

袁英豪, 林长彬, 夏陈, 等. 复合微生物发酵天麻液的品质特性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 278–289. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040279

YUAN Yinghao, LIN Changbin, XIA Chen, et al. Quality Characteristics Analysis of *Gastrodia elata* Fermentation Broth by Microbial Co-fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 278–289. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040279

· 分析检测 ·

复合微生物发酵天麻液的品质特性分析

袁英豪¹, 林长彬¹, 夏陈¹, 付亮², 徐德², 朱永清¹, 刘刚³, 张文会⁴, 余鳧游^{1,*}

(1.四川省农业科学院农产品加工研究所(四川省农业科学院食品与营养健康研究所),

四川成都 610066;

2.达州市农业科学研究院, 四川达州 635000;

3.四川师范大学, 四川成都 610066;

4.西藏自治区农牧科学院农产品开发与食品科学研究所, 西藏拉萨 850000)

摘要:旨在探究复合微生物发酵对天麻品质(发酵液)的影响,为天麻产业深加工奠定理论基础。利用复合微生物(乳酸菌、醋酸菌、酵母菌)对天麻进行发酵处理(FJ组),并设置未发酵对照组(CK组)和酶解处理组(MJ组)进行对比。通过测定发酵液总酸、pH等指标评估理化特性变化。采用高效液相色谱法(HPLC)分析天麻素、对羟基苯甲醇等天麻多酚组分,测定总多酚、总黄酮含量,并评价其抗氧化活性和降血糖活性。利用固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术(SPME-GC-MS)分析挥发性物质组成及特征差异代谢物。最后,通过感官品评评估发酵对天麻整体品质和风味的影响。结果表明,相较于CK组,FJ组的天麻总酸含量增加2.6倍,pH明显下降,粗多糖(247.65±16.10 mg/g)、乙醇(0.54%vol±0.02%vol)含量明显增加。酶解处理组(MJ)关键理化除多糖含量外无较大变化。HPLC分析表明,微生物发酵促进了天麻素、对羟基苯甲醇等活性物质的产生,显著提高了天麻总多酚(比CK组提高29.45%)、总黄酮含量(比CK组提高44.08%)以及抗氧化活性和降血糖活性(FJ>MJ>CK)。SPME-GC-MS分析显示,FJ组醇类物质、酸类物质、酯类物质明显增加,鉴定出3-戊烯-2-酮、异戊醇、苯乙醇、乙酸乙酯等为特征挥发性差异代谢物。经感官品评,微生物发酵明显改善天麻品质并赋予其醇香和甜香的气味。研究结果有助于进一步开发新型功能性食品,为天麻产业深加工提供更多理论依据和技术支撑。

关键词:天麻,复合微生物,活性成分,抗氧化,挥发性物质

中图分类号:TS201.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2026)09-0278-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040279

本文网刊:



Quality Characteristics Analysis of *Gastrodia elata* Fermentation Broth by Microbial Co-fermentation

YUAN Yinghao¹, LIN Changbin¹, XIA Chen¹, FU Liang², XU De², ZHU Yongqing¹, LIU Gang³, ZHANG Wenhui⁴, YU Manyou^{1,*}

(1.Institute of Agro-Products Processing Science and Technology (Institute of Food Nutrition and Health),

Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China;

2.Dazhou Academy of Agricultural Sciences, Dazhou 635000, China;

3.Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China;

4.Institute of Agricultural Product Development and Food Science, Academy of Agricultural and Animal Husbandry, Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

Abstract: To investigate the impact of compound microbial fermentation on *Gastrodia elata* quality (fermented liquid),

收稿日期: 2025-04-22

基金项目: 西藏科技厅重点研发项目(XZ202401ZY0002);四川省农业科学院“1+9揭榜挂帅”项目(1+9KJGG007);四川道地中药材创新团队项目(SCCXTD2025-19)。

作者简介: 袁英豪(1997-),男,硕士,研究实习员,研究方向:功能食品/微生物发酵,E-mail:y13253360907@163.com。

*通信作者: 余鳧游(1988-),女,博士,助理研究员,研究方向:功能食品,E-mail:392322388@qq.com。

providing a theoretical foundation for its industrial deep processing. *Gastrodia elata* was fermented using a compound microbial consortium (*Lactobacillus plantarum*, *Acetobacter pasteurianus*, and *Wickerhamomyces anomalus*, FJ group), with unfermented (CK) and enzymatically hydrolyzed (MJ) groups as controls. Physicochemical properties (total acidity, pH, etc.) were assessed. HPLC analyzed gastrodin, p-hydroxybenzyl alcohol, determined total phenols, and total flavonoids, evaluated their antioxidant and hypoglycemic activities. Volatile compounds and differential metabolites were identified using SPME-GC-MS. Sensory evaluation assessed overall quality and flavor. The results showed that compared to CK, FJ significantly increased total acidity (2.6-fold), decreased pH, and elevated the content of crude polysaccharides (247.65±16.10 mg/g) and ethanol (0.54%vol±0.02%vol). MJ showed minimal physicochemical changes except in polysaccharides. HPLC revealed that microbial fermentation enhanced the production of bioactive compounds (gastrodin, p-hydroxybenzyl alcohol), significantly increased total phenols (promoted 29.45% vs. CK), total flavonoids (promoted 44.08% vs. CK), antioxidant activity, and hypoglycemic activity (FJ>MJ>CK). SPME-GC-MS identified increased alcohols, acids, and esters in FJ, with characteristic differential metabolites including 3-penten-2-one, isoamyl alcohol, phenethyl alcohol, and ethyl acetate. Sensory evaluation confirmed improved quality, imparting distinct alcoholic and sweet notes. These results provide that compound microbial fermentation effectively enhances the bioactive components, functional properties, and sensory quality of *Gastrodia elata*, offering valuable insights for developing functional foods and advancing its industrial processing.

Key words: *Gastrodia elata*; compound microorganisms; active components; antioxidant activity; volatile compounds

天麻(*Gastrodia elata*)作为兰科天麻属多年生草本植物的干燥块茎,是我国传统医学典籍中记载的珍贵药食同源物种。近年来,基于色谱分离技术,从天麻中鉴定出天麻素、对羟基苯甲醇、 β -谷甾醇等多种特征活性组分^[1-3],现代药理学研究证实,它们具有多种生物活性,如调节中枢神经系统功能、改善代谢综合征及延缓神经退行性病变等^[4-7]。因此,天麻在功能性食品开发领域具有广阔前景。然而,当前天麻加工仍以炮制工艺为主^[8],存在食用方法相对单一、产品形式有限以及固有得特殊气味不易被消费者广泛接受等瓶颈问题,这些因素严重制约了天麻资源的高值化利用及其在现代健康产业中的推广。

生物转化技术,特别是微生物发酵,为药食同源资源的高值化利用提供了新途径。在发酵过程中,微生物代谢酶系可促进底物发生复杂的生化重构,既能保留原有营养成分,又能通过次级代谢合成新的生物活性物质^[9-11]。研究表明,使用多菌种协同发酵体系(如醋酸菌-酵母菌-乳酸菌复合体系)能显著提高代谢通量^[12],其作用机制涉及糖酵解、三羧酸循环等多个代谢途径,除基础代谢物(乙酸、乙醇等)外,最终产物还富含生物活性的萜类衍生物、酚酸化合物及多种维生素^[13-14]。许多研究证明,微生物转化不仅能改善底物的异味成分^[15-16],还能合成 γ -氨基丁酸等功能因子,赋予产物调节肠道菌群、改善心血管功能及增强免疫应答等功能^[17-20]。然而,目前针对天麻的微生物发酵研究相对较少,且多集中于单一菌种或简单发酵工艺的初步探索,对于复合微生物协同发酵如何系统性地影响天麻关键活性成分(如天麻素、多糖、多酚、黄酮等)的转化规律、挥发性风味物质的形成机制以及感官品质的综合提升,尚缺乏深入系统的研究。特别是,利用乳酸菌-醋酸菌-酵母菌这一特定复合体系对天麻进行发酵,并系统评价其对特征功效成分、功能活性(抗氧化、降血糖)及感官风味的综

合改良效果,具有明确的创新性。

基于以上研究背景和创新性考量,本研究以天麻粉为原料,创新性地采用乳酸菌、醋酸菌和酵母菌组成的复合微生物体系对其进行为期 5 d 的可控发酵。研究将重点探究该复合微生物发酵技术对天麻发酵液关键理化指标(如总酸、pH、粗多糖、乙醇)、核心功效成分(天麻素、对羟基苯甲醇等)的含量与组成、功能活性(体外抗氧化、降血糖活性)以及挥发性风味物质和整体感官品质的影响。通过系统比较发酵组与对照组(未发酵)、酶解组的差异,深入解析复合微生物发酵对天麻品质的改良机制,以期开发新型高附加值天麻发酵食品或配料提供坚实的科学依据和实用的技术路径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

微生物菌种(植物乳杆菌 R5 *Lactiplantibacillus plantarum*、巴氏醋杆菌 FM1 *Acetobacter pasteurianus*、异常威克汉姆酵母 J1 *Wickerhamomyces anomalus*) 保存于四川省农业科学院农产品加工所功能食品研究中心;川红(四川红茶) 市售;天麻粉 达州市某生态农业有限公司;淀粉酶(50000 U/g)、纤维素酶(10000 U/g) 成都市科龙化学品有限公司;乙腈、甲醇 色谱纯,阿拉丁生化;2,2-联苯基-1-苦基肼基(DPPH)、2,2'-联氮基双-(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)(ABTS)、天麻素、对羟基苯甲醇、对羟基苯甲醛、柠檬酸酯 E、柠檬酸酯 B、巴利森苷 A、磷酸、福林酚、碳酸钠、亚硝酸钠、水溶性维生素 E、芦丁、没食子酸、三吡啶基三嗪等 分析纯,购于上海源叶生物科技有限公司。

SW-CJ-1D 超净工作台 苏州净化设备有限公司;LHS-250HC-I 恒温培养箱 上海一恒科学仪器有限公司;Sigma 3K15 冷冻离心机 Sigma 公司;LX-800 多功能酶标仪 美国伯腾仪器有限公司;

1290 Infinity II 高效液相色谱仪、Poroshell 120 PFP 色谱柱、7890A-5975C 气相-质谱联用仪 美国安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 复合微生物发酵天麻 糖茶水培养基: 称取 10 g 洁净红茶叶和 100 g 白砂糖, 加入 0.8 L 纯净水并煮沸 10 min, 过滤并补水至 1 L, 最后得到糖茶水。

天麻发酵培养基: 按照质量比 1:10 的料液比将天麻粉加入红糖水中(80 g/L), 加入纤维素酶(0.3 g/L)和淀粉酶(0.3 g/L), 分别于 55、80 °C 温度条件下各酶解 1 h, 酶解完成后于 121 °C 灭菌 20 min。

种子液制备: 分别将活化后醋酸菌、酵母菌、乳酸菌用无菌生理盐水调整菌体浓度为 10^7 CFU/mL, 按照 1:1:1 比例向糖茶水中加入体积分数为 5% 的菌液, 置于 28~30 °C 培养箱中培养 7 d, 得到复合微生物种子液。

接种发酵: 按照体积分数 5% 将种子液接种于天麻发酵培养基中, 置于 30 °C 培养箱静置发酵 5 d, 得到天麻发酵液(FJ)。按照相同接种比例将无菌水接种于天麻发酵培养基(MJ), 同时设置相同干物质浓度天麻溶液为对照组(CK)。

后处理(仅用于多酚类化合物及总多酚、总黄酮含量测定): 将天麻发酵液进行冷冻干燥处理(升华温度为 35 °C、预冻温度为-80 °C, 真空度 1 Pa, 隔板温度 20 °C)。称取样品(发酵天麻冻干粉、天麻粉)2 g (精确至 0.01 g), 量取 20 mL 体积分数 80% 甲醇溶液, 混匀, 超声浸提 30 min(40 °C 恒温), 过滤, 收集上清液, 重复提取 2 次, 合并上清液并定容至 50 mL, 4 °C 保存, 备用。

1.2.2 天麻发酵液理化指标测定

1.2.2.1 pH 测定 天麻发酵液 pH 由 pH 计准确测定。

1.2.2.2 总酸测定 天麻发酵液总酸测定参照 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》的酸碱滴定法。

1.2.2.3 粗多糖测定 参照文献 [21], 并作适当修改。前处理: 取适量天麻发酵液, 加入无水乙醇(使混合体系中乙醇的体积分数为 80%), 超声 45 min(去除脂溶性杂质), 以 7500 r/min 离心 10 min, 沉淀烘干至恒重。提取: 称取上述除杂后的样品 1 g, 纯水超声浸提 45 min(料液比质量比 1:40), 经 7500 r/min 离心 10 min 后收集上清液, 重复提取 2 次, 将所得上清液合并混匀。醇沉制样: 上清液浓缩至原体积的 25% 左右, 加入 100 mL 的乙醇(95%)。低温过夜沉淀, 7500 r/min 离心 10 min, 沉淀挥干, 加水定容至 50 mL 容量瓶, 置于 4 °C 待测。

参考文献 [22] 方法, 利用蒽酮硫酸法测定粗多糖含量。稀释样液至适当浓度, 量取 1.5 mL 置于干燥洁净玻璃管中, 加入蒽酮试剂 5 mL, 振荡混匀, 保持沸水浴(100 °C)加热 15 min, 取出后迅速冷却。于波长 625 nm 处测定吸光度。以葡萄糖溶液质量浓

度(mg/mL)为横坐标, 吸光度为纵坐标, 制标准曲线为 $y=1.2911x+0.0408$, $R^2=0.9992$ 。计算公式见式(1)。

$$\text{粗多糖含量} = \frac{\rho_1 \times N_1 \times V_1}{m_1} \quad \text{式(1)}$$

式中: ρ_1 为样品溶液中粗多糖的质量浓度, mg/mL; N_1 为稀释倍数; V_1 为样品溶液总体积, mL; m_1 为称取样品干物质质量, g。

1.2.2.4 乙醇含量测定 天麻发酵液的乙醇含量测定参照 GB 5009.225-2016《食品安全国家标准 酒中乙醇浓度的测定》的酒精计法。

1.2.3 发酵天麻提取液中 6 种多酚类化合物测定 参考文献 [11] 方法, 并作修改。取方法 1.2.1 中得到的发酵天麻提取液 1 mL, 经 0.22 μm 有机滤膜过滤至进样瓶。称取天麻素、对羟基苯甲醇、对羟基苯甲醛、柠檬酸酯 E、柠檬酸酯 B、巴利森苷 A 对照品各 20 mg, 经甲醇溶解并定容至 10 mL 容量瓶, 得到 2 mg/mL 标准储备液, 通过梯度稀释制备系列浓度工作液(10~200 $\mu\text{g/mL}$)。使用 HPLC 法进行测定。色谱柱, Poroshell 120 PFP(4.6 mm \times 100 mm, 2.7 μm); DAD 检测器, 检测波长 220 nm; 柱温 35 °C; 进样量 2 μL ; 流速 0.8 mL/min; 流动相: A 相为体积分数 0.1% 的磷酸水溶液, B 相为乙腈。梯度洗脱程序: 0~5 min, 2%~5%B; 5~10 min, 5%~10%B; 10~20 min, 10%~25%B; 20~25 min, 25%~80%B。

定性定量方法: 目标化合物(天麻素、对羟基苯甲醇等)的定性依据为其与相应对照品保留时间的一致性。各目标化合物的定量分析采用外标法, 以相应标准工作溶液的浓度-峰面积绘制标准曲线进行计算。

1.2.4 发酵天麻提取液中总多酚(TPC)和总黄酮(TFC)测定

1.2.4.1 总多酚(TPC)测定 参照文献 [23] 的方法。使用超纯水将天麻提取液进行适当稀释, 吸取稀释液和福林酚溶液(2 mol/L)各 20 μL , 混匀, 静置 5 min, 加入 160 μL 质量分数 5% Na_2CO_3 , 振荡混匀, 常温反应 60 min(避光), 于波长 765 nm 处测定吸光度。以没食子酸质量浓度($\mu\text{g/mL}$)为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制标准曲线为 $y=0.0034x+0.4205$, $R^2=0.9992$ 。样品中的总多酚含量以没食子酸当量(mg GAE/g)表示, 计算公式见式(2)。

$$\text{总多酚含量} = \frac{\rho_2 \times N_2 \times V_2}{m_2} \quad \text{式(2)}$$

式中: ρ_2 为样品待测液中总多酚的质量浓度, $\mu\text{g/mL}$; N_2 为稀释倍数; V_2 为提取液总体积, mL; m_2 为称取样品的干物质质量, g。

1.2.4.2 总黄酮(TFC)测定 参照文献 [23] 的方法。使用超纯水将天麻提取液进行适当稀释, 吸取 20 μL 稀释液和 15 μL 质量分数 5% NaNO_2 混合, 常温反应 6 min(避光), 加入 15 μL 质量分数 10% $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 静置 5 min, 最后加入 100 μL NaOH (1 mol/L), 于波

长 510 nm 处测定吸光度。以芦丁质量浓度($\mu\text{g}/\text{mL}$)为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制标准曲线为 $y=0.0005x+0.046$, $R^2=0.9995$ 。总黄酮含量以芦丁当量($\text{mg RE}/\text{g}$)表示,计算公式见式(3)。

$$\text{总黄酮含量} = \frac{\rho_3 \times N_3 \times V_3}{m_3} \quad \text{式(3)}$$

式中: ρ_3 为样品待测液中总黄酮的质量浓度, $\mu\text{g}/\text{mL}$; N_3 为稀释倍数; V_3 为提取液总体积, mL ; m_3 为称取样品的干物质质量, g 。

1.2.5 天麻发酵液抗氧化活性测定

1.2.5.1 铁离子还原力(FRAP)测定 参考文献 [24] 方法,并稍作修改。按照体积比 1:1:10 量取 10 mmol/L TPTZ、20 mmol/L FeCl_3 和 0.3 mol/L $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$ 溶液($\text{pH}3.6$),混匀,得到 FRAP 工作液。使用超纯水将天麻发酵液(1.2.1)稀释为不同质量浓度(0.25、0.5、1.0、5.0、7.5、10.0、15.0、20.0 mg/mL)的样品待测液备用。吸取 30 μL 待测液和 265 μL FRAP 工作液,混匀,37 $^\circ\text{C}$ 恒温反应 30 min,于波长 700 nm 处测定吸光度。以 Trolox 溶液质量浓度($\mu\text{g}/\text{mL}$)为横坐标,吸光度为纵坐标,制标准曲线为 $y=0.0154x+0.0953$, $R^2=0.9992$ 。铁离子还原能力以水溶性维生素 E(Trolox)当量($\mu\text{g TE}/\text{mL}$)表示。FRAP 计算公式见式(4)。

$$\text{铁离子还原能力} = \rho_4 \times N_4 \quad \text{式(4)}$$

式中: ρ_4 为样品待测液中 Trolox 当量的质量浓度, $\mu\text{g TE}/\text{mL}$; N_4 为稀释倍数。

1.2.5.2 DPPH 自由基清除能力测定 参考文献 [24] 方法,并稍作修改。提前配制质量浓度为 128.50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ DPPH 溶液(体积分数 80% 甲醇溶液为溶剂),吸取 100 μL 待测液(超纯水稀释发酵液至质量浓度为: 0.25、0.5、1.0、5.0、7.5、10.0、20.0、50.0、100.0 mg/mL),加入 100 μL 上述 DPPH 溶液(128.50 $\mu\text{g}/\text{mL}$),混匀后静置 30 min,于波长 517 nm 处测定吸光度。以上述甲醇溶液为空白对照,测定吸光度 A_0 ,以水溶性 V_E (2.00~80.00 $\mu\text{g}/\text{mL}$)为阳性对照。DPPH 自由基清除率计算公式见式(5)。

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \quad \text{式(5)}$$

式中: A_0 为空白组吸光度; A_1 为样品组或阳性组的吸光度。

1.2.5.3 ABTS⁺ 自由基清除能力测定 参考文献 [24] 方法,并稍作修改。按照 1:1 的体积比量取 7 mmol/L ABTS 溶液和 2.45 mmol/L $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 溶液,混匀,得到 ABTS 储备液,常温避光 16 h。ABTS 工作液:将 ABTS 储备液用体积分数 80% 的甲醇溶液稀释,使其吸光度在波长 734 nm 处为 0.70 ± 0.02 。吸取 40 μL 待测液(超纯水稀释发酵液至质量浓度为: 0.25、0.5、1.0、5.0、7.5、10.0、20.0、50.0 mg/mL),加入 160 μL ABTS 工作液,混匀后静置 6 min,于波

长 734 nm 处测定吸光度。用体积分数 80% 的甲醇代替样品溶液作为空白组,测定吸光度 A_2 ,以水溶性 V_E (2.00~200.00 $\mu\text{g}/\text{mL}$)为阳性对照品。ABTS⁺ 自由基清除率计算公式见式(6)。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}(\%) = \frac{A_2 - A_3}{A_2} \times 100 \quad \text{式(6)}$$

式中: A_2 为空白组吸光度; A_3 为样品组或阳性组的吸光度。

1.2.5.4 羟基自由基清除能力测定 参考文献 [25] 方法,结合实验室方法稍作修改。取 1.0 mL 邻二氮菲溶液(0.75 mmol/L,无水乙醇溶液为溶剂)、2.0 mL 磷酸盐缓冲溶液(0.2 mol/L, $\text{pH}7.40$)和 1.0 mL 蒸馏水,混匀,加入 1 mL FeSO_4 溶液(0.75 mmol/L)和待测样液(超纯水稀释发酵液至质量浓度为: 75、100、150、200、250、300、500 mg/mL) 1 mL,最后加入 1.0 mL H_2O_2 (体积分数 0.01%),置于 37 $^\circ\text{C}$ 水浴反应 60 min,于波长 536 nm 处测定吸光度 A_4 ,以水溶性 V_C (10.00~1000.00 $\mu\text{g}/\text{mL}$)为阳性对照品。羟基自由基清除率计算公式见式(7)。

$$\text{羟基自由基清除率}(\%) = \frac{A_5 - A_4}{A_6 - A_5} \times 100 \quad \text{式(7)}$$

式中: A_4 为样液吸光度; A_5 样品空白组的吸光度(无水乙醇代替样液); A_6 样品对照组的吸光度(蒸馏水代替 H_2O_2)。

1.2.6 天麻发酵液 α -葡萄糖苷酶抑制活性测定 参考文献 [26] 方法。吸取 40 μL 待测液(超纯水稀释发酵液至质量浓度为: 0.25、0.5、1.0、7.5、10.0、25.0、50.0、80.0、100.0 mg/mL)和 30 μL α -葡萄糖苷酶溶液(0.5 U/mL),混匀,置于 37 $^\circ\text{C}$ 水浴反应 10 min,再加入 30 μL 5 mmol/L 的对硝基苯- β -D-半乳糖苷(pNPG, 0.1 mol/L $\text{pH}6.8$ 磷酸盐缓冲溶液为溶剂),混匀,继续在 37 $^\circ\text{C}$ 条件下反应 30 min,加入 100 μL 的 1 mol/L Na_2CO_3 溶液,在波长 405 nm 处测吸光度 A_a ,以阿卡波糖(5~200 $\mu\text{g}/\text{mL}$)为阳性对照品。 α -葡萄糖苷酶活性抑制率计算公式见式(8)。

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%) = \left(1 - \frac{A_a - A_b}{A_c - A_d}\right) \times 100 \quad \text{式(8)}$$

式中: A_a 为样品和酶溶液吸光度; A_b 为磷酸盐缓冲液替代样品的吸光度; A_c 为酶液和磷酸盐缓冲液的吸光度; A_d 为磷酸盐缓冲液替代酶的吸光度。

1.2.7 天麻发酵液挥发性风味物质测定 参考文献 [27] 方法。取天麻发酵液 5 mL 置于 15 mL 的顶空瓶中,同时加入 10 μL 2-辛醇(10 mg/L)作为内标物(Internal Standard, IS)和 1 g 氯化钠,将顶空瓶于 50 $^\circ\text{C}$ 水浴锅中恒温平衡 30 min,使用 2 cm-50/30 μm DVB/CAR/PDMS StableFlex 萃取头的手动进样器,50 $^\circ\text{C}$ 顶空萃取 30 min 后,移出萃取头并立即插入 GC-MS 进样口(温度 250 $^\circ\text{C}$),解吸 5 min 进样。

色谱条件: DB-Heavy Wax(30 m×0.25 mm, 0.5 μm); 50 ℃保持2 min, 以5 ℃/min速度升温到240 ℃, 保持5 min; 不分流进样; 高纯N₂流速为1 mL/min。质谱离子源温度: 230 ℃; 传输线温度: 250 ℃; 电离方式: 电子轰击电离(EI); 电子能量: 70 eV; 质量扫描范围: m/z 50~550 amu; 扫描模式: 全扫描(Full Scan)。

定性/定量分析: 将测得的未知化合物质谱图与NIST标准质谱库(NIST 20)进行比对, 选择匹配度(Similarity)大于80%的物质, 并结合色谱保留时间进行初步鉴定。为校正样品前处理及仪器分析过程中的潜在误差, 采用内标法进行半定量分析。目标挥发性化合物的含量以内标当量计(μg/mL), 计算公式如下:

$$\text{目标化合物含量} = (A_h/A_f) \times (C_f \times V_f/M_i) \quad \text{式(9)}$$

式中: A_h为目标化合物的色谱峰面积; A_f为内标物的色谱峰面积; C_f为加入的内标物溶液浓度(μg/mL); V_f为加入的内标物体积(mL); M_i为样品量(mL)。

$$\text{物质的气味活度值(OAV)} = \frac{C_i}{T_i} \quad \text{式(10)}$$

式中: C_i为物质在样本中的浓度; T_i为物质的嗅觉阈值。

1.2.8 感官评价 采用定量描述分析法(Quantitative Descriptive Analysis, QDA)对天麻发酵液进行感官评价。评价小组由12名经过筛选和培训的专业感官评价员组成(6名男性, 6名女性; 年龄范围25~45岁)。评价项目包括色泽、气味、滋味、口感、体态五项(表1), 各项满分分别为: 色泽15分、气味25分、滋味30分、口感10分、体态20分, 总分100分。记录12位评价员对所有样品各感官项目的评分结果。最终结果取各感官项目得分的平均值±标准差(Mean±SD)。

表1 发酵液感官评价标准

感官项目	评分标准	得分
色泽(15分)	颜色呈棕色, 颜色均匀一致	11~15
	颜色较深或较浅	6~10
	颜色过深或过浅	0~5
气味(25分)	香味浓郁, 气味协调	16~25
	香味不足, 气味稍刺激	9~15
	臭味明显, 难以接受	0~8
滋味(30分)	酸甜适中, 口味纯	21~30
	酸甜比例较差, 略有杂味或酚类异味	11~20
	偏酸或偏甜, 杂味或酚类异味明显	0~10
口感(10分)	口感清爽, 细腻顺滑	8~10
	口感不清爽, 稍细腻顺滑	5~7
	口感粗糙	0~4
体态(20分)	清澈透明, 允许有少量沉淀	15~20
	较清澈透明, 有沉淀及杂质	9~14
	样液浑浊, 沉淀及杂质较多	0~8

1.3 数据处理

每个实验处理组重复3次, 使用Excel对数据预处理; 采用Pearson相关分析法, 对总多酚、总黄酮含量与抗氧化能力和降糖能力进行相关性分析; 用SPSS 27.0统计软件对数据进行正态性检验和方差齐性检验, 实验结果使用Simca 14、Origin 2021和Graph pad 10.0软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 天麻发酵液理化指标测定

表2为复合微生物发酵天麻后的理化指标测定结果。结果显示, 较对照组(CK), 复合微生物发酵天麻(FJ)的样液pH显著下降至3.37±0.04, 总酸含量显著增加了2.6倍(P<0.05), 这归因于发酵体系中产酸菌的代谢产生了乳酸、乙酸等短链脂肪酸^[12], 这些酸不仅有助于调节人体肠道健康和增强免疫功能^[28], 还直接导致pH的降低。同时, FJ组粗多糖含量较CK组增加97.33%。此外, 乙醇含量达到0.54%vol, 这些结果综合表明, 复合微生物发酵可促进天麻活性物质转化及风味物质产生。接种无菌水即酶解组(MJ)的各项理化指标较CK组均发生一定程度变化, 其中酶解处理后粗多糖含量显著增加(145.50±0.79 mg/g), 但与发酵组相比差异较大, 说明在传统酶解工艺上, 创新结合三菌协同发酵使天麻品质明显提高。

表2 不同天麻处理组关键理化指标测定

Table 2 Determination of key physicochemical properties in different *Gastrodia elata* processed groups

测定指标	FJ组 (接种复合微生物)	MJ组 (接种无菌水)	CK组 (天麻粉溶液)
pH	3.37±0.04 ^b	5.04±0.01 ^a	5.54±0.02 ^a
总酸(g/100 g)	4.86±0.08 ^a	1.50±0.42 ^b	1.35±0.55 ^b
粗多糖(mg/g)	247.65±16.10 ^a	145.50±0.79 ^b	125.50±0.88 ^c
乙醇(%vol)	0.54±0.02 ^a	/	/

注: 同行不同小写字母表示具有显著差异(P<0.05), 表4同; “/”表示未检出。

2.2 发酵天麻提取液中多酚类化合物组成分析

根据前期广泛的文献调研以及本实验室对多批次天麻样品的初步筛查结果, 表3中6种化合物在天麻中普遍含量较高且相对稳定, 是天麻多酚类成分中的主要物质^[11, 25-26]。以标准品质量浓度X(μg/mL)为横坐标, 对应的峰面积平均值Y为纵坐标, 绘制标准曲线, 并根据标准曲线进行回归分析和计算。结果显示6个标准品的线性关系良好, 回归方程和相关系数如表3所示。

测定不同组天麻提取液中活性化合物, 结果如图1(A)所示。经酶解和发酵处理后, 天麻液中活性化合物存在明显差异, 其中天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷A的含量差异显著(P<0.05)。相关研究表明, 巴利森苷A在酶的作用下可分解为天麻素、对羟基苯甲醇及巴利森苷类等产物^[29]。CK组经酶解后,

表 3 活性化合物的线性关系(n=6)

Table 3 Linear relationship of active compounds (n=6)

序号	标准品	出峰时间(min)	回归方程	R ²
1	天麻素	2.863	y=6620.4x-134.28	0.9994
2	对羟基苯甲醇	4.470	y=4202.4x-52.65	0.9997
3	柠檬酸酯E	10.060	y=3925.8x-79.89	0.9995
4	对羟基苯甲醛	10.608	y=6285.8x-127.03	0.9997
5	柠檬酸酯B	15.596	y=3177.9x-3.2212	0.9998
6	巴利森苷A	16.637	y=4669.2x-70.154	0.9998

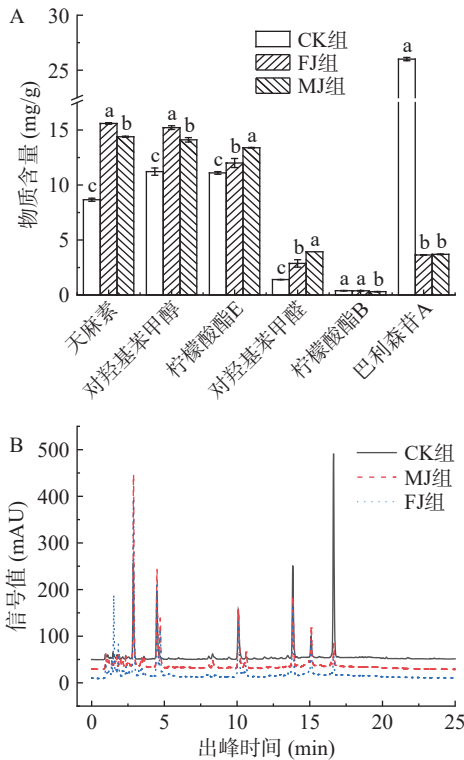


图 1 不同天麻处理组中化合物含量(A)及物质出峰结果图(B)

Fig.1 Compound contents (A) and chromatographic peaks (B) in different *Gastrodia elata* processed groups

注: 图中不同小写字母表示具有显著差异(P<0.05), 图 2~图 4 同。

巴利森苷 A 被大量分解, 同时天麻素和对羟基苯甲醇含量显著增加(P<0.05); 经微生物发酵后, FJ 组中天麻素和对羟基苯甲醇含量较 MJ 组分别增加 8.41% 和 7.87%, 同时较 CK 组分别增加 80.14% 和 35.65%。此外, 柠檬酸酯 E、柠檬酸酯 B 及对羟基苯甲醛等物质含量在酶解和发酵后发生不同程度变化, 活性成分增幅差异源于微生物对特定苷类的定向转化, 其中 MJ 组柠檬酸酯 E 和对羟基苯甲醛含量相对较高, 说明发酵后此类物质被部分分解。对比赖岚玉等^[1]所得到的发酵天麻产物, 本研究高出其对羟基苯甲醇含量 3.94 倍, 高出天麻素含量 4.57 倍, 突出了本文复合微生物发酵优势。进一步分析出峰结果(图 1 B)发现, FJ 组中检测到更多物质, 如出峰时间为 1.527 min 的未知代谢物, 其峰面积较大且在 CK、MJ 组中均未检出, 说明该物质为发酵过程中新产生的代谢产物。由此说明, 复合微生物发酵不仅促进

了天麻活性成分的转化与释放, 还合成了更多新的代谢物, 提高产品的功能活性与附加价值, 为天麻发酵产品的开发提供了重要的理论依据和技术支持。

2.3 发酵天麻提取液中总多酚 (TPC)、总黄酮 (TFC) 含量分析

对比不同组天麻提取液中总多酚(TPC)和总黄酮(TFC)含量, 结果如图 2 所示。FJ 组的 TPC 和 TFC 含量分别达到 39.87±1.55 mg GAE/g 和 17.52±0.21 mg RE/g, 显著大于 MJ 组(30.80±0.89 mg GAE/g、12.16±0.57 mg RE/g)和 CK 组(24.95±0.97 mg GAE/g、9.08±0.10 mg RE/g)(P<0.05)。与 CK 组相比, FJ 组 TPC 和 TFC 含量分别提高 29.45% 和 44.08%。同时, MJ 组的 TPC 和 TFC 含量也显著大于 CK 组, 这一趋势与 HPLC 测定结果基本一致, 表明酶解和发酵提高了天麻中多酚和黄酮类物质的含量。因此推断, 发酵过程中微生物的代谢活动可能促进了天麻中酚类物质的释放和转化, 发酵后多酚含量显著增加, 这与“红茶菌”发酵天麻的研究结果相似^[12]。此外, 黄酮类物质的增加可能与发酵过程中微生物对糖苷类化合物的降解有关, 进一步验证了发酵对天麻活性成分的增强作用。

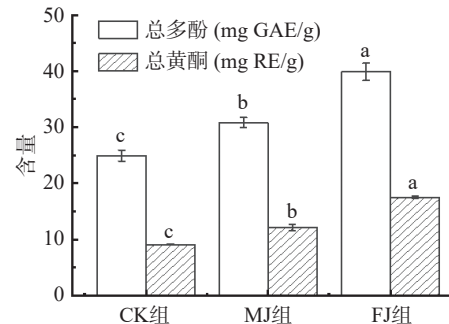


图 2 不同天麻处理组中总多酚、总黄酮含量
Fig.2 Total polyphenol and total flavonoid content in different *Gastrodia elata* treatment groups

2.4 天麻发酵液抗氧化性测定

本研究根据自由基清除能力和铁离子还原能力比较不同组天麻发酵液的抗氧化活性。阳性对照组采用高效合成抗氧化剂(V_E、V_C), 其抗氧化活性显著高于发酵天麻样品, 符合该类对照剂的预期效能, 也侧面验证了本实验体系的灵敏度。如图 3(A)所示, CK 组、MJ 组和 FJ 组 3 组天麻样品在铁离子还原能力上存在显著差异(P<0.05), 具体表现为 FJ 组>MJ 组>CK 组。如图 3B~图 3D 所示, 比较了 3 组样品对 DPPH 自由基、ABTS⁺自由基和羟自由基的清除能力, IC₅₀ 值越小代表自由基清除能力越强, 分析发现 3 组样品自由基清除能力存在显著差异(P<0.05), 不同自由基清除能力表现一致: FJ 组>MJ 组>CK 组。DPPH 实验中, FJ 组 IC₅₀ 为 3.46 mg/mL, 而阳性对照组仅需 9.31 μg/mL(相差约 371 倍); ABTS⁺自由基清除率实验中, FJ 组 IC₅₀ 为 0.73 mg/

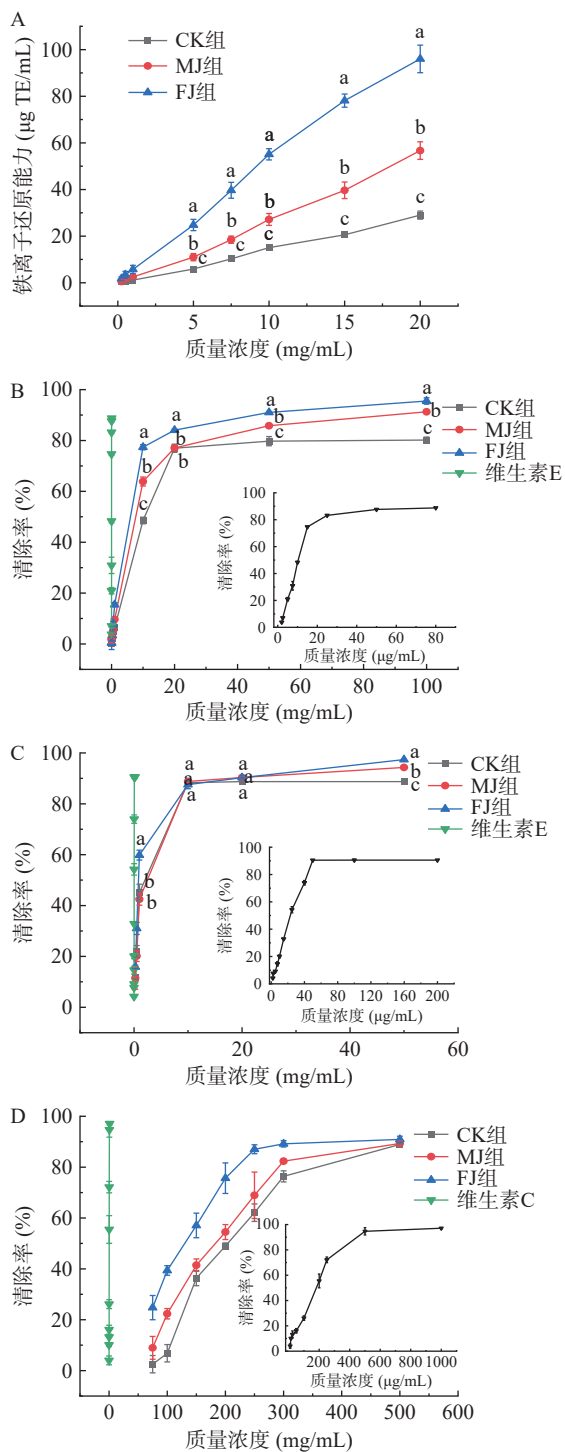


图3 不同天麻处理组抗氧化活性

Fig.3 Antioxidant activities of different *Gastrodia elata* processed groups

注: A-铁离子还原能力; B-DPPH 自由基清除能力; C-ABTS⁺ 自由基清除能力; D-羟自由基清除能力。小图为阳性对照组放大结果,图4同。

mL, 阳性对照组为 19.20 μg/mL (相差约 38 倍); 羟自由基实验中, FJ 组 IC₅₀ 为 93.42 mg/mL, 阳性对照组为 215.50 μg/mL (相差约 434 倍)。阳性对照为小分子强效抗氧化剂, 可直接提供电子或氢原子快速中和自由基; 而天麻样品中的活性成分 (如多糖、酚类) 可能通过协同作用缓慢清除自由基, 且受基质复杂性影响, 故效率较低。

结合上述天麻多酚测定结果, 微生物发酵能够改变天麻液中活性成分组成和含量, 从而提高其抗氧化活性, 这一结果与先前的研究相符^[11], 进一步证实了抗氧化能力与总多酚、总黄酮含量之间存在正向关系。此外, 较 CK 组, MJ 组也表现出较好的抗氧化能力, 这可能是因为酶解过程中分解出了总多酚、总黄酮等活性化合物, 从而提升了天麻样品的抗氧化活性。

2.5 α-葡萄糖苷酶抑制能力分析

由图 4 可知, 不同组天麻样液在抑制 α-葡萄糖苷酶活性方面展现出明显差异, 其中 FJ 组在 3 个试验组中表现最佳 (IC₅₀=0.69±0.12 mg/mL), 显著优于 MJ 组 (IC₅₀=1.17±1.14 mg/mL) 和 CK 组 (IC₅₀=3.02±0.96 mg/mL), 证实微生物发酵可提升天麻降糖活性 (FJ 组较 CK 组 IC₅₀ 降低约 77.15%), 阳性对照组 (阿卡波糖) 的抑制效能远高于天麻样品 (IC₅₀=181.56±12.45 μg/mL), 说明发酵天麻在降糖活性方面仍存在较大提升空间。然而, 通过微生物发酵, 天麻对 α-葡萄糖苷酶活性抑制能力已显著提高 (P<0.05), 且显著优于多数报道的天然产物^[21]。这一发现对于天麻产业在深加工领域, 特别是在探索降低人体餐后血糖的研究中具有重要意义。

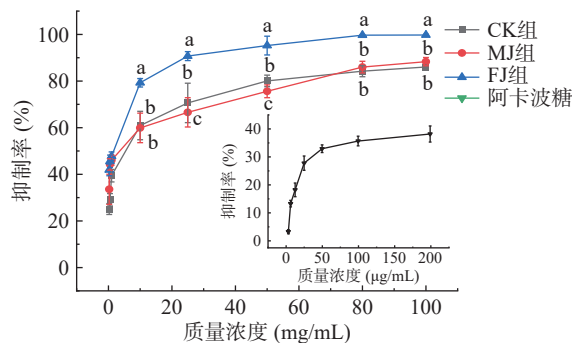


图4 不同天麻处理组 α-葡萄糖苷酶抑制能力

Fig.4 α-Glucosidase inhibitory activity of different *Gastrodia elata* processed groups

2.6 相关性分析

基于以上结果, 对各组天麻样品中总多酚和总黄酮与抗氧化能力和降糖能力进行 Pearson 相关性分析, 如图 5 所示, 总多酚含量与样液中各项抗氧化活性指标 (DPPH 自由基清除能力、ABTS⁺ 自由基清除能力、羟自由基清除能力、铁离子还原能力) 和降糖活性 (α-葡萄糖苷酶抑制能力) 均呈现显著正相关 (P<0.001) (多酚含量与清除率/抑制率 IC₅₀ 值呈负相关, 则与其活性能力呈正相关, 黄酮含量同理); 同时, 总黄酮含量也与样液抗氧化活性和降糖活性呈显著正相关 (P<0.001)。该结果说明总多酚和总黄酮含量对抗氧化活性和降糖活性具有积极作用, 同时也有相关研究表明, 黄酮类化合物和香豆素类化合物具有抗氧化药理活性, 甚至它们可能通过协同作用, 共同清除自由基, 降低氧化应激水平^[30]。

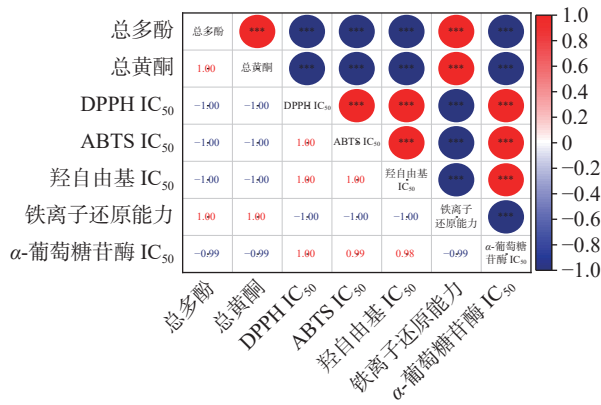


图 5 TPC 和 TFC 含量与抗氧化能力和降糖能力相关性分析

Fig.5 Correlation analysis between TPC/TFC contents and antioxidant/hypoglycemic activities
注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

2.7 挥发性风味物质分析

本文利用 HS-SPME-GC-MS 对天麻发酵液中的挥发性成分进行半定量分析。选取匹配度 >80% 的物质为代表, 在全部样本中共检测到 269 种挥发性物质, 包括醇类 37 种、醛类 10 种、酸类 15 种、酯类 30 种、酮类 26 种等。如图 6 所示, 与 CK 组相比, FJ 组 90 个代谢物上调, 113 个代谢物下调, MJ 组 105 个代谢物上调, 81 个代谢物下调; 与 MJ 组相比, FJ 组 72 个代谢物上调, 113 个代谢物下调。由表 4 所示, 各组样品的物质组成呈现显著差异, 其中

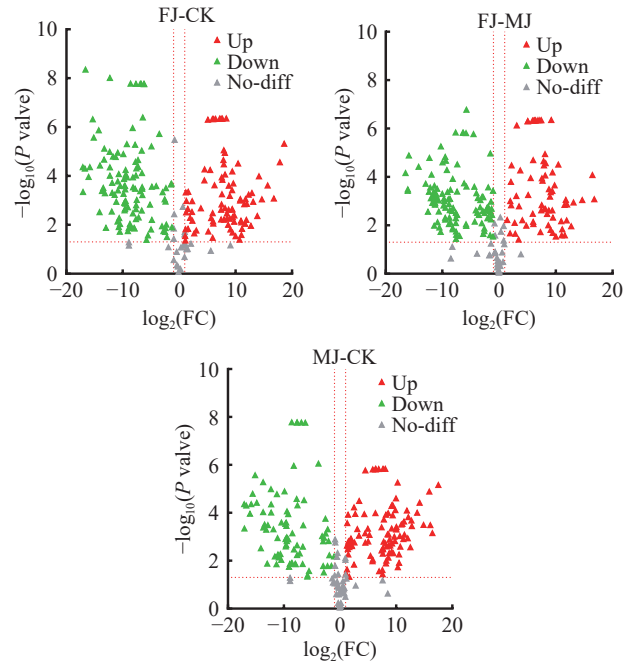


图 6 天麻挥发性代谢物火山图

Fig.6 Volcanic map of volatile metabolites of *Gastrodia elata*

CK 组酮类 ($231.89 \pm 11.41 \mu\text{g/mL}$) 和醇类 ($100.45 \pm 10.38 \mu\text{g/mL}$) 物质含量较高, MJ 组醇类 ($288.60 \pm 16.28 \mu\text{g/mL}$) 和酸类 ($162.29 \pm 11.77 \mu\text{g/mL}$) 物质含量较高, 而 FJ 组表现出更丰富的物质多样性, 其醇类 ($474.04 \pm 47.24 \mu\text{g/mL}$)、酸类 ($681.72 \pm 64.19 \mu\text{g/mL}$)、

表 4 不同天麻处理组主要挥发性物质 ($\mu\text{g/mL}$)

Table 4 Major volatile compounds in different *Gastrodia elata* processed groups ($\mu\text{g/mL}$)

物质分类及名称	CAS号	不同组物质含量			
		CK	FJ	MJ	
醇类	乙醇	ND	239.00±19.20 ^a	190.14±10.77 ^b	
	异丁醇	1.76±1.27 ^b	40.61±3.47 ^a	3.02±0.87 ^b	
	苯乙醇	17.51±1.03 ^c	42.97±5.07 ^a	22.73±6.02 ^b	
	正己醇	3.96±0.07 ^c	57.54±13.12 ^a	33.31±4.86 ^b	
	异戊醇	29.66±2.59 ^b	91.33±9.71 ^a	ND	
	2-庚醇	13.84±2.42 ^a	0.15±0.03 ^b	1.53±0.32 ^b	
	2-壬醇	13.49±0.72 ^a	0.44±0.07 ^b	ND	
	醇类总含量	100.45±10.38 ^c	474.04±47.24 ^a	288.60±16.28 ^b	
	酸类	乙酸	14.28±0.63 ^c	650.99±61.44 ^a	152.66±11.55 ^b
异戊酸		1.02±0.05 ^c	14.93±4.45 ^a	2.22±0.32 ^b	
酸类总含量		16.30±0.83 ^c	681.73±64.19 ^a	162.29±11.77 ^b	
正己酸乙酯		123-66-0	0.76±0.18 ^b	0.39±0.11 ^c	1.09±0.15 ^a
酯类	乙酸乙酯	141-78-6	8.07±0.18 ^c	52.81±7.37 ^a	30.20±4.52 ^b
	乙酸异戊酯	123-92-2	ND	26.13±5.11 ^a	ND
	乙酸异丁酯	110-19-0	ND	18.29±2.05 ^a	0.39±0.04 ^b
	酯类总含量		9.73±1.68 ^c	121.24±9.69 ^a	39.01±5.05 ^b
	仲辛酮	111-13-7	11.26±1.56 ^a	1.39±0.06 ^c	2.71±1.11 ^b
酮类	2-戊酮	107-87-9	23.81±1.44 ^a	6.24±0.07 ^c	13.09±1.80 ^b
	2-庚酮	110-43-0	107.89±10.06 ^a	ND	ND
	2-壬酮	821-55-6	58.28±5.26 ^a	ND	ND
	3-戊烯-2-酮	625-33-2	ND	114.7±22.02 ^a	ND
	酮类总含量		231.89±11.41 ^a	122.89±23.25 ^b	36.33±3.45 ^c

续表 4

物质分类及名称	CAS号	不同组物质含量			
		CK	FJ	MJ	
脂肪烃	2,4-二甲基庚烷	2213-23-2	22.69±0.66 ^a	1.98±0.54 ^c	15.46±2.36 ^b
	癸烷	124-18-5	11.39±1.47 ^b	14.5±1.82 ^b	30.32±1.65 ^a
	异癸烷	25339-56-4	10.09±0.76 ^a	ND	5.19±0.83 ^b
	脂肪烃类总含量		44.17±2.08 ^b	16.48±2.12 ^c	50.97±7.65 ^a
	苯并环丁烯	694-87-1	100.22±0.91 ^a	ND	92.05±9.33 ^b
	邻-异丙基苯	527-84-4	16.87±1.46 ^a	ND	2.81±1.07 ^b
	1,3-二叔丁基苯	1014-60-4	0.09±0.02 ^c	154.71±31.16 ^a	57.89±5.33 ^b
芳香烃及其衍生物	1,2,4,5-四甲基苯	95-93-2	36.27±1.63 ^a	ND	ND
	1,3-二乙基苯	141-93-5	13.05±2.09 ^a	ND	ND
	1-乙基-3,5-二甲基苯	934-74-7	138.74±12.5 ^a	ND	ND
	对甲苯甲醚	104-93-8	19.64±0.74 ^b	ND	69.22±10.79 ^a
	4-乙基苯甲醚	1515-95-3	17.92±4.82 ^a	ND	ND
	芳香烃类总含量		342.8±21.36 ^a	154.71±18.98 ^c	221.97±21.43 ^b
	对甲酚	106-44-5	14.6±0.89 ^a	5.27±0.91 ^b	12.41±1.83 ^a
	4-乙基苯酚	123-07-9	13.36±1.46 ^a	0.07±0 ^b	ND
	N,N,O-三乙酰基胺	41502-84-7	ND	406.76±21.12 ^a	89.2±16.39 ^b
	环丁基胺	2516-34-9	67.63±7.69 ^a	ND	ND
其它	2-(氮杂环丙烷-1-基)乙胺	1072-52-2	74.1±5.61 ^b	0.47±0.08 ^c	143.03±104.46 ^a
	酸草醯脲	1123-24-6	ND	ND	70.17±10.56 ^c
	2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	ND	5.10±0.89 ^b	13.85±1.54 ^a
	其他类总含量		169.69±15.45 ^c	417.67±36.77 ^a	328.66±31.25 ^b

注: ND表示未检出。

酯类(121.24±9.69 μg/mL)和酮类(122.89±23.25 μg/mL)物质含量较高。经对比,微生物发酵对天麻挥发性物质的调控作用最为显著;与CK组相比,FJ组中醇类、酸类和酯类物质分别增长3.72倍、40.82倍和11.46倍,酯类物质含量的增加尤为突出,其中包含乙酸乙酯、乙酸异戊酯等关键酯类物质的大量产生,这与复合微生物发酵过程中酯化反应的激活密切相关(醋酸菌代谢乙酸与酵母菌产乙醇的酯化反应),相关研究表明,酯类物质作为食品风味的重要载体,可通过与醇类、酸类的协同作用形成复合香气^[31];MJ组则主要表现为醇类和酸类物质含量的提升,可能与外源酶系对前体物质的分解作用有关^[32]。

如图7A,通过正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA),三组样品在得分图中呈现明显分离($Rx^2=0.705$, $Ry^2=0.257$, $Q^2=0.628$),表明酶解与发酵处理使天麻挥发性物质的组成发生明显差异。图7B置换检验(200次)结果显示 Q^2 回归线与纵轴交点在负区间($P<0.001$),证实模型具有良好预测能力且未出现过拟合。进一步筛选获得37种VIP值 ≥ 1 且具有统计学显著性($P<0.05$)的差异代谢物(图7C,图中仅展示前30种主要物质),包括冰醋酸(乙酸)(VIP=6.44)、乙醇(VIP=4.11)、2-庚酮(VIP=3.04)、3-戊烯-2-酮(VIP=2.98)、异戊醇(VIP=2.72)等关键化合物。其中,2-庚酮、2-壬酮等酮类物质在CK组中占主导,而FJ组中异戊醇、乙酸乙酯等酯类物质的显著富集,可能赋予产品独特的花果香气。基于气味活性值(OAV)的深入分析显示(表5),共计25个差异

表5 主要特征差异代谢物 OAV 计算

Table 5 Calculation of OAV for major characteristic differential metabolites

物质名称	阈值 (mg/kg) ^[37-38]	风味 描述 ^[33,37-39]	OAV		
			CK	FJ	MJ
冰醋酸	10.00	刺激性酸味	\	0.07	0.02
乙醇	3.50	醇香、微甜	\	0.07	0.05
2-庚酮	0.001	蓝乳酪香、果香	107.89	\	\
3-戊烯-2-酮	0.0015	青草香	\	76.47	\
异戊醇	0.004	杂醇油味、苦杏仁香	7.41	22.83	\
对甲苯甲醚	0.025	药草香、辛香	0.79	\	2.77
2-壬酮	0.005	柑橘皮香、脂肪味	11.66	\	\
正己醇	0.0056	草本香、青叶味	0.71	10.28	5.95
乙酸乙酯	0.005	果香(菠萝/苹果)	\	10.56	6.04
1,2,4,5-四甲基苯	0.083	樟脑味、木香	0.44	\	\
异丁醇	0.36	溶剂味、甜香	\	0.11	0.01
乙酸异戊酯	0.00015	香蕉香、甜果香	\	174.21	\
苯乙醇	0.000015	玫瑰香	1167.43	2864.41	1515.14
2-戊酮	0.01	醚香、果香	2.38	0.02	1.31
乙酸异丁酯	0.025	水果糖香	\	0.73	0.02
2,5-二甲基吡嗪	0.08	坚果香、炒米香	\	0.06	0.17
邻-异丙基苯	0.04	松木香、柑橘皮香	0.42	\	0.07
2-壬醇	0.058	黄瓜香、蜡味	0.23	0.01	\
4-乙基苯酚	0.004	烟熏味、药味	3.34	0.02	\
1,3-二乙基苯	0.39	汽油味、溶剂味	0.03	\	\
2-庚醇	0.041	蘑菇香、土腥味	0.34	\	0.04
异戊酸	0.012	奶酪香、汗酸味	\	1.24	0.18
对甲酚	0.001	酚醛异味	14.6	5.27	12.41

注: “\”表示不可计算。

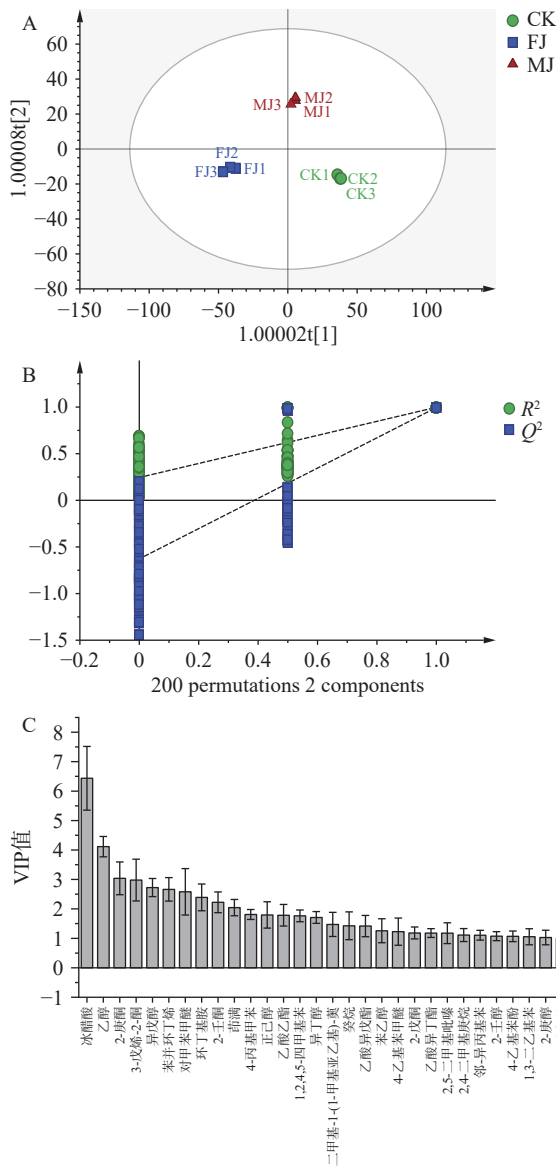


图 7 挥发性风味物质主成分分析(PCoA)

Fig.7 Principal component analysis (PCoA) of characteristic aroma compounds

香气物质可计算 OAV, 13 种物质 OAV ≥ 1 的关键香气成分对整体风味具有实质贡献。FJ 组中 3-戊烯-2-酮(青草香)^[33]、苯乙醇(玫瑰香)^[34]及乙酸乙酯(果香)^[35]等物质的协同作用, 形成了层次丰富的香气特征。与 CK 组相比, MJ 组与 FJ 组均呈现酸类物质增加, 但 FJ 组中异戊酸(奶酪香)的 OAV 显著提升, 暗示微生物转化可能优化了酸类物质的感官特性, 这一发现与文献 [36] 提出的“关键香气成分阈值效应”理论相吻合, 表明可通过定向调控特定代谢通路来有效改良天麻产品的感官品质。

2.7.1 天麻发酵液感官品评 通过定量描述分析对各组进行感官评价, 其样品图以及色泽、体态、气味、滋味、口感打分结果如图 8、图 9 所示。通过微生物发酵, 除了天麻活性成分和功能活性发生改变外, FJ 组天麻发酵液在色泽、体态、气味、滋味等方面均得到明显改善, FJ 组气味呈现明显的醇香和甜香味, 几乎不存在天麻的不愉快气味, 色泽偏红棕色,

体态较为清澈, 酸甜适中; 而 MJ 组天麻液色泽暗淡, 仍存在明显天麻的不愉快气味; 相比之下, CK 组在色泽、气味、滋味等方面更难以接受。整体而言, 利用微生物发酵, 天麻产品感官特性得到显著改善。

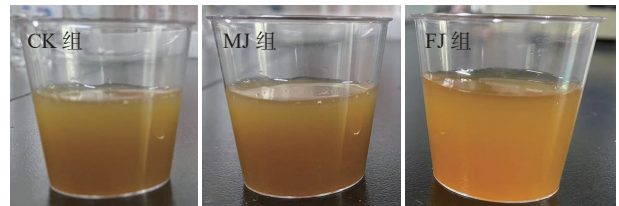


图 8 不同处理组样品图

Fig.8 Sample images from different treatment groups

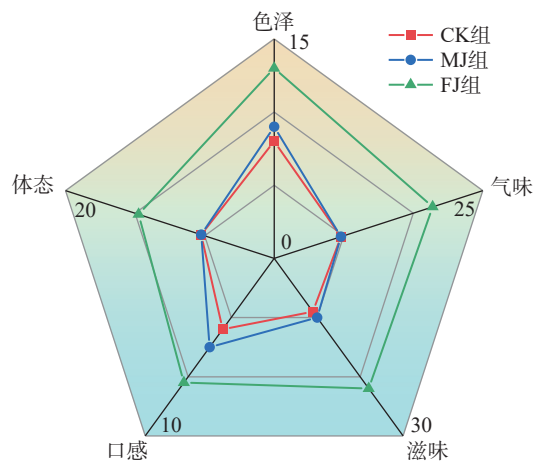


图 9 感官品评雷达图

Fig.9 Sensory evaluation radar chart

3 结论

本研究证实复合微生物(乳酸菌-醋酸菌-酵母菌)协同发酵可显著提升天麻液品质。相较于传统酶解工艺, 微生物复合发酵促进了巴利森苷 A 水解为天麻素(含量提高 8.41%)及对羟基苯甲醇(提高 7.87%), 较 CK 组则分别提高 80.14% 和 35.65%; 此外, 较 CK 组, 天麻提取液总多酚和总黄酮含量分别提升 29.45% 和 44.08%, 驱动抗氧化(DPPH 自由基清除率 IC₅₀ 下降 57.75%、ABTS⁺自由基清除率 IC₅₀ 下降 26.27%)与降糖活性(α-葡萄糖苷酶 IC₅₀ 降低 77.15%)协同增强; 基于酸醇酯化反应富集关键香气物质(如乙酸乙酯 OAV=10.56、苯乙醇 OAV=2864.41), 赋予天麻发酵液花果香与青草香复合气息。本研究揭示了复合微生物转化天麻活性成分及品质的理论机制, 弥补单一酶解技术缺陷(如异味残留), 为开发高附加值功能性食品(如降血糖制剂)提供技术支持。在未来的研究中, 需通过动物实验验证体内降糖功效, 结合宏基因组学解析菌种互作机制, 并继续优化工业化发酵参数。

参考文献

- [1] MATIAS M, SILVESTRE S, FALCÃO A, et al. *Gastrodia elata* and epilepsy: Rationale and therapeutic potential[J]. *Phytomedicine*, 2016, 23(12): 1511–1526.
- [2] ZHU Haodong, LIU Chen, HOU Jinjun, et al. *Gastrodia elata* Blume polysaccharides: A review of their acquisition, analysis, modification, and pharmacological activities[J]. *Molecules*, 2019, 24(13): 2436.
- [3] ZHAO Yang, GONG Xiaojian, ZHOU Xin, et al. Relative bioavailability of gastrodin and parishin from extract and powder of *Gastrodiae rhizoma* in rat[J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2014, 100: 309–315.
- [4] LIU Zilu, WANG Mengting, DING Ximeng, et al. Exploration the effective components of *Gastrodia elata* in improving cerebral ischemia reperfusion injury based on "Spectrum-effect" correlation and zebrafish verification experiment[J]. *Phytomedicine*, 2024, 135: 156211.
- [5] ZHU Chenghao, WANG Shangtao, MA Siyu, et al. Gastrodin reduces A β brain levels in an Alzheimer's disease mouse model by inhibiting P-glycoprotein ubiquitination[J]. *Phytomedicine*, 2024, 135: 156229.
- [6] YANG Xiu, LI Lilang, YAN Yanfang, 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.
- [7] HUANG S C, HUANG Huichi, LIAO Wenling, et al. Neuroprotective effects of *Gastrodia elata* Blume on promoting M2 microglial polarization by inhibiting JNK/TLR4/T3JAM/NF- κ B signaling after transient ischemic stroke in rats[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2024, 15: 1469602.
- [8] 刘燧, 金传山, 张亚中, 等. 天麻产地加工方法与质量评价研究进展[J]. *世界中医药*, 2024, 19(5): 727–735. [LIU Yi, JIN Chuanshan, ZHANG Yazhong, et al. Research progress in the field processing and quality evaluation of *Gastrodiae rhizoma*[J]. *World Chinese Medicine*, 2024, 19(5): 727–735.]
- [9] WANG Yu, LIN Ling, LI Lilang, et al. Dynamic changes of differential metabolites and key metabolic pathways of *Gastrodia elata* Blume during fermentation[J]. *International Journal of Food Properties*, 2022, 25(1): 1539–1548.
- [10] ZHANG Chaoqi, ZHANG Xudong, WANG Yan, et al. Sleep promoting and omics exploration on probiotics fermented *Gastrodia elata* Blume[J]. *npj Science of Food*, 2024, 8: 33.
- [11] 赖岚玉, 李敏, 赵文俊, 等. 益生菌发酵对姜制天麻活性成分及其抗氧化活性的影响[J]. *现代食品科技*, 2024, 40(2): 91–99. [LAI Lanyu, LI Min, ZHAO Wenjun, et al. Effects of probiotic fermentation on the active constituents and antioxidant activity of ginger-processed *Gastrodia elata*[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2024, 40(2): 91–99.]
- [12] 刘思琪, 樊璐瑶, 王硕, 等. 红茶菌功能性微生物开发与利用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(11): 388–395. [LIU Siqi, FAN Luyao, WANG Shuo, et al. Research progress on development and utilization of functional microorganisms from kombucha[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(11): 388–395.]
- [13] SILVA T O, COSTA G N, dos SANTOS LIMA M, et al. Chemical, microbial, and functional characterization of a new fruity probiotic kombucha[J]. *Food Research International*, 2024, 198: 115398.
- [14] 赵洁羽, 魏涛, 秦菲, 等. 康普茶饮料感官品质、理化性质及微生物多样性分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(1): 172–180. [ZHAO Jieyu, WEI Tao, QIN Fei, et al. Analysis of sensory quality, physicochemical characteristics and microbial diversity of kombucha beverages[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(1): 172–180.]
- [15] 韩颖, 王茜, 侯晨梓, 等. 红茶菌发酵荞麦浆醋饮的工艺优化及品质分析[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(16): 167–175. [HAN Ying, WANG Qian, HOU Chenzi, et al. Optimization of fermentation process and quality analysis of buckwheat vinegar fermented by kombucha[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(16): 167–175.]
- [16] 李敏, 陈瑞云, 陈巧红. 大豆乳清红茶菌复合发酵饮料的工艺研究[J]. *山东化工*, 2021, 50(15): 45–47, 49. [LI Min, CHEN Ruiyun, CHEN Qiaohong. Preparation of soybean kombucha complex fermented beverage[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2021, 50(15): 45–47, 49.]
- [17] de SOUZA H F, FREIRE E N S, MONTEIRO G F, et al. Development of potentially probiotic mead from co-fermentation by *Saccharomyces cerevisiae* var. *bouardii* and kombucha microorganisms[J]. *Fermentation*, 2024, 10(9): 482.
- [18] MOUGUECH N, TAILLANDIER P, BOUJILA J, et al. Enhanced biological potential and phytochemical profiling of *Phoenix dactylifera* leaves (deglet nour and alig) by kombucha fermentation: Focus on polyphenols, antioxidant, antidiabetic, and cytotoxic activities[J]. *Chemistry & Biodiversity*, 2025, 22(2): e202401592.
- [19] PRAJAPATI K, PRAJAPATI J, PATEL D, et al. Multidisciplinary advances in kombucha fermentation, health efficacy, and market evolution[J]. *Archives of Microbiology*, 2024, 206(9): 366.
- [20] TANUSHREE, KATYAL P. Production and analysis of kombucha: A black tea based functional beverage[J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2024, 83(9): 1001–1011.
- [21] 张双奇, 刘琳, 何念武, 等. 超声辅助提取陕产天麻多糖的工艺优化及抗氧化活性研究[J]. *中国农学通报*, 2021, 37(9): 131–136. [ZHANG Shuangqi, LIU Lin, HE Nianwu, et al. *Gastrodia elata* polysaccharide from Shaanxi by ultrasound-assisted hot water extraction: Process optimization and antioxidant activity[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2021, 37(9): 131–136.]
- [22] 胡德分, 刘金美, 李凤娇, 等. 蒽酮-硫酸法测定乌天麻多糖含量的条件优化[J]. *云南民族大学学报(自然科学版)*, 2023, 32(6): 687–694. [HU Defen, LIU Jinmei, LI Fengjiao, et al. Determination and optimization of the polysaccharide content of *Gastrodia elata* Bl. f. *glauca* by anthrone-sulfuric acid methods[J]. *Journal of Yunnan Minzu University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 32(6): 687–694.]
- [23] XU Wanxiu, PEI Yongsheng, TIAN Jinghong, et al. Effects of different drying methods on sensory qualities and aroma compounds of finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle) slices[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2021, 15(5): 4465–4474.
- [24] 温启华, 陆逸昊, 杨露芳, 等. 硒化天麻多糖的制备、结构表征及其抗氧化活性评价[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(3): 18–30. [WEN Qihua, LU Yihao, YANG Lufang, et al. Preparation, structure characterization and antioxidant activity evaluation of selenized *Gastrodia elata* polysaccharides[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(3): 18–30.]
- [25] 陈琛, 蔺蓓蓓, 苏鹏超, 等. 不同产地红天麻多酚组成及体外抗氧化活性研究[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*,

- 2021, 49(12): 144–154. [CHEN Chen, LIN Beibei, SU Pengchao, et al. Phenolic compositions and *in vitro* antioxidant activities of *Gastrodia elata* Bl. f. *elata* from different habitats in China[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2021, 49(12): 144–154.]
- [26] 石新卫, 王璐, 张胜, 等. 天麻的化学成分及其抗氧化和抑制 α -葡萄糖苷酶活性研究[J]. 中草药, 2024, 55(19): 6474–6481. [SHI Xinwei, WANG Lu, ZHANG Sheng, et al. Chemical constituents from *Gastrodia elata* and their antioxidant and α -glucosidase inhibitory activities[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, 55(19): 6474–6481.]
- [27] 杨丽莉, 段桂媛, 黄璐晗, 等. 蒸制、水煮和发酵处理对天麻品质和风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 301–307. [YANG Lili, DUAN Guiyuan, HUANG Luhan, et al. Effect of steaming, boiling and fermentation treatments on the quality and flavour of *Gastrodia elata*[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 301–307.]
- [28] 林凤莲, 刘志峰. 短链脂肪酸在功能性便秘中作用的研究进展[J]. 中国微生态学杂志, 2025, 37(3): 364–366, 372. [LIN Fenglian, LIU Zhifeng. Role of short-chain fatty acids in functional constipation; Research progress[J]. Chinese Journal of Microecology, 2025, 37(3): 364–366, 372.]
- [29] 李佳阳, 吴国真, 王新茗, 等. 鲜天麻中酶对巴利森昔 A 的降解作用研究[J]. 中国现代中药, 2022, 24(3): 459–465. [LI Jiayang, WU Guozhen, WANG Xinming, et al. Degradation of parishin a by enzymes in fresh *Gastrodiae rhizoma*[J]. Modern Chinese Medicine, 2022, 24(3): 459–465.]
- [30] 周胡怿, 赵希娟, 焦必宁. 基于超高效液相色谱三重四极杆质谱法同时检测佛手香豆素类化合物含量[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(2): 288–295. [ZHOU Huiyi, ZHAO Xijuan, JIAO Bining. A rapid ultra-high-performance liquid chromatography with triple quadrupole mass spectrometry method for simultaneous detection of coumarins in *Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(2): 288–295.]
- [31] 肖冬光. 白酒酿造过程中酯类物质形成机理探讨[J]. 酿酒科技, 2022(9): 17–24. [XIAO Dongguang. Discussion on the formation mechanism of ester compounds in the production process of Baijiu[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2022(9): 17–24.]
- [32] 史海慧, 刘香英, 孙洪蕊, 等. 传统酿造酱及酱油中微生物酶系研究进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(2): 216–220. [SHI Haihui, LIU Xiangying, SUN Hongrui, et al. Research progress of microbial enzymes in traditionally brewed paste and soy sauce[J]. China Condiment, 2024, 49(2): 216–220.]
- [33] 蓝鑫, 黄浩洲, 方玉宇, 等. 基于顶空微萃取-气质联用的天麻气味成分研究[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(2): 21–27. [LAN X, HUANG H Z, FANG Y Y, et al. Analysis of odor components in *Gastrodia elata* by headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Nat. Prod. Res. Dev., 2023, 35(2): 21–27.]
- [34] 刘雅冉, 李俊龙, 谷佩珊, 等. 发酵型枸杞酒关键香气物质分析[J]. 食品科学, 2024, 45(5): 126–136. [LIU Yaran, LI Junlong, GU Peishan, et al. Analysis of key aroma compounds in fermented goji berry wine[J]. Food Science, 2024, 45(5): 126–136.]
- [35] 胥佳, 廖丽, 邹永芳, 等. 气相色谱法检测浓香型白酒中 53 种挥发性风味成分[J]. 中国酿造, 2025, 44(4): 276–284. [XU Jia, LIAO Li, ZOU Yongfang, et al. Determination of 53 volatile flavor components in strong-flavor Baijiu by gas chromatography[J]. China Brewing, 2025, 44(4): 276–284.]
- [36] 王旭, 刘眉伶, 郑柳艳, 等. 浓香型白酒中主要酸酯相互作用及机理解析[J]. 食品科学, 2025, 46(5): 75–84. [WANG Xu, LIU Meiling, ZHENG Liuyan, et al. Interactions between major acids and esters in Nongxiangxing Baijiu and underlying mechanisms[J]. Food Science, 2025, 46(5): 75–84.]
- [37] VAN GEMERT L J. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2015. [VAN GEMERT L J. Compilations of flavour threshold values in water and other media[M]. Beijing: Science Press, 2015.]
- [38] BURDOCK G A. Fenaroli's handbook of flavor ingredients[M]. 7th ed. Boca Raton: CRC Press, 2020.
- [39] 段桂媛, 张曼, 唐鑫静, 等. 乌红杂交鲜天麻质量评价研究[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(5): 157–167. [DUAN Guiyuan, ZHANG Man, TANG Xinjing, et al. Study on quality evaluation of hybrid fresh *Gastrodia elata*[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(5): 157–167.]