

火龙果果酒酵母的分离鉴定及其混菌发酵工艺优化

申开卫¹, 王雪邈¹, 张旭艺¹, 穆波², 邱树毅^{1,*}

(1. 贵州大学酿酒与食品工程学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省分析测试研究院, 贵州 贵阳 550013)

摘要: 为改善酿酒酵母发酵火龙果酒风味单一的问题, 从自然发酵火龙果酒中分离筛选非酿酒酵母, 通过感官嗅闻法筛选香气明显且乙醇味弱的菌株, 结合形态学观察与分子生物学技术对菌株进行鉴定, 考察其耐受性, 并将其与酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) SY 进行混合发酵制备火龙果酒, 通过单因素试验与正交试验优化混菌发酵工艺条件, 并测定单菌、混菌发酵火龙果酒中的挥发性风味物质。结果表明, 分离筛选出一株产香酵母 DBS-1, 经鉴定为盔形毕赤酵母 (*Pichia manshurica*), 可在 pH 3.0、乙醇体积分数 8%、糖度 18 °Brix 条件下较好地生长。火龙果酒最佳酿造工艺条件为初始糖度 22 °Brix、初始 pH 4.5、接种量 4%、混菌比例 (SY:DBS-1) 1:1。在此优化条件下, 果酒乙醇体积分数为 8.5%, 感官评分为 95.5 分。混菌发酵火龙果酒共鉴定出 45 种挥发性风味物质, 20 种关键挥发性风味物质 (香气活度值 (odor activity value, OAV) ≥ 1); 与酿酒酵母单菌发酵相比, 混菌发酵火龙果酒中酯类、酸类、醇类物质含量分别增加 82.4%、47.6%、37.7%, 己酸乙酯、辛酸、苯乙醇等关键挥发性风味物质的 OAV 升高, 酒体风味的协调性增强。

关键词: 火龙果酒; 非酿酒酵母; 混合发酵; 工艺优化; 风味

Isolation and Identification of Yeasts from Pitaya Wine and Optimization of Mixed-Strain Fermentation Technology

SHEN Kaiwei¹, WANG Xueli¹, ZHANG Xuyi¹, MU Bo², QIU Shuyi^{1,*}

(1. School of Liquor and Food Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Academy of Testing and Analysis, Guiyang 550013, China)

Abstract: To address the issue of insufficient flavor complexity in pitaya wine fermented with pure *Saccharomyces cerevisiae*, non-*Saccharomyces* were isolated and screened from naturally fermented pitaya wine in this study. Strains characterized by prominent aroma production and weak alcoholic pungency were selected via sensory olfactory evaluation, followed by identification through morphological observation and molecular biological techniques. Their stress tolerance properties were further assessed, and mixed-strain fermentation combining the screened strain with *S. cerevisiae* SY was performed to brew pitaya wine. The mixed-culture fermentation parameters were optimized using single-factor tests coupled with orthogonal experiments, and volatile flavor compounds in pitaya wines produced by single-strain and mixed-strain fermentation were systematically analyzed. The results revealed that an aroma-enhancing yeast strain, designated DBS-1, was isolated and identified as *Pichia manshurica*. This strain displayed favorable growth performance under the conditions of pH 3.0, 8% ethanol concentration and 18 °Brix initial sugar content. The optimal fermentation conditions for pitaya wine were determined as follows: initial sugar content of 22 °Brix, initial pH of 4.5, inoculum of 4%, and a mixing ratio of SY to DBS-1 of 1:1. Under these optimized conditions, the resulting pitaya wine attained an alcohol content of 8.5% and a high sensory evaluation score of 95.5. A total of 45 volatile flavor compounds were identified in the mixed-fermentation pitaya wine, among which 20 compounds were classified as key volatile components (odor activity value (OAV) ≥ 1). Compared with pure *S. cerevisiae* fermentation, mixed-strain fermentation increased the total contents of esters, acids and

收稿日期: 2022-02-24

基金项目: 贵州省科技支撑项目 (黔科合支撑[2022]一般148号)

第一作者简介: 申开卫 (2000—), 男, 硕士, 研究方向为食品科学与工程。E-mail: 1454997715@qq.com

*通信作者简介: 邱树毅 (1963—), 男, 教授, 博士, 研究方向生物工程。E-mail: syqiu@gzu.edu.cn

alcohols by 82.4%, 47.6% and 37.7%, respectively. Furthermore, it elevated the OAVs of key aroma compounds including ethyl hexanoate, octanoic acid and phenylethanol, thereby effectively improving the overall flavor balance and sensory quality of pitaya wine.

Keywords: pitaya wine; non-*Saccharomyces*; mixed-strain fermentation; process optimization; flavor

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.009

中图分类号: TS262.7

文献标志码: A

文章编号: 0254-5071 (2026) 05-0065-09

引文格式:

申开卫, 王雪邴, 张旭艺, 等. 火龙果酒酵母的分离鉴定及其混菌发酵工艺优化[J]. 中国酿造, 2026, 45(5): 65-73.

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.009. <http://www.chinabrewing.net.cn>

SHEN Kaiwei, WANG Xueli, ZHANG Xuyi, et al. Isolation and identification of yeasts from pitaya wine and optimization of mixed-strain fermentation technology[J]. China Brewing, 2026, 45(5): 65-73. (in Chinese with English abstract)

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.009. <http://www.chinabrewing.net.cn>

火龙果 (*Hylocereus undulatus*) 属于仙人掌科水果^[1], 集中在广西、海南与贵州等地区种植^[2]。火龙果富含多酚类、黄酮类等活性物质, 具有抗氧化、抗炎、保护消化道与心血管健康等功能^[3]。火龙果鲜食加工兼用, 采收期集中, 采后易腐败、贮藏期短, 将其制备成果酒有助于提高其附加值^[2]。

果酒是以除葡萄以外的新鲜水果或果汁为原料, 经全部或部分发酵酿制而成的发酵酒, 选择适宜的酵母菌种是火龙果果酒酿造的关键。目前酿酒酵母 (*Saccharomyces cerevisiae*) 应用最广泛, 但其代谢产物单一, 易造成果酒风味同质化^[4-6]。非酿酒酵母可产生丰富次级代谢产物, 提升果酒风味层次^[7-8]与口感^[9], 但乙醇产率较低, 单独发酵难以完成发酵过程^[10]。目前, 可应用于果酒发酵的非酿酒酵母主要包括毕赤酵母属 (*Pichia*)、假丝酵母属 (*Candida*)、汉逊酵母属 (*Hanseniaspora*)、克鲁维酵母属 (*Kluyveromyces*)、有孢圆酵母属 (*Torulaspora*) 等^[11], 这类菌株大多分离自果皮、水果发酵醪液及土壤等环境^[12]。关于火龙果果酒的研究集中在果酒工艺优化^[13-15]及非酿酒酵母筛选^[16], 但适用于火龙果果酒发酵专用菌株鲜见报道。

本研究以自然发酵的火龙果果酒为原料分离非酿酒酵母, 通过感官嗅闻法筛选香气明显且乙醇味弱的菌株, 通过形态学与分子生物学对菌株进行鉴定, 并将其与酿酒酵母进行混合发酵制备火龙果果酒, 通过单因素试验及正交试验对其混合发酵工艺条件进行优化, 并采用顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱 (headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 分析单菌、混菌发酵火龙果果酒挥发性风味物质, 以期为火龙果果酒的风味品质提升提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

红心火龙果 (品种蜜宝) 采自贵州省黔南布依族苗族自治州罗甸县火龙果种植基地; 自然发酵的红心火龙果果酒采用火龙果带皮发酵工艺, 发酵温度25~30℃, 发酵时间7 d, 经过滤后制得, 由贵州省黔南布依族苗族自治州罗甸县火龙果酒厂提供; 酿酒酵母SY 安琪酵母股份有限公司。

柠檬酸 (食品级) 山东英轩实业股份有限公司; 果胶酶 (30 000 U/g) 烟台帝伯仕酵母有限公司; 2-辛醇标准品、无水乙醇 (均为色谱纯)、酵母基因组DNA提取试剂盒 北京索莱宝科技有限公司; *Taq* Plus酶、聚合酶链式反应 (polymerase chain reaction, PCR) Buffer 生工生物工程 (上海) 股份有限公司。

酵母浸出粉胨葡萄糖 (yeast extract peptone dextrose, YPD) 培养基: 葡萄糖20.0 g/L、蛋白胨20.0 g/L、酵母粉10.0 g/L。YPD固体培养基: 在YPD液体培养基中添加20.0 g/L的琼脂粉。121℃高压蒸汽灭菌20 min。

1.2 仪器与设备

8890-7000E三重四极杆气相色谱-质谱仪 (配备SPME Arrow聚丙烯酸酯纤维头、260W309P色谱柱 (60 m×250 μm, 0.25 μm)) 安捷伦科技 (中国) 有限公司; L580R冷冻离心机 上海卢湘仪离心机仪器有限公司; DMiL LED倒置荧光显微镜 徕卡显微系统 (上海) 贸易有限公司; PAL-1便携式数显折光仪 ATAGO (爱拓) 中国分公司; Multiskan SkyHigh全波长酶标仪 赛默飞世尔科技公司; Countstar BioLab细胞计数仪 上海睿钰生物科技有限公司。

1.3 方法

1.3.1 菌株分离筛选

取100 mL自然发酵的火龙果酒样品接入250 mL YPD液体培养基中,于28℃、180 r/min条件下富集培养24 h^[17]。将富集后的培养液用无菌生理盐水按照10倍梯度依次稀释至 10^{-6} ,选取100 μ L稀释梯度为 10^{-4} 、 10^{-5} 、 10^{-6} 的菌液均匀涂布于YPD固体培养基上,于28℃静置培养48 h。根据菌落形态特征,挑选典型菌落分离纯化2~3次,直至镜检观察细胞形态均一。采用嗅闻法初步筛选出香气较浓且乙醇味弱的菌株^[18]。菌株编号后挑取单菌落制备菌液,与50%无菌甘油1:1混合,于-80℃冷藏保存。

1.3.2 菌株鉴定

形态学观察:将保藏于斜面的菌株接种至YPD固体培养基,于28℃恒温培养48 h。参照《酵母菌的特征与鉴定手册》^[19],观察并记录菌落的大小、颜色、表面形态等特征。随后,挑取单菌落,用无菌生理盐水制备菌悬液,取样制片,将其置于倒置荧光显微镜下观察酵母细胞的形态及出芽方式。

分子生物学鉴定:根据酵母基因组DNA提取试剂盒说明书提取总DNA,以提取的基因组DNA为模板,使用引物NL1(5'-GCATATCAATAAGCGGAGGAAAAG-3')和NL4(5'-GGTCCGTGTTTCAAGACGG-3')扩增酵母菌26S rDNA D1/D2区序列。PCR扩增体系(25 μ L):10 $\times$ PCR Buffer 12.5 μ L、dNTP混合物(10 mmol/L) 0.5 μ L、Taq Plus DNA聚合酶(5 U/ μ L) 0.2 μ L、上下游引物(10 μ mol/L)各1.0 μ L、DNA模板(50 ng/ μ L) 1.0 μ L,双蒸水(ddH₂O)补足至25 μ L。PCR扩增条件:95℃预变性5 min;94℃变性30 s,57℃退火30 s,72℃延伸90 s,共30个循环后,72℃终延伸10 min。扩增的26S rDNA序列产物送至生工生物工程(上海)股份有限公司进行双向测序,测序结果上传至NCBI的GenBank数据库中进行BLAST比对,下载同源性较高的参考序列,经ClustalX多重比对后,采用MEGA 7.0软件以邻接法构建系统发育树。

1.3.3 种子液制备

酿酒酵母种子液:称取0.5 g的酿酒酵母活性干粉,加入到100 mL 5%葡萄糖溶液中,置于30℃、180 r/min条件下活化10~15 min。随后使用细胞计数仪测定培养液中的细胞浓度,当其浓度达到 1×10^7 个/mL且OD_{600 nm}值达到0.8时,即获得酿酒酵母的种子液。

非酿酒酵母种子液:将保藏的菌株接种于YPD固体培养基,于28℃静置培养24 h,再转接至YPD液体培养基中28℃、180 r/min培养24 h,利用细胞计数仪检测细

胞浓度至 1×10^7 个/mL且OD_{600 nm}值达到0.8时,即获得非酿酒酵母的种子液。

1.3.4 筛选菌株生长曲线测定

将筛选得到的非酿酒酵母种子液(1×10^7 个/mL)按2%(V/V)的接种量接种至YPD培养基中,于28℃条件下培养48 h,期间每隔2 h取样测定。以无菌YPD液体培养基作为空白对照,测定样品的OD_{600 nm}值,以培养时间为横坐标,OD_{600 nm}值为纵坐标,绘制菌株的生长曲线。

1.3.5 耐受性实验

将非酿酒酵母种子液按2%(V/V)的接种量分别接种于不同乙醇体积分数(0%、2%、4%、6%、8%、10%、12%)、不同初始pH值(2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、4.5、5.0)及不同初始糖度(6、10、14、18、22、26、30°Brix)的YPD液体培养基中,于28℃、180 r/min培养24 h后,测定OD_{600 nm}值,考察筛选菌株对不同乙醇体积分数、初始pH值及初始糖度的耐受性。

1.3.6 火龙果果酒制备

火龙果汁的制备:挑选无虫害、无损伤、无腐烂的红心火龙果,去皮后使用原汁机分离果汁与果渣,为抑制褐变与氧化反应,向果汁中添加0.1 g/kg的抗坏血酸,并加入8 g/kg的果胶酶,于55℃黑暗条件下水解2 h以降解除果胶。随后,使用饱和蔗糖溶液将果汁糖度调整至22°Brix,用柠檬酸溶液将果汁pH值调节至4.5,最后经巴氏杀菌(65℃、30 min),冷却后于4℃冷藏备用。

火龙果果酒的制备:待处理好的火龙果汁升温至25℃后,接种4%(V/V)的酵母种子液,于28℃静置培养7 d,5 000 r/min离心10 min后保藏于4℃冰箱备用。

1.3.7 果酒发酵工艺优化

单因素试验:采用单因素轮换法,依次考察接种量(1%、2%、3%、4%、5%)、酿酒酵母与非酿酒酵母接种比例(1:1、1:1.5、1:2、1:2.5、1:3)、初始糖度(16、18、20、22、24°Brix)、初始pH值(3.5、4.0、4.5、5.0、5.5)对火龙果果酒乙醇体积分数及感官品质的影响。

正交试验:根据单因素试验结果,以初始糖度(A)、初始pH值(B)、接种量(C)以及混菌比例(D)为影响因素,以感官评分为评价指标,进行4因素3水平L₉(3⁴)正交试验进行发酵工艺优化,正交试验因素与水平见表1。

表1 发酵工艺条件优化正交试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels in orthogonal experimental design for optimization of fermentation process conditions

水平	因素			
	A初始糖度/ °Brix	B初始pH	C接种量/%	D混菌比例
1	20	4.0	3	1.0:1.0
2	22	4.5	4	1.0:1.5
3	24	5.0	5	1.0:2.0

1.3.8 理化指标检测

乙醇体积分数的测定：参照GB/T 15038—2006《葡萄酒、果酒通用分析方法》。

1.3.9 感官评价

选取10名专业的感官品评人员组成感官评价小组，参照GB/T 15038—2006中的评分细则，从颜色及澄清度、香气、口感和典型性4个方面对红心火龙果果酒样品进行感官评价，满分100分，感官评价标准见表2。

表2 火龙果果酒感官评分标准
Table 2 Sensory evaluation criteria for pitaya wine

项目（分值）	评价标准	评分
颜色及澄清度 (20)	深红色，澄清透明	16~20
	深红色，基本澄清	11~15
	深红色，酒体浑浊	6~10
	暗红色，酒体浑浊	1~5
香气 (30)	浓郁醇厚，香气协调	21~30
	醇香清淡，无异味	11~20
	香气单一，无异味	6~10
	香气不良，有异味	1~5
口感 (30)	酒质醇厚，后味绵长	21~30
	酒质醇和，不够柔和	11~20
	酒质协调，纯正无杂味	6~10
	酒味刺激，酸味苦味过重	1~5
典型性 (20)	酒体协调，典型性强	15~20
	酒体不协调，典型性一般	8~14
	酒体不协调，典型性不足	1~7

1.3.10 挥发性风味物质测定

采用HS-SPME-GC-MS法测定单菌发酵组与混菌发酵组的挥发性风味物质^[20]。

样品预处理：准确移取1 mL样品置于20 mL顶空瓶中，加入1 g NaCl和10 μL内标物2-辛醇（10 μg/mL）。

HS-SPME条件：将聚丙烯酸酯纤维头在使用前置于250 ℃下老化5 min。将老化后的纤维头插入顶空瓶，于50 ℃顶空萃取30 min，随后在250 ℃下解吸5 min，进行GC-MS分析。

GC条件：260W309P色谱柱（60 m×250 μm，0.25 μm），不分流进样，载气为高纯氮气，流速1.0 mL/min。程序升温条件为：初始温度50 ℃保持1 min，以3 ℃/min升至220 ℃，保持5 min，总运行时间63 min。

MS条件为：电子电离源，电子能量70 eV，离子源温度250 ℃，离子传输管温度280 ℃，四极杆温度150 ℃，质量扫描范围m/z 30~350。

定性定量分析：采用NIST 20数据库检索，并且匹配度大于90%进行定性分析；采用内标法进行定量分析。

香气活度值（odor activity value, OAV）用于评价挥发性风味成分对样品香气的贡献程度，其值为化合物在体系中的实际质量浓度与其香气阈值之比。将OAV≥1的物质确定为关键挥发性风味物质，表示该物质对样品的整体风味有显著贡献，OAV<1表示该物质对整体风味的贡献较小。

1.4 数据处理与统计分析

采用Excel 2022处理数据，采用SPSS 25进行显著性分析，采用OriginPro 2025软件绘图。

2 结果与分析

2.1 菌株的分离纯化及鉴定结果

从自然发酵红心火龙果果酒中分离纯化共获得3株菌株，分别编号为DBS-1、DBS-2、DBS-3，通过嗅闻法发现菌株DBS-2、DBS-3有明显乙醇味，菌株DBS-1有花果香无乙醇味，故初步判断DBS-1为非酿酒酵母。

菌株DBS-1菌落、细胞形态如图1A、B所示，菌落呈淡黄色、不透明、表面湿润且黏稠、形态大而凸起、边缘光滑。细胞呈卵圆形至梭形，可见端芽殖方式，芽体突出明显。对该菌株进行分子生物学鉴定，基于26S rDNA序列的系统发育树如图1C所示，该菌株的序列与盔形毕赤酵母（*Pichia manshurica*）的模式菌株DNA序列相似性为99%，聚于一支，亲缘关系最近。因此，结合形态学特征，将菌株DBS-1鉴定为盔形毕赤酵母（*Pichia manshurica*）。

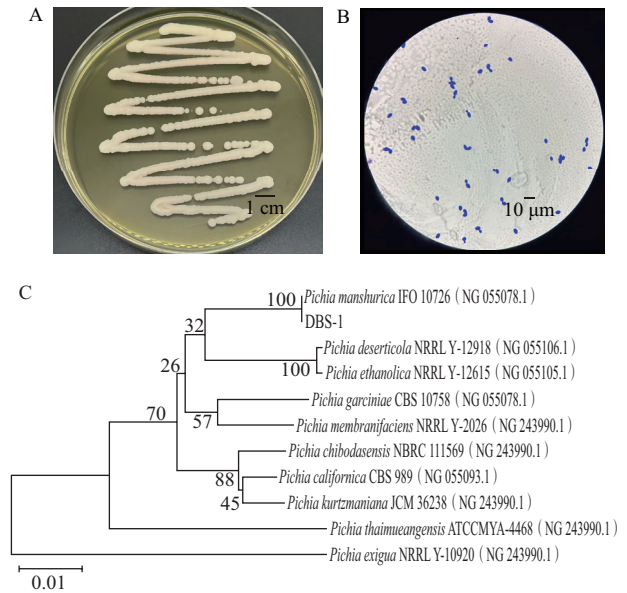


图1 菌株DBS-1的菌落形态（A）、细胞形态（×1 000）（B）与基于26S rDNA序列的系统发育树（C）
Fig. 1 Colony morphology (A), cell morphology (×1 000) (B) and phylogenetic tree based on 26S rDNA sequences (C) of strain DBS-1

2.2 筛选菌株DBS-1的生长曲线

由图2可知, 0~6 h为延滞期; 6~36 h为对数生长期, 16~28 h $OD_{600\text{ nm}}$ 值维持在0.8~1.2之间; 36~64 h为稳定期; 64~72 h为衰亡期, $OD_{600\text{ nm}}$ 值出现小幅度下降, 主要是由于培养基养分趋于耗尽, 代谢废物积累, 导致酵母菌细胞死亡速率高于增殖速率, 种群数量逐渐减少^[21]。因此, 选择培养时间为16~28 h进行接种。

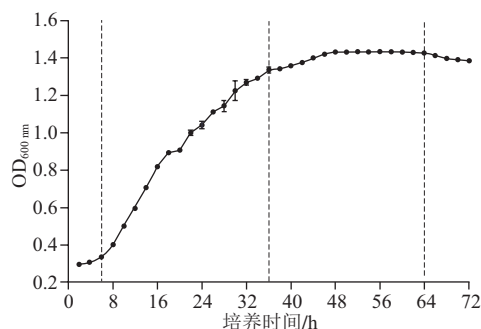


图2 菌株DBS-1的生长曲线
Fig. 2 Growth curve of strain DBS-1

2.3 菌株耐受性

2.3.1 pH值耐受性

不同初始pH值对菌株DBS-1生物量的影响见图3。当初始pH值在2.0~4.5范围内增加时, $OD_{600\text{ nm}}$ 值呈明显上升趋势; 当初始pH值为4.5~5.0时, $OD_{600\text{ nm}}$ 值稳定在1.02左右, 表明该范围的初始pH值有助于菌株DBS-1生长。研究表明, $OD_{600\text{ nm}}$ 值低于0.8时表明菌株生长受到抑制^[22]。因此, 确定菌株可耐受初始pH值为3.0。

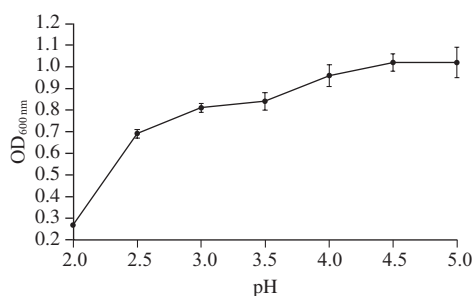


图3 初始pH值对菌株DBS-1生物量的影响
Fig. 3 Effect of initial pH on the biomass of strain DBS-1

2.3.2 乙醇耐受性

由图4可知, 随着乙醇体积分数在0%~4%范围内的增加, $OD_{600\text{ nm}}$ 值呈上升趋势。当乙醇体积分数超过4%时, $OD_{600\text{ nm}}$ 值开始下降, 直至乙醇体积分数达8%时, $OD_{600\text{ nm}}$ 值降至0.79。因此, 菌株可耐受乙醇体积分数为8%。

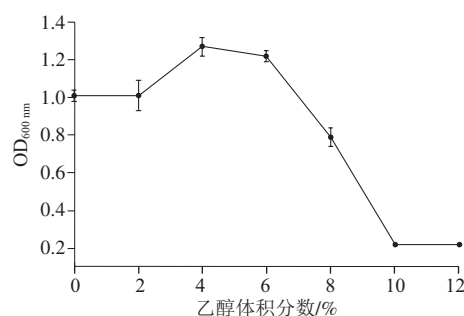


图4 乙醇体积分数对菌株DBS-1生物量的影响
Fig. 4 Effect of ethanol volume fraction on the biomass of strain DBS-1

2.3.3 糖度耐受性

由图5可知, 随着糖度在6~10 °Brix范围内的增加, $OD_{600\text{ nm}}$ 值呈上升趋势; 当糖度大于10 °Brix时, $OD_{600\text{ nm}}$ 值开始下降, 当糖度升高到18 °Brix时, $OD_{600\text{ nm}}$ 值降至0.76。因此, 菌株可耐受糖度为18 °Brix。

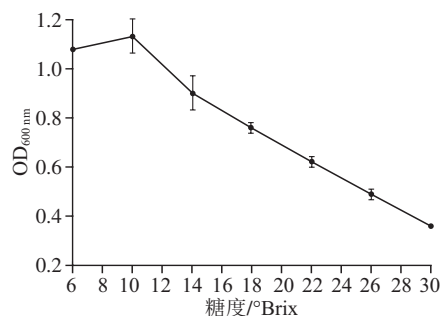
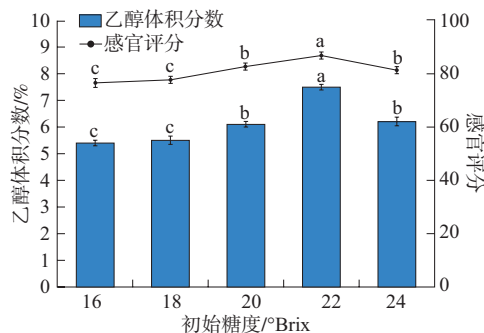


图5 糖度对菌株DBS-1生物量的影响
Fig. 5 Effect of sugar content on biomass of strain DBS-1

2.4 红心火龙果果酒发酵工艺条件优化单因素试验结果

2.4.1 初始糖度的确定

由图6可知, 随着初始糖度在16~24 °Brix范围内的增加, 感官评分及乙醇体积分数均呈先升高后下降的趋势。当初始糖度为22 °Brix时, 感官评分及乙醇体积分数均达到最高值, 分别为86.87分、7.5%, 其原因可能是, 在适宜糖度下酵母菌代谢活性旺盛, 能高效地将糖转化为乙醇, 而过高糖度则抑制了酵母菌活性, 导致乙醇的合成量下降^[23]。综上, 确定最佳初始糖度为22 °Brix。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)。图7~9同。
图6 初始糖度对火龙果酒乙醇体积分数与感官评分的影响
Fig. 6 Effect of initial sugar content on alcohol content and sensory score of pitaya wine

2.4.2 初始pH值的确定

由图7可知,随着初始pH值在3.5~5.5范围内的增加,感官评分及乙醇体积分数均呈先升高后下降的趋势。当初始pH值为4.5时,感官评分及乙醇体积分数均达到最高值,分别为87.18分、7.3%,其原因可能是,pH值过高或过低都会抑制酵母活性与关键酶效率,使乙醇合成减少^[22]。综上,确定最佳初始pH值为4.5。

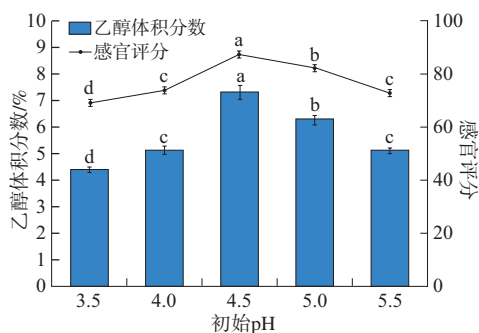


图7 初始pH值对火龙果酒乙醇体积分数与感官评分的影响
Fig. 7 Effects of initial pH on alcohol content and sensory score of pitaya wine

2.4.3 接种量的确定

由图8可知,随着接种量在1%~5%范围内的增加,感官评分及乙醇体积分数均呈先升高后下降的趋势。当接种量为4%时,感官评分及乙醇体积分数均达到最高值,分别为88.26分、8.3%。其原因可能是,接种量过低会导致果酒发酵启动迟缓、糖代谢不完全,导致酒体风味单薄^[24],过高的接种量会导致酵母细胞密度过大,从而加剧了菌体对碳源的竞争性消耗,并可能导致酵母过早进入衰亡期,最终限制了乙醇的合成^[21]。综上,确定最佳接种量为4%。

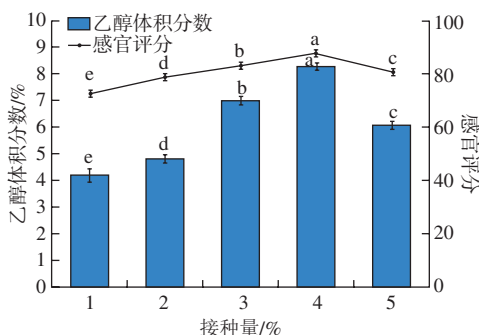


图8 接种量对火龙果酒乙醇体积分数与感官评分的影响
Fig. 8 Effects of inoculation amount on alcohol content and sensory score of pitaya wine

2.4.4 混菌比例的确定

由图9可知,当混菌比例为1.0:1.5时,感官评分及乙醇体积分数均达到最高值,分别为87.2分、8.1%,其原因可能是,酿酒酵母占比过高时,会打破菌群协同代谢

平衡,削弱非酿酒酵母的产香作用^[25],高比例非酿酒酵母提前占据营养与生态位,抑制酿酒酵母生长,降低整体糖酵解效率^[26]。综上,确定最佳混菌比例为1.0:1.5。

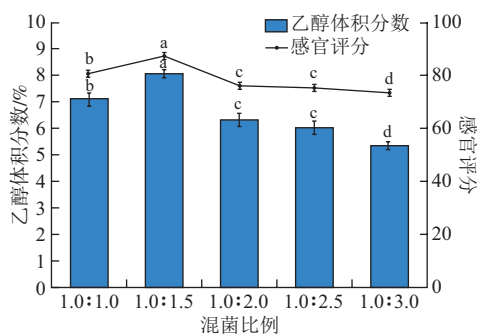


图9 混菌比例对火龙果酒乙醇体积分数与感官评分的影响
Fig. 9 Effects of mixed strain ratios on alcohol content and sensory score of pitaya wine

2.5 火龙果酒发酵工艺条件优化正交试验结果

在单因素试验结果的基础上,以感官评分为评价指标,以初始糖度(A),初始pH值(B),接种量(C)及混菌比例(D)为影响因素,进行4因素3水平正交试验,火龙果酒发酵工艺条件优化正交试验结果与分析见表3,方差分析见表4。

表3 火龙果酒发酵工艺条件优化正交试验结果
Table 3 Results of orthogonal experiments for optimizing the fermentation process conditions of pitaya wine

试验号	A	B	C	D	感官评分
1	1	1	1	1	84.2
2	1	2	3	2	87.8
3	1	3	2	3	82.7
4	2	1	3	3	78.7
5	2	2	2	1	95.5
6	2	3	1	2	91.3
7	3	1	2	2	86.9
8	3	2	1	3	86.8
9	3	3	3	1	89.0
K ₁	254.70	249.80	262.30	268.70	
K ₂	265.50	270.10	265.10	266.00	
K ₃	262.70	263.00	255.50	248.20	
k ₁	84.90	83.27	87.43	89.57	
k ₂	88.50	90.03	88.37	88.67	
k ₃	87.57	87.67	85.17	82.73	
R	3.60	6.77	2.27	6.83	

由表3可知,由R值可知,各因素对火龙果酒感官评分的影响顺序为混菌比例>初始pH值>初始糖度>接种量。根据K值的大小,确定最佳的发酵工艺条件组合为A₂B₂C₂D₁,出现在正交试验5,即初始糖度22 °Brix、初始pH 4.5、接种量4%、混菌比例1.0:1.0。此条件下,果酒乙醇体积分数为8.5%,感官评分为95.5分。由表4可知,初始糖度、初始pH值、接种量、混菌比例对火龙果酒感官评分影响均极显著(P<0.01)。

表4 正交试验结果方差分析
Table 4 Analysis of variance for orthogonal experiment results

因素	偏差平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
A	62.792	2	31.396	35.409	0.009 9	**
B	211.503	2	105.751	119.269	0.008 6	**
C	49.479	2	24.739	27.901	0.009 2	**
D	247.276	2	123.638	139.442	0.008 1	**
误差	15.960	18	0.887			

注: **极显著 ($P<0.01$)。

2.6 火龙果酒挥发性风味物质分析

采用HS-SPME-GC-MS对酿酒酵母单菌、酿酒酵母与盔形毕赤酵母(1:1)混合发酵火龙果果酒中挥发性风味化合物进行测定,结果如表5所示,共检测出55种挥发性化合物,单菌发酵组共检测出44种挥发性化合物,包括24种酯类、6种酸类、6种醇类、3种酚类、3种芳香类、2种其他类,混菌发酵组共检测出45种挥发性化合物,包括22种酯类、7种酸类、7种醇类、3种酚类、4种芳香类、2种其他类;其中共有挥发性风味物质有34种。混菌发酵组火龙果果酒的挥发性物质总质量浓度(1 066.98 mg/L)显著高于对照组(696.26 mg/L) ($P<0.05$)。

表5 火龙果果酒挥发性风味化合物含量
Table 5 Volatile flavor compound contents in pitaya wine

序号	种类	化合物	质量浓度/(mg/L)	
			单菌发酵组	混菌发酵组
1	酯类	油酸乙酯	2.24±0.27 ^b	4.82±0.18 ^a
2		1,5-二甲基-1-乙基-4-己烯基丁酸酯	0.37±0.03 ^a	0.46±0.03 ^a
3		苯甲酸-2-氯乙酯	0.37±0.05 ^a	0.35±0.03 ^a
4		苯乙酸乙酯	15.68±0.24 ^b	27.65±1.16 ^a
5		苯甲酸乙酯	0.51±0.04	—
6		癸酸-2-甲基丁酯	—	1.24±0.06
7		癸酸乙酯	107.62±2.65 ^b	153.98±2.96 ^a
8		月桂酸乙酯	16.69±3.26 ^a	17.78±1.14 ^a
9		9-癸烯酸乙酯	33.75±8.42 ^b	81.84±3.36 ^a
10		棕榈油酸乙酯	10.25±0.3 ^b	15.65±1.37 ^a
11		乙酸乙酯	5.25±0.52	—
12		琥珀酸氢乙酯	0.18±0.06 ^a	0.24±0.05 ^a
13		甲酸己酯	0.23±0.03	—
14		庚酸乙酯	0.42±0.02	—
15		棕榈酸乙酯	6.84±0.90 ^b	9.96±0.69 ^a
16		己酸-2-甲基丁酯	0.37±0.06 ^a	0.61±0.01 ^a
17		己酸乙酯	3.02±0.09 ^b	10.82±0.34 ^a
18		2-羟基-4-甲基苯甲酸甲酯	2.34±0.22 ^b	4.55±0.12 ^a
19		辛酸异丁酯	—	0.67±0.09
20		壬酸乙酯	0.68±0.03 ^b	1.37±0.11 ^a
21		硬脂酸乙酯	1.99±0.11 ^a	1.97±0.04 ^a
22		辛酸异戊酯	2.21±0.48 ^b	4.76±0.76 ^a
23		辛酸乙酯	101.68±2.17 ^b	233.94±7.66 ^a
24		2-甲基-5-氧代脯氨酸甲酯	0.11±0.01	—
25		肉豆蔻酸乙酯	—	0.57±0.09
26		磷酸三异丁酯	0.89±0.09 ^b	1.36±0.09 ^a
27		乙酸异戊酯	5.21±0.49 ^b	7.10±0.74 ^a
小计			318.89±20.54 ^b	581.69±21.08 ^a

续表5

序号	种类	化合物	质量浓度/(mg/L)	
			单菌发酵组	混菌发酵组
28	酸类	9-癸烯酸	1.41±0.08 ^b	2.34±0.09 ^a
29		乙酸	13.29±0.36 ^b	20.51±3.22 ^a
30		苯乙酸	—	0.14±0.02
31		月桂酸	—	0.77±0.18
32		2-甲基己酸	0.64±0.06	—
33		癸酸	5.28±0.16 ^b	7.47±0.08 ^a
34		辛酸	13.64±0.73 ^b	19.20±1.09 ^a
35		异丁酸	0.50±0.06 ^b	0.86±0.16 ^a
小计			34.76±1.45 ^b	51.29±4.84 ^a
36	醇类	3-甲基-1-戊醇	—	0.16±0.01
37		2,3-丁二醇	2.40±0.20 ^b	12.54±1.80 ^a
38		2-壬醇	—	0.37±0.02
39		3,4-二甲基苯甲醇	—	0.20±0.01
40		3-羟基-2-丁酮	0.28±0.06 ^a	0.32±0.09 ^a
41		香茅醇	1.62±0.17 ^b	1.04±0.29 ^a
42		甘油	1.57±0.31	—
43		苯乙醇	109.23±8.95 ^b	144.13±2.33 ^a
44		R-(-)-1,2-丙二醇	0.20±0.03	—
小计			115.30±9.72 ^b	158.76±4.55 ^a
45	酚类	2,4-二叔丁基苯酚	3.99±0.14 ^b	6.11±0.10 ^a
46		2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	—	2.85±0.29
47		4-(2-甲氧基乙基)-2-甲基苯酚	0.04±0.02	—
48		愈创木酚	—	0.38±0.01
49		5-乙烯基-2-甲氧基-苯酚	5.80±0.18	—
小计			9.83±0.34 ^a	9.34±0.40 ^a
50	芳烃类	苯甲醛	0.91±0.03 ^a	1.22±0.05 ^a
51		对甲基苯甲醛	—	2.68±0.32
52		1,3-双(1,1-二甲基乙基)-苯	0.11±0.03 ^a	0.17±0.05 ^a
53	小计	2,3-二氢-苯并呋喃	0.91±0.04 ^b	3.64±0.16 ^a
小计			1.93±0.10 ^b	7.71±0.58 ^a
54	其他类	二甲醚	126.87±11.51 ^b	110.73±10.85 ^a
55		3-(1-甲基乙基)氧杂环丁烷	88.68±3.29 ^b	147.46±33.86 ^a
小计			215.55±14.80 ^a	258.19±44.71 ^a
总计			696.26±37.23 ^b	1 066.98±76.16 ^a

注: 同行小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$); —.未检出。下同。

酯类物质是果酒风味的重要组成部分,可为果酒提供花香、果香与蜂蜜香^[27]。混菌发酵与单菌发酵分别检测出22种和24种酯类物质。混菌发酵组中酯类物质总质量浓度为581.69 mg/L,较对照组(318.89 mg/L)提高了82.4%。其中,混菌发酵组己酸乙酯、辛酸乙酯、9-癸烯酸乙酯含量分别提高了2.6、1.3、1.4倍,可增强果酒中菠萝、香蕉、梨等典型果香特征^[28]。研究表明,毕赤酵母可通过自身生长代谢为酿酒酵母提供中长链脂肪酸,并分泌高活性酯类合成酶,与酿酒酵母形成代谢协同作用,定向高效合成脂肪酸乙酯^[26]。

酸类物质主要来源于水果本身,适量的酸类物质可赋予果酒清爽的口感^[29]。此外,酸类物质还可作为

酯类的合成前体^[30]。混菌发酵与单菌发酵分别检测出7种和6种酸类物质。混菌发酵组中酸类物质总质量浓度为51.29 mg/L, 较对照组(34.76 mg/L)提高了47.6%, 其中, 癸酸与辛酸质量浓度分别从5.28 mg/L与13.64 mg/L显著提高至7.47 mg/L与19.20 mg/L($P<0.05$), 辛酸与癸酸均属于中链饱和脂肪酸, 是果酒脂香基底的核心组分, 也是酯类(辛酸乙酯、癸酸乙酯)合成的关键酰基前体^[28]。

醇类物质主要为果酒带来辛辣味, 香甜味与果香味^[31]。混菌发酵与单菌发酵分别检测出7种和6种醇类物质。混菌发酵组中醇类物质总质量浓度为158.76 mg/L, 较对照组(115.30 mg/L)显著提高了37.7%($P<0.05$), 其中, 苯乙醇质量浓度由109.23 mg/L提高至144.13 mg/L, 增加32%。苯乙醇为体系中最主要的醇类成分, 占醇类物质总含量的90%以上, 是决定果酒花香强度的芳香醇^[31]。研究表明, 非酿酒酵母(含毕赤酵母属)与酿酒酵母混合发酵时可从提高L-苯丙氨酸前体合成、苯乙醇合成酶底物亲和力2方面显著提高苯乙醇产量^[32]。

由表6可知, 关键挥发性风味物质($OAV\geq 1$)共有23种, 单菌发酵、混菌发酵组关键挥发性风味物质均有20种, 混菌发酵组中的油酸乙酯、苯乙酸乙酯、辛酸乙酯、癸酸乙酯、己酸乙酯等酯类物质的OAV均显著提高, 其中己酸乙酯OAV由604提高到2 164, 是增强果酒菠萝与香蕉典型香气的核心物质^[33]。辛酸乙酯和癸酸乙酯OAV分别由524.12与882.13提高至1 205.88与1 262.13, 二者均可显著增强果酒的果香、甜香与酒香, 提升酒体圆润、醇厚感, 改善风味层次。辛酸异戊酯、苯乙酸乙酯的OAV提高则进一步丰富了果香层次, 并赋予火龙果果酒玫瑰与蜂蜜甜香^[33]; 脂肪酸类物质中辛酸、癸酸的OAV经混菌发酵后分别由4.55、40.62提高至6.40、57.46, 为酒体补充了温和的脂香基底, 与酯类果香形成互补, 提升了风味饱满度^[34]。苯乙醇是火龙果果酒的核心醇类物质, 其OAV由193.6提高至255.45, 显著增强了果酒的玫瑰花香, 此外, 混菌发酵火龙果果酒中新增2-甲氧基-4-乙基苯酚、愈创木酚与2-壬醇这3种关键挥发性风味物质, 赋予果酒辛香、烟熏香与蜡香的风味特征, 进一步丰富了酒体的风味复杂性^[35]。此外, 硬脂酸乙酯OAV由3.98降低至3.04, 减少了淡蜡香对风味的干扰。综上, 相较于单菌发酵, 混菌发酵可有效增强主体风味, 提高了酒体风味的协调性, 使火龙果果酒呈现果香突出、花香清雅、脂香醇厚的协调风味。

表6 火龙果果酒挥发性化合物的OAV
Table 6 OAVs of volatile compounds in pitaya wine

序号	化合物	香气特征 ^[35-37]	阈值/ (mg/kg) ^[38]	OAV	
				单菌发酵组	混菌发酵组
1	油酸乙酯	淡脂肪香、油脂气味	0.87	2.57±0.31 ^b	5.54±0.21 ^a
2	苯乙酸乙酯	甜香、蜂蜜样、玫瑰香	0.155 55	100.78±1.54 ^b	177.76±7.46 ^c
3	苯甲酸乙酯	清新果香与冬青油样香气	0.055 56	9.20±0.72	—
4	癸酸乙酯	果香、类似白兰地酒香	0.122	882.13±21.72 ^b	1 262.13±24.26 ^c
5	月桂酸乙酯	花果香、蜡香、肥皂样	0.4	41.71±8.15 ^a	44.45±2.85 ^a
6	乙酸乙酯	类似菠萝或香蕉果香	0.257	20.43±2.02	—
7	庚酸乙酯	类似苹果或梨果香	0.001 9	221.05±10.53	—
8	棕榈酸乙酯	微弱的蜡香、脂香	2.0	3.42±0.45 ^b	4.98±0.35 ^a
9	己酸-2-甲基酯	类似苹果或香蕉果香	0.032	11.56±1.88 ^b	19.06±0.31 ^a
10	己酸乙酯	类似菠萝或香蕉果香	0.005	604.00±18.21 ^b	2 164.00±68.4 ^c
11	壬酸乙酯	葡萄香、脂肪香	0.377	1.80±0.08 ^b	3.63±0.29 ^a
12	硬脂酸乙酯	几乎无味或淡蜡香	0.5	3.98±0.22 ^a	3.04±0.08 ^b
13	辛酸异戊酯	类似香蕉或梨果香	0.07	31.57±6.86 ^b	68.05±10.86 ^c
14	辛酸乙酯	类似菠萝或杏果香	0.194	524.12±11.18 ^b	1 205.88±39.48 ^c
15	乙酸异戊酯	类似香蕉或梨果香	0.5	10.42±0.98 ^b	14.20±1.48 ^a
16	癸酸	脂肪臭, 类似山羊或椰油	0.13	40.62±1.23 ^b	57.46±0.62 ^a
17	辛酸	汗臭、奶酪样、脂肪气味	3.0	4.55±0.24 ^b	6.40±0.36 ^a
18	2-壬醇	油脂香、蘑菇样、土味	0.058	—	6.38±0.34
19	香茅醇	甜玫瑰香、柑橘样、花香	0.062	26.10±2.74 ^b	16.77±4.68 ^a
20	苯乙醇	玫瑰花香、蜜香	0.564 23	193.60±15.86 ^b	255.45±4.13 ^a
21	2-甲氧基-4-乙基苯酚	辛香、烟熏香、丁香样	0.516	—	5.52±0.56
22	愈创木酚	烟熏香、甜香、酚样	0.000 84	—	452.38±11.90
23	苯甲醛	苦杏仁香、樱桃样	0.750 89	1.21±0.04 ^a	1.62±0.07 ^a

3 结 论

本研究从自然发酵的火龙果果酒中分离鉴定出一株产香酵母DBS-1, 经形态学观察与分子生物学技术鉴定为盔形毕赤酵母(*Pichia manshurica*), 可在pH 3.0、乙醇乙醇体积分数8%、糖度18 °Brix条件下生长较好。通过单因素及正交试验优化其发酵工艺条件为: 初始糖度22 °Brix、初始pH 4.5、接种量4%、混菌比例1:1。在此优化条件下, 火龙果果酒乙醇体积分数为8.5%, 感官评分为95.5分。混菌发酵火龙果果酒共鉴定出45种挥发性风味物质, 20种关键挥发性风味物质($OAV\geq 1$); 与酿酒酵母单菌发酵相比, 酿酒酵母与盔形毕赤酵母(*Pichia manshurica*)(1:1)混菌发酵火龙果果酒中酯类、酸类、醇类物质含量分别增加82.4%、47.6%、37.7%, 提高己酸乙酯、辛酸、苯乙醇等关键挥发性风味物质的OAV, 赋予果酒菠萝、香蕉等典型果香及花香特征, 提高了酒体风味的协调性, 为混合发酵火龙果果酒的发酵条件优化及风味调控提供了理论基础及技术支撑。

参考文献:

- [1] 孙佩光, 程志号, 孙长君, 等. 16份火龙果种质资源果实营养成分分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(19): 6585-6592.
- [2] JIANG X, LU Y, LIU S Q. Effects of pectinase treatment on the physicochemical and oenological properties of red dragon fruit wine fermented with *Torulaspora delbrueckii*[J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 132: 9.
- [3] 张文婧, 冯欣悦, 贾金霄, 等. 火龙果功能性成分提取及应用的研究进展[J]. 农产品加工, 2025(5): 88-91.
- [4] 叶丽敏, 刘祎帆, 肖更生, 等. 发酵技术在火龙果加工中的应用[J]. 农产品加工, 2025(17): 89-95.
- [5] XIAO C, PAN Y, HUANG M. Advances in the dynamic control of metabolic pathways in *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Eng Microbiol, 2023, 3(4): 100103.
- [6] BORREN E, TIAN B. The important contribution of non-*Saccharomyces* yeasts to the aroma complexity of wine: a review[J]. foods, 2021, 10(1): 13.
- [7] 黄绿红, 罗艺璇, 唐琪, 等. 戴尔有孢圆酵母与酿酒酵母混合发酵对黄桃酒香气的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(20): 250-257.
- [8] SUN W, CHEN X, FENG S, et al. Effect of sequential fermentation with indigenous non-*Saccharomyces cerevisiae* combinations and *Saccharomyces cerevisiae* on the chemical composition and aroma compounds evolution of kiwifruit wine[J]. Food Chem, 2024, 460: 14.
- [9] WANG X, FAN G, PENG Y, et al. Mechanisms and effects of non-*Saccharomyces* yeast fermentation on the aromatic profile of wine[J]. J Food Compos Anal, 2023, 124: 20.
- [10] PARAMITHIOTIS S, PATRA J K, KOTSERIDIS Y, et al. utilization of non-*Saccharomyces* to address contemporary winemaking challenges: species characteristics and strain diversity[J]. Fermentation, 2025, 11(12): 33.
- [11] 谭玉岩, 郝宁. 酿酒酵母与非酿酒酵母混合发酵对果酒品质的影响[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 353-359.
- [12] MAICAS S, MATEO J J. The Life of *Saccharomyces* and non-*Saccharomyces* yeasts in drinking wine[J]. Microorganisms, 2023, 11(5): 1178.
- [13] 卢玥, 杨易坤, 郑若欣, 等. 红心火龙果酒发酵工艺研究及其风味物质分析[J]. 酿酒科技, 2025(3): 17-24.
- [14] 干莉娜, 樊春燕, 孟宪福. 红心火龙果酒发酵工艺技术研究[J]. 食品科技, 2024, 49(6): 116-121.
- [15] 马婷婷, 梁艳玲, 沈冰, 等. 低杂醇百香果-火龙果复合果酒生产工艺优化[J]. 食品安全导刊, 2024(33): 122-124.
- [16] 李凯, 王金晶, 李永仙, 等. 红心火龙果酒酿酒酵母的筛选及鉴定[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 115-120.
- [17] LÓPEZ-ENRÍQUEZ L, VILA-CRESPO J, RODRÍGUEZ-NOGALES J M, et al. Non-*Saccharomyces* yeasts from organic vineyards as spontaneous fermentation agents[J]. Foods, 2023, 12(19): 3644.
- [18] 卢玥, 杨易坤, 郑若欣, 等. 产香酵母的筛选鉴定、生长特性及其混菌发酵果酒应用[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31(2): 282-294.
- [19] 巴尼特, 佩恩, 亚罗. 酵母菌的特征与鉴定手册[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1991: 15-22.
- [20] CANUTI V, CONVERSANO M, CALZI M L, et al. Headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry for profiling free volatile compounds in Cabernet Sauvignon grapes and wines[J]. J Chromatogr A, 2009, 1216(15): 3012-3022.
- [21] SHEN D, HE X, WENG P, et al. A review of yeast: high cell-density culture, molecular mechanisms of stress response and tolerance during fermentation[J]. FEMS Yeast Res, 2022, 22(1): foac50.
- [22] NARENDRA NATH N V, POWER R. Relationship between pH and medium dissolved solids in terms of growth and metabolism of lactobacilli and *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol production[J]. Appl Environ Microbiol, 2005, 71(5): 2239-2243.
- [23] ANH T T Q, AN N T, THUY D T B. Characterization of red dragon fruit wine fermented with a newly identified yeast strain *Saccharomyces cerevisiae* M7[J]. Food Technol Biotechnol, 2025, 63(1): 4-13.
- [24] 马欣娟, 吕慧威, 孙玉梅. 接种量对草莓酒发酵特性的影响[J]. 中国酿造, 2019, 38(5): 123-126.
- [25] 吴健, 何伟, 王建成, 等. 酿酒酵母与产香酵母发酵特性及其相互作用规律[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(20): 78-87.
- [26] 李海峰, 李坤, 牟志勇, 等. 非酿酒酵母在酒类酿造过程中的微生物相互作用及功能特性研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 313-323.
- [27] 田怀香, 熊娟娟, 于海燕, 等. 果酒中香气化合物的生物转化与调控机制研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 36-47.
- [28] WANG M, WANG J, CHEN J, et al. Effect of commercial yeast starter cultures on Cabernet Sauvignon wine aroma compounds and microbiota[J]. Foods, 2022, 11(12): 1725.
- [29] 石金琴, 刘新宇, 海超, 等. 非酿酒酵母混合发酵对果酒增香的研究进展[J]. 中国酿造, 2025, 44(7): 20-25.
- [30] WANG Y, SUN Z, ZHANG C, et al. Comparative transcriptome analysis reveals the key regulatory genes for higher alcohol formation by yeast at different α -amino nitrogen concentrations[J]. Food Microbiol, 2021, 95: 103713.
- [31] HOU X, CHENG H, LUO Y, et al. Microbial terroir of Helan Mountain east foothill: the role of indigenous yeasts in shaping regional wine flavor during spontaneous fermentation[J]. LWT-Food Sci Technol, 2025, 238: 118881.
- [32] MITRI S, KOUBAA M, MAROUN R G, et al. Bioproduction of 2-phenylethanol through yeast fermentation on synthetic media and on agro-industrial waste and by-products: a review[J]. Foods, 2022, 11(1): 109.
- [33] 周煜, 薛璐, 吴子健, 等. 啤酒挥发性风味成分研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(1): 210-219.
- [34] 李凯娅, 毛曦庆, 林雪, 等. 梅奇酵母与酿酒酵母混合发酵对火龙果酒风味的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(10): 54-60.
- [35] 唐洁, 林斌, 单义民, 等. 白酒中愈创木酚类化合物研究进展[J]. 中国酿造, 2025, 44(1): 1-5.
- [36] 王丽, 李雪, 刘光宪, 等. 芦笋猕猴桃复合果酒发酵过程中挥发性香气物质的变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 242-250.
- [37] 祝霞, 王媛, 刘琦, 等. 混菌发酵对贵人香低醇甜白葡萄酒的香气影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(4): 95-102.
- [38] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 242-431.