陈雪雪, 顾英婕, 许文静, 等. 不同商业酵母对三华李果酒品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 45−55. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070182

CHEN Xuexue, GU Yingjie, XU Wenjing, et al. Effect of Different Commercial Yeasts on the Quality of Sanhua Plum Wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 45−55. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070182

·特邀主编专栏—地方特色食品: 加工技术、感官品质、风味特性和营养健康（客座主编: 易俊洁、和劲松、郭超凡）·

不同商业酵母对三华李果酒品质的影响

陈雪雪, 顾英婕, 许文静, 吴　兰, 尹艳艳, 胡建锋, 路　虎, 范奇高*

（贵州习酒股份有限公司, 贵州习水 564622）

摘　要: 为筛选适合三华李果酒生产的酵母，本研究选用 SY、D254、DV10、EC1118 和 K1 共 5 种商业酿酒酵母进行三华李果酒发酵试验。通过系统分析酒样的基础理化指标、总酚、总黄酮、抗氧化活性、有机酸和氨基酸组成、挥发性成分及感官特性，综合评价不同酵母对三华李果酒品质的影响。结果表明：5 种酵母发酵所得三华李果酒的酒精度在 12.57%~12.97%（v/v）之间，干浸出物含量高（40.00~43.90 g/L），甲醇含量低（30.86~37.41 mg/L）。其中，D254 酵母发酵的三华李果酒总酸（8.29 g/L）和苹果酸（5.96 g/L）含量最低；DV10 酵母发酵的三华李果酒表现出最强的抗氧化活性，具有最高的 DPPH·清除能力（911.26 mg V_C/L）和还原力（976.40 mg V_C/L）。SY 酵母发酵的三华李果酒氨基酸含量最高（402.33 mg/L），挥发性成分组成最复杂，且感官评分最高（89.90 分），更适用于三华李果酒发酵。本研究为三华李果酒生产中酵母的选择提供了理论依据。

关键词: 三华李果酒, 商业酵母, 抗氧化, 有机酸, 氨基酸, 挥发性成分

中图分类号: TS262.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0045−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070182

本文网刊:

Effect of Different Commercial Yeasts on the Quality of Sanhua Plum Wine

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

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

Abstract: In order to select the yeast strain suitable for Sanhua plum wine production, five commercial *Saccharomyces cerevisiae* strains (SY, D254, DV10, EC1118, and K1) were used for Sanhua plum wine fermentation in this study. A comprehensive evaluation of the effects of these yeast strains on Sanhua plum wine quality was conducted by analyzing basic physicochemical parameters, total phenolics and flavonoids, antioxidant activity, profiles of organic acids and amino acids, volatile compounds, and sensory characteristics. The results indicated that the wines fermented with the five yeast strains exhibited an alcohol content of 12.57%~12.97% (v/v), along with high dry extract content (40.00~43.90 g/L), and low methanol levels (30.86~37.41 mg/L). Among them, the D254-fermented Sanhua plum wine showed the lowest total acid content (8.29 g/L) and the lowest malic acid content (5.96 g/L). The DV10-fermented Sanhua plum wine exhibited the strongest antioxidant activity, as evidenced by its highest DPPH· scavenging capacity (911.26 mg V_C/L) and strongest reducing power (976.40 mg V_C/L). The Sanhua plum wine fermented with SY yeast demonstrated the highest amino acid content (402.33 mg/L), the most complex volatile composition, and the highest sensory evaluation score (89.90 points), indicating its superior suitability for Sanhua plum wine fermentation. This study provides a theoretical foundation for yeast selection in the production of Sanhua plum wine.

Key words: Sanhua plum wine; commercial yeast; antioxidant; organic acid; amino acid; volatile composition

收稿日期: 2025−07−17

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: 陈雪雪（1996−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 酿酒科学与工程, E-mail: 1871279408@qq.com。

*** 通信作者:** 范奇高（1995−）, 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 1354326886@qq.com。

三华李作为蔷薇科李属植物的代表性品种，是我国南方特色水果资源，其果实富含有机酸、氨基酸及多酚类活性成分，具有出色的营养价值[1−2]。目前三华李产业存在两大瓶颈：一方面，鲜果因固有高酸特性导致鲜食适口性较差；另一方面，加工方式局限于蜜饯等传统制品，产品附加值较低[3]。近年来，随着果酒消费市场的快速扩张，酒精度低、口感清爽、风味独特的发酵型果酒因其良好的健康属性，已成为年轻消费群体日常饮品的重要组成部分[4−5]。以三华李为原料开发发酵型果酒，不仅可解决鲜果适口性问题，更能通过深加工技术提升产品附加值，同时为功能型果酒市场提供差异化产品，对促进特色水果资源的高值化利用具有重要意义。

果酒中挥发性风味物质的形成主要源于果实基质、发酵菌株及酿造工艺，其组成与含量是决定果酒品质的重要因素[6]。在酒精发酵过程中，酿酒酵母通过糖酵解途径将可发酵糖转化为乙醇及多种次级代谢产物（如高级醇、酯类、有机酸等），这些化合物对果酒的理化及感官品质具有重要影响[7−8]。现阶段果酒生产研究中应用的酿酒酵母主要分为商业酿酒酵母和本土酿酒酵母两大类[9]。二者在发酵动力学特性、对终产品理化及感官品质的影响以及适用场景方面均存在明显差异。其中，本土酿酒酵母因其独特的代谢特性，能够产生更为复杂且具有特征性的风味化合物，从而赋予酒体典型的地域特色，已成为发酵微生物资源挖掘与特色果酒开发研究的重要方向[10−12]。相比之下，商业酵母菌株经过定向选育和系统化评估，具备启酵快、代谢稳定、耐受性强及工艺可控性高等核心优势，在现代酿酒工业的规模化生产中占据主导地位[4,11]。

目前，关于酿酒酵母对三华李果酒品质影响的研究较为有限。吴德光等[13] 从三华李果汁中分离出一株能耐受 14% 乙醇和 3.5% 柠檬酸的酿酒酵母菌株 SHL3。该菌株在三华李果酒发酵过程中表现出优异的发酵性能，包括残糖量低、酒精产量高、酸合成能力强及酯类物质生成量丰富，展现出作为三华李果酒专用发酵菌株的应用潜力。海金萍等[14] 比较了安琪高活性酵母、马利干酵母及其混合发酵对三华李果酒酒精度和残糖量的影响，筛选出发酵性能更优的马利干酵母作为发酵菌株。然而，系统评价不同商业酵母菌株对三华李果酒理化及感官品质影响的研究尚未见报道。

本研究选取 5 种典型的商业酿酒酵母（SY、D254、DV10、EC1118、K1），系统比较其对三华李果酒理化及感官品质的影响，进而筛选出适宜三华李果酒酿造的最优菌株，旨在为三华李果酒的产业化生产提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

三华李鲜果　市售；葡萄酒果酒专用酵母 SY 安琪酵母股份有限公司；葡萄酒果酒专用酵母 D254、DV10、EC1118、K1　法国 Lallemand 公司；果胶酶（酶活力≥4000 U/g）　食品级，帝斯曼公司；酒石酸钾钠、葡萄糖、铁氰化钾、氢氧化钠、酚酞、碳酸钠、磷酸二氢钾、磷酸、三氯化铁、三氯乙酸等　分析纯，国药集团化学试剂公司；2,2'-联氮双（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）二铵盐 [2,2'-azinobis（3-ethylbenzothiazoline 6-sulfonic acid）ammonium salt, ABTS]、2,2-联苯基-1-苦基肼基（2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH）　分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司；L-苹果酸、L-酒石酸、乳酸、乙酸、柠檬酸、琥珀酸（色谱纯）、福林酚（生物技术级）　上海源叶生物科技有限公司；氨基酸标准品（17 种）　赛卡姆（北京）科学仪器有限公司；2-辛醇、甲醇　色谱纯，Sigma-Aldrich 公司。

HR1889 慢速螺旋压榨式大口径原汁机　飞利浦家电（中国）投资有限公司；SPL-450 低温培养箱　天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司；Multiskan SkyHigh 全波长酶标仪　美国赛默飞；MGZ-220-4 大容量高速台式离心机　上海丙林电子科技有限公司；SYKAM S433D 全自动氨基酸分析仪　德国赛卡姆；1260 高效液相色谱仪、箭型顶空固相微萃取三相萃取头（DVB/CWR/PDMS）、GC 8890-MSD 5977B 型气相色谱-质谱联用仪　美国安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　三华李果酒发酵实验　选取无病虫害、成熟度一致的三华李鲜果，洗净沥干后去核打碎，按果浆重量的 30% 加入无菌水，充分搅拌均匀。取 1 kg 混合液置于 1.5 L 无菌发酵罐中，加入白砂糖将可溶性固形物含量调整至 20°Brix（对应预设酒精度为 12%（v/v））。再依次加入焦亚硫酸钾（100 mg/kg）、果胶酶（2 mL/kg）和酿酒酵母（0.3 g/kg），混匀后于 20±1 ℃ 进行主发酵，设置 3 个平行组。采用 CO_2 失重法[15] 监测发酵进程，当日失重<0.6 g 时判定主发酵结束。发酵液在 5000 r/min 条件下离心 10 min 后取上清液于 4 ℃ 陈酿 60 d，取样于-20 ℃ 储存待分析。以不添加酵母的初始发酵液为对照（DZ），其他条件严格一致。

1.2.2　基础理化指标的测定　根据 GB/T 15038-2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》[16] 测定三华李果酒的总糖（以葡萄糖计）、酒精度、总酸（以酒石酸计）、干浸出物和甲醇含量。

1.2.3　总酚、总黄酮的测定

1.2.3.1　总酚　采用 Folin-Ciocalteu 法[17] 测定，含量以没食子酸当量表示（mg GAE/L），标准曲线回归方程为 y=0.0032x+0.0135，R^2=0.9971。

1.2.3.2　总黄酮　采用硝酸铝比色法[18] 测定，含量以芦丁当量表示（mg RE/L），标准曲线回归方程为

y=0.0007x+0.0345，R^2=0.9965。

1.2.4　抗氧化活性的测定　三华李果酒的 $ABTS^+$·清除活性、DPPH·清除活性和还原力的测定参考 Chen 等[19] 的方法并进行修改，均以维生素 C（Vitamin C，V_C）作为阳性对照。

1.2.4.1　$ABTS^+$·清除能力测定　将 14 mmol/L ABTS 溶液和 4.9 mmol/L 过硫酸钾溶液等体积混合，室温下避光反应 16 h 后用超纯水稀释 85 倍得到 ABTS 工作液。分别吸取 2.90 mL ABTS 工作液+0.1 mL 稀释样品（16 倍）、2.90 mL ABTS 工作液+0.1 mL 超纯水，混匀后避光反应 6 min，测定反应液在 734 nm 处的吸光度，分别记为 A_1、A_2。以 V_C 质量浓度为横坐标（范围为 0~150 mg/L）、$ABTS^+$·清除率为纵坐标，绘制得到标准曲线 y=0.601x+0.5545，R^2=0.9998。$ABTS^+$·清除率计算公式如下：

$$ABTS^+\cdot\text{清除率}(\%) = [(A_2-A_1)/A_2]\times 100$$

1.2.4.2　DPPH·清除能力测定　配制 0.2 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液，分别吸取 2 mL DPPH 乙醇溶液+2 mL 稀释样品（70 倍）、2 mL DPPH 乙醇溶液+2 mL 乙醇，混匀后避光反应 30 min，测定反应液在 517 nm 处的吸光度，分别记为 A_1、A_2。以 V_C 质量浓度为横坐标（范围为 0~12.5 mg/L）、DPPH·清除率为纵坐标，绘制得到标准曲线 y=4.5068x+13.637，R^2=0.9990。DPPH·清除率计算公式如下：

$$DPPH\cdot\text{清除率}(\%) = [(A_2-A_1)/A_2]\times 100$$

1.2.4.3　还原力测定　在 10 mL 棕色离心管中依次加入 0.9 mL 超纯水、0.1 mL 待测样品、2.5 mL 0.2 mol/L 的磷酸缓冲液（pH6.6）和 2.5 mL 1% 铁氰化钾溶液，摇匀后于 50 ℃ 水浴 20 min，然后加入 2.5 mL 10% 三氯乙酸，摇匀后于 6000×g 离心 5 min。取 2.5 mL 上清液于新的 10 mL 棕色离心管中，并加入 2.5 mL 超纯水和 0.5 mL 0.1% 三氯化铁，摇匀后在 700 nm 处测定吸光度。空白测定：在相同条件下，用 0.1 mL 超纯水代替 0.1 mL 待测样品。以 V_C 质量浓度为横坐标（范围为 0~1500 mg/L），700 nm 处的吸光度为纵坐标，绘制得到标准曲线 y=0.0005x+0.0115，R^2=0.9992。

1.2.5　有机酸、氨基酸检测

1.2.5.1　有机酸测定　采用高效液相色谱法（HPLC）测定样品中的有机酸含量，参考陈秋竹等[20] 的方法并进行修改。色谱条件：色谱柱为 Venusil ASB C_{18}（4.6 mm×250 mm，5 μm）；流动相为 0.02 mol/L 磷酸二氢钾（用磷酸调节 pH 至 2.3）；流速 0.8 mL/min；检测波长 208 nm；柱温 30 ℃；进样量 5 μL。通过对比标准品的保留时间进行定性，以标准品质量浓度为横坐标、峰面积为纵坐标，绘制标准曲线，通过外标法进行定量。

1.2.5.2　氨基酸测定　采用氨基酸分析仪测定样品中的氨基酸，参考蒋力力等[21] 的方法进行。样品预处理：样品经 5%（w/v）三氯乙酸溶液按 1∶4（v/v）稀释除蛋白，室温静置 1 h 后，10000 r/min 离心 10 min，取上清液过 0.22 μm 水系滤膜，滤液待测。

1.2.6　挥发性成分的测定　采用顶空-箭型固相微萃取-气相色谱-质谱（HS-SPME-Arrow-GC-MS）联用技术对三华李果酒的挥发性成分进行测定，参照 Tian 等[22] 的方法并进行修改。具体如下：

挥发性成分的提取：取 6.0 mL 酒样、3 g 氯化钠于 10 mL 顶空瓶中，最后加入 20 μL 内标物 2-辛醇（终浓度 99.97 μg/L）。用箭型顶空固相微萃取三相萃取头（DVB/CWR/PDMS）于 50 ℃ 条件下萃取 30 min，萃取结束后于 250 ℃ 的进样口解吸 5 min。

色谱条件：采用不分流模式，载气为高纯氦气，流速为 1.5 mL/min；色谱柱为 DB-FFAP（60 m×0.25 mm×0.25 μm）；升温程序：初始温度 50 ℃，保持 2 min，再以 15 ℃/min 升温至 230 ℃，保持 15 min；进样口温度和检测器温度均为 250 ℃。

质谱条件：采用扫描模式采集数据，扫描范围为 30~350 amu；以 EI 电离源为离子源，质谱传输线和离子源温度分别为 250 ℃ 和 230 ℃。

定性与定量方法：采用 Mass Hunter 未知物分析工作站进行数据分析，将色谱峰的质谱信息与 NIST 20 谱库进行比对，筛选匹配度>70% 的化合物。进一步用工作站计算保留指数，并与 NIST 数据库报道值进行比对，筛选差值<50 的化合物供分析。采用内标法计算挥发性化合物的相对含量。

1.2.7　感官评价　参考 GB/T 15038-2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》[16] 制定三华李果酒的感官评价标准，由 10 名经过感官培训的人员组成评估小组，在 20~25 ℃ 环境下，对酒样的色泽、澄清度、香气、滋味和典型性进行评价，具体评分标准见表 1。

表 1　三华李果酒感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria for Sanhua plum wine

项目	评价标准	分值（分）
色泽（5分）	具有三华李果酒应有的色泽，有光泽	(4~5]
	具有三华李果酒应有的色泽	(3~4]
	不具有三华李果酒应有的色泽	≤3
澄清度（5分）	澄清透明、无明显悬浮物	(4~5]
	澄清透明、轻微有悬浮物	(3~4]
	浑浊、有明显悬浮物	≤3
香气（30分）	果香、酒香浓郁优雅，协调悦人	(25~30]
	果香、酒香良好，尚悦人	(20~25]
	果香、酒香不足，香气不良	≤20
滋味（40分）	酒体丰满，醇厚协调，酸味不明显	(30~40]
	酒体柔顺，柔和爽口，酸味可接受	(20~30]
	酒体寡淡，酸味、苦味较重或有其他明显的缺陷	≤20
典型性（20分）	典型性突出，风格独特，幽雅	(15~20]
	有典型性，但不够怡雅	(10~15]
	典型性不明显	≤10

1.3 数据处理

实验取 3 次重复，数据采用平均值±标准差表示。使用 IBM SPSS Statistics 27 进行数据分析（$P<0.05$，差异显著）；采用 Origin 2025 绘图，感官评价数据经十分制转换后绘制雷达图；使用 SIMCA 14.1 进行偏最小二乘判别分析（Partial least squares discrimination analysis，PLS-DA）。

2 结果与分析

2.1 基础理化指标分析

发酵周期是评价酵母发酵性能的关键参数之一。如表 2 所示，供试的 5 种酵母完成三华李果酒主发酵所需时间均在 8~9 d 之间，且组间差异不显著（$P>0.05$），表明这 5 种酵母在本研究条件下发酵速率相近。相比之下，吴德光等[13]报道的酿酒酵母 SHL3 在 30 ℃ 下发酵初始糖度为 20°Brix 的三华李果汁仅需 7 d，该差异可能源于菌株特性及发酵温度的不同。5 组酒样的总糖含量均低于 4 g/L，表明 5 种酵母均具备良好的糖代谢能力。其中，SY 组酒样的总糖含量（3.09 g/L）显著低于 DV10 组和 K1 组（$P<0.05$），与 D254 组和 EC1118 组无显著差异（$P>0.05$）。所有酒样的酒精度均达到预设目标值，在 12.57%~12.97%（v/v）之间，说明 5 种酵母均能有效将可发酵糖转化为乙醇。酸度是决定果酒质量的关键因素，与果酒中有机酸的类型和浓度密切相关[23]。5 组酒样的总酸含量在 8.29~10.38 g/L 之间，其中，D254 组酒样的总酸含量显著低于其他组（$P<0.05$）。

果酒干浸出物含量与原料品质、生产工艺及储藏方式密切相关，其含量显著影响酒体口感与香气表现，是评价果酒品质的重要指标之一[24−25]。5 组酒样的干浸出物含量在 40.00~43.90 g/L 之间，远高于 QB/T 5476-2020《果酒通用技术要求》[26]中规定的 10 g/L 最低限值。其中，SY 组和 DV10 组酒样干浸出物含量显著高于其他组（$P<0.05$）。甲醇作为发酵果酒中的常见组分，具有神经毒性，其经代谢转化生成的甲醛和甲酸可引起器质性病变和中枢呼吸系统疾病[27]。5 组酒样的甲醇含量均处于较低水平（30.86~37.41 mg/L），远低于 NY/T 1508-2017《绿色食品 果酒》[28]中规定的≤0.4 g/L 标准限值，符合食品安全标准。

2.2 不同酵母发酵三华李果酒的总酚及总黄酮含量

多酚类化合物是一类具有抗氧化活性及潜在健康促进作用的生物活性物质[29]，根据化学结构可分为类黄酮和非类黄酮[30]，是构成果酒抗氧化特性的主要活性成分。由图 1 可知，5 组酒样的总酚与总黄酮含量均显著高于 DZ 组（$P<0.05$），表明酒精发酵过程有效促进了果肉中酚类物质的溶出。5 组酒样的总酚含量在 733.91~765.68 mg GAE/L 之间，其中，K1 组和 D254 组酒样的总酚含量显著高于其他 3 组（$P<0.05$）。不同酵母发酵的三华李果酒总黄酮含量差异显著（$P<0.05$），EC1118 组的黄酮含量为 1337.14 mg RE/L，显著低于其余 4 组酒样（$P<0.05$），较 K1 组低 312.38 mg RE/L。这一结果表明酵母菌株的选择对果酒中黄酮类物质具有重要影响。

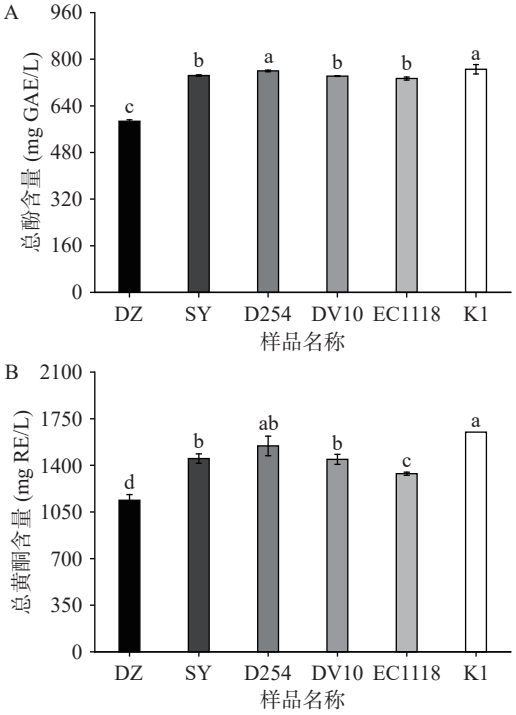


图 1 初始发酵液及三华李果酒的总酚（A）和总黄酮（B）含量

Fig.1 Total phenolics (A) and flavonoids (B) content of the initial fermentation broth and Sanhua plum wines

注：图中不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），图 2、图 3 同。

2.3 不同酵母发酵三华李果酒的抗氧化活性

本研究采用 $ABTS^{+}$·清除活性、DPPH·清除活性和还原力 3 项指标来评价 5 种酵母发酵三华李果酒的抗氧化活性差异。如图 2 所示，DZ 组的各项抗氧化指标均显著低于 5 组酒样（$P<0.05$），这与其较低的总酚及总黄酮含量相一致。K1 组酒样的 $ABTS^{+}$·

表 2 不同酵母发酵三华李果酒的基础理化指标

Table 2 Basic physicochemical parameters of Sanhua plum wine fermented with different yeasts

样品名称	发酵时长（d）	总糖（g/L）	酒精度（%，v/v）	总酸（g/L）	干浸出物（g/L）	甲醇（mg/L）
SY	9±1^{a}	3.09±0.09^{b}	12.71±0.10^{bc}	10.31±0.12^{a}	43.90±0.41^{a}	36.82±0.92^{a}
D254	8±1^{a}	3.32±0.04^{ab}	12.80±0.08^{ab}	8.29±0.03^{c}	40.80±0.14^{c}	30.86±0.77^{b}
DV10	9±1^{a}	3.44±0.15^{a}	12.91±0.11^{a}	10.38±0.02^{a}	43.63±0.21^{a}	37.41±0.94^{a}
EC1118	9±1^{a}	3.35±0.11^{ab}	12.97±0.11^{a}	9.59±0.13^{b}	42.70±0.14^{b}	36.55±0.91^{a}
K1	9±1^{a}	3.45±0.21^{a}	12.57±0.09^{c}	9.76±0.02^{b}	40.00±0.14^{d}	37.39±0.93^{a}

注：同列不同字母表示差异显著（$P<0.05$）。

清除活性显著高于 D254 组和 EC1118 组（P<0.05），而 D254 组、EC1118 组与其余 2 组酒样无显著性差异（P>0.05）。DV10组酒样的 DPPH·清除活性和还原力分别为 911.26、976.40 mg V_C/L，其还原力显著高于其他 4 组酒样（P<0.05）。相比之下，SY 组酒样的还原力最低（836.33 mg V_C/L）。综合而言，DV10 酵母发酵的三华李果酒展现出最强的抗氧化活性特征。

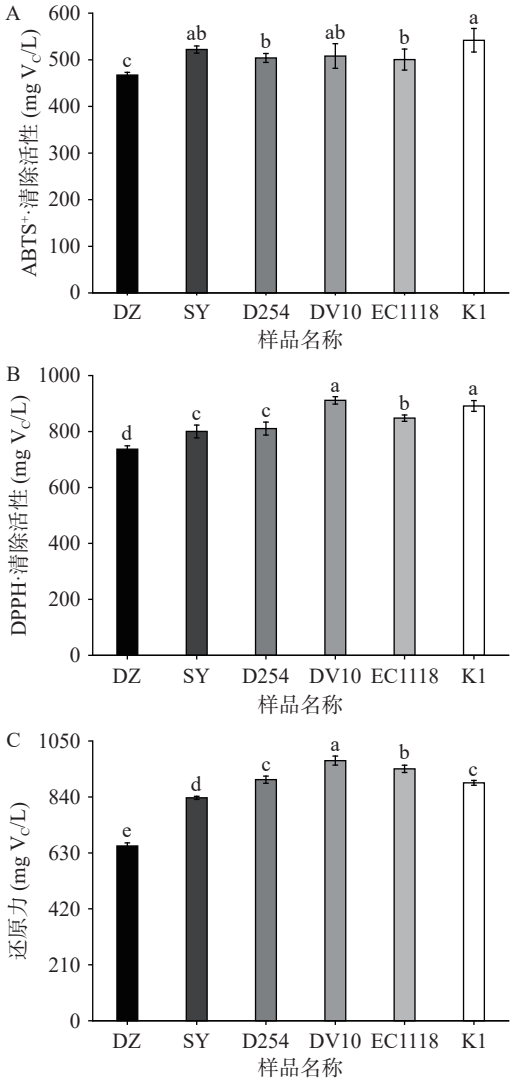


图 2　初始发酵液及三华李果酒的抗氧化活性

Fig.2　Antioxidant activity of the initial fermentation broth and Sanhua plum wines

注：A：ABTS$^+$·清除活性；B：DPPH·清除活性；C：还原力。

2.4　不同酵母发酵三华李果酒的有机酸及氨基酸

如表 3 所示，与 DZ 组（总有机酸 9.55 g/L）相比，SY 组和 DV10 组酒样的总有机酸含量较高（分别为 9.94、9.85 g/L），而 D254 组最低（8.14 g/L）。L-苹果酸作为主要有机酸，在 DZ 组中的含量最高（8.53 g/L），经发酵后均有所下降，其中 D254 组降幅最大（至 5.96 g/L），这与张弛等[31] 在枇杷酒中的研究结果一致。5 组酒样中的乳酸与柠檬酸含量均显著高于 DZ 组（P<0.05），琥珀酸含量有所降低，酒石酸变化不大。乙酸是果酒的主要挥发酸，在 DZ 组中未检出，5 组酒样中的乙酸含量在 0.52~0.62 g/L 之间，远低于 QB/T 5476-2020《果酒通用技术要求》[26] 规定的≤1.2 g/L 限值，均符合标准。

氨基酸是果酒中重要的呈味物质和风味前体物，同时也是发酵过程中酵母最易同化的氮源[32]。所检测的 17 种氨基酸中，除天冬氨酸外，其余 16 种均在 DZ 组及 5 组酒样中被检出。DZ 组的氨基酸总量为 641.01 mg/L，显著高于 5 组酒样（328.62~402.33 mg/L），表明酵母在发酵过程中大量消耗氨基酸用于生长和代谢，其中丝氨酸的消耗尤为明显。与 DZ 组相比，5 组酒样中的丝氨酸、缬氨酸、异亮氨酸等氨基酸的含量显著降低（P<0.05），而甘氨酸、胱氨酸、精氨酸等氨基酸的含量显著增加（P<0.05）。5 组酒样中，含量相对丰富的氨基酸分别是丝氨酸（27.28~137.78 mg/L）、脯氨酸（99.27~112.27 mg/L）、丙氨酸（32.34~54.95 mg/L）和精氨酸（27.26~38.10 mg/L），占氨基酸总量的 63.90%~74.99%；而缬氨酸、蛋氨酸和异亮氨酸 3 种支链氨基酸含量较低，仅占氨基酸总量的 1.30%~3.27%。作为一种甜味氨基酸，丝氨酸在 SY 组酒样中的含量（137.78 mg/L）显著高于其他 4 组（P<0.05），对酒体的滋味品质具有重要贡献。总体而言，SY 酵母发酵酒样的氨基酸总量最高（402.33 mg/L），特别是甜味氨基酸丝氨酸显著富集。

2.5　三华李果酒的挥发性化合物分析

2.5.1　不同酵母发酵三华李果酒挥发性成分分析

挥发性成分作为果酒品质的核心要素，对其感官特性具有重要影响[33]。如表 4 所示，在 5 种酵母发酵的三华李果酒中，共鉴定出 57 种挥发性化合物，分属酯类（38 种）、醇类（6 种）、酸类（5 种）、芳香族（5 种）、酮类（2 种）及萜烯类（1 种）六大类别，其中酯类物质种类最多。不同酵母发酵的三华李果酒的挥发性化合物在数量和含量上均存在显著差异：DV10 组酒样检出的挥发性化合物种类最多（50 种），SY 组次之（49 种），D254 组和 EC1118 组均为 47 种，K1 组最少（44 种）。5 组酒样中，仅 SY 酵母发酵酒样检出六大类风味化合物，其挥发性成分组成最为复杂，具体包括酯类 32 种、醇类 6 种、酸类 4 种、芳香族 4 种、酮类 2 种和萜烯类 1 种。由图 3 可知，各组酒样的挥发性成分以酯类（59.05%~65.37%）和醇类（28.43%~34.62%）为主，酸类次之，酮类和萜烯类含量最低。

酯类物质是果酒的重要香气成分，多数呈现愉悦的花香和果香，主要源于酵母代谢，依据化学结构可划分为乙酯类与乙酸酯类[5]。表 4 数据表明，5 种酵母发酵的三华李果酒均呈现以乙酯类物质为主导的酯类组成特征。其中辛酸乙酯和癸酸乙酯含量最为突出，乙酸乙酯、己酸乙酯和月桂酸乙酯次之，这 5 种乙酯物质占酯类总量的 83.34%~84.73%。其中，

表 3 初始发酵液及三华李果酒的有机酸和氨基酸组成

Table 3 Composition of organic acids and amino acids of the initial fermentation broth and Sanha plum wines

项目	含量					
	DZ	SY	D254	DV10	EC1118	K1
有机酸						
L-酒石酸	0.22±0.02^{ab}	0.16±0.01^{c}	0.21±0.02^{b}	0.22±0^{ab}	0.23±0.01^{a}	0.24±0.01^{a}
L-苹果酸	8.53±0.05^{a}	7.45±0.02^{c}	5.96±0.01^{f}	7.56±0.03^{b}	6.81±0.01^{d}	6.64±0.01^{e}
乳酸	0.05±0^{d}	0.61±0.04^{b}	0.47±0.04^{c}	0.71±0.04^{a}	0.61±0.02^{b}	0.63±0.02^{b}
乙酸	ND	0.62±0.01^{a}	0.54±0.04^{bc}	0.52±0.02^{c}	0.52±0.01^{c}	0.56±0.02^{b}
柠檬酸	0.13±0.01^{c}	0.56±0.08^{a}	0.54±0.01^{a}	0.42±0.03^{b}	0.45±0.01^{b}	0.38±0.01^{b}
琥珀酸	0.61±0.02^{a}	0.53±0.02^{b}	0.42±0.01^{c}	0.42±0.03^{c}	0.40±0.03^{c}	0.50±0.02^{b}
小计	9.55±0.09^{b}	9.94±0.14^{a}	8.14±0.01^{d}	9.85±0.10^{a}	9.03±0.06^{c}	8.95±0.01^{c}
氨基酸						
苏氨酸	36.79±0.52^{a}	28.83±0.82^{b}	23.88±0.28^{d}	26.08±0.20^{c}	22.81±0.66^{d}	23.61±0.64^{d}
丝氨酸	331.70±6.22^{a}	137.78±1.80^{b}	50.40±0.35^{d}	102.33±1.04^{c}	58.55±0.50^{d}	27.28±0.28^{e}
谷氨酸	25.75±1.25^{a}	17.25±0.75^{c}	19.55±0.59^{b}	15.53±0.71^{d}	18.55±0.71^{bc}	13.22±0.32^{e}
脯氨酸	116.96±1.78^{a}	99.30±0.91^{d}	99.27±1.08^{d}	107.57±0.90^{c}	108.13±0.82^{c}	112.27±0.97^{b}
甘氨酸	3.54±0.03^{d}	7.90±0.24^{c}	10.09±0.34^{a}	9.38±0.30^{b}	10.58±0.47^{a}	7.76±0.09^{c}
丙氨酸	56.41±0.35^{a}	36.84±0.40^{e}	39.12±0.29^{d}	50.39±0.60^{c}	54.95±0.45^{b}	32.34±0.24^{f}
胱氨酸	0.65±0.02^{e}	9.63±0.08^{c}	8.43±0.16^{d}	10.40±0.16^{b}	10.37±0.38^{b}	13.52±0.69^{a}
缬氨酸	17.93±0.11^{a}	1.71±0.10^{d}	3.93±0.15^{b}	2.10±0.08^{c}	2.23±0.14^{c}	3.90±0.03^{b}
蛋氨酸	0.66±0.02^{e}	2.10±0.07^{d}	3.03±0.16^{b}	2.50±0.11^{c}	2.36±0.04^{c}	3.22±0.02^{a}
异亮氨酸	11.17±0.07^{a}	1.43±0.08^{e}	3.21±0.15^{c}	1.83±0.12^{d}	1.97±0.15^{d}	3.64±0.11^{b}
亮氨酸	4.76±0.04^{f}	7.47±0.15^{e}	13.19±0.16^{b}	9.33±0.17^{d}	9.72±0.28^{c}	13.58±0.11^{a}
酪氨酸	1.68±0.02^{f}	3.00±0.03^{e}	4.49±0.12^{b}	3.35±0.03^{d}	3.69±0.07^{c}	4.83±0.07^{a}
苯丙氨酸	1.35±0.03^{e}	3.70±0.11^{d}	4.88±0.28^{b}	3.94±0.19^{cd}	4.20±0.28^{c}	7.10±0.14^{a}
组氨酸	12.09±0.07^{a}	9.48±0.41^{c}	9.20±0.17^{cd}	9.19±0.15^{cd}	9.03±0.10^{d}	11.58±0.12^{b}
赖氨酸	2.71±0.04^{d}	8.12±0.27^{c}	10.99±0.65^{b}	10.52±1.04^{b}	8.62±0.13^{c}	12.67±0.13^{a}
精氨酸	16.85±0.51^{d}	27.77±0.80^{c}	30.08±0.17^{b}	27.26±0.60^{c}	29.42±0.38^{b}	38.10±0.79^{a}
天冬氨酸	ND	ND	ND	ND	ND	ND
小计	641.01±5.52^{a}	402.33±3.64^{b}	333.74±2.25^{e}	391.69±3.14^{c}	355.16±4.32^{d}	328.62±4.00^{e}

注: 同行不同字母表示差异显著(P<0.05); “ND”表示未检出; 表4同; 表中有机酸含量单位为g/L, 氨基酸含量单位为mg/L。

表 4 不同酵母发酵三华李果酒的挥发性化合物

Table 4 Volatile compounds in Sanhua plum wine fermented with different yeasts

化合物编号	化合物名称	相对含量(μg/L)				
		SY	D254	DV10	EC1118	K1
	酯类					
Est1	辛酸乙酯	3215.16±114.16^{b}	3779.51±663.85^{a}	3116.57±109.35^{bc}	3210.79±281.72^{b}	2336.36±165.50^{c}
Est2	癸酸乙酯	2390.14±33.83^{b}	3110.92±591.92^{a}	2365.63±135.97^{b}	2832.72±212.80^{ab}	2310.49±161.11^{b}
Est3	月桂酸乙酯	820.79±10.87^{ab}	833.07±108.63^{ab}	754.28±41.42^{b}	922.13±79.84^{a}	576.89±50.19^{c}
Est4	乙酸乙酯	792.38±4.95^{b}	1347.41±202.48^{a}	1582.51±61.18^{a}	1377.77±434.65^{a}	1531.87±236.61^{a}
Est5	正己酸乙酯	746.87±77.93^{ab}	829.97±105.76^{a}	884.05±203.69^{a}	946.45±96.24^{a}	573.86±79.18^{b}
Est6	苯甲酸乙酯	416.07±20.40^{a}	338.19±27.18^{c}	380.26±9.69^{b}	380.16±11.74^{b}	297.38±12.57^{d}
Est7	乙酸异戊酯	287.52±51.15^{d}	480.01±66.99^{ab}	391.08±2.44^{c}	411.17±51.43^{bc}	511.68±13.35^{a}
Est8	棕榈酸乙酯	142.51±2.03^{b}	86.03±3.04^{c}	151.55±0.68^{a}	145.14±3.82^{ab}	72.48±6.13^{d}
Est9	十四酸乙酯	89.98±5.33^{a}	65.55±14.02^{b}	68.86±4.07^{b}	101.71±7.16^{a}	73.35±2.77^{b}
Est10	辛酸异戊酯	68.78±0.92^{c}	179.65±41.56^{a}	123.34±15.33^{b}	151.11±46.64^{ab}	ND
Est11	丁酸乙酯	86.73±24.76^{b}	148.80±28.08^{a}	121.89±7.56^{ab}	128.63±29.67^{ab}	157.14±43.61^{a}
Est12	丁二酸二乙酯	63.92±2.35^{a}	57.16±2.91^{b}	ND	ND	ND
Est13	癸酸异戊酯	43.36±2.25^{c}	87.85±10.34^{a}	48.59±2.05^{c}	70.93±5.54^{b}	45.82±3.30^{c}
Est14	辛酸甲酯	35.11±2.02^{ab}	40.53±7.23^{a}	32.10±0.48^{b}	32.17±3.28^{b}	20.61±3.22^{c}
Est15	水杨酸甲酯	23.12±0.02^{bc}	32.03±3.29^{a}	20.50±0.31^{c}	25.50±1.97^{b}	25.08±2.99^{b}
Est16	壬酸乙酯	22.92±0.04^{b}	37.69±10.55^{a}	19.44±1.74^{b}	19.61±1.38^{b}	25.19±4.14^{b}
Est17	乙酸己酯	24.94±2.75^{c}	22.00±5.37^{c}	49.50±0.87^{a}	30.75±2.33^{b}	44.43±1.91^{a}

续表 4

化合物编号	化合物名称	相对含量(μg/L)				
		SY	D254	DV10	EC1118	K1
Est18	癸酸甲酯	20.94±0.42^{ab}	26.40±5.37^{a}	21.07±3.23^{ab}	24.86±3.34^{a}	17.63±0.60^{b}
Est19	辛酸丙酯	19.13±0.16^{a}	8.11±1.93^{c}	17.34±0.42^{a}	11.74±1.70^{b}	7.34±0.40^{c}
Est20	癸酸正丙酯	18.59±0.36^{a}	6.56±1.73^{d}	13.11±0.12^{b}	9.17±0.63^{c}	6.28±0.62^{d}
Est21	乙酸异丁酯	22.32±5.49^{b}	38.15±6.05^{b}	37.95±0.05^{b}	36.84±7.73^{b}	71.53±28.01^{a}
Est22	癸酸异丁酯	16.55±0.01^{c}	28.85±6.64^{ab}	22.77±0.25^{b}	31.95±2.10^{a}	24.69±2.42^{b}
Est23	己酸异戊酯	10.73±0.25^{c}	19.48±4.45^{a}	13.87±0.85^{bc}	17.50±1.24^{ab}	5.78±0.69^{d}
Est24	乙基9-癸烯酸酯	10.68±0.36^{c}	34.04±7.19^{a}	11.89±0.67^{c}	14.11±1.62^{c}	20.87±1.88^{b}
Est25	肉桂酸乙酯	6.34±0.43^{a}	5.01±1.08^{b}	5.17±0.09^{ab}	5.16±0.57^{ab}	3.95±0.55^{b}
Est26	月桂酸甲酯	4.69±0.17^{a}	4.56±1.07^{a}	3.90±0.29^{ab}	4.40±0.56^{a}	3.07±0.59^{b}
Est27	己酸丙酯	4.62±0.31^{a}	1.25±0.27^{b}	4.77±1.82^{a}	1.82±0.23^{b}	ND
Est28	十一酸乙酯	2.05±0.12^{b}	3.83±1.48^{a}	1.82±0.34^{b}	2.85±0.07^{ab}	3.19±0.87^{ab}
Est29	2-甲基丁酸乙酯	1.61±0.02^{b}	2.84±0.17^{a}	ND	ND	ND
Est30	3-羟基辛酸乙酯	3.76±0.28^{b}	5.84±1.95^{a}	2.61±0.13^{b}	3.30±0.40^{b}	2.53±0.30^{b}
Est31	己酸甲酯	3.05±0.21^{b}	ND	9.01±0.78^{a}	9.18±0.29^{a}	ND
Est32	乙酸甲酯	ND	11.02±1.70^{a}	ND	4.79±0.52^{b}	11.76±2.12^{a}
Est33	十八酸乙酯	ND	7.26±0.04^{a}	7.55±0.08^{a}	7.08±0.43^{a}	6.43±0.65^{b}
Est34	庚酸乙酯	ND	ND	2.72±0.12^{b}	3.65±0.09^{a}	ND
Est35	3-羟基丁酸乙酯	ND	ND	2.95±0^{b}	3.95±0.74^{a}	ND
Est36	乙酸叶醇酯	ND	ND	0.71±0.01	ND	ND
Est37	己酸异丁酯	ND	ND	ND	ND	2.81±0.25
Est38	γ-丁内酯	10.92±3.23^{a}	6.32±1.74^{bc}	9.16±0.35^{ab}	5.58±0.41^{c}	4.34±0.39^{c}
	醇类					
Alc1	异戊醇	3590.91±375.90^{c}	4747.96±394.44^{a}	3572.12±79.07^{c}	4004.05±272.62^{bc}	4131.44±61.04^{b}
Alc2	正丙醇	318.02±7.72^{a}	62.74±2.42^{c}	304.60±5.12^{a}	186.99±22.90^{b}	170.75±9.11^{b}
Alc3	异丁醇	338.48±48.47^{d}	490.05±43.88^{c}	609.57±1.14^{b}	710.61±46.90^{a}	780.39±44.28^{a}
Alc4	(2R,3R)-(-)-2,3-丁二醇	18.61±4.52^{cd}	24.82±5.90^{bc}	47.36±1.96^{a}	28.23±4.26^{b}	12.42±1.50^{d}
Alc5	反式-3-己烯-1-醇	5.59±1.32^{b}	5.23±0.47^{b}	6.68±0.45^{b}	5.33±0.09^{b}	60.60±5.13^{a}
Alc6	1,3-丙二醇单乙醚	35.31±4.68^{a}	ND	21.00±5.20^{b}	ND	ND
	酸类					
Aci1	乙酸	613.07±24.93^{a}	761.01±115.01^{a}	328.21±25.05^{b}	339.11±85.26^{b}	426.17±110.11^{b}
Aci2	辛酸	371.80±28.29^{a}	388.37±114.87^{a}	270.65±5.66^{ab}	328.26±57.40^{ab}	219.42±71.73^{b}
Aci3	己酸	173.09±3.83^{a}	163.11±26.24^{a}	145.63±12.66^{a}	152.90±15.61^{a}	83.10±11.46^{b}
Aci4	2-甲基丁酸	ND	13.54±4.38^{a}	13.01±0.66^{a}	ND	6.57±1.54^{b}
Aci5	异丁酸	9.36±0.73^{b}	18.47±2.16^{a}	13.01±1.38^{b}	12.00±1.79^{b}	10.47±3.01^{b}
	芳香族					
Aro1	2,4-二叔丁基苯酚	141.45±4.45^{a}	158.74±43.23^{a}	87.39±0.79^{b}	141.82±5.24^{a}	142.07±19.12^{a}
Aro2	苯甲醇	87.55±4.11	ND	ND	ND	ND
Aro3	苯乙烯	5.99±0.58^{ab}	7.18±1.23^{a}	6.25±0.39^{ab}	5.85±0.44^{b}	6.56±0.09^{ab}
Aro4	乙酸苄酯	0.97±0.01^{a}	ND	0.86±0.07^{b}	ND	ND
Aro5	苯乙酸丁香酚酯	ND	51.33±14.87^{a}	24.53±0.96^{c}	33.51±3.68^{bc}	42.84±10.87^{ab}
	酮类					
Ket1	2-壬酮	1.44±0.14	ND	ND	ND	ND
Ket2	大马士酮	5.71±0.28^{ab}	5.99±1.29^{a}	4.55±0.01^{b}	5.10±0.41^{ab}	5.26±0.53^{ab}
	萜烯类					
Ter1	香茅醇	7.33±0.67	ND	ND	ND	ND

SY 组酒样的乙酸乙酯含量为 792.38 μg/L，显著低于其他组(1347.41~1582.51 μg/L，P<0.05)。

高级醇主要由酿酒酵母经 Ehrlich 途径降解氨基酸生成，适量时赋予酒体水果香，但过量积累会产生不愉快气味，含量过低则导致酒体单薄[32]。在三华李果酒中，醇类化合物种类相对较少(5~6 种)，其中异戊醇含量最高，异丁醇和正丙醇次之。其中，SY 组酒样的异戊醇含量与 DV10 组相比无显著性差异(P>0.05)，且该两组酒样的异戊醇含量均显著低于 D254 组和 K1 组(P<0.05)，与 EC1118 组无显著差异(P>0.05)。同时，SY 组酒样的异丁醇含量显著低于其他 4 组(P<0.05)。基于此醇类组成特征，SY 组酒样的高级醇总量与 DV10 组相比无显著性差异(P>0.05)，但显著低于其他 3 组(P<0.05)。SY

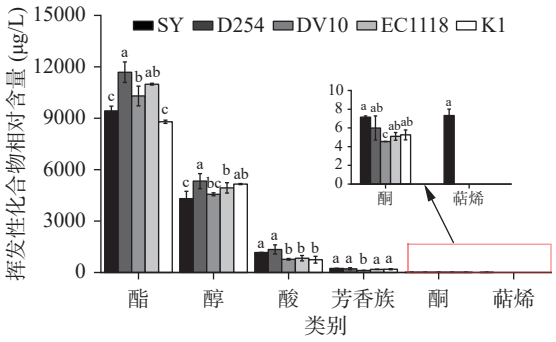


图 3 不同酵母发酵三华李果酒挥发性成分比较

Fig.3 Comparison of volatile components in Sanhua plum wine fermented with different yeasts

组酒样中较低的高级醇总量水平，使其在维持酒体香气骨架完整性的同时，有效规避了因过量积累引发的感官劣变风险。

在 5 组酒样中检出的 5 种酸类化合物中，乙酸、辛酸、己酸和异丁酸为共有成分，2-甲基丁酸存在于除 SY 组和 EC1118 组外的三组酒样中。其中，乙酸含量最高，辛酸和己酸次之。SY 组和 D254 组酒样的乙酸含量分别为 613.07、761.01 μg/L，二者均显著高于其他 3 组（328.21~426.17 μg/L，P<0.05）。酸类物质总量分析表明，SY 组和 D254 组相比无显著性差异（P>0.05），但二者均显著高于其余 3 组（P<0.05）。

芳香族、酮类和萜烯类化合物虽含量较低，但对酒体香气复杂度的提升具有重要贡献。芳香族化合物中，2,4-二叔丁基苯酚和苯乙烯为 5 组酒样的共有组分，苯甲醇仅在 SY 组酒样中被检出（87.55 μg/L）。所有酒样中共检测出 2 种酮类化合物和 1 种萜烯类化合物，分别是 2-壬酮、大马士酮和香茅醇。其中，大马士酮为共有组分（4.55~5.99 μg/L），而 2-壬酮和香茅醇是 SY 组酒样的特有组分。

2.5.2 不同酵母发酵三华李果酒差异化合物鉴定分析 为解析不同酵母发酵三华李果酒的特征风味物质，本研究以酵母菌株为预测变量，5 组酒样中检出的 57 种挥发性化合物为响应变量，采用 PLS-DA 进行建模。如图 4A 所示，该模型实现了 5 组酒样的有效分离。模型参数显示：自变量拟合指数 R^2x=0.973，因变量拟合指数 R^2y=0.996，预测指数 Q^2=0.9919。R^2 与 Q^2 值均大于 0.5，表明模型拟合结果可接受[34]。通过 200 次置换检验验证模型可靠性（图 4B），Q^2 回归线与纵轴交点为负值，排除过拟合风险，确认模型可靠、有效[34]，可用于解析不同酵母发酵三华李果酒挥发性化合物的差异特征。

VIP（Variable Importance in Projections）值可量化 PLS-DA 模型中各变量对分类的贡献度，VIP 值越大表明变量在组间差异越显著[29]。为筛选 5 种酵母发酵三华李果酒的显著差异化合物，以 VIP>1 且

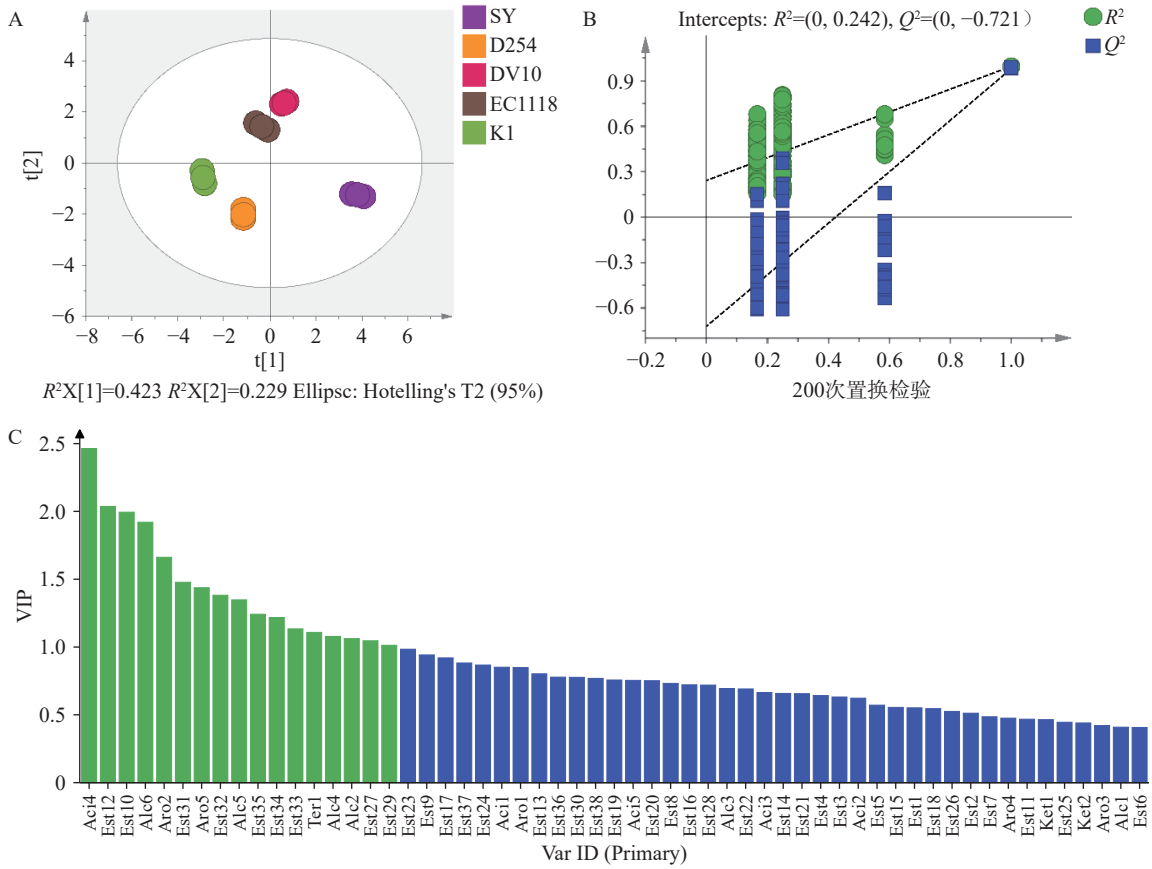


图 4 不同酵母发酵三华李果酒挥发性成分的 PLS-DA 分析

Fig.4 PLS-DA analysis of volatile components in Sanhua plum wine fermented with different yeast strains

注：A：得分图；B：200 次置换检验图；C：VIP 预测值分布图；图中物质的编号代码对应表 4。

P<0.05 的条件进行筛选[34]，共鉴定出 17 种标志性差异挥发性化合物（图 4C），包括 9 种酯类（丁二酸二乙酯、辛酸异戊酯、己酸甲酯、乙酸甲酯、3-羟基丁酸乙酯、庚酸乙酯、十八酸乙酯、己酸丙酯、2-甲基丁酸乙酯）、4 种醇类（1,3-丙二醇单乙醚、反式-3-己烯-1-醇、（2R,3R）-(-)-2,3-丁二醇、正丙醇）、2 种芳香族（苯甲醇、苯乙酸丁香酚酯）、1 种酸类（2-甲基丁酸）和 1 种萜烯类（香茅醇），这些化合物可作为区分不同酵母发酵酒样的特征标志物。其中，苯甲醇与香茅醇是 SY 组酒样的特征成分，苯甲醇呈现温和的花香[35]，香茅醇则表现出蔷薇、柑橘及玫瑰花香特征[36]，二者对该组酒样的花香与果香特征具有重要贡献。

2.6　不同酵母发酵三华李果酒的感官评价

果酒的感官特征是衡量其质量与消费者偏好的关键指标[37]，而感官评价则是判断果酒品质最根本和最直接的方法[29]。如图 5 所示，感官评价结果显示，酵母种类对三华李果酒的感官属性有显著影响。在色泽方面，SY 组、DV10 组和 EC1118 组酒样的得分（4.43~4.67 分）明显高于其他 2 组（4.07~4.17 分），均呈现出典型的李子酒色泽与光泽感。就澄清度而言，SY 和 DV10 组酒样得分明显高于其他 3 组，分别为 4.80 和 4.83 分。在香气特征方面，SY组酒样得分最高（28.50 分），酒体呈现出浓郁的果香与酒香，且香气协调愉悦；K1 组酒样香气得分最低（24.83 分），这一结果与其挥发性化合物种类最少且含量最低的结果相吻合。滋味评价中，SY 组酒样得分最高（34.43 分），酒体表现出丰满醇厚、协调平衡的特点；DV10 组酒样得分最低（27.67 分）。典型性评价显示，酵母 SY 发酵酒样得分最高（17.67 分），D254 组最低（15.60）。综合感官评价结果表明，SY 酵母发酵的三华李果酒以 89.90 分的综合得分显著高于其他菌株（P<0.05），感官品质最佳。

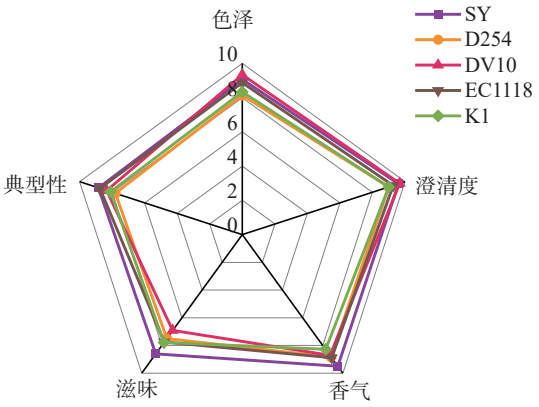


图 5　三华李果酒感官评分雷达图

Fig.5　Radar chart for sensory evaluation of Sanhua plum wines

注：感官评分经十分制转化后绘制雷达图。

3　结论

本研究系统比较了 5 种商业酿酒酵母（SY、D254、DV10、EC1118 和 K1）对三华李果酒品质的影响。结果表明，所有酵母发酵酒样的酒精度均符合预期，甲醇含量低于安全限值，干浸出物含量达标。不同酵母发酵的三华李果酒品质存在显著差异：D254 酵母发酵酒样呈现最低的总酸和苹果酸含量；DV10 酵母发酵酒样则表现出最强的抗氧化活性，其 DPPH·清除能力和还原力均最高；而 K1 酵母发酵酒样的挥发性化合物种类最少且含量最低，感官评分也最低；SY 酵母发酵酒样展现出最优的综合品质，其氨基酸总量最高，挥发性成分组成最复杂，含有苯甲醇和香茅醇等特征风味物质，同时感官评分最高，酒体呈现丰满醇厚、协调平衡的特性。因此，SY 酵母被确定为三华李果酒酿造的最佳商业菌株，本研究为三华李果酒生产中的酵母选择提供了理论依据。

© The Author(s) 2026. 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] WU Zhiqian, LI Xusheng, ZENG Yingyu, et al. Color stability enhancement and antioxidation improvement of Sanhua plum wine under circulating ultrasound[J]. Foods, 2022, 11(16): 2435.

[2] WEN Ke, CHEN Xinxin, ZHOU Xue, et al. *Phytophthora nicotianae*: A new threat to Sanhua plum (*Prunus salicina*) causing shoot blight in China[J]. European Journal of Plant Pathology, 2023, 166(3): 329−339.

[3] LI Lu, YU Yangyang, XU Yujuan, et al. Effect of ultrasound-assisted osmotic dehydration pretreatment on the drying characteristics and quality properties of Sanhua plum (*Prunus salicina* L.)[J]. LWT, 2021, 138: 110653.

[4] PAVLOVIĆ H, TOMINAC V P, VELIĆ D, et al. Application of wine yeast starter cultures in the production of grape and fruit wines[J]. Fermentation, 2025, 11(4): 228.

[5] WANG Fei, ZHAO Pengtao, DU Guorong, et al. Advancements and challenges for brewing aroma-enhancement fruit wines: Microbial metabolizing and brewing techniques[J]. Food Chemistry, 2024, 456: 139981.

[6] 熊荣园, 王思怡, 魏玲, 等. 催陈工艺对果酒芳香物质形成影响研究进展[J]. 食品工业, 2024, 45(12): 149−152. [XIONG Rongyuan, WANG Siyi, WEI Ling, et al. The research on the effect of aging technology on the formation of aromatic substances in fruit wine[J]. The Food Industry, 2024, 45(12): 149−152.]

[7] WANG Z Y, SVYANTEK A, BOGENRIEF S, et al. The influence of yeast strain on the chemical, chromatic, and sensory characteristics of ‘wodarz’ apple cider[J]. Applied Sciences, 2024, 14(11): 4851.

[8] CHEN Li, LI Ke, CHEN Huitai, et al. Reviewing the source, physiological characteristics, and aroma production mechanisms of aroma-producing yeasts[J]. Foods, 2023, 12(18): 3501.

[9] WHITELEY L E, RIECKH G, DIGGLE F L, et al. Use of commercial or indigenous yeast impacts the *S. cerevisiae* transcriptome during wine fermentation[J]. Microbiology Spectrum, 2024, 12(11): e01194−e01124.

[10] HERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ G, CHAPINGO U A, GUERRA-RAMÍREZ D, et al. Fermented beverage of *Ardisia compressa*

fruits based on commercial and native yeasts: Evaluation of kinetic changes[J]. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 2022, 22(3): 1−21.

[11] LIU Junyu, LI Ruirui, LI Ying, et al. Selection of indigenous *Saccharomyces cerevisiae* strains with good oenological and aroma characteristics for winemaking in Ningxia China[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101693.

[12] LONG Junming, CAI Jian, GAO Xiu, et al. Investigation on screening, identification, and fermentation characteristics of Yunnan olive in the fermented liquid utilizing five strains of *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Archives of Microbiology, 2024, 206(4): 164.

[13] 吴德光, 刘政凯, 王力腾, 等. 三华李果酒生产专用酵母的筛选与酿造性能比较[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 24−29. [WU Deguang, LIU Zhengkai, WANG Liteng, et al. Screening and brewing performance compares of special yeasts for Sanhua plum wine production[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(6): 24−29.]

[14] 海金萍, 刘钰娜, 邱松山. 三华李果酒发酵工艺的优化及香气成分分析[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 222−229. [HAI Jinping, LIU Yuna, QIU Songshan. Optimization of fermentation process of 'Sanhua' plum wine and analysis of its aroma components[J]. Food Science, 2016, 37(23): 222−229.]

[15] 常腾文, 易子程, 陈翔, 等. 美极梅奇酵母发酵马瑟兰葡萄酒过程中品质成分的动态变化规律[J]. 食品工业科技, 2025, 46(22): 339−347. [CHANG Tengwen, YI Zicheng, CHEN Xiang, et al. Dynamic changes of quality components during *Metschnikowia pulcherrima* fermentation of marselan wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(22): 339−347.]

[16] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 葡萄酒、果酒通用分析方法: GB/T 15038-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Analytical methods of wine and fruit wine: GB/T 15038-2006[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.]

[17] HOSU A, CRISTEA V M, CIMPOIU C. Analysis of total phenolic, flavonoids, anthocyanins and tannins content in Romanian red wines: Prediction of antioxidant activities and classification of wines using artificial neural networks[J]. Food Chemistry, 2014, 150: 113−118.

[18] 娄世豪, 孙小晶, 李丹丹, 等. 干燥方式对山楂总黄酮含量及抗氧化性质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 121−129. [LOU Shihao, SUN Xiaojing, LI Dandan, et al. Effects of different drying methods on total flavonoids content and antioxidant activity of hawthorn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 121−129.]

[19] CHEN Xuexue, PENG Mengdi, WU Dianhui, et al. Physicochemical indicators and sensory quality analysis of kiwi wines fermented with different *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e17132.

[20] 陈秋竹, 谢菡怡, 何娇娇, 等. 基于有机酸和多酚组成的贵州 5 种特色水果酿酒特性评价[J]. 食品科学, 2024, 45(10): 158−166. [CHEN Qiuzhu, XIE Hanyi, HE Jiaojiao, et al. Evaluation of wine fermentation characteristics of Guizhou's five specialty fruits based on the composition of organic acids and polyphenols[J]. Food Science, 2024, 45(10): 158−166.]

[21] 蒋力力, 田露琴, 尚煜豪, 等. 不同种类高温大曲功能特性与成分差异比较[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 362−370. [JIANG Lili, TIAN Luqin, SHANG Yuhao, et al. Comparison of functional characteristics and compositional differences of different high-temperature daqu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 362−370.]

[22] TIAN Tiantian, YANG Hua, YANG Fan, et al. Optimization of fermentation conditions and comparison of flavor compounds for three fermented greengage wines[J]. LWT, 2018, 89: 542−550.

[23] ZENG Qingbo, HA Shuo, CHEN Ming, et al. Common organic acids in fruit wine and the deacidification strategies[J]. Systems Microbiology and Biomanufacturing, 2025, 5(2): 489−499.

[24] 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. [MENG Jinming, FAN Aiping, HE Chuanqi, et al. Dynamic changes of physicochemical and aroma components in the fermentation process of mango-carrot compound fruit wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(12): 7−13.]

[25] PIOMBINO P, LISANTI M T, PITTARI E, et al. Studying how dry extract can affect the aroma release and perception in different red wine styles[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(2): 901−912.

[26] 中华人民共和国工业和信息化部. 果酒通用技术要求: QB/T 5476-2020[S]. 北京: 中国轻工业出版社, 2020. [Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China. General technical requirements for fruit wine: QB/T 5476-2020[S]. Beijing: China Light Industry Press, 2020.]

[27] SHEN Ju, HUANG Weidong, YOU Yilin, et al. Controlling strategies of methanol generation in fermented fruit wine: Pathways, advances, and applications[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(6): e70048.

[28] 中华人民共和国农业部. 绿色食品 果酒: NY/T 1508-2017[S]. 北京: 中国农业出版社, 2017. [Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Green food. Fruit wine: NY/T 1508-2017[S]. Beijing: China Agriculture Press, 2017.]

[29] 周艳, 陈雅, 廖茂雯, 等. 不同品种李子品质特性及其酿酒适宜性评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 272−282. [ZHOU Yan, CHEN Ya, LIAO Maowen, et al. Quality characteristics of different plum varieties and their suitability for winemaking[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 272−282.]

[30] 张云伟, 白天华, 王礼, 等. 葡萄酒加工废弃物的资源化利用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 302−310. [ZHANG Yunwei, BAI Tianhua, WANG Li, et al. Recent advances on resource utilization of wine wastes[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 302−310.]

[31] 张驰, 李宛格, 钮成拓, 等. 枇杷果酒酿酒酵母的筛选及其发酵性能研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(13): 135−143. [ZHANG Chi, LI Wange, NIU Chengtuo, et al. Screening of strains for brewing loquat wine and study on its fermentation performance[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(13): 135−143.]

[32] 田甜甜. 青梅酒酿酒酵母的选育及耐酸机制解析[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [TIAN Tiantian. Screening of *Saccharomyces cerevisiae* for greengage wine and its mechanism of acid tolerance[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]

[33] 赵永梅, 郑万财, 谢惠春, 等. 不同酵母对香茶藨子果酒品质

及挥发性成分的影响[J]. 食品与发酵工业，2024, 50(12): 142−150. [ZHAO Yongmei, ZHENG Wancai, XIE Huichun, et al. Effect of different yeasts on quality and volatile components of *Ribes odoratum* Wendl. fruit wine[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(12): 142−150.]

[34] CHEN Lihua, LI Dongna, RONG Yuzhi. Fermentation mechanism of *Ginkgo* rice wine using an ultra-high-performance liquid chromatography–quadrupole/time-of-flight mass spectrometry based metabolomics method[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 105: 104230.

[35] 蔡尉彤, 吴文辉, 王孝余, 等. 红枣风味发酵液的制备及其关键香气成分分析[J/OL]. 食品科学技术学报, 1−21[2026-03-31]. [CAI Weitong, WU Wenhui, WANG Xiaoyu, et al. Preparation of jujube flavor fermented juice and analysis of its key aroma components[J/OL]. Journal of Food Science and Technology, 1−21[2026-03-31].]

[36] 李嘉欣, 徐彬艳, 俞柏含, 等. 果汁复配比例和混菌发酵对富士-美乐复合果酒品质的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(4): 81−90. [LI Jiaxin, XU Binyan, YU Baihan, et al. Effects of mixing ratio and mixed culture fermentation on the quality of fuji-merlot wine [J]. Food Science, 2025, 46(4): 81−90.]

[37] SUN Q, EBERSOLE C, WONG D P, et al. The impact of vineyard mechanization on grape and wine phenolics, aroma compounds, and sensory properties[J]. Fermentation, 2022, 8(7): 318.