何洋, 安琪尔, 袁国慧, 等. 酿酒酵母/胶红酵母协同米根霉发酵改善云南米酒的风味品质 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 294−303. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020131

HE Yang, AN Qi'er, YUAN Guohui, et al. Enhancing Yunnan Rice Wine through Cooperative Fermentation of *Saccharomyces cerevisiae*/*Rhodotorula mucilaginosa* with *Rhizopus oryzae* for Flavor Quality Improvement[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 294−303. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020131

·分析检测·

酿酒酵母/胶红酵母协同米根霉发酵改善云南米酒的风味品质

何　洋[1,2], 安琪尔[1], 袁国慧[1], 冯怡婷[1], 郭　磊[1], 韩　龙[1,*], 范方宇[1,2,3,*]

（1.西南林业大学生物与食品工程学院, 云南昆明 650224;
2.云南省发酵蔬菜重点实验室, 云南红河 651100;
3.云南省高校大健康类森林资源开发利用工程研究中心, 云南昆明 650224）

摘　要: 为解决云南甜米酒风味寡淡的问题，以云南传统甜米酒中筛选的高产醇酿酒酵母 LF05（*Saccharomyces cerevisiae* LF05，LF05）、高产酯胶红酵母 PL10（*Rhodotorula mucilaginosa* PL10，PL10）为研究对象，探究酿酒酵母、胶红酵母及混菌协同米根霉发酵对甜米酒理化性质、感官、游离氨基酸、挥发性成分的影响。结果表明：酵母菌协同米根霉发酵的甜米酒乙醇浓度、鲜味氨基酸、甜味氨基酸、挥发性化合物含量均有所提升。LF05-PL10 混菌的感官评分、鲜味氨基酸、甜味氨基酸、高级醇、酯类化合物含量均为各组最高，比米根霉组分别提高 89.03%、94.07%、155.37%、335.04%、412.25%，使其达到“提醇增酯增香”的效果。对甜米酒的 16 种游离氨基酸、73 种挥发性化合物进行 OPLS-DA 分析，以 VIP 值≥1 为条件筛选出 8 种差异氨基酸和 30 种差异挥发性化合物，其对甜米酒独特风味形成具有重要贡献。综上，酿酒酵母/胶红酵母协同米根霉发酵可有效改善云南甜米酒风味寡淡问题，研究可为云南甜米酒的风味品质改善提供理论参考。

关键词: 甜米酒, 酵母混菌, 氨基酸, 气相色谱-质谱法（GC-MS）, 挥发性成分

中图分类号: TS262.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0294−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020131

本文网刊:

Enhancing Yunnan Rice Wine through Cooperative Fermentation of *Saccharomyces cerevisiae*/*Rhodotorula mucilaginosa* with *Rhizopus oryzae* for Flavor Quality Improvement

HE Yang[1,2], AN Qi'er[1], YUAN Guohui[1], FENG Yiting[1], GUO Lei[1], HAN Long[1,*], FAN Fangyu[1,2,3,*]

（1.College of Biology Science and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;
2.Yunnan Key Laboratory of Fermented Vegetables, Honghe 651100, China;
3.Forest Resources Exploitation and Utilization Engineering Research Center for Grand Health of Yunnan Provincial Universities, State Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, China）

Abstract: In order to solve the problem of the thin flavor of Yunnan sweet rice wine. This study had focused on locally screened high alcohol producing *Saccharomyces cerevisiae* LF05 and high esters producing *Rhodotorula mucilaginosa* PL10, investigating the effects of their mono- and co-fermentation with *Rhizopus oryzae* on the physicochemical properties, sensory characteristics, free amino acids, and volatile compounds of the wine. The synergistic fermentation with yeasts and

收稿日期: 2025−02−20

基金项目: 云南省重大科技专项计划（202302AE090019）; 云南省发酵蔬菜重点实验室开放课题（202205AG070001）; 云南省科技厅中青年学术和技术带头人后备人才项目（202405AC350032）。

作者简介: 何洋（1999−）, 男, 硕士, 研究方向: 食品发酵, E-mail: heyang18468@163.com。

*** 通信作者:** 韩龙（1987−）, 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品微生物, E-mail: longhan24@vip.qq.com。
范方宇（1979−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农林产品加工, E-mail: ffy118@163.com。

Rhizopus oryzae had significantly enhanced ethanol concentration, umami amino acids, sweetness amino acids, and volatile compound content in sweet rice wines. The LF05-PL10 co-culture group had demonstrated the highest sensory score, umami amino acids, sweetness amino acids, higher alcohols, and ester compounds among all experimental groups, with increases of 89.03%, 94.07%, 155.37%, 335.04%, and 412.25% compared to the *Rhizopus oryzae*-only group, respectively. This synergistic effect had achieved the goal of "enhancing alcohol content, ester synthesis, and aroma complexity" in the fermented product. Orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) had been applied to 16 free amino acids and 73 volatile compounds in sweet rice wines. With variable importance in projection (VIP) values ≥1 as the threshold, 8 differential amino acids and 30 differential volatile metabolites had been identified as key contributors to the characteristic flavor profile of the wine. In conclusion, the cooperative fermentation strategy using *Saccharomyces cerevisiae*/*Rhodotorula mucilaginosa* with *Rhizopus oryzae* had effectively alleviated the bland flavor issue in Yunnan sweet rice wines, providing a theoretical foundation for flavor quality optimization in traditional fermented beverages.

Key words: sweet rice wine; yeast mix; amino acids; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); volatile components

甜米酒是以糯米为原料，经酒曲中微生物发酵而成的传统发酵食品，富含氨基酸、低聚糖和多肽等营养物质，深受消费者喜爱[1]。云南甜米酒发酵剂分商业酒曲和传统酒曲。商业酒曲一般由单一米根霉构成，发酵产品品质稳定，但风味寡淡[2]；传统酒曲由多菌系（霉菌、酵母菌、乳酸菌为主）构成，发酵产品芳香扑鼻、滋味醇厚但品质不稳[3]。因此，酒曲是决定甜米酒品质的重要因素，酒曲中微生物种类及其组成比例是甜米酒风味形成的关键。

甜米酒发酵过程涉及微生物（霉菌、酵母菌和乳酸菌为主）间的复杂相互作用。发酵前期，霉菌通过分泌淀粉酶，将淀粉水解为葡萄糖以提升甜米酒糖化效率和出品率[4]。在甜米酒发酵后期，霉菌演替酵母菌成为优势菌群；此时酿酒酵母通过糖酵解、Ehrlich 途径将糖类物质转化为醇类化合物；产香酵母通过酯化反应、Ehrlich 途径、糖代谢途径生成多种芳香类化合物[5]。因此甜米酒风味的形成与酵母菌息息相关。Zhao 等[6] 发现酿酒酵母协同米根霉发酵米酒中乙醇、挥发性化合物含量显著高于自然发酵米酒。雷英杰等[7] 发现非酿酒酵母协同米根霉发酵甜米酒中酯类化合物种类及含量明显高于单一米根霉发酵甜米酒。Cui 等[8] 研究了酿酒酵母、非酿酒酵母混菌发酵甜米酒，结果发现产品中的异丁醇、异戊醇和苯乙醇、乙酸乙酯比单一酿酒酵母分别提高了 185%、29% 和 138%、145%，米酒酒体感官评分及风味物质明显提高。综上，酵母菌作为甜米酒风味形成的"灵魂"，对提升云南米酒风味品质稳定性具有可行性。

基于此，研究选取课题组前期从云南甜米酒中分离筛选出的 1 株高产醇酿酒酵母 LF05（*Saccharomyces cerevisiae* LF05，LF05）、1 株高产酯胶红酵母 PL10（*Rhodotorula mucilaginosa* PL10，PL10）为研究对象[9]，以米根霉（商业甜酒曲）发酵甜米酒为对照组（CK），探究 *Saccharomyces cerevisiae* LF05、*Rhodotorula mucilaginosa* PL10 单菌、混菌协同米根霉发酵对甜米酒感官、理化性质、游离氨基酸与挥发性成分的影响，为后期调控优化甜米酒发酵工艺及风味品质提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

糯米　云南绿宝康农业科技有限公司；麸皮　市售；商业甜酒曲　安琪酵母股份有限公司；*Saccharomyces cerevisiae* LF05（CCTCC NO：M2024 1213）、*Rhodotorula mucilaginosa* PL10（CCTCC NO：M20241214）　保藏至中国典型培养物保藏中心；酵母浸出粉胨葡萄糖琼脂培养基、酵母浸出粉胨葡萄糖肉汤培养基　广东环凯微生物科技有限公司；2-辛醇（色谱级）　国药集团化学试剂有限公司；17 种氨基酸混合标准品（质谱级）　中国计量科学研究院。

DH6000BII电热恒温培养箱　天津市泰斯特仪器有限公司；5804R 台式冷冻离心机　德国艾本德股份公司；YXQ-LS-50A 立式压力蒸汽灭菌锅　上海博迅实业有限公司医疗设备厂；SW-CJ-2FD 洁净工作台　苏净集团苏州安泰空气技术有限公司；UV-2600 紫外可见分光光度计　日本岛津公司；7890B GC-5977B MSD GC-MS 联用仪、DBWAX 色谱柱　美国安捷伦公司；LC-20A 高效液相色谱仪　日本岛津公司。

1.2　实验方法

1.2.1　酵母曲协同米根霉发酵甜米酒　酵母曲制作工艺：麸皮→过筛→灭菌→培养→干燥→保藏。将 20 目筛下麸皮与 40% 的无菌水（按麸皮干重计）混匀，通过 121 ℃ 高温灭菌 20 min 制备麸皮培养基。麸皮培养基在无菌环境下降温至 30 ℃，麸皮培养基按 3×10^5 CFU/g 接种 *Saccharomyces cerevisiae* LF05、*Rhodotorula mucilaginosa* PL10 种子液，经 30 ℃ 固态发酵 72 h 后，通过 38 ℃ 热风干燥 24 h制备 LF05、PL10 麸皮酵母曲。LF05 酵母曲、PL10酵母曲按质量比 1∶30（前期感官预实验确定）进行复配，得 LF05-PL10 酵母曲。

甜米酒制作工艺[9]：糯米→浸泡→洗米→蒸饭→淋饭→拌入酒曲→搭窝→保温发酵→发酵粗品→灭菌→发酵成品。以商业甜酒曲（3.5×10^5 CFU/g）发

酵甜米酒为对照组(CK)。根据前期实验,LF05 酵母曲和商业甜酒曲按质量比 7∶3 发酵甜米酒为 LF05 组;PL10 酵母曲和商业甜酒曲按质量比 7∶3 发酵甜米酒为 PL10 组;LF05-PL10 酵母曲和商业甜酒曲按质量比 7∶3 发酵甜米酒为 LF05-PL10 组。将 0.50 kg 糯米泡 8 h,泡好糯米水洗 3 遍,纱布过滤水分。将糯米蒸 15~20 min(软、松、不粘连),在无菌操作台中用 375 mL 无菌水冲淋使饭粒分离冷却至 30 ℃并将其移入 2500 mL 的玻璃泡菜坛中,拌入 0.8% 酒曲(按糯米干基重量计)混匀后搭窝,泡菜坛沿用 20 mL 无菌水密封。将 4 组甜米酒在 28 ℃ 培养箱中发酵 60 h 即为发酵甜米酒粗品。发酵甜米酒粗品于水浴(65 ℃)30 min 为甜米酒成品。

1.2.2 甜米酒理化指标测定 还原糖通过 3,5-二硝基水杨酸法测定[10];总糖通过苯酚-硫酸法测定[11]。酸度通过 pH 计法测定;乙醇浓度通过 GB/T 13662-2008《黄酒》测定。

1.2.3 感官评价 感官评价小组由 20 名经培训的食品专业学生(男女各半)组成,按表 1 对甜米酒进行滋味、香气、外观及整体风格评分,以平均值作为样品最终得分(满分 100 分)。

表 1 甜米酒感官评分标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of sweet rice wines

项目	评分标准	分数(分)
滋味(30分)	酸甜比例适当,鲜甜爽口,口感醇厚,无异味	24~30
	偏酸或偏甜,口感偏淡或平淡,无异味	11~23
	无甜味,有黏腻感,有酸味	0~10
香气(30分)	具有谷物、甜米酒发酵特有的香气和甜香味,醇香浓郁	24~30
	具有轻微的甜米酒发酵香气和甜香味,无异香	11~23
	无谷物、甜米酒发酵特有香气和甜香味,有苦味、异味	0~10
外观(20分)	甜米酒脱罐,液体清亮、呈宝石红、颜色均匀	15~20
	甜米酒脱罐,液体清亮、呈玫瑰红、颜色均匀性较差	6~14
	甜米酒未脱罐,少量发酵液体或无发酵液体,呈紫黑色	0~5
风格(20分)	米酒酒体组分谐调,具有甜米酒的独特风味	15~20
	米酒酒体组成不谐调、单一性,具有甜米酒的独特风味	6~14
	米酒酒体组分不谐调、具有刺鼻味,无甜米酒独特风味	0~5

1.2.4 甜米酒氨基酸组成分析 参照 QBT 4356-2012《黄酒中游离氨基酸的测定 高效液相色谱法》略作修改,对甜米酒汁中游离氨基酸含量进行定量分析。样品前处理:安瓿瓶中加入 2.0 mL 甜米酒上清液(8000 r/min 离心 5 min),按 1∶3(v/v)加入含 0.1% 苯酚的 6 mol/L 盐酸溶液。安瓿瓶密封置于 105 ℃ 恒温箱水解 22 h,冷却后取 1.0 mL 水解液经−50 ℃ 真空冷冻干燥,取 0.1 mol/L 盐酸溶液将冻干样品定容至 1.0 mL。

样品衍生及测定:取冻干复溶样品 500 μL 至 2.0 mL 离心管,依次添加 250 μL 的 1 mol/L 三乙胺-乙腈溶液及 0.1 mol/L 异硫氰酸苯酯-乙腈试剂,混匀静置 60 min,随后加入 1.0 mL 正己烷,室温静置 10 min 分层后取下层水相(经 0.45 μm 滤膜过滤)500 μL 进行 HPLC 分析。

色谱条件:色谱柱温 40 ℃;流动相流速 1000 μL/min;采用色谱柱(Shim-pack GIST C_{18}, 5 μm, 规格 4.6 mm×250 mm)。流动相 A:0.1 mol/L醋酸钠(pH6.5);流动相 B:甲醇-水(80∶20)。梯度洗脱程序:0~19 min, 0%A→85%A, 0%B→15%B; 19~25 min, 0%A→75%A, 0%B→25%B; 25~45 min, 0%A→55%A, 0%B→45%B; 45~55 min, 0%A→40%A, 0%B→60%B; 55~68 min, 0%A→38%A, 0%B→62%B; 68~70 min, 0%B→100%B。

1.2.5 甜米酒中挥发性物质分析 参考李柔[12]方法略作修改,对甜米酒挥发性化合物进行测定。样品预处理:精密称取 1.0 g 氯化钠与 4.9 mL 甜米酒样品于 20 mL 顶空瓶中,加入 0.1 mL 2-辛醇内标液(500 μg/mL)。使用预活化(250 ℃/10 min)的 DVB/CAR/PDMS 萃取头插入顶空瓶,45 ℃ 萃取 40.0 min 立即进行 GC-MS 联用分析。通过 NIST 数据库的质谱图(保留指数大于 80 的结果)对化合物定性,根据化合物与 2-辛醇峰面积对挥发性化合物进行定量。

$$\text{组分含量(mg/L)} = \frac{\text{各组分峰面积} \times \text{内标物质量(mg)}}{\text{内标物峰面积} \times \text{样品体积(L)}}$$

色谱条件:DB-WAXETR 极性色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),进样口温度 250 ℃,载气采用 99.99% 高纯氦(He),恒流模式(1.00 mL/min,电子流量控制(EFC)精度±0.01 mL)。升温程序:初始柱温 35 ℃ 平衡 3 min,以 6 ℃/min 升至 160 ℃,再以 10 ℃/min 梯度升至 230 ℃(保留窗口 5 min)。

质谱条件:电子轰击离子源 EI:70 eV,接口温度 250 ℃,离子源温度 230 ℃,四极杆温度 150 ℃,扫描范围 33~450 m/z。

1.3 数据处理

采用 Excel 2021 软件处理数据;利用 SpSS 22.0 软件中 Duncan 多重比较进行显著性分析(P<0.05);利用 Origin 2022 软件绘制堆叠柱状图;利用 SIMCA 软件建立 OpLS-DA 模型;利用 Tbtools-II 2.08 绘制热图。所有实验重复 3 次,结果以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 甜米酒基本理化指标

图 1 显示,4 组甜米酒中还原糖、总糖、酒精度、pH 分别为 164.64~446.86 mg/mL、180.44~510.69 mg/mL、0vol%~6.80vol%、3.42~4.00。4组甜米酒中还原糖浓度大于 100 mg/mL(图 1A),均符合甜型甜米酒 GB/T 13662-2018 标准。与 CK 组比,LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组中还原糖、总糖含量分别下降 48.07%~67.19%、37.83%~64.83%,乙醇浓度上升 4.80vol%~6.80vol%。其中 LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组的酒精度显著高于 CK 组,LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组的还原糖、总糖含量显著低

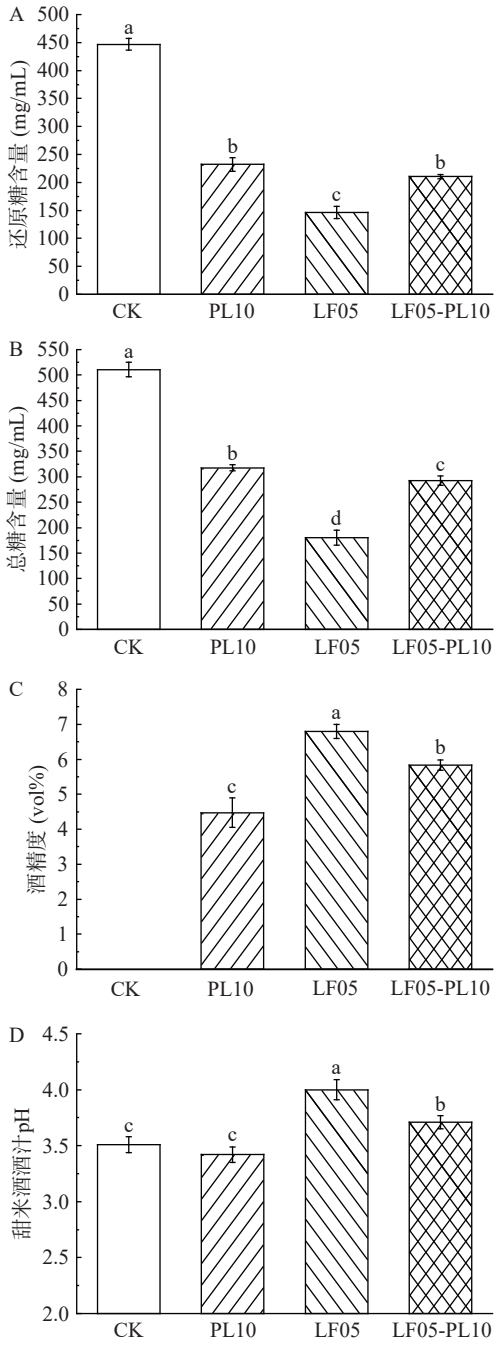


图 1　甜米酒理化指标

Fig.1　Physicochemical indexes of sweet rice wines

注：A、B、C、D 分别表示 4 组甜米酒中还原糖含量、总糖含量、酒精度、pH。CK 表示由单一米根霉发酵甜米酒；LF05、PL10、LF05-PL10 分别表示 *S. cerevisiae* LF05、*R. mucilaginosa* PL10、*S. cerevisiae* LF05 与 *R. mucilaginosa* PL10 混菌协同米根霉复配发酵的甜米酒，图 2~图 5 同。不同小写字母表示具有显著性差异，$P<0.05$。

于 CK 组（$P<0.05$）；表明酵母菌比米根霉能更高效将糖类物质转化为醇类物质。魏文鼎等[13]发现添加酵母菌发酵米酒乙醇浓度高于未添加酵母组，这与本研究一致。LF05-PL10 组酒精度比 LF05组降低 0.97vol%，还原糖、总糖含量分别上升了 43.42%、62.22%，该趋势与孙文静等[14]一致。结果表明 *S. cerevisiae* LF05、*R. mucilaginosa* PL10 混菌发酵时，酿酒酵母产乙醇途径与胶红酵母的增香生化途径相互竞争导致酿酒酵母对糖类利用程度降低[15]，LF05-PL10 组的还原糖、总糖含量高于 LF05 组。

2.2　甜米酒感官评价

表 2 可见，CK 组滋味寡淡、风味欠缺、米酒酒体组分不协调。LF05 组滋味酸甜适当，口感醇厚，具有甜米酒独特风味但酯香气不足，侧重于滋味及酒精度提升；PL10 组酯香浓郁但醇厚感不足，侧重于香气提升。LF05-PL10 组的滋味、香气评分明显高于其他组，表明 LF05-PL10 组使“*S. cerevisiae* LF05、*R. mucilaginosa* PL10”优势互补，其酒体酸甜适中、口感醇厚、酯香浓郁具有谷物发酵香味。

表 2　甜米酒感官评价

Table 2　Sensory evaluation of sweet rice wines

编号	滋味（30分）	香气（30分）	外观（20分）	风格（20分）	总分
CK	13.80±0.62^{c}	15.55±0.76^{c}	9.00±0.32^{c}	9.50±0.51^{c}	47.85±0.99^{d}
LF05	28.00±0.73^{a}	25.00±0.97^{b}	17.00±0.56^{b}	14.00±0.46^{b}	84.00±1.34^{c}
PL10	24.00±0.73^{b}	29.00±1.08^{a}	18.00±0.56^{a}	15.00±0.32^{a}	86.00±1.56^{b}
LF05-PL10	28.05±1.05^{a}	29.10±0.91^{a}	18.10±0.55^{a}	15.20±0.41^{a}	90.45±1.28^{a}

注：CK表示由单一米根霉发酵甜米酒；LF05、PL10、LF05-PL10分别表示 *S. cerevisiae* LF05、*R. mucilaginosa* PL10、*S. cerevisiae* LF05与*R. mucilaginosa* PL10混菌协同米根霉复配发酵的甜米酒，表3、表4同。表中同列上标不同字母表示数据间具有显著性差异（$P<0.05$）。

2.3　游离氨基酸分析

2.3.1　游离氨基酸组成及含量　游离氨基酸是甜米酒的主要营养与风味物质。甜米酒发酵过程中，微生物自溶及代谢作用产生了鲜味、甜味、苦味等呈味氨基酸，提高了甜米酒营养价值同时又丰富了味觉层次[16]。表 3 可见，LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组中鲜味氨基酸含量比 CK 组提高了 26.54%、56.19%、94.07%，甜味氨基酸含量提高了 87.77%、137.43%、155.37%。其原因是酵母菌协同米根霉提高了发酵体系的蛋白酶活力，蛋白质被分解产生更多鲜味、甜味氨基酸[16]。LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组中苦味氨基酸含量比 CK 组分别降低了 32.67%、49.04%、35.60%，表明酵母菌协同米根霉促进了发酵米酒中鲜味、甜味氨基酸的合成且抑制了苦味氨基酸的代谢，且胶红酵母抑制苦味氨基酸合成的能力高于酿酒酵母，因此 PL10 组中苦味氨基酸为各组最低[9]。蓝彩红[17]发现酵母协同米根霉发酵甜米酒中蛋白酶活力、游离氨基酸含量高于单一米根霉发酵甜米酒，表明微生物共培养对游离氨基酸生成起到促进作用，该趋势与本研究一致。胶红酵母的基础营养组分主要由游离氨基酸构成，其游离氨基酸主要由鲜味、甜味氨基酸组成，表明 *R. mucilaginosa* PL10 自溶是导致 PL10 组中鲜味、甜味氨基酸含量显著高于 CK 组、LF05 组的原因，这与吴康等[18]研究一致。酿酒和非酿酒酵母混菌发酵对氨基酸代谢起到促进作用，蛋白质代谢通路产生更多鲜味、甜味氨基酸，使得 LF05-PL10 组中甜味、鲜味、总氨基酸含量显著高于其他组（$P<0.05$）。Yang 等[16]发现酿酒酵母、非酿酒酵母单菌发酵米酒中鲜味、甜味显著低于酿酒与非

表 3　甜米酒中游离氨基酸含量

Table 3　Content of free amino acids in sweet rice wines

游离氨基酸种类	呈味特性	游离氨基酸含量(μg/mL)			
		CK	LF05	PL10	LF05-PL10
Asp	鲜味	143.15±21.65^{d}	285.80±7.51^{c}	295.21±2.94^{b}	339.51±6.94^{a}
Glu	鲜味	129.07±3.19^{b}	58.66±4.8^{c}	129.97±4.76^{b}	188.79±1.32^{a}
鲜味氨基酸		272.22±24.30^{d}	344.46±4.56^{c}	425.18±5.16^{b}	528.30±16.18^{a}
Ser	甜味	80.95±7.16^{b}	48.776±1.15^{c}	5.55±0.23^{d}	93.56±2.98^{a}
Gly	甜味	22.92±1.25^{d}	110.19±9.98^{c}	139.07±1.88^{b}	208.42±7.62^{a}
Thr	甜味	33.82±1.50^{b}	41.30±6.34^{b}	37.62±3.19^{b}	90.91±2.78^{a}
Ala	甜味	92.35±2.95^{d}	231.96±13.11^{c}	362.31±5.67^{a}	323.16±18.56^{b}
Pro	甜味	81.85±3.10^{c}	153.42±8.35^{b}	195.95±9.16^{a}	91.41±7.24^{c}
甜味氨基酸		311.89±12.26^{d}	585.64±7.56^{c}	740.51±18.78^{b}	794.45±27.51^{a}
Phe	苦味	37.99±4.44^{a}	26.07±1.18^{b}	6.83±0.13^{c}	34.05±0.72^{a}
His	苦味	57.29±2.23^{a}	3.81±0.27^{c}	2.16±0.20^{c}	25.00±5.88^{b}
Arg	苦味	77.23±4.25^{a}	55.15±3.67^{bc}	62.88±3.04^{ab}	51.53±6.58^{c}
Tyr	苦味	74.45±1.33^{b}	129.20±16.30^{a}	8.70±0.29^{d}	26.81±0.96^{c}
Met	苦味	15.47±1.16^{b}	13.49±3.18^{bc}	10.67±1.00^{c}	27.04±2.00^{a}
Val	苦味	108.41±4.30^{a}	21.04±3.25^{c}	103.47±5.25^{a}	80.94±3.52^{b}
Ile	苦味	31.62±1.15^{a}	21.14±2.25^{c}	10.90±0.69^{d}	25.58±1.12^{b}
Leu	苦味	45.66±2.34^{a}	27.61±2.42^{b}	21.88±3.15^{c}	15.80±1.21^{d}
Lys	苦味	40.86±3.53^{a}	31.48±0.75^{b}	21.68±0.67^{c}	28.12±0.72^{b}
苦味氨基酸		488.99±13.36^{a}	329.25±14.19^{b}	249.16±3.42^{c}	314.87±9.52^{b}
总氨基酸		1073.09±38.54^{d}	1259.34±18.02^{c}	1414.84±19.75^{b}	1639.62±40.60^{a}

注: 表中同行上标不同字母表示数据间具有显著性差异(P<0.05), 表4同。

酿酒酵母混菌发酵米酒, 该趋势与本研究一致。

2.3.2　游离氨基酸差异化分析　正交偏最小二乘法(Orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)是一种监督判别分析方法, 可将复杂实验数据降维处理以评估样品间差异性与规律性。为进一步探究单一米根霉、酵母(单菌、混菌)菌协同米根霉发酵对甜米酒中游离氨基酸的影响, 以 16 种游离氨基酸为因变量, 4 组甜米酒为自变量, 进行 OPLS-DA 分析。如图 2(a)所示, 4 组甜米酒样品区分明显, 同组样本间聚集性较强, PL10 组和 LF05 组分布较近。

如图 2(b)(c)所示, 对 OPLS-DA 模型进行 200 次交叉置换检验。自变量拟合指数(R^2X)为 0.986, 因变量拟合指数(R^2Y)为 0.995, 模型预测指数(Q^2)为 0.991, R^2 和 Q^2 超过 0.9 且 Q^2 回归线与 Y 轴截距为负值, 表明该模型稳定性和预测能力较好[19]。此外, 变量投影重要度(Variable importance for the projection, VIP)可反映 OPLS-DA 模型变量, 即各游离氨基酸对整体滋味贡献程度, VIP≥1 被认为对整体滋味有重要贡献[19]。4 组甜米酒中筛选出 8 种 VIP≥1 的关键呈味氨基酸, 包括 2 种鲜味氨基酸、4 种甜味氨基酸、2 种苦味氨基酸。向凡舒等[20]报道谷氨酸、天冬氨酸是米酒中贡献较大的关键呈味氨基酸, 这与本研究一致。进一步验证了 2.2 感官评价中 LF05、PL10、LF05-PL10 三组甜米酒的滋味鲜甜且滋味评分高于 CK 组。由此推测, 酵母菌协同米根霉可增加发酵体系蛋白酶活力, 对氨基酸代谢起到促进作用, 在高蛋白酶活力与更多通路代谢作用下代谢蛋白质产生更多鲜、甜味氨基酸[16]。

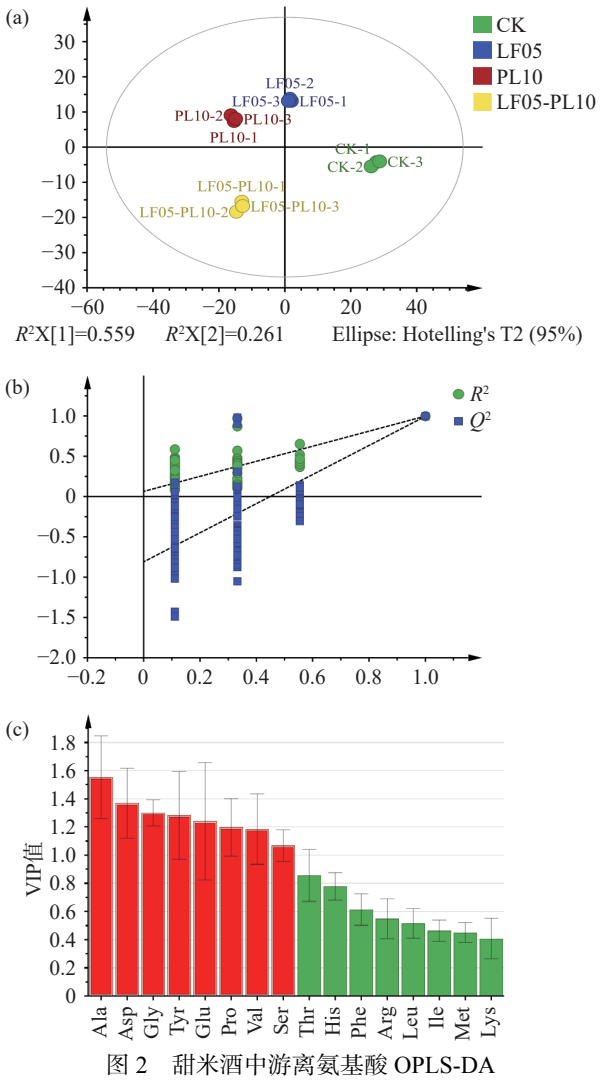


图 2　甜米酒中游离氨基酸 OPLS-DA

Fig.2　OPLS-DA of free amino acid in sweet rice wines

注: (a)OPLS-DA 图, (b)模型置换检验图, (c)VIP 图, 图 5 同。

2.4　甜米酒挥发性化合物分析

2.4.1　挥发性化合物种类及含量　图 3 所示, 4 组甜米酒中定性出 73 种化合物, 包含 28 种酯类, 12 种醇类, 13 种醛酮类、13 种烃类、7 种其他类化合物, 结果如表 4 所示。CK 组、LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组的挥发性物质总含量分别为 19.68、47.60、38.84、48.35 mg/L。相比 CK 组(26 种, 19.68 mg/L), LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组中挥发性物质种类分别增加了 13、16、24 种, 含量分别提高了 141.90%、77.07%、145.72%。表明酵母菌利用葡萄糖、氨基酸(米根霉水解淀粉、蛋白质产生)等物质代谢产生了更多次生代谢物[21]; 酿酒酵母通过 Harris、Ehrlich 途径将糖类、游离氨基酸等物质转化为醇类物质, 故 LF05 组醇类化合物含量为各组最高; 非酿酒酵母利用胞内酯化酶产生大量酯类物质[22], 故 LF05-PL10 组、PL10 组中酯类化合物含量显著高

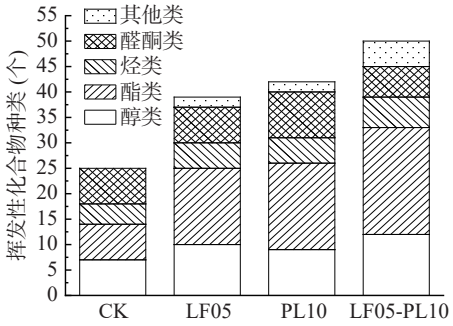


图 3　甜米酒中各类挥发性化合物组成

Fig.3　Composition of various volatile compounds in sweet rice wine

于 CK 组、LF05 组（$P<0.05$）。LF05-PL10 组的高级醇、酯类化合物种类及含量为各组最高，表明酿酒、非酿酒酵母混菌发酵可促进醇酯类化合物相关通路的代谢[23]。赵江林[24] 发现酿酒酵母、胶红酵母混菌发酵米酒中酯类化合物种类含量比酵母单菌发酵有所增加，该趋势与本研究一致。

醇类化合物是甜米酒中主要呈香化合物（以酒香、花香为主），由糖酵解、Ehrlich、Harris 途径产生。适宜浓度醇类化合物可衬托酯类化合物香气，使米酒酒体更协调。高级醇是由酵母菌经氨基酸脱羧、脱氨基等代谢途径生成碳原子数大于 2 的一元醇。高

表 4　甜米酒中各类挥发性化合物含量

Table 4　Content of various volatile compounds in sweet rice wine

化合物名称	各样品挥发性化合物含量（μg/L）			
	CK	LF05	PL10	LF05-PL10
乙醇	3707.35±327.51^{d}	30467.42±904.02^{a}	17290.38±584.63^{b}	13362.87±328.70^{c}
正丙醇	283.69±51.56^{a}	114.23±21.34^{b}	ND	97.47±13.64^{c}
正壬醇	ND	ND	17.19±0.69^{a}	ND
正庚醇	ND	14.20±1.41^{b}	ND	22.26±0.76^{a}
正己醇	188.40±5.56^{b}	34.71±1.36^{c}	24.47±9.99^{d}	667.10±9.51^{a}
正辛醇	79.15±7.97^{a}	17.00±1.59^{d}	42.70±3.15^{c}	46.20±3.78^{b}
苯乙醇	2593.73±141.43^{d}	11478.50±257.18^{b}	6787.18±255.96^{c}	12518.69±373.81^{a}
异丁醇	230.54±11.43^{d}	289.55±10.17^{c}	295.41±49.03^{b}	541.92±109.36^{a}
异戊醇	512.21±42.44^{d}	1594.91±118.94^{c}	2055.98±119.07^{a}	2047.28±217.49^{ab}
2-甲基丁醇	88.72±20.46^{d}	246.08±13.77^{c}	309.74±19.23^{b}	332.08±33.04^{a}
丁二醇	ND	9.26±1.02^{b}	ND	27.93±2.32^{a}
己酸异丁醇	ND	ND	ND	3.53±0.57^{a}
醇类	7583.29±241.11^{d}	44265.84±1199.14^{a}	26823.04±189.84^{c}	36536.18±1043.43^{b}
丁酸乙酯	240.19±34.79^{a}	12.06±3.75^{c}	221.11±16.24^{b}	15.70±1.51^{c}
庚酸乙酯	ND	ND	ND	6.20±0.78^{a}
癸酸乙酯	323.38±27.54^{d}	606.44±74.78^{c}	988.40±316.1^{b}	1519.09±122.22^{a}
甲酸甲酯	ND	1.21±0.03	ND	ND
壬酸乙酯	651.78±36.06^{a}	39.97±4.03^{c}	94.33±3.58^{b}	31.67±3.08^{d}
辛酸乙酯	281.34±31.98^{c}	191.28±15.34^{d}	551.40±129.85^{b}	770.67±5.92^{a}
2-甲基丁基乙酸酯	ND	ND	ND	28.55±1.94^{a}
乙酸己酯	12.04±1.54^{a}	ND	5.03±0.26^{c}	9.72±0.29^{b}
乙酸乙酯	670.74±78.74^{b}	ND	66.26±11.57^{c}	696.20±55.09^{a}
丁二酸二乙酯	ND	ND	ND	14.43±1.34^{a}
月桂酸乙酯	252.68±9.80^{d}	281.80±7.33^{c}	448.37±155.38^{b}	761.59±43.47^{a}
正辛酸异戊酯	ND	ND	ND	20.87±3.05^{a}
棕榈酸乙酯	ND	964.63±71.16^{c}	3551.07±58.82^{b}	3697.98±530.77^{a}
苯乙酸乙酯	ND	ND	ND	23.95±2.11^{a}
反油酸乙酯	6.71±0.45^{c}	103.29±2.79^{b}	138.20±11.29^{a}	ND
癸酸异丁酯	ND	4.46±0.75^{b}	7.31±2.84^{a}	ND
十四酸乙酯	ND	314.31±15.35^{c}	595.40±126.18^{b}	1146.75±62.72^{a}
十五酸乙酯	ND	ND	10.27±1.01^{b}	13.07±0.44^{a}
辛酸异丁酯	ND	4.08±1.90^{b}	12.32±5.91^{a}	ND
亚油酸乙酯	ND	49.34±3.67^{c}	76.33±11.35^{b}	428.10±43.10^{a}
乙酸苯乙酯	ND	55.82±4.85^{c}	358.86±134.65^{b}	1030.68±65.69^{a}
乙酸异戊酯	312.42±42.08^{a}	32.81±0.87^{d}	166.35±41.88^{b}	150.94±6.41^{c}
L(-)-乳酸乙酯	ND	ND	ND	5.38±0.23^{a}
异丁酸异丁酯	ND	ND	3.20±0.93^{a}	ND
1,3-苯二酚单苯甲酸酯	ND	27.94±3.29^{a}	ND	ND
正戊酸异戊酯	ND	ND	ND	20.87±3.05^{a}

续表 4

化合物名称	各样品挥发性化合物含量(μg/L)			
	CK	LF05	PL10	LF05-PL10
9-十六碳烯酸乙酯	ND	ND	ND	50.87±6.32^{a}
硬脂酸乙酯	ND	ND	ND	25.22±3.04^{a}
酯类	2039.54±342.90^{d}	2865.58±186.39^{c}	7294.21±703.27^{b}	10447.65±534.88^{a}
缩醛	14.40±1.09^{c}	ND	45.05±3.36^{b}	49.09±2.73^{a}
壬醛	1393.12±126.49^{a}	22.76±2.71^{c}	22.64±4.15^{c}	116.97±3.25^{b}
乙醛	1489.54±149.22^{a}	53.81±1.04^{c}	71.53±9.56^{b}	36.29±3.13^{d}
苯甲醛	1015.78±78.33^{a}	ND	90.89±21.43^{c}	485.27±2.78^{b}
苯乙醛	956.39±97.86^{a}	214.15±30.33^{b}	116.04±11.34^{c}	49.56±7.29^{d}
仲辛酮	50.14±7.98^{a}	29.27±5.85^{b}	26.60±1.71^{c}	ND
2-丁烯醛	ND	ND	ND	9.13±1.95^{a}
丁醛二乙缩醛	ND	ND	1.46±0.10^{a}	ND
2-甲基丁醛	ND	22.06±5.81^{a}	8.50±0.14^{b}	ND
3-羟基-2-丁酮	475.11±26.25^{a}	28.77±1.60^{c}	160.90±51.87^{b}	28.06±2.05^{c}
葵醛	11.78±0.23^{b}	ND	21.99±3.11^{a}	ND
2-壬酮	792.40±39.79^{a}	ND	ND	ND
3-辛酮	ND	ND	ND	79.75±4.06^{a}
醛酮类	6184.25±148.12^{a}	384.13±23.47^{d}	528.78±98.53^{c}	688.05±11.71^{b}
十四烷	951.86±56.14^{a}	ND	ND	ND
十五烷	901.82±37.46^{a}	ND	ND	11.11±0.92^{b}
3-甲基十五烷	224.47±22.15^{a}	1.74±0.07^{b}	ND	ND
2,6-二甲基-1-辛烯	ND	3.66±1.06^{b}	ND	6.17±0.96^{a}
2,4,5-三甲基-1,3-二氧戊环	ND	ND	ND	12.35±1.55^{a}
2,6-二甲基-2-辛烯	4.02±0.91^{a}	ND	ND	ND
3,3-二甲基已烷	280.24±10.44^{a}	2.14±0.10^{b}	1.56±0.76^{b}	1.02±0.16^{b}
1,1-二乙氧基乙烷	ND	ND	45.05±3.36^{b}	ND
4,4-二甲基十一烷	ND	1.72±0.15^{b}	16.44±1.58^{a}	ND
3-异丙基氧杂环丁烷	ND	ND	60.43±6.69^{a}	ND
1-(1-乙氧基乙氧基)-丁烷	2.78±0.37^{b}	ND	16.44±1.57^{a}	ND
2,2-二甲基丁烷	ND	ND	ND	0.55±0.08^{a}
3-甲基十三烷	ND	ND	16.44±1.58^{a}	3.21±0.27^{b}
烃类	3871.13±470.95^{a}	23.47±1.87^{d}	126.93±7.16^{b}	77.33±2.95^{c}
乙酸铵	ND	ND	ND	74.87±1.46^{a}
2,3-环氧丙烷甲基醚	ND	ND	ND	2.56±0.11^{a}
丁酸	ND	ND	ND	1.86±0.21^{a}
氢胺	ND	ND	ND	7.25±0.24^{a}
戊酸	ND	30.05±5.39^{b}	ND	41.63±11.64^{a}
1,3-二叔丁基苯	ND	ND	ND	517.26±26.99^{a}
2-氯苯乙醚	ND	32.80±4.18^{a}	ND	26.14±1.44^{b}
其他类	ND	62.85±9.57^{b}	ND	603.81±27.81^{a}
总含量	19678.22±271.04^{d}	47601.87±1279.75^{b}	34844.12±405.07^{c}	48353.31±681.32^{a}

级醇过低会使米酒酒体寡淡、过高使米酒酒体苦涩且对人体有一定程度损害,适量高级醇可促进米酒酒体协调与饱满感[23]。图 4 可见,各组甜米酒中高级醇以苯乙醇、异丁醇、异戊醇、正己醇为主;苯乙醇赋予米酒酒体丰富的花香;适量异丁醇、异戊醇可增加米酒酒体协调与饱满感。高级醇由 Ehrlich 和 Harris 代谢途径生成,酿酒、非酿酒酵母混菌发酵可促进两条代谢通路及基因上调[25],这可能是 LF05-PL10 组中高级醇含量及种类为各组最高的原因。LF05-PL10 组中苯乙醇、异丁醇含量为各组最高,分别比对照组提高 3.83、1.35 倍,赋予米酒酒体浓郁花香与饱满感,这与 2.2 中感官评分相一致。Wu 等[26] 研究发现酿酒、非酿酒酵母混菌发酵米酒中高级醇含量显著高于酵母单菌发酵,该趋势与本研究一致。

酯类化合物具有类似花果的香气,是甜米酒香气复杂性和典型性的主要贡献者[27]。LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组中酯类化合物含量比 CK 组分别提高了 40.50%、257.64%、412.26%;LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组比 CK 组增添了棕榈酸乙酯(菠萝香气)等挥发性化合物,表明酵母菌协同米根霉发酵可提高甜米酒中酯类化合物种类及含量,赋予米酒酒体丰富的花香与果香[14]。Xie 等[28] 发现胶红酵母产

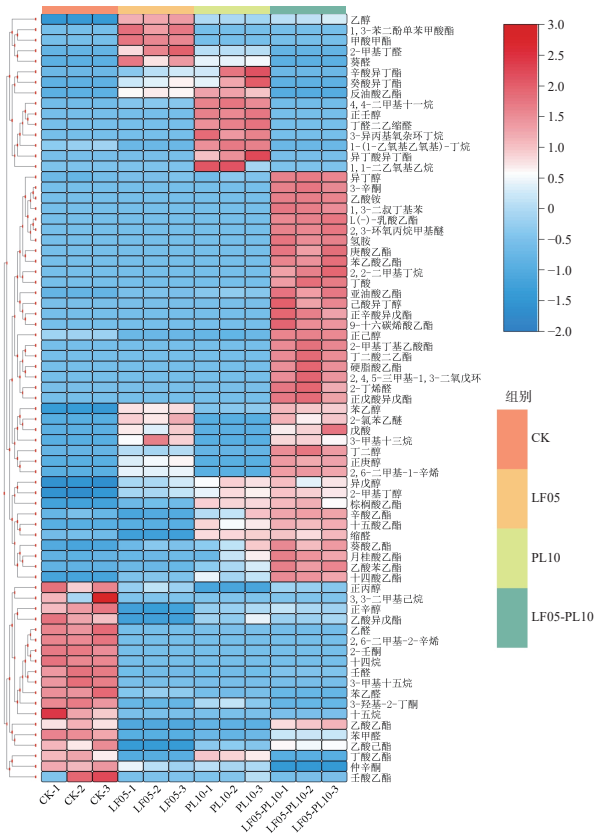
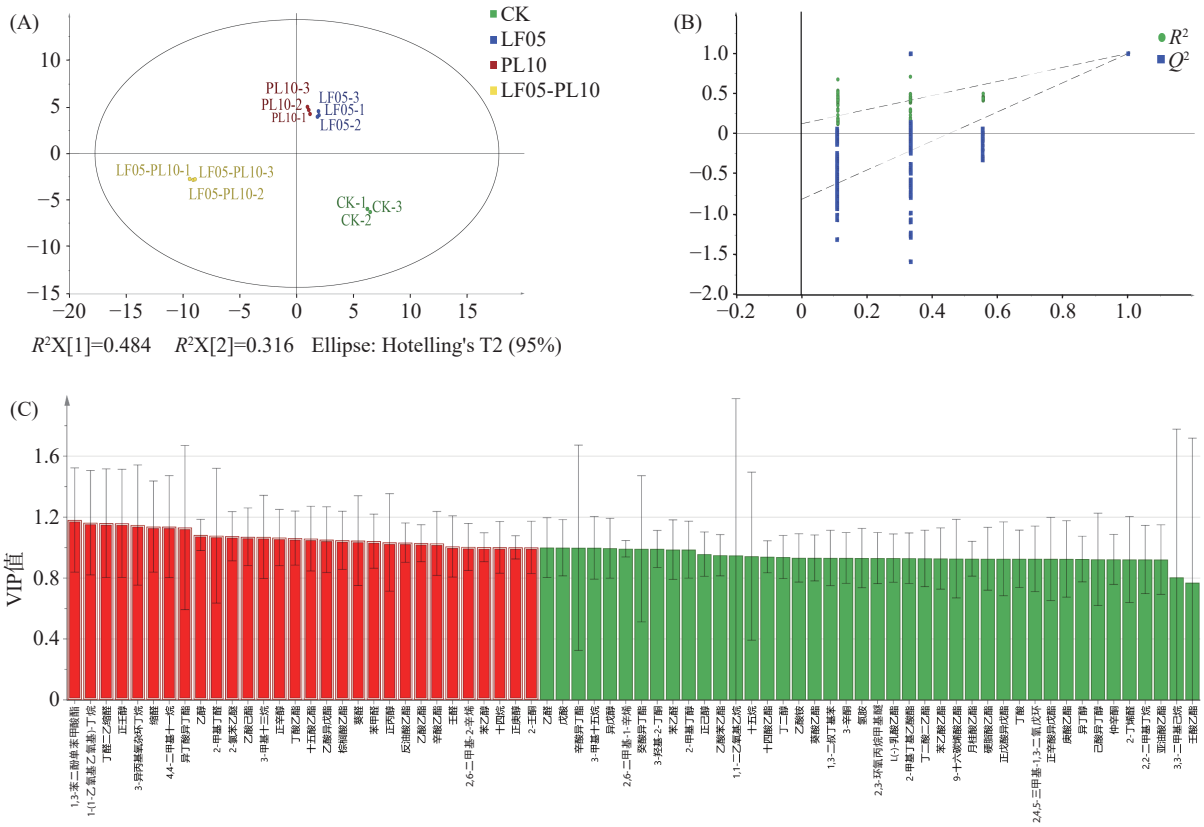


图 4　甜米酒中挥发性物质含量热图(对挥发性化合物质量进行对数处理)

Fig.4　Heat map of volatile substance contents in sweet rice wine (logarithmic treatment of volatile compound mass)

生的水解酶有助于酯类挥发性化合物的生成，这是 PL10 组的酯类化合物种类及含量显著高于 CK 组、LF05 组的主要原因。LF05-PL10 组的酯类化合物种类及含量为各组最高，其棕榈酸乙酯、十四酸乙酯含量也显著高于其他组(P<0.05)。LF05-PL10 组的酯类化合物种类及含量提升是由于非酿酒酵母的代谢特性与酿酒酵母共同作用于酯类化合物的合成路径[29]。Wang 等[30]研究发现酿酒酵母、胶红酵母混菌发酵米酒中酯类物质含量显著高于酿酒酵母单菌发酵；王燕荣等[31]发现酿酒酵母、非酿酒酵母混菌发酵米酒中酯类物质含量显著高于酿酒、非酿酒酵母单菌发酵；两者趋势与本研究一致。此外，甜米酒中的醛酮类、烃类化合物虽然种类及含量相对较少，但它们是构成其独特风味特征的重要组成部分。总体而言，甜米酒的整体风味轮廓是由醇类、酯类、醛酮类、烃类以及酸类、酚类等多种物质协同作用、共同贡献的结果。

2.4.2　挥发性化合物种类差异性分析　为明确甜米酒中挥发性化合物差异性及其对米酒酒体风味的贡献程度，以 73 种挥发性化合物为因变量，4 组甜米酒为自变量，进行 OPLS-DA 分析，结果如图 5 所示。4 组甜米酒的挥发性化合物区分明显，同组间聚集性较强，PL10 组和 LF05 组分布较近。本次分析的自变量拟合指数(R^2X)为 0.963，因变量拟合指数(R^2Y)为 0.998，模型预测指数(Q^2)为 0.995。R^2 和 Q^2 超



R^2X[1]=0.484　R^2X[2]=0.316　Ellipse: Hotelling's T2 (95%)

图 5　甜米酒中挥发性化合物 OPLS-DA

Fig.5　OPLS-DA based on volatile compounds in sweet rice wine

过 0.9 且 Q^2 回归线与 Y 轴截距为负值，表明该模型稳定性和预测能力较好，该模型可用于 4 组甜米酒中挥发性化合物差异性分析。

变量投影重要度（Variable importance for the projection，VIP）可反映 OPLS-DA 模型的变量，即各挥发性成分对整体香气贡献程度，VIP≥1 的差异性化合物（重要差异性化合物）被认为对整体香气有重要贡献。73 种挥发性化合物中筛选出 30 种重要差异性化合物，其中 6 个醇类（正壬醇、乙醇、正辛醇、正庚醇、苯乙醇、正丙醇）、10 个酯类（1,3-苯二酚单苯甲酸酯、异丁酸异丁酯、乙酸己酯、丁酸乙酯、十五酸乙酯、乙酸异戊酯、棕榈酸乙酯、反油酸乙酯、乙酸乙酯、辛酸乙酯）、7 个醛酮类（丁醛二乙缩醛、缩醛、2-甲基丁醛、葵醛、苯甲醛、壬醛、2-壬酮）、6 个烃类（1-（1-乙氧基乙氧基）-丁烷、3-异丙基氧杂环丁烷、2,6-二甲基-2-辛烯、4,4-二甲基十一烷、十四烷、3-甲基十三烷）、1 个醚类（2-氯苯乙醚），30 种重要化合物各组含量占比均超过 80%。LF05-PL10 组中 6 种（苯乙醇、正庚醇、棕榈酸乙酯、十五酸乙酯、乙酸乙酯、辛酸乙酯）重要化合物含量（VIP≥1）为各组最高，均为甜米酒中的典型挥发性化合物，可赋予米酒酒体丰富酒香、花香与果香，表明酵母混菌协同米根霉发酵有助于提升甜米酒香气的复杂性与典型性。LF05-PL10 组中苯乙醇、棕榈酸乙酯为主的酯醇类化合物含量显著提高，表明酿酒、非酿酒酵母混菌发酵可促进 Harris 与酯类代谢途径，进而增加酒中高级醇、酯类化合物的种类与含量。

3 结论

以课题组前期从云南米酒中分离筛选的一株高产醇 *S. cerevisiae* LF05、一株高产酯 *R. mucilaginosa* PL10 为研究对象，分析酵母菌以单菌及混菌协同米根霉方式对甜米酒风味化合物形成及其品质影响。结果表明，LF05 组、PL10 组、LF05-PL10 组比 CK 组感官评分、氨基酸含量、挥发性化合物种类及含量明显提高，而 LF05-PL10 组品质提升最为明显。对 4 组甜米酒中的 16 种游离氨基酸、73 种挥发性成分进行 OPLS-DA 分析，将 VP 值≥1 的风味物质定义为差异标志物，筛选出 8 种关键呈味氨基酸、28 种重要差异性化合物，这些化合物对甜米酒独特风味形成具有重要贡献。综上，酵母混菌协同米根霉发酵体系使 *S. cerevisiae* LF05、*R. mucilaginosa* PL10“优势互补”，其产醇增酯提香效果优于其他组，对改善云南甜米酒风味寡淡、滋味不足具有显著作用。后续研究可通过多维宏组学技术研究酵母混菌协同米根霉发酵对甜米酒酿造过程中风味品质形成的调控途径，为甜米酒产业发展提供科学依据。

© 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] 张竞一, 洪滨, 张珊, 等. 发酵对糙米营养品质影响及其在米制产品中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(6): 320−329. [ZHANG Jingyi, HONG Bin, ZHANG Shan, et al. Research progress in the effect of fermentation on the nutritional quality of brown rice and its application in rice products[J]. Food Science, 2025, 46(6): 320−329.]

[2] YANG Yurong, ZHONG Haiyan, YANG Ning, et al. Quality improvement of sweet rice wine fermented with *Rhizopus delemar* on key aroma compounds content, phenolic composition, and antioxidant capacity compared to *Rhizopus oryzae*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(6): 2339−2350.

[3] XIANG Wenliang, XU Qin, ZHANG Nandi, et al. *Mucor indicus* and *Rhizopus oryzae* co-culture to improve the flavor of Chinese turbid rice wine[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(12): 5577−5585.

[4] WONG B, MUCHANGI K, QUACH E, et al. Characterisation of Korean rice wine (makgeolli) prepared by different processing methods[J]. Current Research in Food Science, 2023, 6: 100420.

[5] CAO Kaixin, WU Junrui, WAN Xiujuan, et al. Impact of non-*Saccharomyces* yeasts derived from traditional fermented foods on beer aroma: Analysis based on HS-SPME-GC/MS combined with chemometrics[J]. Food Research International, 2024, 187: 114366.

[6] ZHAO Chi, SU Wei, MU Yingchun, et al. Effects of Jiuqu inoculating *Rhizopus oryzae* Q303 and *Saccharomyces cerevisiae* on chemical components and microbiota during black glutinous rice wine fermentation[J]. International Journal of Food Microbiology, 2023, 385: 110012.

[7] 雷英杰, 赵定锡, 缪婷, 等. 非酿酒酵母筛选及协同发酵对醪糟挥发性风味影响[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 94−102. [LEI Yingjie, ZHAO Dingxi, MIAO Ting, et al. Selection of non-*Saccharomyces* yeasts and effect of co-fermentation with them and *Rhizopus* on the volatile flavor components of fermented glutinous rice wine[J]. Food Science, 2024, 45(15): 94−102.]

[8] CUI Rongrong, LIU Xueli, WANG Qifeng, et al. Effects of co-fermentation of high-yield ester *Zygosaccharomyces rouxii* and *Saccharomyces cerevisiae* on the quality of rice wine[J]. JSFA Reports, 2024, 4(2): 78−91.

[9] 何洋, 冯怡婷, 吴昊文, 等. 云南米酒中优质酵母协同米根霉发酵对米酒理化性质及风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 173−183. [HE Yang, FENG Yiting, WU Haowen, et al. Effects of synergistic fermentation of yeast in Yunnan rice wine and *Rhizopus oryzae* on physicochemical properties and flavor substances of rice wine[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 173−183.]

[10] ZHAO Wenhong, RUAN Fengxi, QIAN Min, et al. Comparing the differences of physicochemical properties and volatiles in semi-dry Hakka rice wine and traditional sweet rice wine via HPLC, GC-MS and E-tongue analysis[J]. Food Chemistry, 2023, 20: 100898.

[11] CHEN Lihua, LIU Bo, LI Dongna, et al. Effects of fermentation on flavor and antioxidant activity in *Ginkgo* rice wine[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102652.

[12] 李柔. 非酿酒酵母对米酒酿造的影响及其应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023: 11−15. [LI Rou. Study on the effects of non-*Saccharomyces* yeast on Mijiu-making and its application[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023: 11−15.]

[13] 魏学鼎, 孙文超. 酿酒酵母的筛选及其发酵性能应用研究

[J]. 粮食与油脂，2024, 37(3): 117−121,153. [WEI Xueding, SUN Wenchao. Screening of brewing yeast and its application in fermentation performance[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(3): 117−121, 153.]

[14] 孙文静, 陈建胜, 束超, 等. 3 株商业克鲁维酵母对贺兰山东麓赤霞珠干红葡萄酒增酸效果及酒品质的影响[J]. 食品科学技术学报，2024, 42(4): 61−74. [SUN Wenjing, CHEN Jiansheng, SHU Chao, et al. Evaluation of acid-enhancing effect and wine quality of 3 commercial *Kluyveromyces* on cabernet sauvignon dry red wine from eastern foot of Helan Mountain[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(4): 61−74.]

[15] ZHANG Boqin, ZHANG Cuiying, LI Jin, et al. A comparative study to investigate the individual contribution of metabolic and physical interaction on volatiles formation in the mixed fermentation of *Torulaspora delbrueckii* and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Food Microbiology, 2024, 119: 104460.

[16] YANG Liu, ZHOU Yue, LI Jinglei, et al. Effect of enzymes addition on the fermentation of Chinese rice wine using defined fungal starter[J]. LWT, 2021, 143: 111101.

[17] 蓝彩红. 拟内孢霉酵母协同根霉发酵对甜酒风味的影响及机理[D]. 长沙：中南林业科技大学, 2021. [LAN Caihong. The effect and mechanism of the flavor of sweet rice wine prepared by synergistic fermentation with *Saccharomycopsis fibuligera* and *Rhizopus*[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021.]

[18] 吴康, 盛哲良, 丁立建, 等. 3 株海洋红酵母的分离及营养成分分析[J]. 热带作物学报，2017, 38(12): 2238−2242. [WU Kang, SHENG Zheliang, DING Lijian, et al. Isolation and nutritional compositions analysis of three marine strains of *Rhodotorula*[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2017, 38(12): 2238−2242.]

[19] 张婧年, 李升升, 马纪兵, 等. 基于 GC-IMS 的牦牛部位肉特征风味物质分析[J]. 食品工业科技，2025, 46(2): 258−270. [ZHANG Jingnian, LI Shengsheng, MA Jibing, et al. Analysis of characteristic flavor substances of yak part meat based on GC-IMS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 258−270.]

[20] 向凡舒, 蔡文超, 郭壮, 等. 大竹米酒滋味品质与细菌类群的关联性分析[J]. 食品科学，2023, 44(18): 231−238. [XIANG Fanshu, CAI Wenchao, GUO Zhuang, et al. Correlation between taste quality and bacterial community of Dazhu rice wine[J]. Food Science, 2023, 44(18): 231−238.]

[21] SADOUDI M, TOURDOT-MARÉCHAL R, ROUSSEAUX S, et al. Yeast-yeast interactions revealed by aromatic profile analysis of Sauvignon Blanc wine fermented by single or co-culture of non-*Saccharomyces* and *Saccharomyces* yeasts[J]. Food Microbiology, 2012, 32(2): 243−253.

[22] 刘娅, 刘双平, 刘甜甜, 等. 低产杂醇高产酯酵母菌株的选育和共酵对黄酒品质的影响及机制分析[J]. 食品科学技术学报，2024, 42(4): 31−44. [LIU Ya, LIU Shuangping, LIU Tiantian, et al. Breeding of yeast strains with low fusel alcohol yield and high ester yield and effect of co-fermentation on Huangjiu quality and its mechanism analysis[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(4): 31−44.]

[23] LY S, MITH H, TARAYRE C, et al. Impact of microbial composition of Cambodian traditional dried starters (dombea) on flavor compounds of rice wine: Combining amplicon sequencing with HP-SPME-GCMS[J]. Frontiers in Microbiology, 2018, 9: 894.

[24] 赵江林. 红酵母和酿酒酵母混合发酵对猕猴桃酒风味物质的影响[D]. 雅安：四川农业大学, 2020. [ZHAO Jianglin. Effect of mixed fermentation of *Rhodotorula* and *Saccharomyces cerevisiae* on flavor substances of kiwifruit wine[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2020.]

[25] XING Xin, CHU Qi, LI Chaojie, et al. Early transcriptional response of *Saccharomyces cerevisiae* in mixed culture with *Torulaspora delbrueckii* in cherry wine[J]. LWT, 2023, 181: 114749.

[26] WU Yuzheng, LI Zhigao, ZOU Sibo, et al. Chemical composition and flavor characteristics of cider fermented with *Saccharomyces cerevisiae* and non-*Saccharomyces cerevisiae*[J]. Foods, 2023, 12(19): 3565.

[27] DENG Yuhang, KAN Huan, LI Yonghe, et al. Analysis of volatile components in *Rosa roxburghii* Tratt. and *Rosa sterilis* using headspace-solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry[J]. Molecules, 2023, 28(23): 7879.

[28] XIE Jia, TIAN Xiaofei, HE Songgui, et al. Evaluating the intoxicating degree of liquor products with combinations of fusel alcohols, acids, and esters[J]. Molecules, 2018, 23(6): 1239.

[29] HU Lanlan, LIU Rui, WANG Xiaohong, et al. The sensory quality improvement of *Citrus* wine through co-fermentations with selected non-*Saccharomyces* yeast strains and *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Microorganisms, 2020, 8(3): 323.

[30] WANG Xiaodi, CHEN Jiawei, GE Xiaoxin, et al. Sequential fermentation with indigenous non-*Saccharomyces* yeasts and *Saccharomyces cerevisiae* for flavor and quality enhancement of Longyan dry white wine[J]. Food Bioscience, 2023, 55: 102952.

[31] 王燕荣, 胡海霞, 史晓霞, 等. 混菌发酵对‘123’苹果酒香气成分的影响[J]. 中国酿造，2023, 42(9): 96−102. [WANG Yanrong, HU Haixia, SHI Xiaoxia, et al. Effects of mixed-strains fermentation on the aroma compounds of '123' cider[J]. China Brewing, 2023, 42(9): 96−102.]