香	923.76 ± 171.40^{a}	883.1 ± 45.41^{ab}	/	/	601.76 ± 77.59^{b}	1.160 56
15	2,3-丁二醇	19.63	1 556	668 000	水果味、奶油味、脂肪味	40.08 ± 2.96	/	/	/	30.84 ± 3.56	1.268 12
16	4-萜烯醇	20.68	1 601	5 000	胡椒、木质味	/	1.71 ± 0.11^{b}	2.96 ± 0.01^{ab}	3.19 ± 0.29^{a}	2.51 ± 0.78^{ab}	1.246 96
17	丁二酸二乙酯	22.64	1 687	353 193.25	浓郁的酒曲香、水果香	5.06 ± 0.83	/	/	/	/	1.191 33
18	麦芽酚	30.62	1 968	35 000	焦糖香、甜香	2.99 ± 0.52	/	/	/	/	1.188 88
19	对乙烯基愈疮木酚	34.1	2 190	10 000	烟熏味、药味	7.06 ± 2.23^{b}	10.4 ± 1.46^{b}	10.70 ± 1.40^{b}	18.73 ± 3.21^{a}	7.52 ± 1.96^{b}	1.171 92
20	己酸	27.69	1 861	3 000	汗味、奶酪味	107.95 ± 8.42^{ab}	93.92 ± 2.63^{b}	87.32 ± 9.40^{bc}	110.74 ± 9.74^{a}	79.42 ± 2.33^{c}	1.170 54
21	苯乙酸乙酯	26.31	1 785	406	蜂蜜香、花香	1.68 ± 0.21^{abc}	1.41 ± 0.05^{bc}	1.31 ± 0.01^{c}	1.83 ± 0.07^{ab}	2.00 ± 0.17^{a}	1.141 05
22	辛酸丙酯	18.34	1 504	13 153	果香、蜡香	2.22 ± 0.39	/	3.38 ± 0.38	/	/	1.122 04
23	癸酸异戊酯	27.99	1 350	1 122	果香、油脂感	12.77 ± 1.55^{b}	25.27 ± 7.19^{a}	13.01 ± 0.79^{b}	17.93 ± 1.81^{ab}	11.42 ± 2.43^{b}	1.112 8
24	正丙醇	7.51	1 038	306 000	酒精味	/	/	51.44 ± 1.70	/	31.84 ± 5.87	1.075 15
25	正壬酸	33.36	2 169	500	脂肪味	2.15 ± 0.26^{ab}	/	2.77 ± 0.18^{a}	1.79 ± 0.28^{b}	/	1.053 55

续表3

编号	挥发性风味化合物	保留时间/min	保留指数 *	香气阈值/(μg·L^{-1})[32,36-39]	香气描述	SY	D254	DV10	EC1118	K1	VIP 值
26	2、3、5-三甲基吡嗪	16.05	1 413	729.86	坚果香	2.81 ± 0.74	/	1.12 ± 0.02	/	/	1.040 59
27	4-甲基-1-戊醇	13.51	1 311	34 400	醇香	2.72 ± 0.41^{a}	1.16 ± 0.09^{b}	/	0.94 ± 0.02^{b}	/	1.034 92
28	丙酸乙酯	6.31	951	1 800	清新果香	2.81 ± 0.51	1.67 ± 0.03	/	/	/	1.024 56
29	庚酸	30	1 953	3 000	脂肪味	1.29 ± 0.25^{b}	2.44 ± 0.19^{a}	1.53 ± 0.24^{b}	/	/	1.023 3
30	壬酸乙酯	18.78	1 521	1 300	果香、花香	7.75 ± 0.86^{c}	11.51 ± 2.27^{bc}	19.46 ± 6.09^{b}	32.01 ± 6.47^{a}	19.69 ± 4.19^{b}	1.020 76
31	3-羟基-2-丁酮	14.3	1 287	55	奶油香、脂肪香	/	/	/	1.86 ± 0.03	1.47 ± 0.18	1.011 56
32	3-甲硫基丙醇	24.75	1 702	668 000	洋葱、大蒜样气味、低浓度时肉香	6.20 ± 0.30^{ab}	13.10 ± 4.31^{a}	4.79 ± 0.13^{b}	12.24 ± 1.41^{a}	7.64 ± 0.67^{ab}	1.004 79
33	5-甲基己酸	29.05	1 914	—	—	10.57 ± 0.33	/	/	/	/	1.191 74
34	(2S,3S)-(+)-,3-丁二醇	20.04	1 584	—	—	44.35 ± 4.67^{a}	34.61 ± 1.83^{b}	23.17 ± 1.48^{c}	/	/	1.171 71
35	乙酸甲酯	25.6	827	—	—	/	/	/	/	1.92 ± 0.21	1.161 84
36	羟基丙酮	13.92	1 317	—	—	4.93 ± 0.18^{a}	2.08 ± 0.12^{b}	/	/	1.46 ± 0.17^{b}	1.158 43
37	2,3-二氢-3,5 二羟基-6-甲基-4H-吡喃-4-酮	35.18	2 266	—	—	1.63 ± 0.11	/	/	/	/	1.151 39
38	十七酸乙酯	36.01	2 365	—	—	/	/	9.21 ± 0.44	/	/	1.087 91
39	十八酸乙酯	37.62	2 467	—	—	/	/	4.80 ± 0.29	/	/	1.087 42
40	丙位己内酯	24.13	1 689	—	—	12.85 ± 1.51^{a}	/	6.89 ± 0.71^{b}	/	7.38 ± 0.39^{b}	1.058 66
41	乙基 9-癸烯酸酯	22.87	1 680	—	—	/	27.47 ± 1.80^{b}	/	21.60 ± 1.98^{b}	68.58 ± 13.23^{a}	1.047 22
42	3,7-二甲基-7-辛烯醇	25.9	1 944.2	—	—	8.45 ± 0.80	/	4.96 ± 0.81	/	/	1.043 35
43	α-二去氢莴蒲烯	29.88	1 918	—	—	1.60 ± 0.40^{b}	2.94 ± 0.31^{a}	1.54 ± 0.13^{b}		1.72 ± 0.40^{b}	1.037 24
44	十五酸乙酯	33.14	2 179	—	—	1.51 ± 0.26^{b}	1.51 ± 0.21^{b}	3.86 ± 0.35^{a}	/	/	1.030 92
45	癸酸正丙酯	23.79	1 750	—	—	1.55 ± 0.24	/	1.78 ± 0.11	/	/	1.028 28
46	3-甲硫基丙酸甲酯	18.92	1 525	—	—	56.28 ± 4.34^{a}	55.62 ± 5.54^{a}	43.56 ± 0.22^{b}	50.49 ± 1.99^{ab}	55.42 ± 5.54^{a}	1.013 22
47	γ-丁内酯	22.1	1 643	—	—	4.26 ± 1.32	3.49 ± 0.01	/	6.43 ± 2.96	3.55 ± 0.22	1.000 07

注：同行不同小写字母表示不同酵母发酵酒之间差异显著（$P<0.05$）；* 化合物在 DB-FFAP 色谱柱上的保留指数；—未查到；/ 未检出。

3 结论

实验分析了 5 株酿酒酵母对菠萝发酵酒品质和风味的影响。结果表明，SY 发酵酒中总酚质量浓度（423.49 mg GAE eq. L^{-1}）、还原力（436.33 mg Vc eq. L^{-1}）、DPPH 自由基清除活性（361.92 mg Vc eq. L^{-1}）、$ABTS^{+}$ 自由基清除活性（219.06 mg Vc eq. L^{-1}）均最高，是其余 4 种发酵酒的 1.1~1.2 倍，展现出较强的抗氧化能力。同时，SY 酵母对菠萝浆中的多种可同化氮源（苏氨酸、丝氨酸、谷氨酸等）表现出最高的利用度（消耗率在 61.62%~91.79% 之间），这预示着其具较优的发酵性能和产香潜力。挥发性风味物质分析表明，SY 发酵酒展现出最丰富的风味物质谱，其拥有最多的挥发性化合物种类（70 种）及最高的总相对质量浓度（10 925.05 μg·L^{-1}），分别是其余 4 种菠萝酒样的 1.2~1.3 倍、1.2~1.5 倍。此外，辛酸乙酯（OAV=472.42）、癸酸乙酯（OAV=9.45）的 OAV 值在 SY 发酵酒中最为突出，分别是其他 4 种酒样的 1.3~1.9、1.2~1.8 倍。同时，仅在 SY 发酵酒中检测到苯乙醛（OAV=388.89）化合物。上述三类化合物赋予了 SY 发酵酒浓郁的特征果香及独特的花香，可作为区别于其他 4 种发酵酒的特征性标志物。感官评价证实 SY 酒样具有最佳的果香－花香－酒香协调性及清爽口感，这与其丰富的香气物质种类、较高的特征酯类质量浓度及较低的高级醇比例直接相关。综上所述，采用 SY 酵母发酵可提升菠萝发酵酒的综合品质与风味表现，在推动菠萝深加工产业应用方面具有潜力。

参考文献

[1] 薛忠,陈如约,张秀梅.菠萝机械化种植与收获研究现状[J].山西农业大学学报(自然科学版),2021,41(3):110-120.

[2] 李佳欣.广西菠萝产业发展现状及对策研究[D].南宁:广西大学,2024.

[3] 崔文宇,孙子羽,满都拉,等.基于多元统计分析耐酸酿酒酵母发酵沙棘果酒品质及挥发性香气成分特征[J].食品与发酵工业,2025,51(17):345-350.

[4] 怀欲晓,孙泽荟,李文,等.菠萝百香果复合低醇果酒发酵工艺及香气成分分析[J].酿酒,2024,51(3):87-92.

[5] 吴惠婵,王秀杏,宁正祥,等.发酵菠萝酒的风味及其稳定性研究[J].现代食品科技,2012,28(2):191-194.

[6] 马丽娜,袁源,林丽静,等.不同酿酒酵母在菠萝果酒中的发酵特性[J].食品工业科技,2018,39(3):12-16,21.

[7] 冼嘉雯,吴晖,刘冬梅.菠萝果酒酿造酵母菌的筛选研究[J].中国酿造,2009,1:51-54.

[8] 姜永超,李柳基,袁源,等.不同酿酒酵母对菠萝果汁发酵特性的比较[J].食品科技,2018,43(11):90-97.

[9] 庞惟俏,曲鹏宇,魏程程,等.6种酵母发酵菠萝酒香气成分的GC-MS分析及其筛选[J].酿酒科技,2018,3:106-112,15.

[10] 贾言言,刘四新,李卓婷,等.非酵母属酵母的接种顺序对混合发酵菠萝酒香气成分的影响[J].食品科学,2015,36(17):152-157.

[11] GB/T 15038-2006,葡萄酒、果酒通用分析方法.[S].

[12] GB 5009.266-2016,食品中甲醇的测定.[S].

[13] ĆUJIĆ N, ŠAVIKIN K, JANKOVIĆ T, et al. Optimization of polyphenols extraction from dried chokeberry using maceration as traditional technique [J]. Food Chemistry, 2016, 194: 135-142.

[14] DU R, QIAO X, ZHAO F, et al. Purification, characterization and antioxidant activity of dextran produced by *Leuconostoc pseudomesenteroides* from homemade wine [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 198: 529-536.

[15] 郑莎莎.干酪乳杆菌H1发酵红酸汤的品质影响及特征代谢物研究[D].贵阳:贵州大学,2020.

[16] KUHN D, SCHLABITZ C, GIROLDI M, et al. Determination of free amino acids in dairy whey and its hydrolysates using gas chromatography coupled with mass spectrometry [J]. International Dairy Journal, 2023, 141: 105626.

[17] TIAN T, YANG H, YANG F, et al. Optimization of fermentation conditions and comparison of flavor compounds for three fermented greengage wines [J]. Food Science and Technology, 2018, 89: 542-550.

[18] GB/T15037-2006葡萄酒[S].

[19] 孟金明,樊爱萍,和川琦,等.芒果、胡萝卜复合果酒发酵过程中理化成分和香气物质的变化[J].食品工业科技,2020,41(12):7-13.

[20] HUANG J, LI H, WANG Y, et al. Evaluation of the quality of fermented kiwi wines made from different kiwifruit cultivars [J]. Food Bioscience, 2021, 42: 101051.

[21] BULJETA I, PICHLER A, ŠIMUNOVIĆ J, et al. Polyphenols and antioxidant activity of citrus fiber/blackberry juice complexes [J]. Molecules, 2021, 26(15): 4400.

[22] 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):347-357,12.

[23] 裴芳艺,姜明,马岩石,等.3株酿酒酵母发酵过程中有机酸含量变化分析[J].食品与机械,2019,35(10):24-28.

[24] CHU Q, SUN S, XING X, et al. Transcriptional analysis and key genes associated with sugar, amino acid and organic acid metabolism in *Saccharomyces cerevisiae* during wine-making combined with *Torulaspora delbrueckii* [J]. Food Science and Technology, 2024, 198: 116007.

[25] 苏昊,梁璋成,李维新,等.酿酒酵母JP2代谢苹果酸途径及其关键基因解析[J].福建农业学报,2023,38(5):632-638.

[26] SCUTARAȘU E C, TELIBAN I V, ZAMFIR C I, et al. Effect of different winemaking conditions on organic acids compounds of white wines [J]. Foods, 2021, 10(11): 2569.

[27] ZENG C, YUAN J, MU Y, et al. The physicochemical components, amino acids, organic acids, phenolic compounds and antioxidant capacity of apple ciders: according to geographical origin and altitude of Fuji apple [J]. Microchemical Journal, 2024, 201: 110571.

[28] BIANCHI F, VAN'T KLOOSTER JOURY S, RUIZ STEPHANIE J, et al. Regulation of amino acid transport in *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2019, 83(4): 19.

[29] LIAN W, LEI J, HAN C, et al. Effect of different yeasts on the higher alcohol content of mulberry wine [J]. Foods, 2024, 13(12): 1788.

[30] LEI X, SU W, ZHANG P, et al. Microbial community and flavor metabolite interactions in the fermentation of Zao chili enhanced by

Lactiplantibacillus plantarum CZ-3 and *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Food Science and Technology, 2025, 225: 117925.

[31] ALMEIDA DOS ANJOS V H, DE BRITO ARAÚJO CARVALHO A J, PRUDÊNCIO DUTRA M D C, et al. Effect of commercial *Saccharomyces cerevisiae* and non-*Saccharomyces* yeasts on the chemical composition and bioaccessibility of pineapple wine [J]. Food Research International, 2024, 194: 114888.

[32] YUN J, CUI C, ZHANG S, et al. Use of headspace GC/MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea [J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.

[33] LIU C, LI M, REN T, et al. Effect of *Saccharomyces cerevisiae* and non-*Saccharomyces* strains on alcoholic fermentation behavior and aroma profile of yellow-fleshed peach wine [J]. Food Science and Technology, 2022, 155: 112993.

[34] HU L, CHEN X, CAO Y, et al. *Lactiplantibacillus plantarum* exerts strain-specific effects on malolactic fermentation, antioxidant activity, and aroma profile of apple cider [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101575.

[35] ZHANG Y, XIONG X, LI Y, et al. Aromatic composition and sensory characteristics of passion fruit wine fermented by different indigenous non-*Saccharomyces* yeast strains [J]. Food Bioscience, 2025, 68: 106576.

[36] 张曼.美极梅奇酵母与酿酒酵母混合发酵对李子酒品质提升研究[D].重庆:西南大学,2022.

[37] 李娜娜,束廷廷,梁艳英,等.不同采收期对爱格丽葡萄酒及蒸馏酒香气成分的影响[J].食品科学,2018,39(2):215-221.

[38] WEI J, ZHANG Y, WANG Y, et al. Assessment of chemical composition and sensorial properties of ciders fermented with different non-*Saccharomyces* yeasts in pure and mixed fermentations [J]. International Journal of Food Microbiology, 2020, 318: 108471.

[39] LUKIĆ I, RADEKA S, GROZAJ N, et al. Changes in physico-chemical and volatile aroma compound composition of Gewürztraminer wine as a result of late and ice harvest [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 1048-1057.

[40] WU Y, LI Z, ZOU S, et al. Chemical composition and flavor characteristics of cider fermented with *Saccharomyces cerevisiae* and Non-*Saccharomyces cerevisiae* [J]. Foods, 2023, 12(19): 3565.