刘莎,郎瑞,严梅,等. 酵母菌与不同乳酸杆菌复合发酵对野木瓜酵素品质的影响 [J]. 食品工业科技,2026,47(4):36−48. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020091

LIU Sha, LANG Rui, YAN Mei, et al. Effect of Co-fermentation of Yeast with Different *Lactobacillus* Species on the Quality of *Stauntonia chinensis* Ferment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 36−48. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020091

·特邀主编专栏—果蔬基料制造:基础理论、新型加工、质量控制与智能制造(客座主编:徐贞贞、王永涛、李涛;产业顾问:李仁杰)·

酵母菌与不同乳酸杆菌复合发酵对野木瓜酵素品质的影响

刘　莎[1,2],郎　瑞[2],严　梅[2],王　瑜[1,2],李立郎[1,2],周　美[2],李春燕[2],杨　娟[1,2,*]

(1.贵州医科大学药学院,中药功效成分发掘与利用全国重点实验室,贵州贵阳 561113;
2.贵州省天然产物研究中心,贵州贵阳 550014)

摘　要:为探究不同乳酸杆菌强化发酵对野木瓜酵素品质的影响,本研究以新鲜野木瓜果浆为原料,采用罗伊氏乳杆菌(LRL)、鼠李糖乳杆菌(LRT)、植物乳杆菌(LPZ)、嗜酸乳杆菌(LAS)与酵母菌进行复合发酵,分析发酵过程中的常规理化指标、功效成分、抗氧化活性及风味物质的变化。结果表明:随发酵进行,不同发酵体系中总酸含量逐渐增加,而 pH、可溶性固形物和三萜含量逐步下降,总酚含量则先降低后升高。发酵至 15 d 时,LRT 发酵体系中三萜含量最高,为 5.57 mg/100 mL,LAS 发酵体系中多酚含量最高,为 4.27 mg/mL。此外,DPPH 自由基清除能力和 SOD 酶活性在 LRT 体系中最高,而羟自由基抑制率在 LRL 体系中最高。通过 GC-MS 结合 OAV 法分析,发现除 LRL 发酵体系外,酯类的种类和含量在其他 3 种体系中均增加。其中,LRT 发酵体系中检测到 87 种挥发性成分,主要为酯类(168.45 mg/L)和醇类(151.60 mg/L),OAV≥1 的挥发性物质共 30 种,主要关键风味物质为异丁酸乙酯、癸酸乙酯、苯乙醇、壬醛。主成分分析(PCA)表明,复合菌种制备的野木瓜酵素与未发酵的野木瓜挥发性成分的种类和含量相差较大,丰富了野木瓜挥发性成分组成,且 LRT 发酵体系风味最为丰富。综上所述,酵母菌与不同乳酸杆菌复合发酵对野木瓜酵素的品质有不同影响,且 LRT 发酵体系在功效成分含量、抗氧化能力和风味物质改善方面均表现较佳。

关键词:野木瓜,酵素,复合发酵,抗氧化活性,多酚,风味物质
中图分类号:TS201.4　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1002−0306(2026)04−0036−13
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025020091　　本文网刊:

Effect of Co-fermentation of Yeast with Different *Lactobacillus* Species on the Quality of *Stauntonia chinensis* Ferment

LIU Sha[1,2], LANG Rui[2], YAN Mei[2], WANG Yu[1,2], LI Lilang[1,2], ZHOU Mei[2], LI Chunyan[2], YANG Juan[1,2,*]

(1.State Key Laboratory of Discovery and Utilization of Functional Components in Traditional Chinese Medicine, School of Pharmaceutical Sciences, Guizhou Medical University, Guiyang 561113, China;
2.Guizhou Natural Products Research Center, Guiyang 550014, China)

Abstract: To investigate the effect of enhanced fermentation of different *Lactobacillus* species on the quality of *Stauntonia chinensis* ferment, the fresh *Stauntonia chinensis* pulp was utilized as the raw material. *Lactobacillus royceae* (LRL), *Lactobacillus rhamnosus* (LRT), *Lactobacillus plantarum* (LPZ), and *Lactobacillus acidophilus* (LAS) combined with yeast were used in the co-fermentation. Changes in conventional physicochemical indexes, functional components, antioxidant activity, and flavor components were systematically analyzed during the fermentation process. The results indicated that the

收稿日期: 2025−02−17
基金项目: 贵州省科技成果转化应用项目(黔科合成果 [2024] 一般 095)。
作者简介: 刘莎(2000−),女,硕士研究生,研究方向:天然药物化学,E-mail:2917195735@qq.com。
*** 通信作者:** 杨娟(1971−),女,博士,研究员,研究方向:天然药食两用植物资源活性物质研究,E-mail:yangxz2002@126.com。

total acid content increased gradually, while pH, soluble solids, and triterpene content decreased. After 15 days of fermentation, the LRT fermentation system exhibited the highest triterpene content at 5.57 mg/100 mL, while the LAS system showed the highest polyphenol content at 4.27 mg/mL. In addition, the DPPH radical scavenging capacity and SOD enzyme activity were highest in the LRT system, whereas the hydroxyl radical inhibition rate was highest in the LRL system. Using gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) combined with odor activity value (OAV) analysis, it was found that except for the LRL fermentation system, the types and contents of esters increased in the other three systems. Notably, a total of 87 volatile components were detected in LRT fermentation system, predominantly comprising esters (168.45 mg/L) and alcohols (151.60 mg/L). Among these, 30 volatile components had an OAV≥1, and the primary key volatile components were ethyl isobutyrate, ethyl caprate, phenylethanol and nonanal. Principal component analysis (PCA) indicated that the types and contents of *Stauntonia chinensis* ferment prepared by composite strains differed significantly from those of unfermented *Stauntonia chinensis*. This fermentation process enriched the composition of volatile components in *Stauntonia chinensis* ferment, and the LRT fermentation system had the richest flavor profile. In conclusion, the quality of *Stauntonia chinensis* ferment was influenced by the co-fermentation of yeast with different *Lactobacillus* species. The LRT fermentation system demonstrated superior performance in terms of functional component content, antioxidant activity, and flavor profile improvement.

Key words: *Stauntonia chinensis*; ferment; co-fermentation; antioxidant activity; polyphenols; flavor component

野木瓜（*Stauntonia chinensis*）生长于我国南部，素有“百益之果”美称[1]，其作为地方特有的药食两用资源，富含维生素、矿物质、蛋白质、多糖和有机酸等[2]。此外，野木瓜中还含有超氧化物歧化酶（SOD）、绿原酸、齐墩果酸等有效成分，具有抗炎、抗肿瘤、降血脂、镇痛、抗氧化等药理作用[3]。但由于野木瓜果实的糖酸比较低、质地较硬、口感不佳，难以直接食用，通常需要进行加工处理才能食用[4]。因此，野木瓜通常被开发成果汁，果酒，饮料，果醋等高附加值产品[5−7]。随着人们对健康生活的追求日益增强，天然、健康和功能性的食品及保健品受到越来越多的消费者的青睐。野木瓜作为一种绿色、天然的药食两用资源，因其鲜果的特性不便于直接食用，因此将其制备为酵素，不仅可以有效提升野木瓜的食用价值，丰富其营养成分，还能为消费者提供更多的健康选择。

微生物酵素是以一种或多种新鲜蔬菜、水果、菌菇、中草药等为原料，经多种有益菌发酵而产生的，含有丰富的维生素、酶、矿物质和次生代谢产物等营养成分的功能性微生物发酵产品[8]。由于其具有抗氧化，抗菌，消炎，提高免疫功能，修复身体损伤等作用，因而受到广泛关注[9−10]。通过益生菌对新鲜水果进行发酵能改变原料中的风味物质及生理活性物质的构成与含量[11]。覃引等[12] 比较了不同发酵方式所制备的覆盆子-石榴复合果汁酵素的抗氧化活性，结果表明混合发酵比单纯发酵及自然发酵具有更好的抗氧化活性。赵宇等[13] 通过接种酵母菌和乳酸杆菌发酵制备西梅酵素，并对不同发酵阶段的 4 组样品进行检测，共检测出 37 种挥发性化合物；该研究表明，经发酵处理后，西梅酵素中的挥发性成分种类及含量有所提高，丰富了西梅酵素特征香气和宜人风味。张江宁等[14] 研究发现，通过乳酸杆菌、酵母菌偶联发酵红枣汁，共检测出 53 种挥发性化合物，并证明通过混菌发酵能够有效提高发酵枣汁的品质。Mandha 等[15] 在发酵芒果汁中鉴定出 44 种挥发性物质，其中酮类和呋喃类化合物含量显著增加。

乳酸杆菌和酵母菌兼具益生菌和发酵特性，是制备酵素类产品的优良发酵菌剂[16−18]。复合发酵过程中，酵母菌在发酵初期快速消耗氧气，创造厌氧环境，并生成乙醇和 CO_2。乳酸杆菌则在厌氧条件下主导产酸（如乳酸），降低 pH，抑制病原菌生长。两者通过协同、竞争、拮抗等方式相互调节，较单菌发酵可提高发酵效率，使得发酵产物中有机酸、醇类物质、酚类物质等风味物质的含量提高，有助于提高发酵产品的品质，延长保质期，满足天然健康产品的需求[19]。然而，目前关于酵母菌和乳酸杆菌复合发酵对野木瓜酵素品质的影响仍需进一步研究。因此，为探究酵母菌与不同乳酸杆菌复合发酵对野木瓜酵素品质的影响，本文通过追踪野木瓜复合发酵过程中发酵液理化指标、功效成分、抗氧化活性的动态变化，并分析比较未发酵的野木瓜及经 4 种复合菌种发酵后的野木瓜酵素挥发性成分的差异，旨在探索野木瓜的潜在应用价值，为加快野木瓜资源的高效开发和利用提供一定的理论与实践依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鲜野木瓜　贵州威凌生物科技有限公司，采摘于贵州省遵义市正安县；酵母菌（安琪活性干酵母粉 BV818）　安琪酵母股份有限公司；PG-LAS107 嗜酸乳杆菌、G-LPZ131 植物乳杆菌、G-LRT109 鼠李糖乳杆菌、G-LRL116 罗伊氏乳杆菌　山东嘉诚生物科技有限公司；环己酮（>98%）　上海麦克林生化科技有限公司；纤维素酶（2 万 U/g）、果胶酶（3 万 U/g）　南宁庞博生物工程有限公司；超氧化物歧化酶试剂盒、DPPH、羟自由基试剂盒　北京索莱宝科技有限公司。

GZX-9420MBE 烘箱、BZF-50 干燥箱　上海博迅实业有限公司；BS-210S 电子天平　北京赛多利斯

仪器有限公司; Cary60UV-VIS 分光光度计、HP6890/5975C 气质联用仪、HP-5MS 石英毛细管色谱柱(60 m×0.25 mm×0.25 μm) 美国安捷伦公司; SKG-PB-936 打浆机 上海达瑞宝公司; SAAB-57348-U 固相微萃取装置(2 cm-50/30 μm DVB/CAR/PDMS) Supelco 公司; VarioskanLUX 酶标仪 Thermo Fisher 公司; Millipore-0026 纯水机 Millipore 公司; LDZX-50L 高压蒸汽灭菌锅 上海申安医疗器械厂; PHS-3C 酸度计 上海仪电科学仪器股份有限公司; 080SD 超声波清洗机 深圳市超洁科技实业有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 野木瓜酵素的制备 野木瓜酵素的制备参考文献 [20], 并做适当调整; 挑选无虫害的鲜野木瓜用清水清洗干净、去核。按料液比 1∶1 加水混合后进行打浆破碎, 添加 10% 的白糖, 装瓶灭菌(121 ℃, 0.1 MPa, 30 min), 冷却至 35~40 ℃。按照浆液的重量添加 0.2% 的纤维素酶和 0.2% 的果胶酶。将酵母菌与不同的乳杆菌按质量比为 1∶2 比例混合(LRL: 酵母菌+罗伊氏乳杆菌; LRT: 酵母菌+鼠李糖乳杆菌; LPZ: 酵母菌+植物乳杆菌; LAS: 酵母菌+嗜酸乳杆菌)采用 37 ℃ 温水活化后, 按照 0.2% 的质量比添加进行接种发酵, 控制发酵温度为 20~25 ℃, pH 为 3.5, 恒温有氧发酵 15 d 后, 得到各复合菌种发酵的野木瓜酵素; 其间在发酵 0、3、7、11、15 d 时取上清液过滤, 滤液用于后续检测, 具体流程参见图 1。

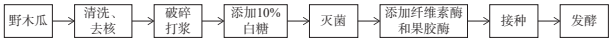


图 1 野木瓜酵素制备流程

Fig.1 Flow of *Stauntonia chinensis* ferment preparation

1.2.2 理化指标和功效成分的测定方法 总酸: 参照国标 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》中的酸碱滴定法检测, 根据滴定样品稀释液消耗的 NaOH 溶液量, 计算样品中的总酸含量(乳酸当量)。

pH: 使用酸度计直接测定。

可溶性固形物含量: 用手持糖度-折射仪检测, 检测前吸取纯净水进行调零, 后吸取待测液体 2~3 滴于镜面并开始检测记录可溶性固形物含量以及监测温度, 根据可溶性固形物含量温度校正表进行校正后得出最终值。

总酚含量: 各样品取 1 mL 稀释 100 倍, 摇匀后精密吸取稀释液 1 mL 至 10 mL 试管中先加水 6 mL, 摇匀再加入福林酚试液 0.5 mL, 摇匀 0.5~8 min 内加入 20% Na_2CO_3 溶液 1.5 mL, 加水定容至刻度, 摇匀于 75 ℃ 水浴中反应 10 min。以没食子酸为对照品绘制标准曲线, 得到 y=73.321x+0.1545, R^2=0.9926, 其中 x 为没食子酸浓度, y 为吸光度。采用 UV-VIS 计在 760 nm 处测定吸光值, 将吸光度 y 代入上式标准曲线, 乘以稀释倍数, 得样品总酚含量[21]。

总三萜含量: 分别精密吸取 1 mL 各样品于 50 mL 容量瓶中, 加入无水乙醇定容, 超声(400 W, 30 ℃)1 h 进行提取。超声结束后, 将提取液混匀, 即得供试液。分别精密吸取 1 mL 供试液于试管中, 90 ℃ 水浴挥干后, 加入 5% 香草醛-冰醋酸混合溶液 0.1 mL, 继续加入高氯酸溶液(70%~72%)0.8 mL, 于 60 ℃ 水浴条件下反应 20 min, 结束后于冰水浴中冷却 4 min, 继续加入 5 mL 冰醋酸混匀。以齐墩果酸为对照品绘制标准曲线得到 y=0.0048x+0.1934, R^2=0.998, 其中 y 为吸光度, x 为齐墩果酸质量。采用 UV-VIS 计在 550 nm 处测定吸光值, 将吸光度 y 代入上式标准曲线, 计算出样品中所含总三萜质量除以样品体积, 得到总三萜含量[22]。

1.2.3 抗氧化指标的测定方法 SOD 酶活性、DPPH 自由基清除率和羟自由基抑制率的检测均参照试剂盒说明书进行测定与计算。

1.2.4 挥发性风味成分测定方法 样品提取方法: 精密吸取样品 3 mL, 内标溶液(环己酮 0.7554 mg/mL) 5 μL, 置于 20 mL 采样瓶中。在 45 ℃ 加热条件下顶空萃取 10 min 后, 插入长度为 1 cm 的固相微萃取采样器, 继续萃取 30 min, 萃取过程中每 10 s 搅动 2 s, 萃取结束后, 移出萃取头并立即插入气相色谱仪进样口(温度 250 ℃)中, 热解析进样。

测定条件: 色谱柱为 HP-5MS UItra Inert(30 m×0.25 mm×0.25 μm)弹性石英毛细管柱; 初始温度 42 ℃(保留 2 min), 以 3 ℃/min 升温至 150 ℃, 再以 5 ℃/min 升温至 210 ℃, 最后 10 ℃/min 升温至 310 ℃(保留 2 min); 运行时间: 62 min; 汽化室温度 250 ℃; 载气为高纯 He(99.99%); 柱前压 7.18 psi, 载气流量 1.0 mL/min, 不分流, 溶剂延迟时间: 1 min。离子源温度 230 ℃; MS1 四极杆温度 150 ℃; MS2 四极杆温度 150 ℃; 电子能量 70 eV; 发射电流 34.6 μA; 倍增器电压 2377 V; 接口温度 250 ℃; 质量范围 30~500 amu。

定性方法: 对总离子流图中的各峰经质谱计算机数据系统检索及核对 Nist20 标准质谱图, 确定挥发性化学成分。

定量方法: 挥发性成分采用内标半定量法[23−24], 计算公式如下:

$$C_2(mg/L) = \frac{C_1 \times V_1 \times S_2}{V_0 \times S_1} \times 1000$$

式中: C_2 为目标化合物质量浓度, mg/L; C_1 为内标质量浓度, mg/mL; V_1 为内标体积, mL; V_0 为样品体积, mL; S_2 为目标化合物峰面积; S_1 为内标峰面积。

1.3 数据处理

以上实验重复进行三次, 使用 SPSS 26 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA), P<0.05 具有统计学意义。采用 GraphPad 9.50 和 Origin 2021 进行绘图。

2　结果与分析

2.1　不同复合菌种发酵过程中 pH、总酸和可溶性固形物含量的变化

pH 可以反映发酵过程的异常情况，总酸含量表明微生物的代谢变化情况。发酵过程中的 pH 持续降低、总酸含量不断增加，由图 2A 可知，0~3 d 时，各发酵体系中的野木瓜发酵液 pH 由最初的 3.39~3.55 迅速下降至 3.01~3.10，与第 0 d 相比，第 3 d 时 pH 具有显著性差异（P<0.05），继续发酵 pH 趋于稳定；发酵过程中发酵液总酸含量总体呈升高趋势，0~3 d 时，总酸含量由最初的 8.59~9.99 g/L 增加至 17.28~18.39 g/L，与第 0 d 相比，第 3 d 时总酸含量具有显著性差异（P<0.05）。在 3~15 d 时，总酸含量缓慢升高至 17.85~20.49 g/L（图 2B）。可溶性固形物是指能溶于水的化合物，其含量的变化可直观反映发酵液品质，主要包括糖、有机酸、矿物质等。在发酵 0~3 d 时，可溶性固形物含量迅速下降（图 2C），原因是微生物迅速繁殖，大量消耗原料中的糖类等可溶性营养物质进行生长和发酵[25]。在 3~15 d 期间，可溶性固形物含量先上升后下降，可能是微生物为维持生命活动开始将野木瓜发酵液中的其他物质转化为可溶性碳水化合物并逐渐进行利用，从而导致可溶性固形物含量先上升后下降。在发酵过程中（0~15 d），LRT 复合发酵体系的 pH 由 3.55 降至 2.97，总酸含量由 9.99 g/L 升至 20.49 g/L，可溶性固形物含量由 3.50°Brix 降至 2.23°Brix，变化均有显著性差异（P<0.05），且该发酵体系在总酸含量的增加程度及对野木瓜中可溶性固形物的利用程度相较于其他 3 种复合发酵体系更高。

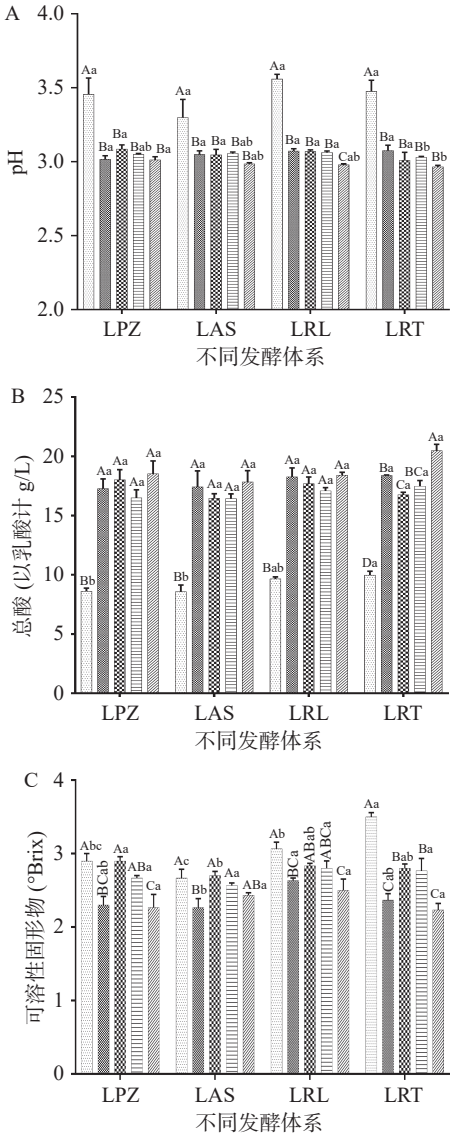


图 2　酵母菌与不同乳酸杆菌复合发酵对野木瓜酵素 pH（A）、总酸（B）和可溶性固形物（C）的影响

Fig.2　Effect of co-fermentation of yeast and different *Lactobacillus* species on pH (A), the total acid (B), and soluble solids (C) of *Stauntonia chinensis* ferment

注：不同大写字母代表组内具有显著性差异（P<0.05），不同小写字母代表组间具有显著性差异（P<0.05）；图 3~图 5 同。

2.2　不同复合菌种发酵过程中功效成分含量的变化

由图 3A 可知，随着发酵的进行（0~15 d），不同菌种复合发酵体系总三萜含量整体呈下降趋势（P<0.05），与 Li 等[26] 采用嗜酸乳杆菌（GIM1.208）发酵刺梨的趋势一致；这可能是发酵期间乳酸杆菌降解了三萜类化合物所致[26]。发酵结束后，LPZ、LAS、LRL、LRT 制备的野木瓜酵素中总三萜含量分别为 1.48、1.48、5.50 和 5.57 mg/100 mL，较发酵前分别降低了 85.27%、85.44%、41.21% 和 37.95%。由图 3B 可知，4 种复合菌种在发酵前期（0~3 d）总酚含量下降；在 3~11 d 期间，总酚含量持续增加，第 11 d 时，各发酵体系中总酚含量与 3 d 时相比均有显著性差

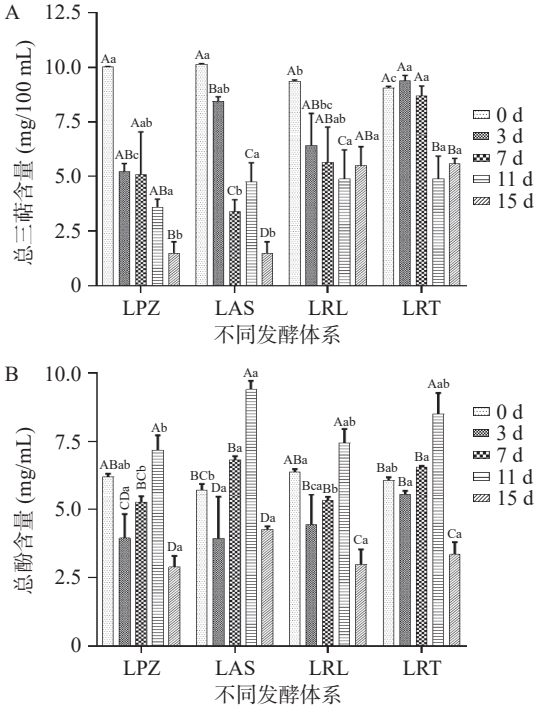


图 3　酵母菌与不同乳酸杆菌复合发酵对野木瓜酵素总三萜（A）和总酚（B）含量的影响

Fig.3　Effect of co-fermentation of yeast and different *Lactobacillus* species on total triterpenes (A) and total phenol (B) content of *Stauntonia chinensis* ferment

异(P<0.05)，且总酚含量于第 11 d 时达到最高值，分别为 LPZ(7.19 mg/mL)、LAS(9.41 mg/mL)、LRL(7.45 mg/mL)和 LRT(8.51 mg/mL)，较发酵前分别提高了 15.73%、64.05%、16.73% 和 40.00%。在 11 d 后，总酚含量迅速下降，第 15 d 时，各发酵体系中总酚含量与 11 d 时相比均有显著性差异(P<0.05)。发酵结束后 LPZ、LAS、LRL 和 LRT 发酵体系中，总酚含量分别为 2.89、4.27、2.99 和 3.35 mg/mL。发酵 3 d 后总酚含量的增加可能归因于微生物(如：酵母菌、乳酸杆菌)分泌的胞外水解酶对聚合酚类物质的水解作用促进了游离酚的释放与积累，而不同发酵体系间总酚含量的差异则与各菌株的个体适应性及其胞外水解酶合成能力的特异性密切相关[25]。发酵 11 d 后，发酵体系中酵母菌和乳酸杆菌的生长进入衰亡期，菌体数量减少。在此过程中，菌体内的多种酶(如：多酚氧化酶)被释放出来，使得多酚的氧化和降解占据主导地位，导致发酵体系中总酚含量下降[27]。

2.3 不同复合菌种发酵过程中 SOD 酶活力变化

SOD 作为一种重要的抗氧化酶，其酶活力常被用来衡量酵素酶活性的高低和发酵系统的抗氧化活性强弱[10]。如图 4 所示，经复合发酵后(15 d)，各发酵体系中 SOD 酶活力与第 0 d 相比显著下降(P<0.05)。分析原因可能为 SOD 在高温下不稳定，酵素制备流程中高温灭菌可导致 SOD 酶活力损失；以及在发酵初期(0~3 d)，发酵体系内的糖类物质被微生物快速消耗，生成有机酸(如乳酸、乙酸)，导致体系总酸含量显著积累并伴随着 pH 的降低，从而使得发酵体系酸化偏离 SOD 的最适 pH，进而导致 SOD 酶活力降低[28−29]。发酵结束后，LPZ、LAS、LRL、LRT 制备的野木瓜酵素中 SOD 酶活较发酵前分别降低了 61.46%、65.39%、66.28% 和 55.90%。

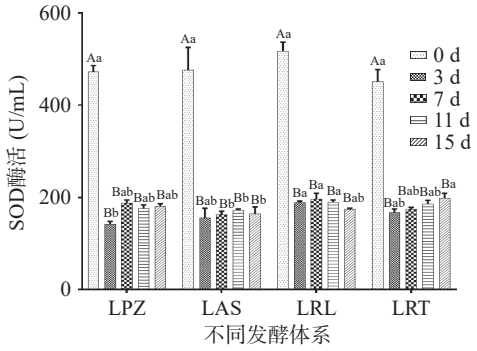


图 4 酵母菌与不同乳酸杆菌复合发酵对野木瓜酵素 SOD 酶活的影响

Fig.4 Effect of co-fermentation of yeast and different *Lactobacillus* species on the SOD enzyme activity in *Stauntonia chinensis* ferment

2.4 不同复合菌种发酵过程中抗氧化活性变化

采用 DPPH 和 OH·两种不同抗氧化方法来评价复合发酵体系的抗氧化能力[30]。由图 5A 可知，4 种复合发酵菌种在发酵过程中均能提升发酵体系中

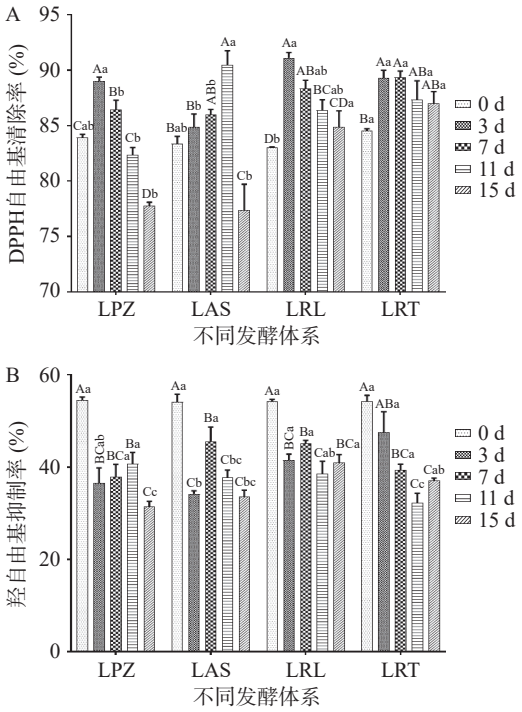


图 5 酵母菌与不同乳酸杆菌复合发酵对野木瓜酵素 DPPH 自由基清除率(A)、羟自由基抑制率(B)的影响

Fig.5 Effect of co-fermentation of yeast and different *Lactobacillus* species on DPPH radical scavenging capacity (A) and hydroxyl radical inhibition rate (B) of *Stauntonia chinensis* ferment

DPPH 自由基清除能力，其清除能力随着发酵时间的增加而先上升后下降。在 0~3 d 期间，LRL、LRT 和 LPZ 均可提高发酵体系 DPPH 自由基清除能力；第 3 d 时，这 3 种发酵体系中 DPPH 自由基清除能力与 0 d 时相比均有显著性差异(P<0.05)。在 3~15 d 期间，LRL、LPZ 和 LRT 这 3 种复合发酵体系中 DPPH 自由基清除能力随着发酵时间逐步降低；第 15 d 时，除 LRT 发酵体系外，其余 2 种发酵体系中 DPPH 自由基清除能力与 3 d 时相比均有显著性差异(P<0.05)；这与张文刚等[31]研究结果一致。LAS 发酵体系 DPPH 自由基清除能力在第 0~11 d 期间逐步升高，第 11 d 时与第 0 d 相比差异具有显著性(P<0.05)；在 11~15 d 时则开始下降，第 15 d 时与第 11 d 相比差异具有显著性(P<0.05)。其原因为在发酵初期，乳酸杆菌进入快速产酸阶段，此时 DPPH 自由基清除能力的提升主要得益于有机酸积累[32]；同时，发酵过程中生成的酚类物质等代谢产物[33]也发挥了积极作用。例如，Wang 等[34]研究发现，发酵后的黑苦莓汁中，酚酸和类黄酮的转化增强了其清除 DPPH 自由基的能力。随着发酵时间的延长，复合发酵体系中菌种生长进入稳定期或衰亡期，代谢产物合成减少，同时降解酶活性增强，导致具有 DPPH 清除能力的物质被分解所致[35]。发酵结束后，LPZ、LAS、LRL、LRT 制备的野木瓜酵素中 DPPH 自由基清除率分别为 77.75%、77.4%、84.88% 和 86.99%。

由图 5B 可见，在整个发酵过程中 4 种复合发酵体系的羟自由基抑制率呈下降上升交替变化的波动趋势，这一变化与宋吉玲等[36] 研究结果相似。发酵结束后，所有发酵体系的羟自由基抑制率相较于未发酵时均有所降低，且差异具有显著性（P<0.05）。这是由于发酵前期在供氧条件下，复合发酵导致发酵液中产生了羟自由基[37]，进而导致了复合发酵体系中羟自由基抑制率下降；随着发酵时间的不断增加，发酵体系中酚类化合物的不断增加，从而使发酵体系中羟自由基的抑制率有所增加，但其抑制率仍低于发酵前，推测可能是发酵体系中过量的羟自由基抵消了酚类物质的清除效果。发酵结束后，LPZ、LAS、LRL、LRT 制备的野木瓜酵素中羟自由基抑制率分别为 31.50%、33.66%、41.01% 和 37.14%。

Feng 等[38] 在综述中指出，不同乳酸杆菌（LAB）的自由基清除能力存在差异，主要源于其抗氧化系统、代谢产物谱及菌株特异性特征的不同。本研究以 4 种乳酸杆菌与酵母菌对野木瓜进行复合发酵，发现不同发酵体系的抗氧化能力总体趋势相似，但在发酵过程中均随时间呈现不同的动态变化。这一现象可能归因于不同乳酸杆菌在发酵过程中产生的代谢产物（如有机酸、胞外多糖及过氧化物酶等）存在差异。

2.5　不同复合菌种制备的野木瓜酵素理化指标、功效成分和抗氧化活性比较

如表 1 所示，4 种复合菌种发酵的野木瓜酵素（发酵 15 d）在总酸、总三萜含量、SOD 酶活、DPPH 清除率和羟自由基抑制率方面均有显著差异（P<0.05）。在理化指标方面，4 种复合菌种发酵的野木瓜酵素 pH 维持在 2.97~3.01，其中，LRT 发酵体系 pH 最低（2.97）。4 种复合菌种发酵的野木瓜酵素总酸含量则呈现 LRT>LPZ>LRL>LAS 的关系，各复合菌种间无显著性差异（P>0.05）。功效成分分析表明，总三萜的含量呈现菌株特异性，LRT 与 LRL 组分别为 5.57 mg/100 mL 和 5.50 mg/100 mL，显著高于另外 2 种发酵体系（P<0.05）。而总酚含量则以 LAS 表现最优（4.27 mg/mL），这可能与乳酸杆菌各菌株的个体适应性及其胞外水解酶合成能力的特异性密切相关[25]。抗氧化活性综合评价表明，LRT 在 SOD 酶活（198.71 U/mL）和 DPPH 清除率（86.99%）两项指标上比其他 3 种复合菌种更高，其 DPPH 清除能力较 LAS 提高了 9.59%。而羟自由基抑制率则是 LRL 优于其他 3 种复合菌种。

由此可知，发酵至 15 d 时，与其他 3 种复合菌种比较，LRT 发酵体系中 pH 最低；总酸和总三萜含量最高，多酚含量则在 LAS 发酵体系中最高。此外，DPPH 自由基清除能力和 SOD 酶活性在 LRT 体系中最高，而羟自由基抑制率在 LRL 体系中最高。

2.6　挥发性风味成分分析

2.6.1　挥发性成分总离子流图　采用固相微萃取技术提取进样后，经过气相-质谱记录分子碎片信息，得到的总离子流图见图 6。由图 6 可知，采用 GC-MS 能较好地将野木瓜及其酵素中的挥发性成分进行分离，并且可以观察到野木瓜经发酵后，色谱峰数量有所增加，且 LRL、LRT、LPZ 和 LAS 制备的野木瓜酵素色谱峰数量均比未发酵的野木瓜多。

2.6.2　挥发性成分检测结果　采用固相微萃取-气质（SPME-GC-MS）对未发酵的野木瓜及 4 种复合菌种发酵的野木瓜酵素进行风味物质测定分析，结果见图 7。以上 4 种复合菌种发酵野木瓜酵素的挥发性成分有酯类、烷烃类、醇类、酸类、酮类、烯烃类、醛类、酚类及其他类。未经发酵的野木瓜挥发性成分含量较高的是酯类、醇类、烷烃类，分别为 29.54、25.00、14.30 mg/L；LRL 发酵的野木瓜酵素中挥发性成分含量较高的是烷烃类、醛类、酯类，分别为 203.23、134.65、53.30 mg/L；LRT 发酵的野木瓜酵素中挥发性成分含量较高的是酯类和醇类，分别为 168.45、151.60 mg/L；LPZ 发酵的野木瓜酵素中挥发性成分相对含量较高的是酯类、烷烃类、酸类、烯烃类，分别为 156.37、66.97、53.83、53.51 mg/L；LAS 发酵的野木瓜酵素中挥发性成分含量较高的是酯类和醇类，分别为 143.07、156.09 mg/L。相较于未发酵的野木瓜，除 LRL 主要增加了野木瓜酵素的烷烃类和醛类物质含量外，其他三种复合菌种均增加了野木瓜酵素的酯类物质含量。LRT 和 LAS 还增加了野木瓜酵素的醇类物质含量，减少了烷烃类物质的含量，LPZ 增加了野木瓜酵素的酸类和烯烃类物质含量。

表 2 概述了未发酵的野木瓜及各组野木瓜酵素中的风味物质分析结果。对未发酵的野木瓜和发酵

表 1　不同菌种发酵野木瓜酵素的理化指标、功效成分、抗氧化活性

Table 1　Physicochemical indexes, functional components and antioxidant activity of *Stauntonia chinensis* ferment fermented by different strains

不同发酵体系	pH	总酸（g/L）	可溶性固形物（°Brix）	总三萜（mg/100 mL）	总酚（mg/mL）	SOD酶活（U/mL）	DPPH自由基清除率（%）	羟自由基抑制率（%）
LPZ	3.01±0.04^{a}	18.54±1.86^{a}	2.27±0.31^{a}	1.48±0.93^{b}	2.89±0.7^{a}	181.76±8.54^{ab}	77.75±0.5^{b}	31.50±1.88^{c}
LAS	2.99±0.01^{ab}	17.85±1.62^{a}	2.43±0.06^{a}	1.48±0.93^{b}	4.27±0.1^{a}	164.50±26.3^{b}	77.4±4.02^{b}	33.66±2.36^{bc}
LRL	2.98±0.01^{ab}	18.42±0.41^{a}	2.5±0.26^{a}	5.50±1.48^{a}	2.99±0.9^{a}	174.63±4.21^{ab}	84.88±2.5^{a}	41.01±2.9^{a}
LRT	2.97±0.02^{b}	20.49±0.90^{a}	2.23±0.15^{a}	5.57±0.44^{a}	3.35±0.7^{a}	198.71±17.7^{a}	86.99±1.8^{a}	37.14±0.82^{ab}

注：同列不同小写字母表示数据差异显著，P<0.05。

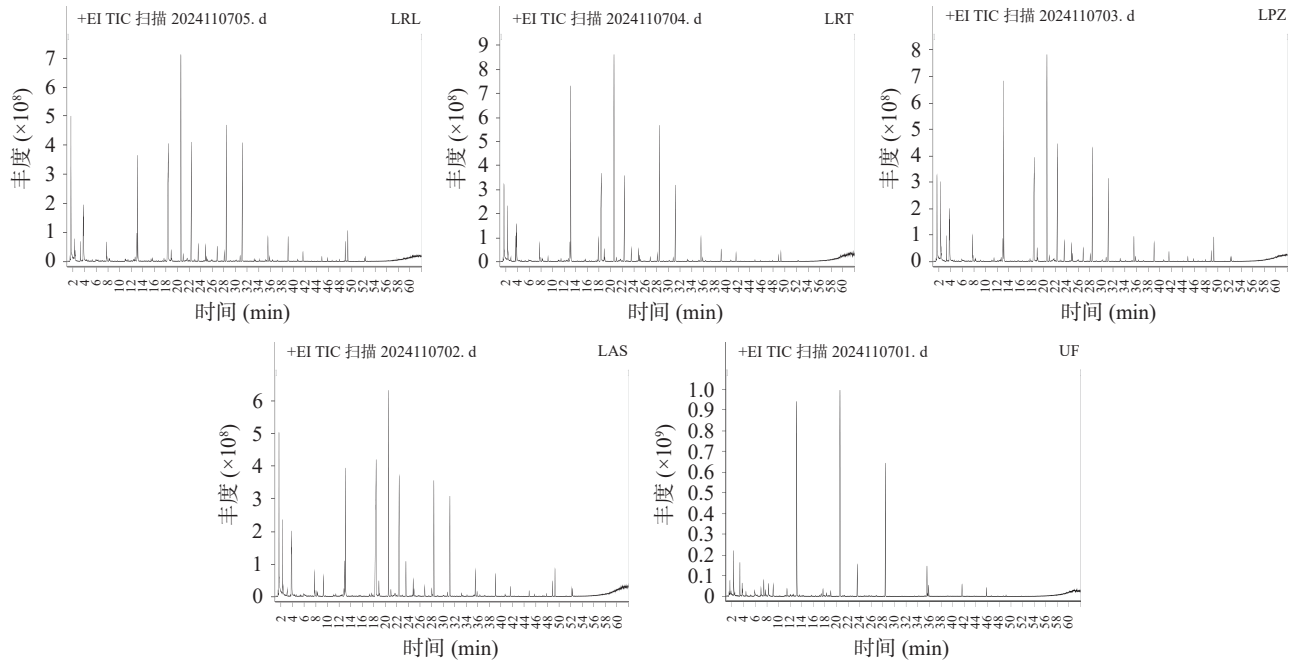


图 6 不同菌种发酵野木瓜酵素的挥发性成分总离子流图

Fig.6 Total ion flow diagram of volatile components of *Stauntonia chinensis* ferment fermented by different strains

注: LRL: 酵母菌与罗伊氏乳杆菌; LRT: 酵母菌与鼠李糖乳杆菌; LPZ: 酵母菌与植物乳杆菌; LAS: 酵母菌与嗜酸乳杆菌; UF: 未发酵(0 d), 不同菌种发酵野木瓜酵素的时间为 15 d。

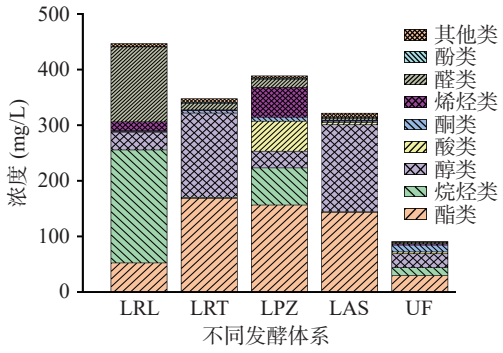


图 7 不同菌种发酵野木瓜酵素的挥发性成分含量

Fig.7 Content of volatile components of *Stauntonia chinensis* ferment fermented by different strains of bacteria

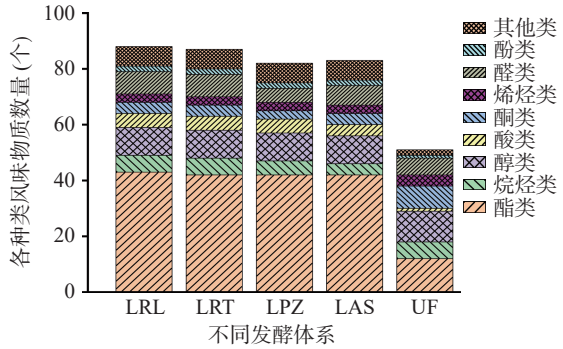


图 8 不同菌种发酵野木瓜酵素的各种挥发性物质数量

Fig.8 Amounts of various volatiles of *Stauntonia chinensis* ferment fermented by different strains of bacteria

后各组野木瓜酵素进行挥发性风味物质检测, 鉴定出原料中含有 51 种挥发性风味物质, 经 LRL、LRT、LPZ 和 LAS 发酵制备的野木瓜酵素分别鉴定出 88、87、82 和 83 种挥发性物质(图 8), 说明野木瓜经以上 4 种复合菌种发酵后风味物质种类数增加, 风味更为丰富。4 中乳杆菌与酵母菌复合发酵后, 野木瓜酵素中酯类含量均有所增加。其中, LRT、LPZ 和 LAS 在发酵野木瓜的过程中产生大量酯类物质, 对野木瓜酵素的整体风味具有积极作用; 酯类物质能够赋予野木瓜酵素令人愉悦的水果香气[39], 例如: 乙酸乙酯能够产生浓郁的葡萄香味, 己酸乙酯能够带来香蕉香气, 乙酸甲酯赋予样品清甜的果香[13]。LRT 发酵体系比其它三种发酵体系增加了更多酯类物质且含量最高, 为 168.45 mg/L, 是未发酵野木瓜的 5.70 倍, 是 LRL、LPZ、LAS 发酵体系的 3.16、1.08、1.18 倍。与 UF 相比, 采用 LRT、LPZ 和 LAS 发酵方法制备的野木瓜酵素中酯类物质含量显著提高(P<0.05), 而 LRL 发酵制备的野木瓜酵素与 UF 相比无显著差异(P>0.05)。表 2显示未发酵的野木瓜中主要的酯类为棕榈酸甲酯(21.16 mg/L)。有研究表明, 棕榈酸甲酯是苦瓜粉中关键特征挥发性物质之一[40]。经 LRL 发酵后, 野木瓜酵素中主要的酯类为棕榈油酸甲酯和乙酸乙酯, LRT 中主要为乙酸乙酯、乙酸己酯、辛酸乙酯和癸酸乙酯, LPZ 中主要为丁酸乙酯、异丁酸异戊酯、水杨酸甲酯和月桂酸异戊酯, LAS 中主要为乙酸乙酯、乙酸己酯、辛酸乙酯和棕榈酸乙酯。醇类物质在野木瓜酵素的风味特征中同样起着重要作用, 由 LRT 和 LAS 所制备的野木瓜酵素中醇类物质含量较高, 与 LRL、LPZ 和 UF 相比差异具有显著性(P<0.05)。其中, α-松油醇、异戊醇、异丁醇、苯乙醇能够赋予野木瓜酵素木质花香、花香、麦芽香气、威士忌味、甜香[13]。此外, 除 LRL 制备的野木瓜酵素中醛类化合物的含量较高

表 2　不同菌种发酵野木瓜酵素的挥发性成分检测结果

Table 2　Detection results of volatile components of *Stauntonia chinensis* ferment fermented by different strains of bacteria

序号	保留时间（min）	化合物名称	分子式	分子量（g/mol）	相对含量(mg/L)				
					LRL	LRT	LPZ	LAS	UF
1	1.83	乙酸甲酯	$C_3H_6O_2$	74	–	–	–	–	1.21±0.07
2	2.26	乙酸乙酯	$C_4H_8O_2$	88	10.17±1.89^{b}	20.11±2.93^{a}	0.87±0.24^{c}	10.85±1.35^{b}	0.18±0.08^{c}
3	3.36	丙酸乙酯	$C_5H_{10}O_2$	102	0.16±0.04^{a}	0.25±0.18^{a}	–	0.07±0.04^{a}	–
4	4.27	异丁酸乙酯	$C_6H_{12}O_2$	116	1.67±0.09^{b}	0.09±0.01^{c}	4.01±0.70^{a}	0.09±0.05^{c}	–
5	4.61	乙酸异丁酯	$C_6H_{12}O_2$	116	0.18±0.04^{b}	0.36±0.01^{a}	0.42±0.06^{a}	0.24±0.03^{b}	0.07±0.02^{c}
6	5.29	丁酸乙酯	$C_6H_{12}O_2$	116	1.06±0.3^{b}	0.35±0.07^{b}	10.08±1.11^{a}	0.21±0.01^{b}	0.44±0.03^{b}
7	6.82	2-甲基丁酸乙酯	$C_7H_{14}O_2$	130	1.58±0.41^{a}	0.16±0.02^{b}	0.09±0.02^{b}	0.14±0.03^{b}	0.29±0.10^{b}
8	7.77	乙酸异戊酯	$C_7H_{14}O_2$	130	1.90±0.67^{c}	8.63±0.81^{a}	0.17±0.08^{d}	6.9±0.63^{b}	0.25±0.20^{d}
9	7.86	2-甲基丁基乙酸酯	$C_7H_{14}O_2$	130	0.14±0.04^{d}	2.22±0.15^{a}	0.09±0.05^{d}	1.92±0.07^{b}	0.42±0.21^{c}
10	9.68	己酸甲酯	$C_7H_{14}O_2$	130	0.30±0.04^{a}	0.22±0.01^{a}	0.27±0.10^{a}	0.2±0.01^{a}	–
11	13.01	乙酸己酯	$C_8H_{16}O_2$	144	0.32±0.07^{c}	10.44±1.37^{a}	0.15±0.07^{c}	10.87±1.15^{a}	3.66±1.05^{b}
12	13.11	3-己烯酸乙酯	$C_8H_{14}O_2$	142	0.11±0.08^{c}	0.21±0.03^{ab}	0.14±0.02^{ab}	0.23±0.02^{a}	–
13	13.34	顺-3-乙酸己烯酯	$C_8H_{14}O_2$	142	–	–	–	–	0.44±0.16
14	13.6	异丁酸异戊酯	$C_9H_{18}O_2$	158	0.14±0.05^{b}	0.15±0.03^{b}	10.32±0.4^{a}	0.13±0.04^{b}	–
15	15.45	2-糠酸乙酯	$C_7H_8O_3$	140	0.72±0.21^{a}	0.32±0.08^{b}	0.39±0.04^{b}	0.23±0.03^{b}	–
16	18.91	辛酸甲酯	$C_9H_{18}O_2$	158	0.78±0.17^{b}	6.11±0.39^{a}	0.93±0.24^{b}	5.28±1.01^{a}	–
17	20.98	苯甲酸乙酯	$C_9H_{10}O_2$	150	0.36±0.05^{c}	2.24±0.18^{b}	0.42±0.09^{c}	2.81±0.5^{a}	0.38±0.20^{c}
18	21.54	琥珀酸二乙酯	$C_8H_{14}O_4$	174	0.09±0.02^{c}	0.26±0.002^{b}	1.08±0.08^{a}	0.22±0.09^{b}	–
19	22.04	水杨酸甲酯	$C_8H_8O_3$	152	2.82±0.37^{b}	0.54±0.09^{b}	76.67±5.14^{a}	0.44±0.1^{b}	–
20	22.4	辛酸乙酯	$C_{10}H_{20}O_2$	172	1.91±0.76^{b}	55.94±1.85^{a}	1.56±0.39^{b}	59.27±9.19^{a}	1.04±0.13^{b}
21	24.44	苯乙酸乙酯	$C_{10}H_{12}O_2$	164	0.16±0.05^{c}	0.27±0.01^{bc}	0.43±0.12^{a}	0.31±0.02^{ab}	–
22	24.72	己酸异戊酯	$C_{11}H_{22}O_2$	186	0.50±0.15^{a}	0.34±0.03^{ab}	0.22±0.03^{b}	0.33±0.05^{ab}	–
23	24.98	乙酸苯乙酯	$C_{10}H_{12}O_2$	164	1.04±0.15^{c}	3.23±0.31^{a}	0.89±0.24^{c}	2.32±0.23^{b}	–
24	26.83	壬酸乙酯	$C_{11}H_{22}O_2$	186	0.26±0.08^{b}	2.67±0.79^{a}	0.27±0.07^{b}	3.87±1.92^{a}	–
25	28.04	癸酸甲酯	$C_{11}H_{22}O_2$	186	2.20±0.44^{b}	4.29±0.59^{a}	0.38±0.06^{c}	3.46±1.06^{ab}	–
26	30.78	9-癸烯酸乙酯	$C_{12}H_{22}O_2$	198	0.77±0.10^{b}	1.49±0.22^{a}	0.13±0.06^{c}	1.27±0.09^{a}	–
27	31.18	癸酸乙酯	$C_{12}H_{24}O_2$	200	1.06±0.34^{b}	45.75±1.79^{a}	0.97±0.27^{b}	–	–
28	33.21	3-辛酸甲丁酯	$C_{13}H_{26}O_2$	214	0.05±0.02^{b}	1.05±0.06^{a}	1.09±0.08^{a}	1.09±0.08^{a}	–
29	33.33	2-甲基丁基辛酸酯	$C_{13}H_{26}O_2$	214	0.37±0.16^{a}	0.35±0.03^{a}	0.38±0.17^{a}	0.29±0.09^{a}	–
30	35.2	十一酸乙酯	$C_{13}H_{26}O_2$	214	0.17±0.03^{b}	0.65±0.08^{b}	7.04±1.45^{a}	0.39±0.13^{b}	–
31	36.36	月桂酸甲酯	$C_{13}H_{26}O_2$	214	0.54±0.07^{a}	0.64±0.12^{a}	0.35±0.04^{b}	0.65±0.12	–
32	39.05	月桂酸乙酯	$C_{14}H_{28}O_2$	228	0.22±0.10^{c}	6.45±0.76^{a}	2.56±0.92^{b}	7.44±1.09^{a}	–
33	40.71	癸酸异戊酯	$C_{15}H_{30}O_2$	242	0.75±0.09^{a}	0.71±0.15^{a}	0.4±0.04^{b}	0.75±0.2^{a}	–
34	40.81	2-甲基丁基癸酸酯	$C_{15}H_{30}O_2$	242	0.06±0.02^{b}	0.24±0.05^{b}	0.95±0.37^{a}	0.21±0.09^{b}	–
35	43.06	十四酸甲酯	$C_{15}H_{30}O_2$	242	0.44±0.08^{a}	0.08±0.03^{b}	0.12±0.05^{b}	0.14±0.06^{b}	–
36	44.86	肉豆蔻酸乙酯	$C_{16}H_{32}O_2$	256	2.02±0.13^{a}	0.93±0.24^{c}	1.77±0.13^{ab}	1.43±0.29^{b}	–
37	46.62	月桂酸异戊酯	$C_{17}H_{34}O_2$	270	0.56±0.17^{b}	0.12±0.1^{c}	28.42±0.29^{a}	0.12±0.05^{c}	–
38	47.2	13-甲基十四酸乙酯	$C_{17}H_{34}O_2$	270	0.20±0.10^{a}	0.05±0.01^{b}	0.16±0.02^{ab}	0.15±0.04^{ab}	–
39	47.42	棕榈油酸甲酯	$C_{17}H_{32}O_2$	268	10.91±1.43^{a}	0.2±0.08^{b}	0.04±0.02^{b}	0.26±0.04^{b}	–
40	47.89	棕榈酸甲酯	$C_{17}H_{34}O_2$	270	0.51±0.27^{b}	0.46±0.15^{b}	0.78±0.10^{b}	0.83±0.28^{b}	21.16±9.09^{a}
41	48.89	9-十六碳烯酸乙酯	$C_{18}H_{34}O_2$	282	0.91±0.22^{bc}	2.76±1.71^{ab}	0.35±0.06^{b}	4.3±0.92^{a}	–
42	49.33	棕榈酸乙酯	$C_{18}H_{36}O_2$	284	0.15±0.09^{b}	2.98±0.67^{b}	0.19±0.08^{b}	9.85±3.45^{a}	–
43	52.24	亚油酸乙酯	$C_{20}H_{36}O_2$	308	1.91±0.28^{a}	0.79±0.65^{bc}	0.28±0.02^{c}	1.46±0.27^{ab}	–
44	52.32	油酸乙酯	$C_{20}H_{38}O_2$	310	0.75±0.25^{b}	1.13±0.81^{b}	0.55±0.06^{b}	2.01±0.26^{a}	–
45	52.68	十八酸乙酯	$C_{20}H_{40}O_2$	312	1.70±0.70^{a}	–	0.14±0.13^{b}	0.22±0.16^{b}	–
		酯类含量(总计)			53.30±8.13^{b}	168.45±25.78^{a}	156.37±11.37^{a}	143.07±20.97^{a}	29.54±10.97^{b}
1	5.23	己烷	$C_6H_{12}O$	100	4.94±0.86^{a}	0.11±0.02^{b}	–	–	0.12±0.05^{b}
2	5.82	庚烷	C_9H_{20}	128	39.6±6.41^{a}	0.11±0.04^{b}	37.59±4.2^{a}	–	0.26±0.15^{b}
3	7.23	4-甲基辛烷	C_9H_{20}	128	–	–	–	–	0.54±0.08
4	17.66	十一烷	$C_{11}H_{24}$	156	0.19±0.04^{b}	1±0.19^{b}	4.17±0.99^{a}	1.09±0.06^{b}	–
5	31.26	十四烷	$C_{14}H_{30}$	198	0.21±0.02^{b}	0.13±0.01^{b}	23.7±0.73^{a}	0.13±0.07^{b}	0.16±0.02^{b}
6	35.35	十五烷	$C_{15}H_{32}$	212	129.78±26.46^{a}	0.38±0.05^{b}	1.14±0.06^{b}	0.33±0.08^{b}	10.07±3.34^{b}

续表 2

序号	保留时间（min）	化合物名称	分子式	分子量（g/mol）	相对含量(mg/L)				
					LRL	LRT	LPZ	LAS	UF
7	42.33	庚十二烷	$C_{17}H_{36}$	240	28.42±2.17^{a}	0.11±0.02^{c}	0.37±0.04^{c}	0.13±0.09^{c}	3.16±1.36^{b}
		烷烃类含量(总计)			203.23±34.58^{a}	1.79±0.11^{c}	66.97±5.8^{b}	1.67±0.16^{c}	14.30±3.32^{c}
1	1.64	乙醇	C_2H_6O	46	11.98±4.94^{b}	32.38±1.26^{a}	12.3±4.03^{b}	34.03±1.35^{a}	1.55±0.69^{c}
2	2.35	异丁醇	$C_4H_{10}O$	74	4.11±1.05^{b}	2.95±0.42^{b}	10.77±2.71^{a}	2.01±0.56^{b}	–
3	3.74	异戊醇	$C_5H_{12}O$	88	–	–	–	–	5.34±1.79
4	3.8	异戊醇	$C_5H_{12}O$	88	6.51±1.8^{b}	8.63±0.81^{a}	0.17±0.08^{c}	6.9±0.63^{ab}	0.34±0.18^{c}
5	3.85	2-甲基丁烷-1-醇	$C_5H_{12}O$	88	0.78±0.26^{b}	2.22±0.15^{a}	0.06±0.02^{d}	1.92±0.07^{a}	0.42±0.21^{c}
6	6.99	叶醇	$C_6H_{12}O$	100	–	–	–	–	5.43±1.58
7	7.5	1-己醇	$C_6H_{14}O$	102	0.93±0.34^{a}	0.06±0.02^{b}	0.25±0.07^{b}	0.05±0.02^{b}	0.13±0.01^{b}
8	11.67	1-庚醇	C_7H_16O	116	–	–	–	–	0.26±0.15
9	14.37	2-乙基己醇	$C_8H_{18}O$	130	1.15±0.55^{a}	0.18±0.13^{b}	0.23±0.05^{b}	0.16±0.04^{b}	–
10	14.57	苯甲醇	C_7H_8O	108	0.74±0.06^{b}	0.18±0.06^{c}	1.26±0.36^{a}	0.18±0.004^{c}	–
11	16.34	辛醇	$C_8H_{18}O$	130	0.22±0.04^{b}	0.22±0.17^{b}	0.32±0.12^{b}	0.23±0.12^{b}	1.19±0.33^{a}
12	17.66	芳樟醇	$C_{10}H_{18}O$	154	–	–	–	–	4.71±1.37
13	18.42	苯乙醇	$C_8H_{10}O$	122	0.16±0.12^{b}	104.32±6.6^{a}	0.21±0.07^{b}	110.3±11.49^{a}	0.4±0.14^{b}
14	21.92	*α*-松油醇	$C_{10}H_{18}O$	154	5.31±1.45^{a}	0.46±0.10^{b}	4.36±0.94^{a}	0.31±0.14^{b}	5.34±1.79^{a}
		醇类含量(总计)			31.89±7.01^{b}	151.60±6.66^{a}	29.96±8.23^{b}	156.09±13.76^{a}	25.00±8.13^{b}
1	2.43	醋酸	$C_2H_4O_2$	60	0.11±0.03^{c}	1.99±0.29^{b}	0.11±0.04^{c}	1.71±0.55^{b}	3.28±0.51^{a}
2	12.41	己酸	$C_6H_{12}O_2$	116	0.34±0.05^{bc}	0.93±0.39^{a}	0.16±0.05^{c}	0.59±0.14^{ab}	–
3	21.64	辛酸	$C_8H_{16}O_2$	144	0.07±0.03^{b}	1.05±0.06^{a}	1.09±0.08^{a}	1.09±0.08^{a}	–
4	25.92	壬酸	$C_9H_{18}O_2$	158	0.13±0.02^{b}	0.69±0.37^{b}	51.84±11.3^{a}	–	–
5	30.09	癸酸	$C_{10}H_{20}O_2$	172	0.33±0.07^{b}	0.49±0.21^{ab}	0.64±0.1^{a}	0.44±0.07^{ab}	–
		酸类含量(总计)			1.00±0.13^{b}	5.14±0.05^{b}	53.83±11.55^{a}	3.83±0.67^{b}	3.28±0.51^{b}
1	3.01	2-戊酮	$C_5H_{10}O$	86	–	–	–	–	0.06±0.01
2	8.29	2-庚酮	$C_7H_{14}O$	114	–	–	–	–	10.88±2.19
3	10.24	4-甲基-2-庚酮	$C_8H_{16}O$	128	–	–	–	–	0.46±0.11
4	12.3	2-甲基硫兰-3-酮	C_5H_8OS	116	0.1±0.02^{b}	0.29±0.06^{b}	2.78±0.25^{a}	0.3±0.05^{b}	–
5	12.4	6-甲基-5-庚烯-2-酮	$C_8H_{14}O$	126	0.67±0.8^{a}	0.64±0.16^{a}	–	0.69±0.03^{a}	0.91±0.79^{a}
6	12.55	2-辛酮	$C_8H_{16}O$	128	–	–	–	–	1.96±0.62
7	12.69	2H-吡喃-2,6(3H)-二酮	$C_5H_4O_3$	112	0.38±0.07^{b}	0.89±0.47^{b}	4.33±1.29^{a}	1.44±0.79^{b}	–
8	17.32	2-壬酮	$C_9H_{18}O$	142	–	–	–	–	1.08±0.28
9	26.66	2-十一酮	$C_{11}H_{22}O$	170	–	–	–	–	0.29±0.03
10	33.44	香叶基丙酮	$C_{13}H_{22}O$	194	0.43±0.04^{a}	2.3±0.33^{a}	0.19±0.07^{b}	0.24±0.04^{b}	0.16±0.02^{b}
		酮类含量(总计)			1.58±0.9^{b}	4.13±0.69^{b}	7.3±1.12^{ab}	2.68±0.79^{b}	12.17±7.86^{a}
1	8.19	肉桂烯	C_8H_8	104	0.72±0.01^{b}	1.37±0.1^{a}	0.06±0.04^{c}	1.39±0.12^{a}	0.21±0.09^{c}
2	14.2	D-柠檬烯	$C_{10}H_{16}$	136	15.3±3.08^{b}	0.13±0.02^{c}	37.59±4.2^{a}	0.14±0.02^{c}	1.96±0.6^{c}
3	15.22	(Z)-*β*-罗勒烯	$C_{10}H_{16}$	136	–	–	–	–	0.12±0.05
4	35.7	*α*-法呢烯	$C_{15}H_{24}$	204	0.09±0.04^{b}	0.11±0.03^{b}	15.87±2.48^{a}	0.09±0.03^{b}	0.24±0.1^{b}
		烯烃类含量(总计)			16.11±3.07^{b}	1.57±0.11^{c}	53.51±6.69^{a}	1.62±0.14^{a}	2.53±0.83^{c}
1	2.72	2-甲基丁醛	$C_5H_{10}O$	86	–	–	–	–	0.16±0.02
2	6.89	2-己烯醛	$C_6H_{10}O$	98	–	–	–	–	0.44±0.03
3	8.61	庚醛	$C_7H_{14}O$	114	0.25±0.02^{a}	0.19±0.09^{a}	–	–	–
4	10.96	2-庚烯醛	$C_7H_{12}O$	112	8.36±2.48^{a}	0.69±0.05^{b}	–	0.17±0.06^{b}	–
5	11.08	苯甲醛	C_7H_6O	106	4.30±0.95^{a}	1.26±0.28^{b}	1.26±0.28^{b}	0.8±0.25^{b}	0.79±0.14^{b}
6	14.94	苯乙醛	C_8H_8O	120	0.81±0.35^{a}	0.24±0.08^{b}	0.21±0.02^{b}	0.26±0.07^{b}	0.06±0.01^{b}
7	15.65	2-辛烯醛	$C_8H_{14}O$	126	54.96±6.86^{a}	1.16±0.04^{b}	–	0.44±0.14^{b}	–
8	17.88	壬醛	$C_9H_{18}O$	142	1.58±1.08^{b}	10.27±3.15^{a}	0.07±0.02^{b}	0.51±0.11^{b}	0.9±0.4^{b}
9	22.66	癸醛	$C_{10}H_{20}O$	156	6.35±0.37^{a}	0.25±0.15^{c}	3.58±0.04^{b}	0.15±0.05^{c}	–
10	22.98	3,4-二甲基苯甲醛	$C_9H_{10}O$	134	58.04±5.96^{a}	0.51±0.06^{c}	9.75±2.05^{b}	0.54±0.14^{c}	–
11	25.59	4-丙基苯甲醛	$C_{10}H_{12}O$	148	–	–	–	–	0.09±0.02
		醛类含量(总计)			134.65±14.61^{a}	11.15±6.2^{b}	14.86±2.3^{b}	2.87±0.55^{b}	2.41±0.52^{b}
1	27.49	2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	$C_9H_{10}O_2$	150	0.19±0.03^{a}	0.25±0.01^{a}	0.22±0.07^{a}	0.22±0.04^{a}	–
2	35.86	2,4-二叔丁基苯酚	$C_{14}H_{22}O$	206	0.59±0.03^{c}	1.88±0.11^{a}	1.42±0.16^{b}	1.79±0.31^{a}	0.40±0.07^{c}

续表 2

序号	保留时间（min）	化合物名称	分子式	分子量（g/mol）	相对含量（mg/L）				
					LRL	LRT	LPZ	LAS	UF
		酚类含量（总计）			0.78±0.05^{c}	2.13±0.11^{a}	1.64±0.19^{b}	2.01±0.34^{ab}	0.4±0.07^{d}
1	4.39	甲苯	C_7H_8	92	0.12±0.01^{b}	0.17±0.02^{b}	0.18±0.03^{b}	0.13±0.06^{b}	0.76±0.44^{a}
2	7.4	对二甲苯	C_8H_{10}	106	0.17±0.05^{c}	0.07±0.01^{c}	2.89±0.11^{a}	0.08±0.02^{c}	0.46±0.11^{b}
3	8.71	乙基糠基醚	$C_7H_{10}O_2$	126	0.08±0.05^{c}	0.14±0.03^{bc}	0.85±0.05^{a}	0.21±0.01^{b}	–
4	9.1	2-乙酰呋喃	$C_6H_6O_2$	110	3.57±1.73^{a}	0.07±0.03^{b}	0.05±0.01^{b}	0.05±0.01^{b}	–
5	24.83	1,3-二叔丁苯	$C_{14}H_{22}$	190	0.14±0.03^{b}	6.16±0.16^{a}	0.15±0.04^{b}	6.96±2.15^{a}	–
6	29.12	1,2-二氢-1,5,8-三甲基萘	$C_{13}H_{16}$	172	1.02±0.13^{a}	0.22±0.04^{b}	0.19±0.02^{b}	0.26±0.06^{b}	–
7	29.89	1,2-二甲氧基-4-乙烯基苯	$C_{10}H_{12}O_2$	164	0.17±0.01^{a}	0.09±0.05^{b}	0.06±0.002^{b}	0.07±0.02^{b}	–
		其他类含量（总计）			5.27±1.58^{bc}	6.91±0.26^{ab}	4.37±0.15^{c}	7.76±2.2^{a}	1.22±0.54^{d}

注：“–”表示未检出。

外，LRT、LPZ 和 LAS 发酵体系中醛类的相对含量较低，与 LRL 发酵体系相比具有显著性差异（$P<0.05$）。大多数醛类物质在低浓度时往往呈现清香、果香或脂肪香等令人愉悦的香气，但其易被氧化还原为酸类和醇类物质，且过量积累易产生土腥味、金属味等一些令人不愉快的气味[13,41]。因此，通过筛选适宜的酵母菌与乳酸杆菌构建复合发酵体系，可有效调控发酵体系中醛类物质的水平，提高挥发性酯类和醇类等挥发性成分的种类和含量，有助于构建以果香和花香为核心特征的野木瓜酵素香气体系。

2.6.3　挥发性成分 OAV 分析　OAV 是挥发性组分的浓度与感官阈值的比值，通常当 OAV≥1 时，表明该物质对整体风味具有贡献，定为关键化合物，且 OAV 值越大，贡献越大。0.1≤OAV<1，说明该物质对总体风味有修饰作用，定为修饰性风味化合物。OAV<0.1，说明该物质对总体风味无显著影响，定为潜在风味化合物[42]。如表 3 所示，未发酵的野木瓜（UF）和发酵的野木瓜酵素（LRL、LRT、LPZ、LAS）中关键挥发性物质共有 41 种，其中 LRL、LRT、LPZ、LAS 和 UF 的关键风味化合物分别为 26、30、20、28 和 19 种。LRL 发酵体系中的关键风味物质，以丁酸乙酯、异丁酸乙酯、2-甲基丁酸乙酯、辛酸乙酯和壬醛为主，赋予该体系突出的果香（青苹果、菠萝）、酒香（朗姆酒）及甜橙油脂香气。LRT 发酵体系中的关键风味物质以癸酸乙酯和苯乙醇为主，贡献了浓郁的椰子香和玫瑰花香，辅以异丁酸乙酯和壬醛的朗姆酒、甜橙风味，使发酵体系的香气更复杂、甜美。LPZ 发酵体系中的关键风味物质以丁酸乙酯和异丁酸乙酯为主，为发酵体系带来了果香（菠萝、香蕉）。LAS 发酵体系中的关键风味物质以辛酸乙酯为主，赋予了发酵体系蜡质果香，并辅以苯乙醇的花香。而 UF 发酵体系中的关键风味物质以芳樟醇的柑橘玫瑰香、叶醇的青草香及辛醇的油脂柑橘味为主导，该体系中以植物本源香气为主。

2.6.4　挥发性成分 PCA 分析　采用 Origin 2021 对 LRL、LRT、LPZ、LAS 和 UF 进行主成分分析（PCA），结果如图 9 所示，PCA-2D 图能充分反映未发酵的野木瓜及 4 种复合菌种发酵的野木瓜酵素的总体特征。在 PCA 分析图中，样品之间距离近代表差异小，距离远代表差异明显[41,44]。从样本的聚集、

表 3　不同菌种发酵野木瓜酵素的 OAV 分析

Table 3　OAV analysis of *Stauntonia chinensis* ferment fermented by different strains of bacteria

序号	化合物名称	香气特征	阈值（mg/kg）	OAV				
				LRL	LRT	LPZ	LAS	UF
1	丙酸乙酯	甜味、酒味	0.0040	40.00	62.50	–	17.50	–
2	异丁酸乙酯	朗姆酒	0.0001	16700.00	900.00	40100.00	900.00	–
3	异丁酸异戊酯	果味	1.3000	0.11	0.12	7.94	0.10	–
4	2-甲基丁酸乙酯	甜美的青苹果果味	0.0040	395.00	40.00	22.50	35.00	72.50
5	己酸甲酯	果香味、培根味	0.0500	6.00	4.40	5.40	4.00	–
6	苯乙酸乙酯	甜美花香味	0.1000	1.60	2.70	4.30	3.10	–
7	丁酸乙酯	新鲜果香	0.0001	10600.00	3500.00	100800.00	2100.00	4400.00
8	2-糠酸乙酯	果香、花香	1.0000	0.72	0.32	0.39	0.23	–
9	水杨酸甲酯	冬绿薄荷味	0.0600	47.00	9.00	1277.83	7.33	–
10	十一酸乙酯	法国白兰地、椰子味	1.0000	0.17	0.65	7.04	0.39	–
11	乙酸苯乙酯	花香，甜甜的蜂蜜果味	0.0200	52.00	161.50	44.50	116.00	–
12	癸酸甲酯	酒香、果香、花香气味	1.0000	2.20	4.29	0.38	3.46	–
13	辛酸甲酯	甜味，醛类气味	0.5000	1.56	12.22	1.86	10.56	–
14	乙酸乙酯	葡萄味、甜味	7.5000	1.36	2.68	0.12	1.45	0.02

续表 3

序号	化合物名称	香气特征	阈值(mg/kg)	OAV				
				LRL	LRT	LPZ	LAS	UF
15	壬酸乙酯	果香、酒香	1.2000	0.22	2.23	0.23	3.23	–
16	乙酸异戊酯	香蕉味	0.9000	2.11	9.59	0.19	7.67	0.28
17	月桂酸乙酯	甜糯花香	0.3300	0.67	19.55	7.76	22.55	–
18	棕榈酸乙酯	果味、奶油味	1.5000	0.1	1.99	0.13	6.57	–
19	乙酸己酯	梨和苹果样香气	7.5000	0.04	1.39	0.02	1.45	0.49
20	癸酸乙酯	椰子香味	0.0200	53.00	2287.50	48.50	–	–
21	辛酸乙酯	蜡味、果味	0.0020	955.00	27970.00	780.00	29635.00	520.00
22	乙酸甲酯	果味、葡萄酒味	0.0500	–	–	–	–	24.20
23	辛醇	油脂气味和柑橘香味	0.0540	4.07	4.07	5.93	4.26	22.04
24	*α*-松油醇	木质花香	0.3000	17.70	1.53	14.53	1.03	17.80
25	异戊醇	苹果白兰地香气和辛辣味	0.7000	9.30	12.33	0.24	9.86	0.49
26	苯乙醇	玫瑰花香	0.0450	3.56	2318.22	4.67	2451.11	8.89
27	1-庚醇	油脂气息和辛辣香气	0.2000	–	–	–	–	1.30
28	芳樟醇	柑橘花香甜玫瑰气味	0.0015	–	–	–	–	3140.00
29	叶醇	青草香气和新茶叶气息	0.0700	–	–	–	–	77.57
30	6-甲基-5-庚烯-2-酮	柑橘味、果味	0.1000	6.70	6.40	–	6.90	9.10
31	香叶基丙酮	木兰香气	0.0100	43.00	230.00	19.00	24.00	16.00
32	2-庚酮	果味、辛辣、甜、草本木香	0.6800	–	–	–	–	16.00
33	2-辛酮	苹果香气	0.0400	–	–	–	–	49.00
34	2-壬酮	水果、花、油脂和药草似香气	0.0800	–	–	–	–	13.50
35	庚醛	醛脂肪气味	0.0035	71.43	54.29	–	–	–
36	苯乙醛	风信子香气	0.0090	90.00	26.67	23.33	28.89	6.67
37	壬醛	油脂气味和甜橙气	0.0035	451.43	2934.29	20.00	145.71	257.14
38	2-庚烯醛	绿色脂质的味道	0.0420	199.05	16.43	–	4.05	–
39	苯甲醛	杏仁气味	0.3000	14.33	4.20	4.20	2.67	5.30
40	2-辛烯醛	脂肪和肉类香气有黄瓜、鸡肉香味	0.0830	662.17	13.98	–	1.45	–
41	2-己烯醛	甜杏仁味	0.0800	–	–	–	–	5.50

注: “–”未检出; 气味阈值来自于文献[43], 香气特征由数据库Flavor Ingredient Library检索得到。

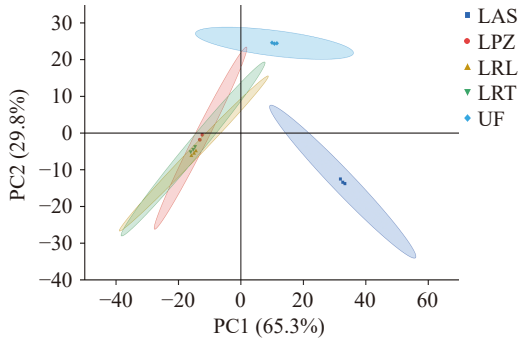


图 9 不同菌种发酵野木瓜酵素的挥发性成分 PCA 图

Fig.9 PCA plot of volatile components of *Stauntonia chinensis* ferment fermented by different strains of bacteria

离散程度来看, LRL 和 LRT、LAS 和 UF 以及 LPZ 分布在不同的平面内, 说明它们的挥发性风味物质组成有差异; 从距离来看, LRL、LRT 和 LPZ 样本间距离较近并远离 UF, 说明这三种复合菌种发酵的野木瓜酵素挥发性成分相似且与未发酵的野木瓜相差较大。从以上的分析可知, LRL、LRT 和 LPZ 的挥发性成分的数量分别为 88、87 和 82 种; 但相较于未发酵的野木瓜, LRL 发酵的野木瓜酵素中挥发性成分含量较高的是烷烃类和醛类, LRT 中含量较高的是酯类和醇类, LPZ 中含量较高的是酯类和烷烃类。

3 结论

本研究采用酵母菌与不同乳酸杆菌复合发酵野木瓜, 并对发酵过程中理化指标、功效成分含量、抗氧化活性的差异及风味物质等进行分析。结果表明, 不同菌种复合发酵对野木瓜酵素的品质均有不同的影响。发酵 15 d 后, LRT 的产酸能力及对野木瓜中可溶性固形物的利用程度相较于其他 3 种复合菌种更高, 且 LRT 发酵体系具备较高的总三萜含量、DPPH 自由基清除能力、SOD 酶活性及酯类物质含量。在挥发性风味物质组成方面, 不同复合菌种发酵的野木瓜酵素均有所不同。其中, LRT 发酵显著促进了酯类和醇类物质的积累, 其关键风味物质主要以癸酸乙酯和苯乙醇为主, 这两种风味物质分别赋予了发酵体系浓郁的椰子香和玫瑰花香特征。此外, 异丁酸乙酯和壬醛的协同作用进一步贡献了朗姆酒和甜橙的风味, 使 LRT 发酵体系呈现的香气更为复杂、甜美。因此, 相较于其他 3 种复合发酵方式, 采用 LRT 发酵更有利于野木瓜酵素酯类和醇类物质的富集。综上, LRT 是适宜用于制备野木瓜酵素的菌

种。本研究为野木瓜资源的高效利用及果蔬发酵产品的品质调控提供了参考。但目前研究尚存不足，在未来的研究中可聚焦于酵母菌与乳酸杆菌复合发酵的代谢互作机制，以及对野木瓜酵素的益生功能特性与贮藏期品质变化规律进行系统研究，以推动功能性酵素产品的标准化开发。

© 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］吴国卿, 王文平, 陈燕. 野木瓜的资源状况与食用加工研究综述[J]. 贵州农业科学, 2010, 38(2): 163−165. ［WU G Q, WANG W P, CHEN Y. Resource status and active composition of *Chaenomeles cathayensis* and its processing technology[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2010, 38(2): 163−165.］

［2］贺莉芳, 殷瑜霞, 郑明辉, 等. 野木瓜提取物对家蝇生长发育的影响[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(2): 64−66. ［HE L F, YIN Y X, ZHENG M H, et al. Effects of extracts from *Stauntonia chinensis* on the growth and development of musca domestica[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2018, 57(2): 64−66.］

［3］陈瑛, 李锦, 吴英良. 野木瓜化学成分及其药理和临床研究进展[J]. 沈阳药科大学学报, 2008, 25(11): 924−928. ［CHEN Y, LI J, WU Y L. Research overview of the chemical components and the pharmacoclinic of *Stauntonia chinensis*[J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, 2008, 25(11): 924−928.］

［4］韦广鑫, 龙立利, 杨笑天, 等. 野木瓜果酒发酵工艺优化研究[J]. 酿酒科技, 2015(5): 83−85,93. ［WEI G X, LONG L L, YANG X T, et al. The optimization of fermenting technology of *Stauntonia chinensis* DC wine[J]. Liquor-Making Science& Technology, 2015(5): 83−85,93.］

［5］吴国卿, 王文平, 甘红旗, 等. 野木瓜果醋的澄清研究[J]. 中国酿造, 2011(4): 72−74. ［WU G Q, WANG W P, GAN H Q, et al. Clarification of *Chaenomeles cathayensis* vinegar[J]. China Brewing, 2011(4): 72−74.］

［6］潘红梅, 游敬刚, 柏红梅, 等. 野木瓜饮料的工艺研究[J]. 食品与发酵科技, 2011, 47(6): 92−95. ［PAN H M, YOU J G, BO H M, et al. Technology research of wild *Stauntonia chinensis* beverage[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2011, 47(6): 92−95.］

［7］田亮, 王文平, 吴国卿, 等. 发酵型野木瓜果酒加工工艺研究[J]. 中国酿造, 2010(11): 177−179. ［TIAN L, WANG W P, WU G Q, et al. Processing technology of *Chaenomeles cathayensis* wine[J]. China Brewing, 2010(11): 177−179.］

［8］赵芳芳, 莫雅雯, 蒋增良, 等. 功能性微生物酵素产品的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(7): 283−287. ［ZHAO F F, MO Y W, JIANG Z L, et al. Research progress of functional microbial enzyme products[J]. Food and Fermentation Industry, 2016, 42(7): 283−287.］

［9］高庆超, 常应九, 马蓉, 等. 微生物酵素的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(2): 190−195. ［GAO Q C, CHANG Y J, MA R, et al. Research progress on microbial ferment[J]. Food Research and Development, 2020, 41(2): 190−195.］

［10］梁红敏, 刘洁, 史红梅. 食用植物酵素研究进展[J]. 食品工业, 2020, 41(7): 193−197. ［LIANG H M, LIU J, SHI H M. Research progress of edible plant source jiaosu[J]. The Food Industry, 2020, 41(7): 193−197.］

［11］朱丹实, 吴逗逗, 沈雨思, 等. 多菌种混合发酵果蔬汁的研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(10): 343−352. ［ZHU D S, WUI D D, SHEN Y S, et al. Research progress of mixed fermentation of fruit and vegetable juices with multiple strains of bacteria[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(10): 343−352.］

［12］覃引, 熊音如, 卢丽, 等. 不同发酵方式制备树莓-石榴复合果汁酵素的抗氧化活性研究[J]. 中国酿造, 2019, 38(10): 105−109. ［QIN Y, XIONG Y R, LU L, et al. Study on antioxidant activity of Raspberry-pomegranate composite juice enzyme prepared by different fermentation methods[J]. China Brewing, 2019, 38(10): 105−109.］

［13］赵宇, 杜庆萍, 杨瑞, 等. 西梅酵素发酵过程中理化指标、抗氧化能力及挥发性物质的变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 335-343. ［ZHAO Y, DU Q P, YANG R, et al. Physicochemical properties and antioxidant capacity and volatile compound changes during the fermentation of Chinese prune jiaosu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 335-343.］

［14］张江宁, 叶峥, 杨春. 在红枣汁中乳酸菌、酵母菌单一及偶联发酵特征物质差异分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(5): 64−72. ［ZHANG J N, YE Z, YANG C. Differential analysis of characteristic substances of single and coupled fermentation of lactic acid bacteria and yeast in Red Date juice[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(5): 64−72.］

［15］MANDHA J, SHUMOY H, DEVAERE J, et al. Effect of lactic acid fermentation on volatile compounds and sensory characteristics of Mango (*Mangifera indica*) juices[J]. Foods, 2022, 11(3): 383.

［16］MA R F, SUI L, ZHANG J S, et al. Polyphasic characterization of yeasts and lactic acid bacteria metabolic contribution in semi-solid fermentation of chinese baijiu (traditional fermented alcoholic drink): towards the design of a tailored starter culture[J]. Microorganisms, 2019, 7(5): 147.

［17］ADESULU D A T, DAHUNSI S O, OLAYANJU A. Synergistic microbial interactions between lactic acid bacteria and yeasts during production of *Nigerian indigenou*s fermented foods and beverages[J]. Food Control, 2020, 110: 106963.

［18］PENG W Y, MENG D Q, YUE T L, et al. Effect of the apple cultivar on cloudy apple juice fermented by a mixture of *Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus plantarum*, and *Lactobacillus fermentum*[J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127922.

［19］犹然, 贾晓珂, 郑萌萌, 等. 乳酸菌酵母菌混合发酵果蔬汁对产品风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(19): 403−411. ［YOU R, JIA X K, ZHENG M M, et al. Influence of mixed fermentation with lactic acid bacteria and yeasts on flavor of fruit and vegetable juice[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(19): 403−411.］

［20］王瑜, 李立郎, 柏啟雪, 等. 基于模糊数学与响应面法优化野木瓜酵素发酵工艺[J]. 酿酒科技, 2019(4): 22−29, 35. ［WANG Y, LI L L, BAI Q X, et al. Optimization of the fermentation of Wild Papaya enzyme based on fuzzy mathematics and response surface method[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2019 (4): 22−29, 35.］

［21］AINSWOETH E A, GILLESPIE K M. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using folin–ciocalteu reagent[J]. Nature Protocols, 2007, 2(4): 875−877.

［22］祝朋玲, 张静, 李思雨, 等. 大孔树脂纯化灵芝子实体和孢子

粉中总三萜[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(4): 79−85. [ZHU P L, ZHANG J, LI S Y, et al. Purification of total triterpenoids from fruiting body and spore powder of *Ganoderma lucidum* by macroporous adsorption resins[J]. Food Research and Development, 2023, 44(4): 79−85.]

[23] MCCORD J, NEWTON S, STRYNAR M. Validation of quantitative measurements and semi-quantitative estimates of emerging perfluoroethercarboxylic acids (PFECAs) and hexfluoroprolyene oxideacids (HFPOAs)[J]. Journal of Chromatography. A, 2018, 1551: 52−58.

[24] RUIZ H V, ROCA M J, EGEA C M, et al. A comparison of semi-quantitative methods suitable for establishing volatile profiles[J]. Plant Methods, 2018, 14: 67.

[25] KWAW E, MA Y K, TCHABO W, et al. Effect of Lactobacillus strains on phenolic profile, color attributes and antioxidant activities of lactic-acid-fermented Mulberry juice[J]. Food Chemistry, 2018, 250: 148−154.

[26] LI B B, YUAN D D, SONG S G, et al. Effects of *Lactobacillus acidophilus* GIM1.208 on antioxidant and hypoglycemic activities, flavor and glycosides of *Rosa roxburghii* Tratt[J]. Food Bioscience, 2023, 55: 102948.

[27] 江慧斌, 聂攀, 吕玮, 等. 藜麦与黑大麦复合谷物发酵富集多酚和黄酮工艺优化及其生物有效性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 150−160. [JIANG H B, NIE P, LÜ W, et al. Study on the processing optimization for the enrichment of polyphenols and flavonoids in co-fermentation of Quinoa and Black Barley and its bioavailability[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 150−160.]

[28] 丁玉峰, 马艳莉, 李素萍, 等. 不同乳酸菌对葡萄酵素发酵特性及代谢产物的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(17): 120−128. [DING Y F, MA Y L, LI S P, et al. Effects of different lactic acid bacteria on fermentation characteristics and metabolites of grape jiaosu[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(17): 120−128.]

[29] 王印壮, 丁玉峰, 段定定, 等. 葡萄酵素发酵过程中的酵母菌筛选及品质变化分析[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(10): 70−77. [WANG Y Z, DING Y F, DUAN D D, et al. Screening of yeast and analysis of quality changes during grape jiaosu fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(10): 70−77.]

[30] YANG X, LI L L, YAN Y F, et al. Investigation of the pharmacodynamic components of *Gastrodia elata* Blume for treatment of type 2 diabetes mellitus through hplc, bioactivity, network pharmacology and molecular docking[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(19): 10498.

[31] 张文刚, 张杰, 党斌, 等. 藜麦黄酒发酵工艺优化及抗氧化特性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(12): 174−178,226. [ZHANG W G, ZHANG J, DANG B, et al. Optimization on fermentation conditions and the antioxidant characteristics of Chinese Quinoa rice wine[J]. Food & Machinery, 2019, 35(12): 174−178,226.]

[32] 付龙威, 汤晓娟, 林祥娜, 等. 枇杷酵素自然发酵过程中有机酸及其抗氧化活性的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(4): 42−47,54. [FU L W, TANG X J, LIN X N, et al. Studies on the organic acid and antioxidant activity of Loquat enzyme during spontaneous fermentation process[J]. Food Research and Development, 2021, 42(4): 42−47,54.]

[33] MARKKINEN N, LAAKSONEN O, NAHKU R, et al. Impact of lactic acid fermentation on acids, sugars, and phenolic compounds in black chokeberry and sea buckthorn juices[J]. Food Chemistry, 2019, 286: 204−215.

[34] WANG J, WEI B C, XU J, et al. Influence of lactic acid fermentation on the phenolic profile, antioxidant activities, and volatile compounds of black chokeberry (*Aronia melanocarpa*) juice[J]. Journal of Food Science, 2024, 89(2): 834−850.

[35] 王思溥, 朱丹, 牛广财, 等. 黑果腺肋花楸酵素自然发酵过程中主要成分与抗氧化活性变化[J]. 食品工业科技, 2023, 44(15): 93−100. [WANG S P, ZHU D, NIU G C, et al. Changes of main components and antioxidant activity of black chokeberry jiaosu in natural fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(15): 93−100.]

[36] 宋吉玲, 王伟科, 闫静, 等. 药用真菌桑黄抗氧化物质及其活性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 144−154. [SONG J L, WANG W K, YAN J, et al. Antioxidant substances and activity of medicinal fungus Sanghuangporus[J]. Journal of Northwest A& F University(Natural Science Edition), 2022, 50(3): 144−154.]

[37] 严敏, 李崎, 董建军, 等. 利用电子自旋共振(ESR)研究啤酒酿造过程中的自由基[J]. 食品科学, 2007(2): 64−66. [YAN M, LI Q, DONG J J, et al. Study on free radicals emerging during beer brewing by ESR method[J]. Food Science, 2007(2): 64−66.]

[38] FENG T, WANG J. Oxidative stress tolerance and antioxidant capacity of lactic acid bacteria as probiotic: A systematic review[J]. Gut Microbes, 2020, 12(1): 1801944.

[39] DONGMO S N, PROCOPIO S, SACHER B, et al. Flavor of lactic acid fermented Malt based beverages: current status and perspectives[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 54: 37−51.

[40] 奚星林, 曾广丰, 谢建军, 等. SPME-GC-MS 结合 ROAV 法分析苦瓜粉中挥发性特征风味物质[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(2): 153−160. [XI X L, ZENG G F, XIE J J, et al. Analysis of volatile characteristic compounds in bitter melon powder by spme-gc-ms combined with roav method[J]. China Food Additives, 2022, 33(2): 153−160.]

[41] 梁子钧, 俞滢, 张磊, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 分析茶树新品系‘白云 0492’白茶香气特征成分[J]. 食品科学, 2023, 44(22): 313−321. [LIANG Z J, YU Y, ZHANG L, et al. Headspace solid phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry analysis of aroma characteristics of white tea from new strain ‘Baiyun 0492’[J]. Food Science, 2023, 44(22): 313−321.]

[42] 李钰芳, 施娅楠, 李祥, 等. 传统工艺下发酵时间对大河乌猪火腿挥发性风味物质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 160−167. [LI Y F, SHI Y N, LI X, et al. Effect of fermentation time on volatile flavor compounds of Dahe Black Pig Ham during traditional processing[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(6): 160−167.]

[43] 里奥·范·海默特著, 刘强, 等译. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社有限责任公司, 2015. [VAN HEMMERT L, LIU Q, et al. Compilation of compound aroma threshold[M]. Beijing: Science Press Co., Ltd., 2015.]

[44] ZHAO F, CHEN M J, JIN S, et al. Macro-composition quantification combined with metabolomics analysis uncovered key dynamic chemical changes of aging white tea[J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130593.