赖谦, 刘世艳, 王镇, 等. 微生物发酵对赶黄草-葛根-枳椇子复方功能特性及风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 453−464. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060234

LAI Qian, LIU Shiyan, WANG Zhen, et al. Effects of Microbial Fermentation on Functional Properties and Flavor Characteristics of a *Penthorum chinense*, *Pueraria lobata* and *Hovenia dulcis* Compound Formulation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 453−464. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060234

· 食品营养与健康功效 ·

# 微生物发酵对赶黄草-葛根-枳椇子复方功能特性及风味的影响

赖　谦[1], 刘世艳[1], 王　镇[1], 向卓亚[2], 夏　陈[2], 邓洁琼[3], 叶　霄[3], 余鳗游[2], 甘　露[2], 李　钰[3], 袁英豪[2,*]

(1.古蔺县农业农村局, 四川 泸州 646599;
2.四川省农业科学院农产品加工所（四川省农业科学院食物与营养健康研究所）, 四川 成都 610066;
3.四川省农业科学院经济作物研究所, 四川 成都 610300)

**摘　要:** 基于微生物发酵技术对药食同源物质的增效潜力，探究复合微生物发酵对赶黄草-葛根-枳椇子复方的活性成分和风味品质的影响，本研究通过酶解（纤维素酶）和微生物发酵（乳酸菌、醋酸菌、酵母菌）协同作用，系统分析其活性成分动态变化、功能活性及风味品质。结果表明，酶解显著提升样品中葛根素（250.43 μg/mL）、阿福豆苷（44.34 μg/mL）等活性化合物含量（$P$<0.05），同时生成表儿茶素（41.16 μg/mL）；发酵过程中，赶黄草苷 A 等大分子物质降解，总多酚（TPC）与总黄酮（TFC）含量呈先降后升趋势，酶解发酵（M7D）组铁离子还原能力（76.00 μg TE/mL）及 DPPH 自由基清除能力（$IC_{50}$=0.2447 mg/mL）显著优于对照组和其他实验组（$P$<0.05），但 $ABTS^{+\cdot}$清除能力相对较弱（$IC_{50}$=0.3022 mg/mL），同时该组仍保持较好的 $\alpha$-葡萄糖苷酶抑制活性（$IC_{50}$=0.0898 mg/mL）。挥发性成分分析显示：较对照组，发酵组（S7D 和 M7D）醇类（分别增加 299.23%、230.89%）、醛类（分别增加 237.78%、207.02%）、酯类（分别增加 51.86%、46.29%）等含量显著增加（$P$<0.05），核心风味物质如 $\beta$-紫罗兰酮（果香、花香）、苯乙醇（花香、蜜香）及乙酸异戊酯（果香）协同提升香气复杂度。综合感官评价，M7D 组口感协调，保留药材特有风味，发酵酸味适中，无涩感，药香与发酵风味融合自然，表现最佳。本研究为开发兼具抗氧化与风味的发酵型饮品提供了理论依据。

**关键词:** 微生物发酵, 酶解, 药食同源, 活性成分, 抗氧化活性, 挥发性风味物质
**中图分类号:** TS201.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0453−12
**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025060234　　本文网刊:

# Effects of Microbial Fermentation on Functional Properties and Flavor Characteristics of a *Penthorum chinense*, *Pueraria lobata* and *Hovenia dulcis* Compound Formulation

**LAI Qian[1], LIU Shiyan[1], WANG Zhen[1], XIANG Zhuoya[2], XIA Chen[2], DENG Jieqiong[3], YE Xiao[3], YU Manyou[2], GAN Lu[2], LI Yu[3], YUAN Yinghao[2,*]**

(1.Gulin County Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Luzhou 646599, China;
2.Institute of Agro-products Processing Science and Technology (Institute of Food Nutrition and Health), Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China;
3.Industrial Corp Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610300, China)

**Abstract:** Based on the synergistic potential of microbial fermentation technology in enhancing the efficacy of medicinal and edible homologous substances, this study investigated the effects of compound microbial fermentation on bioactive

**收稿日期:** 2025−06−20
**基金项目:** 古蔺县赶黄草品牌提升及选育研究; 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（SCCXTD-2020-19）。
**作者简介:** 赖谦（1992−）, 男, 硕士, 农艺师, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 919422362@qq.com。
*** 通信作者:** 袁英豪（1997−）, 男, 硕士, 研究实习员, 研究方向: 功能食品研究, E-mail: y13253360907@163.com。

components and flavor profiles of *Pueraria lobata*, *Penthorum chinense*, and *Hovenia dulcis*. Through combined enzymatic hydrolysis (cellulase) and microbial fermentation (*Lactobacillus*, *Acetobacter*, yeast), dynamic changes in bioactive compounds, functional activities, and flavor characteristics were systematically analyzed. Results demonstrated that enzymatic hydrolysis significantly increased the content of active compounds such as puerarin (250.43 μg/mL) and afzelin (44.34 μg/mL) ($P$<0.05), while generating epicatechin (41.16 μg/mL). During fermentation, macromolecules like flavoskyrin A were degraded. Total phenolic content (TPC) and total flavonoid content (TFC) exhibited an initial decline followed by an upward trend. The enzymolysis-fermentation (M7D) group showed superior ferric ion reducing antioxidant power (76.00 μg TE/mL) and DPPH radical scavenging capacity ($IC_{50}$=0.2447 mg/mL), significantly outperforming control and other experimental groups ($P$<0.05), though its $ABTS^{+\cdot}$ scavenging capacity was relatively weaker ($IC_{50}$= 0.3022 mg/mL). Notably, the M7D group retained effective $\alpha$-glucosidase inhibitory activity ($IC_{50}$=0.0898 mg/mL). Volatile component analysis revealed: Compared to the control group, substantial increased in alcohols (increase of 299.23% and 230.89%, respectively), aldehydes (increase of 237.78% and 207.02%, respectively), and esters (increase of 51.86% and 46.29%, respectively) in fermented groups (S7D and M7D) ($P$<0.05). Core aroma compounds, including $\beta$-ionone (fruity/floral), phenethyl alcohol (floral/honey), and isoamyl acetate (fruity), synergistically enhanced olfactory complexity. Sensory evaluation indicated that the M7D group achieved optimal flavor integration, balancing herbal characteristics with moderate fermentation acidity, eliminating astringency, and harmonizing medicinal and fermented aromas. This research provides theoretical support for developing fermented beverages with dual antioxidant and flavor-enhancing properties.

**Key words**: microbial fermentation; enzymolysis; medicinal-food homology; bioactive components; antioxidant activity; volatile flavor compounds

药食同源物质兼具营养与药用价值，现代研究证明，多数药食同源物质对调节心脑血管疾病[1]、修复神经系统[2]、调节糖脂代谢、糖尿病干预[3] 等具有显著作用，但其活性成分（如黄酮类、多酚）的生物利用度及功能活性受加工技术显著影响，且对药食同源物质的利用方式较为单一，主要以粉剂、蒸煮等方式为主。在中药现代化进程中，酶解技术作为生物转化的重要手段，通过纤维素酶、果胶酶等生物催化剂对植物细胞壁的定向解构，显著提高了活性成分的溶出效率，李清筱[4] 通过优化纤维素酶处理马齿苋的条件，其黄酮提取率提高 1.14%；刘京等[5] 为探究酶解法对山楂多糖提取率的影响，经多因素优化后木瓜蛋白酶对多糖的提取率可达 11.72%。传统酶解技术虽能通过破坏植物细胞壁提升提取效率[6−7]，但单一处理难以实现成分深度转化；微生物发酵可通过代谢酶系（如 $\beta$-葡萄糖苷酶）将结合态活性物质转化为游离态，同时生成酯类、醇类等风味物质[8]，Zhou 等[9] 利用枯草芽孢杆菌和两歧双歧杆菌发酵山茱萸，结果表明发酵显著增加了没食子酸的含量。然而，酶解与发酵协同机制尚不明确，且发酵过程中活性成分的动态变化及风味调控缺乏系统性研究。

该研究选取赶黄草（*Penthorum chinense* Pursh）、葛根（*Puerariae Lobatae* Radix）与枳椇子（*Hoveniae semen*）三种原料进行复配。其中，葛根富含葛根素、大豆苷等异黄酮类物质，具有抗氧化、解酒护肝及调节血糖等功能[10]；赶黄草含赶黄草苷 A、槲皮素等多种活性成分，具显著的保肝作用[11]；枳椇子则因其解酒毒、止渴除烦的功效被广泛应用，其活性成分如二氢杨梅素等同样具有保肝与抗氧化活性[12]。三者均常用于解酒护肝类食品或药物的开发，在功能上具有协同增效的潜力。前期预实验表明，按赶黄草粉∶葛根粉∶枳椇子粉=1.5∶5∶1 的比例复配，其总黄酮、总多酚得率及体外抗氧化活性优于其他配比，故以此比例进行后续研究。

本文以赶黄草（新食品原料）、葛根、枳椇子为研究对象，选择具有代谢互补特性的复合菌系（乳酸菌 *Lactobacillus* sp.、醋酸菌 *Acetobacter* sp.、酵母菌 *Saccharomyces* sp.）进行发酵，该菌系中乳酸菌主导有机酸合成并降低 pH，酵母菌产乙醇及高级醇类，醋酸菌则催化乙醇氧化为乙酸并参与酯化反应，该组合在药食同源基质发酵中已被证实可协同提升风味复杂度与功能活性[13−14]，通过酶解（纤维素酶）联合微生物发酵技术进行处理，系统分析其活性成分动态变化及功能活性，为药食同源发酵产品的开发提供了科学依据。鉴于菌酶协同处理的复杂性，该研究旨在通过设置酶解后发酵（M 组）与直接发酵（S 组）的对比，初步探讨纤维素酶预处理对后续微生物发酵过程及最终发酵品质（包括活性成分与风味）的影响，以明确是否存在协同增效作用，并为后续优化酶解与发酵工艺参数提供基础数据与理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

微生物菌种（乳酸菌 *Lactobacillus* sp. R-1、醋酸菌 *Acetobacter* sp. C-1、酵母菌 *Saccharomyces* sp. J-1） 保存于四川省农业科学院农产品加工研究所功能食品研究中心；赶黄草、葛根、枳椇子、红茶叶 市售；纤维素酶（10000 U/g） 广东广泰食品科技；乙腈、甲醇（色谱纯）、2,2-联苯基-1-苦基肼基（2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl, DPPH）、2,2'-联氮基双-（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）（2,2'-Azino-bis（3-ethyl-

benzothiazoline-6-sulfonic acid, ABTS)(分析纯)、1-没食子酸酰葡萄糖、没食子酸、儿茶素、木麻黄素、葛根素等标准品(分析纯)　上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

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; DHG-9075A 电热恒温鼓风干燥箱　上海齐欣科学仪器有限公司; FY-250 粉碎机　永康市久品工贸有限公司; FDU-2110 冷冻干燥机　东京理化器械; KQ5200DE 型数控超声波清洗器　昆山市超声仪器有限公司; 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、8890-7000D GC-MS/MS　美国 Agilent 公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　培养基制备　茶汤培养基: 取红茶叶 1 g, 加入 100 mL 蒸馏水煮沸提取 30 min, 过滤, 补水至 100 mL, 再加入 10 g 白砂糖, 充分溶解, 得到茶汤培养基, 用于发酵菌剂制备。发酵培养基: 将干燥后的赶黄草(叶)、葛根、枳椇子进行粉碎, 过 60 目筛, 按照 1.5∶5∶1 的比例称取赶黄草粉、葛根粉、枳椇子粉共 20 g, 加入 1000 g 蒸馏水煮沸提取 60 min, 提取完成后补水至 1000 g, 再加入 100 g 白砂糖, 充分溶解, 得到培养基 S; 同上述步骤, 区别在于煮沸提取前先加入纤维素酶(0.5 g/L), 适宜温度下(55~70 ℃)酶解 30 min, 再进行相同步骤的煮沸提取, 最后得到培养基 M, 均用于发酵试验。

1.2.2　发酵菌剂制备　分别将活化后的乳酸菌、醋酸菌、酵母菌使用无菌生理盐水调整活菌数为 $10^7$ CFU/mL, 按照 1∶1∶1 的比例(总接种量 5%)接入茶汤培养基, 28 ℃, 150 r/min 条件下培养 24 h, 得到复合微生物发酵菌剂。

1.2.3　接种及取样方法　按照体积分数 5% 接种量将发酵菌剂接种于培养基 S 和培养基 M 中, 置于 28 ℃ 培养箱静止发酵 7 d, 发酵 3、5、7 d 时对发酵液进行取样。

1.2.4　样品分组设计及后处理　将培养基 S 组发酵 3、5、7 d 的样品组分别命名 S3D、S5D、S7D, 未发酵组即对照组命名为 SCK; 将培养基 M 组发酵 3、5、7 d 的样品组分别命名 M3D、M5D、M7D, 未发酵组命名为 MCK。发酵完成后对样本进行冷冻干燥处理(升华温度为 35 ℃、预冻温度为−80 ℃, 真空度 1 Pa, 隔板温度 20 ℃, 干燥时间 36~48 h)。取冻干样本 1 g(精确至 0.01 g), 加入 10 mL 体积分数 80% 甲醇, 充分溶解, 以 40 ℃ 超声处理 30 min, 再以 6000 r/min 离心 15 min, 收集上清液, 以相同方法重复提取 2 次并合并上清液, 使用体积分数 80% 甲醇定容至 50 mL, 4 ℃ 保存, 备用。

1.2.5　发酵复方提取液的多酚类化合物测定　参照向卓亚等[15] 方法并稍作修改, 取 1.2.4 中得到的提取液, 过 0.22 μm 有机滤膜过滤至进样瓶。称取 1-没食子酸酰葡萄糖、没食子酸、儿茶素、木麻黄素、葛根素、表儿茶素、表儿茶素等共计 19 个标准品各 20 mg, 使用甲醇溶解并定容至 10 mL 作为标准品母液, 以二倍稀释法配制不同质量浓度梯度(10~200 μg/mL)的标准溶液。

色谱条件: 色谱柱, Poroshell 120 PFP(4.6 mm×100 mm, 2.7 μm); DAD 检测器, 检测波长 254、280、290、350 nm; 柱温 30 ℃; 进样量 5 μL; 流速 0.8 mL/min; 流动相: A 相为体积分数 0.1% 的甲酸水溶液, B 相为乙腈。梯度洗脱程序: 0~10 min, 5%~10% B; 10~15 min, 10%~20% B; 15~20 min, 20%~35% B; 20~30 min, 35%~75% B; 30~32 min, 75%~95% B。

定性定量方法: 目标化合物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。

1.2.6　发酵复方提取液的总多酚(TPC)和总黄酮(TFC)测定　TPC 测定参照文献 [15] 方法。将提取液稀释至适当浓度(5 mg/mL), 取 1 mL 稀释液和 1 mL 福林酚溶液(2 mol/L)混合反应 5 min, 加入 8 mL 质量分数 5% 的 $Na_2CO_3$, 涡旋, 室温条件下暗处放置 60 min, 以充分反应, 于波长 765 nm 处测定吸光度。样品中的总多酚含量以没食子酸当量(mg GAE/g)表示; 同时以不同没食子酸质量浓度(μg/mL)为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制标准曲线 y=0.0041x+0.3956, $R^2$=0.9997。根据标准曲线及稀释倍数即可计算样液中总多酚含量。

TFC 测定参照文献 [15] 方法。将提取液稀释至适当浓度(5 mg/mL), 取 0.2 mL 提取液和 0.15 mL 质量分数 5% $NaNO_2$ 混合, 室温条件下暗处反应 6 min, 加入 0.15 mL 质量分数 10% $AlCl_3·6H_2O$, 室温反应 5 min, 最后加入 1 mL NaOH(1 mol/L), 于波长 510 nm 处测定吸光度。总黄酮含量以芦丁当量(mg RE/g)表示; 同时以不同芦丁质量浓度(μg/mL)为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制标准曲线 y=0.0006x+0.051, $R^2$=0.9994。根据标准曲线及稀释倍数计算样液中总黄酮含量。

1.2.7　发酵复方提取液抗氧化活性测定

1.2.7.1　铁离子还原力(FRAP)测定　参照文献 [16] 方法。将提取液稀释为不同浓度备用(0.01、0.025、0.05、0.10、0.25、0.50、1.0、2.5 mg/mL), 取 40 μL 稀释液和 260 μL FRAP 工作液(0.3 mol/L 醋酸钠溶液(pH3.6)、10 mmol/L 三吡啶基三嗪(TPTZ)与 20 mmol/L $FeCl_3$ 按照体积比 10∶1∶1 混合即得), 轻轻振荡混匀, 在 37 ℃ 条件下水浴 30 min, 于波长 593 nm 处测定吸光度。铁离子还原能力以水溶性维生素 E(Trolox)当量(mg TE/g)表示; 以不同 Trolox 溶液质量浓度(μg/mL)为横坐标, 吸光度为纵坐标, 得到标准曲线 y=0.0201x+0.0875, $R^2$=0.9991。根据

标准曲线计算测定液中 Trolox 当量。

1.2.7.2 DPPH 自由基清除能力测定 参照文献 [17] 方法，并稍作修改。将提取液稀释为不同浓度备用（0.05、0.10、0.25、0.50、1.0、2.5 mg/mL），取待测液 100 μL，加入 100 μL DPPH 溶液（128.50 μg/mL，体积分数 80% 的甲醇溶液为溶剂），室温反应 30 min 后，于波长 517 nm 处测定吸光度（$A_s$）。使用体积分数 80% 甲醇溶液替代样液为空白组（$A_0$），使用体积分数 80% 甲醇溶液替代 DPPH 溶液为对照组（$A_e$），同时以维生素 E（Trolox）为阳性对照。DPPH 自由基清除率计算见式（1）。

$$\text{DPPH自由基清除率} = \left(1 - \frac{A_s - A_e}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式（1）}$$

式中：$A_s$ 为待测液或阳性组吸光度；$A_e$ 为对照组吸光度；$A_0$ 为空白组吸光度。

1.2.7.3 $ABTS^+$ 自由基清除能力测定 参考文献 [17] 方法，并稍作修改。取 7 mmol/L ABTS 溶液和 2.45 mmol/L $K_2S_2O_8$ 溶液各 10 mL，室温避光放置 16 h，得到 ABTS 储备液；将 ABTS 储备液用体积分数 80% 甲醇溶液稀释，使得此溶液的吸光度在波长 734 nm 处为 0.70±0.02，得到 ABTS 工作液。将提取液稀释为不同浓度备用（0.05、0.10、0.25、0.50、1.0、2.5 mg/mL），取待测液 40 μL，加入 160 μL ABTS 工作液，室温反应 6 min，于波长 734 nm 处测定吸光度（$A_r$）。使用体积分数 80% 甲醇溶液替代样液为空白组（$A_1$），使用体积分数 80% 甲醇溶液替代 ABTS 溶液为对照组（$A_h$），同时以 Trolox 为阳性对照。$ABTS^+$ 自由基清除率计算见式（2）。

$$ABTS^+\text{自由基清除率} = \left(1 - \frac{A_r - A_h}{A_l}\right) \times 100 \quad \text{式（2）}$$

式中：$A_r$ 为待测液或阳性组吸光度；$A_h$ 为对照组吸光度；$A_1$ 为空白组吸光度。

1.2.8 α-葡萄糖苷酶抑制活性测定 参考文献 [18] 方法。取 40 μL 不同浓度（0.01、0.025、0.05、0.10、0.25、0.50、1.0、2.5、5.0 mg/mL）的待测液和 30 μL α-葡萄糖苷酶溶液（0.5 U/mL，需预实验确定合适的酶使用浓度），轻轻振荡混匀，37 ℃ 恒温水浴 10 min，加入 30 μL 5 mmol/L 的对硝基苯-β-D-半乳糖苷（pNPG），混匀，37 ℃ 恒温水浴 30 min 后加入 100 μL 的 1 mol/L $Na_2CO_3$ 溶液，于波长 405 nm 处测吸光度 $A_a$，以阿卡波糖为阳性对照品。α-葡萄糖苷酶活性抑制率计算见式（3）。

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率} = \left(1 - \frac{A_a - A_b}{A_c - A_d}\right) \times 100 \quad \text{式（3）}$$

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酶溶液的吸光度；$A_c$ 为磷酸盐缓冲液替代样品的吸光度；$A_d$ 为磷酸盐缓冲液替代样品和酶溶液的吸光度。

1.2.9 复方发酵液的挥发性风味物质测定 参考 Ruan 等[19] 方法，适当修改。取复方发酵液 2 mL 置于 15 mL 的顶空瓶中，同时加入 20 μL 内标溶液（正己烷，10 μg/mL）和 1 mL 饱和 NaCl 溶液，将顶空瓶置于 60 ℃ 水浴锅中恒温 5 min，使用 120 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头插入样品顶空瓶，顶空萃取 15 min，于 250 ℃ 解析 5 min，然后进行 GC-MS 分离鉴定。

GC 条件：DB-5MS（30 m×0.25 mm×0.25 μm）色谱柱，载气为高纯氦气（纯度不小于 99.999%），恒流流速 1.2 mL/min，进样口温度 250 ℃。程序升温：40 ℃ 保持 3.5 min，以 10 ℃/min 升至 100 ℃，再以 7 ℃/min 升至 180 ℃，最后以 25 ℃/min 升至 280 ℃，保持 5 min。MS 条件：传输线温度 280 ℃；离子源为电子轰击源（EI 源）；离子源温度 230 ℃；四极杆温度 150 ℃；电子能量 70 eV；扫描模式为全扫描（Full Scan）；质量扫描范围（m/z）为 35~500。

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相对含量以“μg/mL 样品，以内标当量计”表示，计算公式如下：

$$\text{目标化合物相对含量}(\mu g/mL) = \frac{B_h}{B_f} \times \frac{C_f \times V_f}{M_i} \quad \text{式（4）}$$

式中：$B_h$ 为目标化合物的色谱峰面积；$B_f$ 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）。

气味活性值（OAV）可由物质在样本中的浓度（Ci）比上物质的嗅觉阈值（Ti）获得，即 Ci/Ti。

1.2.10 感官品评 参照文献 [20]，并针对液态发酵复方的特性进行修改。审评员（n=12，6 男 6 女，年龄 25~40 岁）均经过专业培训，熟悉发酵饮的风味特征且感官灵敏度测试合格。审评前，将离心并灭菌后的发酵液置于品鉴杯中，由审评员独立进行盲评（样品随机编号），评价标准见表 1。

### 1.3 数据处理

所有试验均独立重复 3 次，实验结果以平均值±标准差表示。使用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理和初步计算。采用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA）和组间显著性检验。使用 Origin 2022 和 GraphPad Prism 10.1.2 软件进行图形绘制。通过迈维云平台（https://cloud.metware.cn）对挥发性代谢物分析。为有效区分不同发酵处理组间挥发性代谢物的整体差异并筛选关键差异代谢物，进行了正交偏最小二乘法判别

分析（Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA）。

表 1　样液感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria of sample solutions

| 感官项目 | 评分标准 | 得分 |
|---|---|---|
| 色泽（10分） | 色泽透亮，呈现药材发酵后特有的稳定色泽，无杂色 | 8~10 |
| | 色泽较均匀，但光泽略暗或轻微浑浊 | 4~7 |
| | 色泽暗淡，有明显浑浊或分层现象或色泽异常 | 0~3 |
| 气味（30分） | 具有浓郁的药材特征香气（如赶黄草的草本清香）与发酵特有的醇香，无杂味 | 25~30 |
| | 香气较明显，但醇香或药材香稍弱 | 15~24 |
| | 香气平淡，或有轻微发酵酸味、霉味 | 10~14 |
| | 有明显异味（如硫臭、焦糊味）或刺激性气味 | 0~9 |
| 滋味（40分） | 口感协调，保留药材特有风味（如葛根甘甜、赶黄草微苦），发酵酸味适中，无涩感 | 30~40 |
| | 滋味较协调，但酸味或苦味略突出 | 20~29 |
| | 酸苦味失衡，或有轻微金属味、涩感 | 11~19 |
| | 滋味混杂，有明显发酵失败导致的腐败味或刺激性异味 | 0~10 |
| 口感（10分） | 口感清爽，细腻润滑 | 8~10 |
| | 口感不清爽，稍细腻顺滑 | 5~7 |
| | 口感粗糙 | 0~4 |
| 风格与协调性（10分） | 风格独特，药香与发酵风味融合自然 | 8~10 |
| | 风格较明显，但某一方面（如酸度）稍显突兀 | 5~7 |
| | 风味单一，或与传统药材特性脱节 | 0~4 |

## 2　结果与分析

### 2.1　发酵复方提取液中多酚类物质分析

该研究对样品中多酚类物质定性定量分析共计 19 个，测定结果如表 2 所示。分析表明，各组样品中活性化合物主要为葛根素（189.99~250.43 μg/mL）、阿福豆苷（30.38~44.34 μg/mL）、赶黄草苷 A（28.50~86.95 μg/mL）、1-没食子酸酰葡萄糖（14.47~22.50 μg/mL）、二氢杨梅素（13.67~20.48 μg/mL）等，没食子酸（6.19~8.39 μg/mL）、木麻黄素（5.44~6.03 μg/mL）等含量相对较低，其次为芦丁（0.30~0.53 μg/mL）、异槲皮苷（0.69~1.30 μg/mL）、山奈酚-3-O-芸香糖苷（0.97~2.55 μg/mL）等。

对比 MCK 与 SCK，纤维素酶处理显著促进了部分结合态物质的释放。酶解后葛根素含量由 234.18 μg/mL（SCK）提升至 250.43 μg/mL（MCK）（$P<0.05$），可能是纤维素酶通过破坏植物细胞壁的纤维网状结构，释放了更多结合态异黄酮[21]；表儿茶素在此过程生成量达 41.16 μg/mL。同时，酶解导致大豆苷含量减少 94.45%（从 7.57 μg/mL 降至 0.42 μg/mL），分析是糖苷键被纤维素酶水解为苷元[22]。此外，MCK 组赶黄草苷 A 含量较 SCK 组提高 18.67%，表明酶解可能部分裂解赶黄草苷 A 的前体大分子，释放游离苷类[8]。

在发酵过程中，活性成分呈现差异性波荡变化：葛根素在 S 组中随发酵时间延长呈波动下降趋势（SCK: 234.18→S7D: 214.16 μg/mL），相似的，MCK 发酵后减少 2.26%（发酵末期含量回增），表明乳酸菌与酵母菌可能通过分泌糖苷酶催化其脱糖基化，生成大豆苷元等小分子产物[23]。赶黄草苷 A 在 SCK 组中含量由 73.26 μg/mL 降至 28.50 μg/mL（S7D），MCK 组由 86.95 μg/mL 降至 44.23 μg/mL（S7D），可能与其被微生物氧化裂解为二氢杨梅素等简单酚酸有关[24]。此外，异槲皮苷在 SCK、MCK 组未检出，发酵终产物增加至 0.69~1.15 μg/mL，可能源于芦丁的脱鼠李糖基化反应[25]。发酵后期，微生物代谢减缓或底物耗尽，部分成分（如葛根素、槲皮素）因合成-降解平衡而出现含量回升。纤维素酶预处理通过促进

表 2　发酵复方提取液中多酚化合物含量（μg/mL）

Table 2　Content of polyphenol compounds in fermented compound extract (μg/mL)

| 化合物名称 | 检测波长（nm） | 保留时间（min） | SCK | S3D | S5D | S7D | MCK | M3D | M5D | M7D | 标准曲线 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1-没食子酸酰葡萄糖 | 280 | 2.122 | 21.98±0.07$^{b}$ | 20.09±0.02$^{c}$ | 19.60±0.06$^{c}$ | 22.50±0.02$^{a}$ | 17.95±0.06$^{e}$ | 14.47±0.02$^{g}$ | 16.17±0.02$^{f}$ | 18.79±0.02$^{d}$ | y=1.3142x+5.4697 |
| 没食子酸 | 280 | 2.947 | 7.16±0.00$^{c}$ | 7.05±0.01$^{cd}$ | 6.19±0.01$^{f}$ | 6.91±0.05$^{d}$ | 8.12±0.01$^{b}$ | 6.52±0.02$^{e}$ | 7.05±0.01$^{cd}$ | 8.39±0.03$^{a}$ | y=15.232x−104.36 |
| 儿茶素 | 280 | 8.393 | 4.31±0.03$^{a}$ | 4.03±0.05$^{b}$ | 3.43±0.02$^{de}$ | 3.65±0.03$^{d}$ | 4.24±0.03$^{a}$ | 3.59±0.03$^{d}$ | 3.26±0.03$^{e}$ | 3.82±0.03$^{c}$ | y=1.7993x−9.0296 |
| 木麻黄素 | 280 | 10.241 | 5.89±0.23$^{ab}$ | 6.03±0.26$^{a}$ | 5.47±0.04$^{c}$ | 5.88±0.26$^{ab}$ | 5.42±0.02$^{c}$ | 5.59±0.05$^{bc}$ | 5.44±0.05$^{c}$ | 5.70±0.05$^{b}$ | y=4.2907x−227.18 |
| 葛根素 | 250 | 10.926 | 234.18±0.16$^{c}$ | 214.76±0.01$^{d}$ | 189.99±0.1$^{f}$ | 214.16±0.54$^{d}$ | 250.43±24.49$^{a}$ | 202.17±0.01$^{e}$ | 204.49±0.58$^{e}$ | 244.77±0.08$^{b}$ | y=1.8655x+81.093 |
| 表儿茶素 | 280 | 11.440 | \ | \ | \ | \ | 41.16±0.23$^{a}$ | 24.16±0.08$^{b}$ | 20.84±0.01$^{c}$ | 24.45±0.32$^{b}$ | y=1.9011x−19.069 |
| 二氢杨梅素 | 290 | 12.847 | 20.48±0.04$^{a}$ | 18.81±0.03$^{b}$ | 15.52±0.02$^{d}$ | 18.06±0.04$^{b}$ | 19.82±0.01$^{ab}$ | 14.5±0.06$^{e}$ | 13.67±0.05$^{f}$ | 17.84±0.05$^{c}$ | y=7.3342x+151.41 |
| 大豆苷 | 254 | 14.12 | 7.57±0.01$^{a}$ | 5.78±0.00$^{c}$ | 6.14±0.00$^{b}$ | 7.14±0.01$^{ab}$ | 0.42±0.00$^{d}$ | 0.21±0.00$^{f}$ | 0.19±0.00$^{f}$ | 0.34±0.00$^{e}$ | y=9.0139x+31.036 |
| 芦丁 | 254 | 16.313 | 0.30±0.01$^{c}$ | 0.50±0.00$^{a}$ | 0.49±0.00$^{a}$ | 0.53±0.00$^{a}$ | 0.34±0.00$^{c}$ | 0.43±0.00$^{b}$ | 0.47±0.01$^{ab}$ | 0.52±0.00$^{a}$ | y=5.1845x−3.7347 |
| 异槲皮苷 | 254 | 16.759 | \ | 1.13±0.00$^{b}$ | 1.30±0.03$^{a}$ | 0.69±0.01$^{c}$ | \ | 0.97±0.01$^{b}$ | 0.96±0.02$^{b}$ | 1.15±0.00$^{b}$ | y=6.6006x−14.635 |
| 山奈酚-3-O-芸香糖苷 | 350 | 17.224 | 2.07±0.05$^{b}$ | 2.55±0.02$^{a}$ | 1.75±0.00$^{c}$ | 1.95±0.01$^{b}$ | 1.15±0.03$^{d}$ | 0.97±0.00$^{d}$ | 1.08±0.03$^{d}$ | 1.13±0.00$^{d}$ | y=1.8634x−3.7121 |
| 紫云英苷 | 350 | 17.635 | 5.72±0.00$^{a}$ | 5.42±0.00$^{c}$ | 4.11±0.00$^{g}$ | 4.88±0.01$^{e}$ | 5.62±0.00$^{b}$ | 4.38±0.01$^{f}$ | 3.76±0.00$^{h}$ | 5.1±0.01$^{d}$ | y=5.3597x−5.2787 |
| 阿福豆苷 | 254 | 17.85 | 41.69±0.01$^{b}$ | 39.19±0.09$^{c}$ | 31.51±0.01$^{f}$ | 36.83±0.05$^{d}$ | 44.34±0.01$^{a}$ | 33.14±0.01$^{e}$ | 30.38±0.02$^{f}$ | 39.69±0.01$^{c}$ | y=4.3082x−11.461 |
| 乔松素-7-O-葡萄糖苷 | 280 | 18.801 | 1.94±0.01$^{a}$ | 1.86±0.01$^{b}$ | 1.47±0.01$^{d}$ | 1.75±0.01$^{c}$ | 1.92±0.00$^{a}$ | 1.47±0.00$^{d}$ | 1.29±0.00$^{e}$ | 1.77±0.00$^{c}$ | y=5.1296x−0.7974 |
| 槲皮素 | 254 | 19.818 | 1.60±0.01$^{a}$ | 1.38±0.08$^{c}$ | 1.17±0.08$^{d}$ | 1.45±0.00$^{b}$ | 1.31±0.04$^{c}$ | 1.03±0.00$^{e}$ | 0.84±0.00$^{f}$ | 1.22±0.00$^{d}$ | y=6.5491x−27.581 |
| 山奈酚 | 350 | 20.737 | 0.86±0.00$^{c}$ | 0.98±0.04$^{b}$ | 0.45±0.00$^{e}$ | 0.71±0.00$^{d}$ | 1.33±0.04$^{a}$ | 0.86±0.00$^{c}$ | 0.41±0.01$^{e}$ | 0.99±0.01$^{b}$ | y=7.8365x−20.653 |
| PGHG | 280 | 22.226 | 2.59±0.32$^{c}$ | 3.41±0.04$^{a}$ | 0.8±0.05$^{f}$ | 1.69±0.11$^{e}$ | 3.18±0.03$^{b}$ | 2.36±0.03$^{c}$ | 0.69±0.01$^{f}$ | 2.27±0.03$^{d}$ | y=3.9848x−4.8992 |
| 乔松素 | 280 | 23.944 | 0.21±0.02$^{g}$ | 1.04±0.01$^{d}$ | 0.38±0.01$^{f}$ | 0.68±0.00$^{e}$ | 1.21±0.02$^{c}$ | 1.43±0.01$^{b}$ | 0.68±0.02$^{e}$ | 1.66±0.00$^{a}$ | y=8.1363x−3.4096 |
| 赶黄草苷A | 280 | 24.216 | 73.26±1.51$^{b}$ | 58.79±0.64$^{d}$ | 38.89±1.16$^{f}$ | 28.50±0.31$^{g}$ | 86.95±0.57$^{a}$ | 67.86±0.69$^{c}$ | 44.33±0.21$^{e}$ | 44.23±0.54$^{e}$ | y=3.9471x−16.577 |

注："\"代表未检出；同行上标不同字母代表存在显著性差异，$P<0.05$，表3、表4同。

植物细胞壁释放结合态活性成分，为微生物发酵提供可转化底物；而复合菌群通过分泌 β-葡萄糖苷酶等代谢酶，进一步将苷类转化为苷元，同时可合成酯类、醇类等风味物质，形成酶解-发酵协同增效机制。

### 2.2 总多酚、总黄酮含量分析

测定不同组在发酵过程中总多酚含量变化，如图 1(A)所示，S 组在发酵期间 TPC 含量呈波荡性变化，于发酵第 3 d 达到峰值(730.29±27.63 μg/mL)，随后含量下降，至发酵结束(第 7 d)时 TPC 含量显著下降。反之，M 组 TPC 含量呈先下降后上升的趋势，在发酵前 5 d 显著降低，之后略有回升。这一先降后升的趋势可能与微生物代谢活动的阶段性激活及底物利用的动态平衡有关[26]。值得注意的是，在整个发酵过程中，M 组的 TPC 含量始终低于 S 组，这可能是由于 M 组中微生物的代谢活动更为活跃，导致了对多酚类物质的转化或利用。

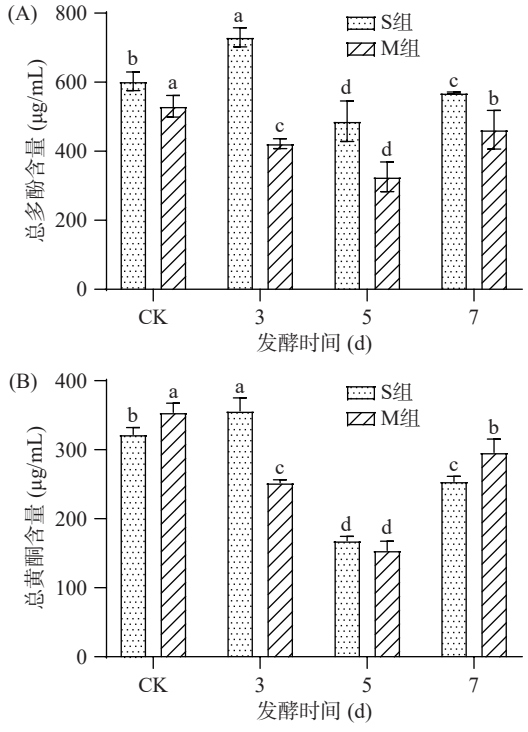



图 1 样品不同阶段总多酚(A)和总黄酮(B)含量的变化

Fig.1 Changes of total polyphenol (A) and total flavonoid (B) contents in samples at different stages

注：组内不同小写字母表示存在显著性差异($P$<0.05)。

总黄酮的变化趋势如图 1(B)所示，S 组与 M 组 TFC 含量整体均呈下降趋势。S 组 TFC 含量在发酵第 3 d 时达到最高(356±19.04 μg/mL)，而 M 组的初始 TFC 最高。至发酵结束时，M 组的 TFC 含量(296±19.60 μg/mL)显著高于 S 组($P$<0.05)，高出约 16.54%。一个关键的共同发现是，两个发酵组的 TPC 和 TFC 含量均在发酵第 5 d 达到最低点，并在第 7 d 略有回升，这一现象提示最佳的发酵周期可能并非 7 d，有待进一步研究确定。

### 2.3 发酵复方提取液的抗氧化活性分析

2.3.1 铁离子还原能力 铁离子还原能力(FRAP)测定结果(图 2)表明，发酵处理能显著地增强样品的抗氧化能力。在样品浓度 0.01~1.0 mg/mL范围内，发酵 7 d 的样品(M7D, S7D)的 FRAP 值均显著高于其相应的未发酵对照组(MCK, SCK)($P$<0.05)。在低浓度(0.1 mg/mL)下，这种增强效应尤为突出，M7D 的活性(10.14±1.81 μg TE/mL)约为 MCK 的 3.86 倍，而 S7D 的活性(6.60±1.04 μg TE/mL)更是 SCK 的 4 倍以上，在所测样品中铁离子还原能力最高可达 76±1.43 μg/mL，这很可能源于发酵过程中微生物代谢将抗氧化前体物质转化为活性更高的小分子。

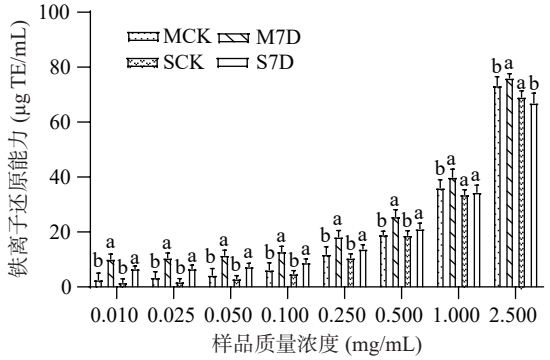



图 2 不同组样品铁离子还原能力

Fig.2 Reducing capacity of ferric ion in different sample groups

注：相同浓度下组内(M 或 S 组)不同小写字母表示存在显著性差异($P$<0.05)。

同时，酶解预处理也显示出一定的积极影响。未发酵的酶解组(MCK)活性始终高于未酶解组(SCK)。当与发酵联用时，“酶解-发酵”组(M7D)在大部分浓度下表现出最强的抗氧化活性，特别是在活性相对较低的 0.1 mg/mL 浓度下，其 FRAP 值仍高于其他各组。这表明酶解预处理可能通过提高底物可利用性，与发酵过程产生了协同增效作用。综上所述，“酶解-发酵”联用(M7D)是提升该复合物铁离子还原能力的最佳处理方式。

2.3.2 DPPH、$ABTS^+$自由基清除能力 DPPH 与 $ABTS^+$自由基清除能力测定结果(图 3)揭示了不同处理方式的差异化影响。对于 DPPH 自由基清除能力，发酵处理显示出明确的增强效果，其中经过酶解预处理后发酵的样品(M7D)清除能力最强($IC_{50}$=0.2447 mg/mL)，显著优于未发酵的酶解组(MCK)($P$<0.05)。这表明“酶解-发酵”联用对提升 DPPH 清除能力具有协同效应。然而，对于 $ABTS^+$自由基，酶解预处理的影响占主导地位。无论发酵与否，酶解组(MCK, M7D)的清除能力均优于未酶解组(SCK, S7D)，且未发酵的酶解组(MCK)活性最强，与发酵酶解组(M7D)无显著差异，其 $IC_{50}$ 值=0.3022 mg/mL。这可能因为酶解直接释放了大量能有效中和 $ABTS^+$自由基的抗氧化成分，而发酵对此途径的额外

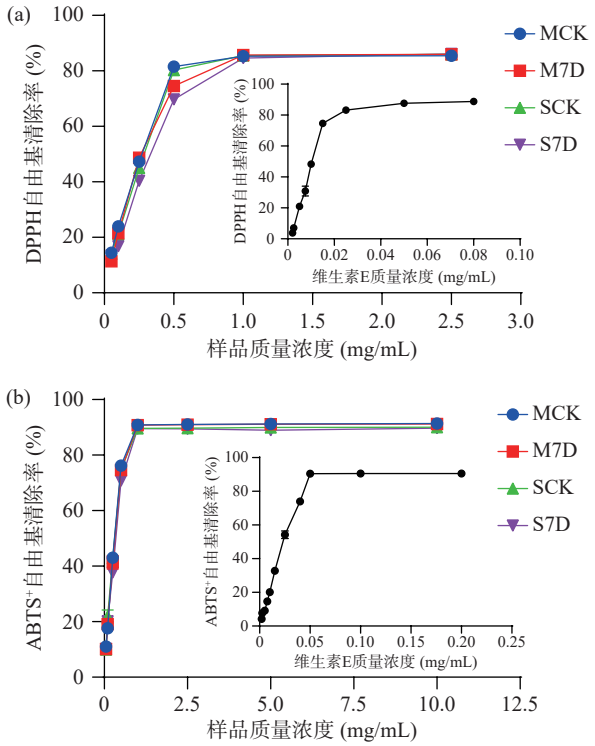



图 3　不同组样品 DPPH(a)、ABTS$^+$(b)自由基清除能力

Fig.3　Scavenging capacity of DPPH (a) and ABTS$^+$ (b) radical in different sample groups

贡献相对有限。两种自由基清除实验的不同结果，反映了样品中抗氧化成分的多样性与作用机制的差异性。总体而言，“酶解-发酵”联用(M7D)赋予了样品最均衡且强大的自由基清除能力，尤其是在 DPPH 模型中优势明显。

## 2.4　α-葡萄糖苷酶抑制能力分析

测定不同组样品对 α-葡萄糖苷酶抑制能力结果如图 4，结果为 SCK($IC_{50}$=0.0538 mg/mL)、MCK($IC_{50}$=0.0813 mg/mL)、M7D($IC_{50}$=0.0898 mg/mL)、S7D($IC_{50}$=0.1285 mg/mL)，组间均不具有显著性差异。发酵复方提取液对 α-葡萄糖苷酶抑制能力影响不明显，相较于 SCK 组，M7D 组保持良好的 α-葡萄糖苷酶抑制能力；尽管发酵组 α-葡萄糖苷酶抑制活性在数值上略有所降低，其活性仍优于多数报道的植物提取物[27−28]，表明发酵对降糖活性保留有效。相关文献报道，多糖、酚类鞣质类物质(如没食子酸、柯里拉京)、黄酮类(如芦丁、槲皮素、山奈酚)等物质均对 α-葡萄糖苷酶具有较好的抑制作用[29−30]，各样品组中含多种活性物质，对 α-葡萄糖苷酶具较好抑制能力。

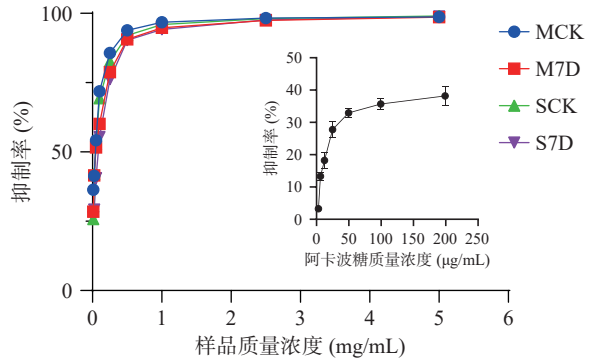



图 4　不同组样品 α-葡萄糖苷酶抑制能力

Fig.4　α-Glucosidase inhibitory activity of different sample groups

## 2.5　挥发性风味物质分析

本文利用 HS-SPME-GC-MS 对样品组的挥发性成分进行半定量分析，结果如表 3 所示。选取匹配度>80% 的物质为代表，在全部样本中共检测到 1337 种挥发性代谢物，包括醇类 120 种、醛类 85 种、酸类 73 种、酯类 247 种、酮类 150 种、萜类 256 种及其它共计 406 种。分析发现，SCK 和 MCK 组的核心风味物质包括醇类(11.59~11.75 μg/mL)、醛类(8.51~8.55 μg/mL)、酯类(13.94~14.00 μg/mL)、酮类(11.20~11.29 μg/mL)、萜类(17.36~17.40 μg/mL)、及杂环类物质(6.79~6.87 μg/mL)，SCK 和 MCK 组比较，酶解处理后挥发性代谢物未发生明显改变，而未发酵组(SCK、MCK)和发酵组(S7D、M7D)比较，风味成分存在显著差异($P$<0.05)。经复合微生物发酵，挥发性代谢物含量显著增加($P$<0.05)，其中醇类(S7D: 46.91 μg/mL, M7D: 38.88 μg/mL)、醛类(S7D: 28.88 μg/mL, M7D: 26.25 μg/mL)、酯类(S7D: 21.26 μg/mL, M7D: 20.48 μg/mL)等物质变化显著($P$<0.05)，与对照组 SCK 相比，发酵后的样品组醇类物质含量增加 230.89%~299.23%，醛类增加 207.02%~237.78%，酯类增加 46.29%~51.86%，由此可见微生物发酵对挥发性风味代谢物的产生具有重要作用。相关研究表明，乳酸菌可通过同型或异型乳酸发酵生成乳酸、乙酸、琥珀酸等有机酸，同时分泌酯酶和脂肪酶，催化酸与醇的酯化反应，形成酯类风味物质(如乳酸乙酯)[31−32]，酵母菌经酒精发酵将糖源物质转化为乙醇和二氧化碳，同时代谢产生高级醇

表 3　复方发酵液中挥发性物质含量(μg/mL)

Table 3　Content of volatile substances in compound fermentation broth (μg/mL)

| 物质种类 | 挥发性物质含量 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | SCK | MCK | S7D | M7D |
| 醇类 | 11.75±0.59$^c$ | 11.59±0.49$^c$ | 46.91±1.61$^a$ | 38.88±1.22$^b$ |
| 醛类 | 8.55±0.24$^c$ | 8.51±0.37$^c$ | 28.88±1.20$^a$ | 26.25±0.89$^b$ |
| 酸类 | 3.58±0.09$^c$ | 3.53±0.11$^c$ | 4.74±0.00$^a$ | 4.46±0.30$^b$ |
| 酯类 | 14.00±0.79$^c$ | 13.94±0.29$^c$ | 21.26±0.48$^a$ | 20.48±1.09$^b$ |
| 酮类 | 11.29±1.00$^b$ | 11.20±0.99$^b$ | 10.82±0.89$^c$ | 11.53±0.99$^a$ |
| 萜类 | 17.36±1.09$^b$ | 17.40±1.03$^b$ | 20.54±2.12$^a$ | 20.78±1.53$^a$ |
| 胺类 | 2.09±0.01$^c$ | 2.13±0.02$^c$ | 25.9±1.02$^a$ | 20.67±2.46$^b$ |
| 芳烃 | 0.27±0.02$^b$ | 0.27±0.04$^b$ | 0.39±0.00$^a$ | 0.38±0.05$^a$ |
| 酚类 | 1.85±0.01$^c$ | 1.89±0.04$^c$ | 3.37±0.01$^b$ | 7.06±0.68$^a$ |
| 醚类 | 1.21±0.06$^c$ | 1.23±0.02$^c$ | 2.69±0.01$^a$ | 2.45±0.42$^b$ |
| 卤代烃 | 0.25±0.01$^a$ | 0.27±0.04$^a$ | 0.26±0.00$^a$ | 0.26±0.05$^a$ |
| 烃类 | 3.99±0.02$^d$ | 4.25±0.11$^c$ | 6.79±0.10$^b$ | 7.22±0.10$^a$ |
| 杂环类 | 6.87±0.11$^c$ | 6.79±0.06$^c$ | 8.15±0.90$^b$ | 8.55±0.24$^a$ |

(如异戊醇、苯乙醇)、酯类(如乙酸乙酯)及醛类(如乙醛)等关键风味物质[33],而醋酸菌代谢产生的酸类物质进一步参与酯化反应,同时伴随挥发性酸类(如丙酸、丁酸)和酮类化合物合成[34]。该研究表明,通过微生物发酵与酶协同作用,显著提升了发酵样品中醇类、醛类及酯类等核心风味物质的含量,为优化发酵工艺、定向调控风味提供了理论依据。

基于气味活性值(OAV)的分析表明,发酵处理显著增强了样品的整体香气复杂度。发酵组(S7D 和 M7D)中 OAV>1 的关键风味物质数量(120~125 种)明显多于未发酵组(SCK 和 MCK,85~89 种),这证实微生物发酵是产生新风味化合物的主要驱动力。如表 4 所示,在未发酵组中,香气主要由酮类(如 $\beta$-紫罗兰酮)和醛类(如(E,Z)-2,6-壬二烯醛)物质主导,共同构成甜香与青香的基调[35]。相比之下,发酵处理新增了多种对香气有重要贡献的醇类和酯类物质。最为显著的是,苯乙醇(具花香、蜂蜜香)和乙酸异戊酯(具甜果香)等物质在发酵组中的 OAV 从

表 4 挥发性风味关键物质 OAV(OAV>1)

Table 4 OAV of key volatile flavor compounds (OAV>1)

| | 物质 | OAV | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | SCK | S7D | MCK | M7D |
| 醇类 | 苯乙醇 | 0.04±0.01$^{d}$ | 234.26±14.25$^{a}$ | 0.46±0.15$^{c}$ | 178.68±7.66$^{b}$ |
| | 1-庚烯-3-醇 | 0.09±0.00$^{c}$ | 2.42±0.04$^{a}$ | 0.08±0.01$^{c}$ | 1.62±0.07$^{b}$ |
| | 反式,顺式-2,6-壬二烯-1-醇 | 827.95±19.71$^{b}$ | 942.56±35.94$^{a}$ | 816.27±28.11$^{c}$ | 940.2±17.62$^{a}$ |
| | 二甲萘烷醇 | 8.32±0.36$^{b}$ | 13.09±0.45$^{a}$ | 8.65±0.05$^{b}$ | 13.95±0.47$^{a}$ |
| | 苯甲硫醇 | 639.93±21.81$^{d}$ | 652.79±6.6$^{c}$ | 673.82±113.3$^{b}$ | 778.69±27.97$^{a}$ |
| | 葑醇 | / | 34.10±3.16$^{a}$ | 0.05±0.01$^{c}$ | 26.37±1.05$^{b}$ |
| | 左旋龙脑 | 30.41±0.51$^{a}$ | 24.20±0.81$^{c}$ | 29.94±0.98$^{b}$ | 23.71±0.46$^{d}$ |
| 醛类 | 2-己烯醛 | 160.1±7.65$^{b}$ | 188.42±3.53$^{a}$ | 157.81±5.75$^{b}$ | 185.32±6.31$^{a}$ |
| | (E)-2-己烯醛 | 887.22±39.16$^{c}$ | 1037.91±19.46$^{a}$ | 872.89±29.1$^{d}$ | 1020.64±34.55$^{b}$ |
| | (E)-4-壬烯醛 | 0.52±0.19$^{d}$ | 5957.46±317.24$^{a}$ | 10.42±4.51$^{c}$ | 4454.58±154.81$^{b}$ |
| | (E,E)-2,6-壬二烯醛 | 87.97±2.09$^{a}$ | 70.98±2.53$^{b}$ | 85.88±2.46$^{a}$ | 70.88±1.76$^{b}$ |
| | 3-甲基戊醛 | 114.46±3.88$^{c}$ | 2257.02±146.79$^{b}$ | 111.84±7.7$^{c}$ | 2525.78±110.65$^{a}$ |
| | 8-壬烯醛 | 1678.19±23.19$^{a}$ | 1202.83±45.63$^{c}$ | 1647.69±42.22$^{a}$ | 1333.75±26.48$^{b}$ |
| | 4-甲氧基苯甲醛 | 181.92±0.93$^{a}$ | 155.38±5.71$^{c}$ | 176.46±2.56$^{b}$ | 150.33±2.64$^{c}$ |
| | 2-辛烯醛 | 121.3±14.66$^{b}$ | 161.78±13.57$^{a}$ | 114.6±9.57$^{c}$ | 167.8±5.62$^{a}$ |
| | (E,E)-2,4-壬二烯醛 | 77.06±10.73$^{c}$ | 99.63±9.44$^{b}$ | 70.83±5.32$^{d}$ | 115.68±18.91$^{a}$ |
| | 2-壬烯醛 | 333.6±12.81$^{a}$ | 275.65±9.6$^{d}$ | 323.84±10.91$^{b}$ | 281.04±4.63$^{c}$ |
| | (E)-2-壬烯醛 | 417±16.02$^{a}$ | 344.57±12$^{d}$ | 404.81±13.63$^{b}$ | 351.3±5.79$^{c}$ |
| | (Z,Z)-3,6-壬二烯醛 | 2033.31±26.03$^{a}$ | 1432.46±50.22$^{d}$ | 2012.89±51.38$^{b}$ | 1550.72±19.57$^{c}$ |
| | 2,4-壬二烯醛 | 246.58±34.34$^{c}$ | 318.81±30.20$^{b}$ | 226.65±17.03$^{d}$ | 370.18±60.5$^{a}$ |
| | (E,Z)-2,6-壬二烯醛 | 4398.4±104.72$^{a}$ | 3549.17±126.66$^{c}$ | 4293.91±123.23$^{b}$ | 3543.75±88.22$^{c}$ |
| 酸类 | 壬酸 | 0.05±0.05$^{c}$ | 43.56±25.86$^{a}$ | 0.02±0.00$^{c}$ | 28.93±1.09$^{b}$ |
| 酯类 | 顺式-3-己烯基异戊酸酯 | 23.12±0.4$^{a}$ | 19.93±0.68$^{c}$ | 22.56±0.78$^{b}$ | 19.40±0.39$^{c}$ |
| | 乙酸-2-戊酯 | 8.35±0.56$^{c}$ | 10.02±0.15$^{a}$ | 8.29±0.43$^{c}$ | 9.87±0.34$^{b}$ |
| | 丙酸己酯 | / | 17.7±1.05$^{a}$ | 0.06±0.05$^{c}$ | 13.44±0.57$^{b}$ |
| | 2-羟基苯甲酸丁酯 | 15.44±0.3$^{b}$ | 17.48±0.73$^{a}$ | 15.22±0.54$^{b}$ | 17.17±0.3$^{a}$ |
| | 2-甲基丁基乙酸酯 | 0.01±0.00$^{c}$ | 85.48±0.98$^{a}$ | 0.01±0.00$^{c}$ | 63.95±3.27$^{b}$ |
| | 月桂酸甲酯 | 11.66±0.17$^{c}$ | 13.42±2.15$^{b}$ | 11.41±0.40$^{c}$ | 14.26±1.08$^{a}$ |
| | 乙酸异戊酯 | 0.02±0.00$^{c}$ | 213.69±2.45$^{a}$ | 0.02±0.00$^{c}$ | 159.86±8.18$^{b}$ |
| | 3-甲基丁酸乙酯 | 45.34±2.1$^{b}$ | 52.08±2.70$^{a}$ | 45.74±1.24$^{b}$ | 53.21±2.12$^{a}$ |
| | 3-巯基乙酸酯 | 222.79±5.17$^{a}$ | 168.13±7.43$^{b}$ | 220.81±8.86$^{a}$ | 159.84±3.3$^{b}$ |
| 酮类 | 5-乙基-2(5H)-呋喃酮 | 10.62±0.16$^{a}$ | 8.12±0.21$^{b}$ | 10.44±0.21$^{a}$ | 7.79±0.21$^{b}$ |
| | 4-庚酮 | 64.41±2.56$^{c}$ | 75.06±1.14$^{a}$ | 63.2±1.86$^{c}$ | 73.77±2.46$^{b}$ |
| | 6-甲基-2-庚酮 | 218.79±2.16$^{a}$ | 166.3±5.04$^{c}$ | 216.56±4.37$^{b}$ | 156.28±3.12$^{d}$ |
| | (Z)-3-甲基-2-(2-戊烯基)-2-环戊烯-1-酮 | 22.59±1.01$^{d}$ | 29.34±0.78$^{a}$ | 24.01±1.43$^{c}$ | 28.36±0.39$^{b}$ |
| | 5-乙基-3-羟基-4-甲基-2(5H)-呋喃酮 | 392846.25±7526.05$^{a}$ | 387700.81±17822.93$^{b}$ | 378875.4±13723.37$^{d}$ | 383267.67±9233.36$^{c}$ |
| | 1-壬烯-3-酮 | 5556.39±706.8$^{c}$ | 6379.54±632.48$^{b}$ | 4824.89±316.18$^{d}$ | 7412.05±336.15$^{a}$ |
| | D-香芹酮 | 13.87±0.23$^{a}$ | 11.93±0.44$^{b}$ | 13.45±0.47$^{a}$ | 11.67±0.27$^{b}$ |
| | (E)-$\beta$-紫罗兰酮 | 1154.71±20.82$^{b}$ | 1072.52±64.18$^{d}$ | 1226.43±89.77$^{a}$ | 1084.83±50.85$^{c}$ |
| | $\beta$-紫罗兰酮 | 32991.65±594.91$^{b}$ | 30643.45±1833.74$^{d}$ | 35040.84±2564.86$^{a}$ | 30995.08±1452.99$^{c}$ |

注:OAV>1表示对整体风味有显著贡献,“/”表示未检出。

可忽略不计急剧上升至数百($P$<0.05)，这些典型发酵产物的生成极大地丰富了香气的果香与花香层次[36]。比较 M7D 与 S7D、MCK 与 SCK 可发现，经过酶解预处理的样品中，部分关键醛酮类物质的 OAV 存在细微但显著的差异($P$<0.05)，例如 M7D 中的 1-壬烯-3-酮含量最高。这表明酶解可能通过预先降解底物，为发酵微生物提供了不同的前体物质，从而微调了最终的风味轮廓。综合来看，“酶解-发酵”联用策略(M7D)在丰富香气物质种类和优化关键成分含量上效果最佳，证实该处理是提升产品风味品质的有效手段。

利用正交偏最小二乘法判别分析法(Partial Least Squares-Discriminant Analysis，OPLS-DA)对 4 个样本组进行展示，不同样本呈现显著分离(72.10%解释率)，说明不同处理方式使样品组挥发性代谢物发生显著变化。在此基础上，利用火山图对样品组差异挥发性代谢物进行多组比对分析，如图 5 所示。由图 5(a)展示结果显示，酶解处理后共计 184 个代谢物上调，仅有少数物质下调(24 个)，结合图 6(a)分析(仅展示显著变化 VIP 值前 15 个物质)，2-庚烯酸、D-马鞭草酮、2,6,6-三甲基-2,4-环庚二烯-1-酮、顺式-二氢香芹酮等代谢物显著上调，2-庚烯酸、荜澄茄油宁烯等代谢物显著下调。将发酵组 S7D、M7D 样品和 SCK 对比，挥发性代谢物组分发生较大变化，其中 4-甲氧基苯甲醇、4-甲基戊酸甲酯、乙酸异戊酯、2-甲基丁基乙酸酯等代谢物在 S7D 组显著上

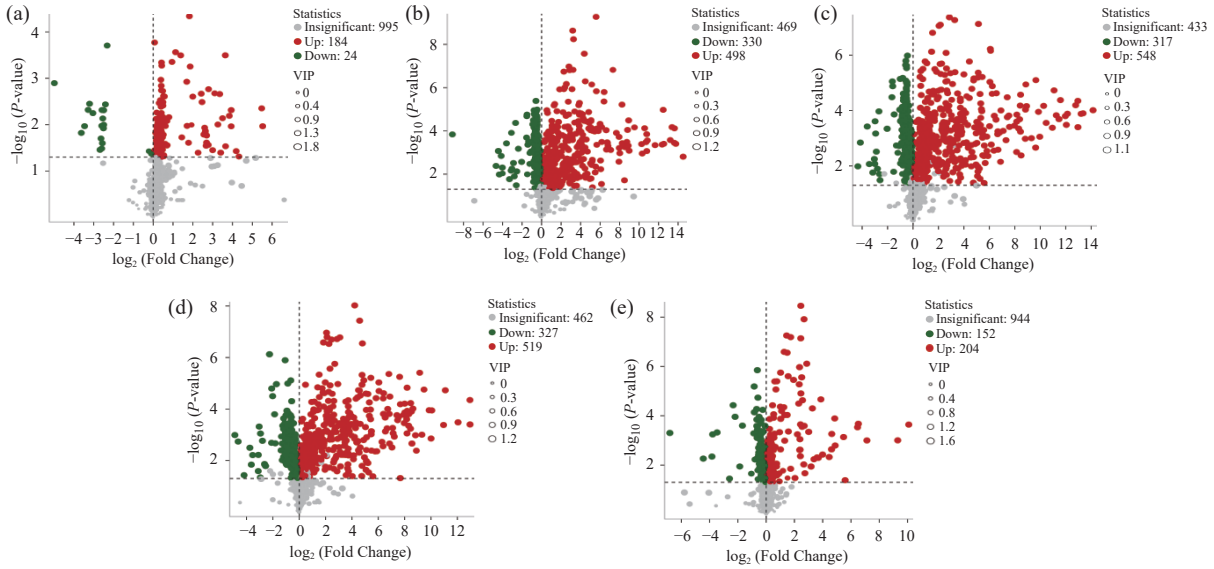



图 5　差异挥发性代谢物火山图

Fig.5　Volcano plot of differential volatile metabolites

注：(a)为 MCK vs. SCK；(b)为 S7D vs. SCK；(c)为 M7D vs. SCK；(d)为 M7D vs. MCK；(e)为 M7D vs. S7D。

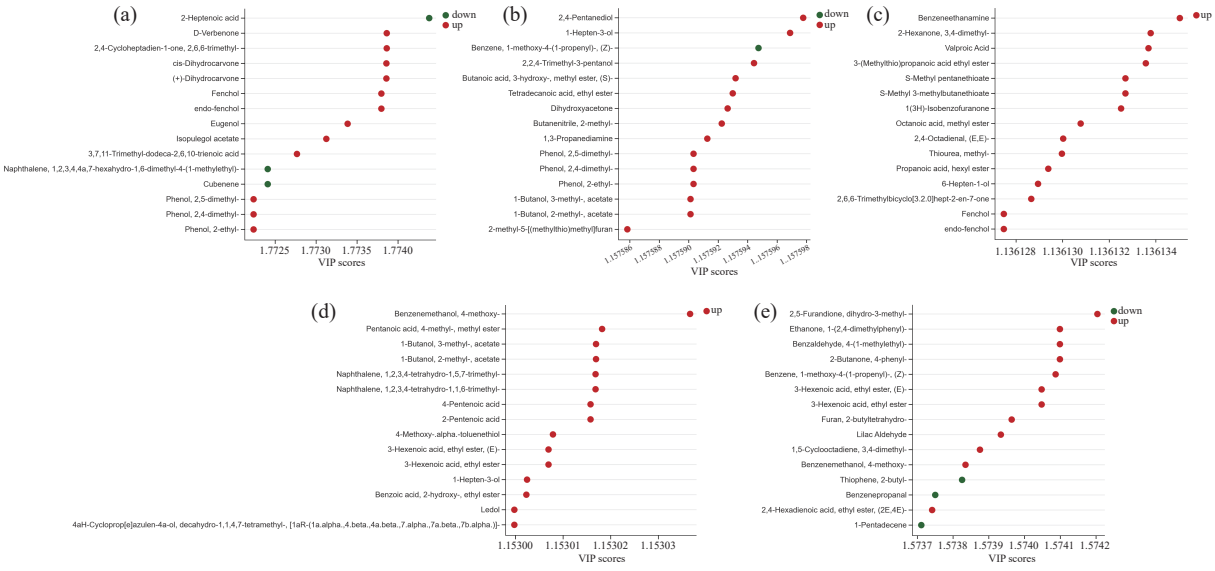



图 6　差异代谢物 VIP 值图

Fig.6　VIP score plot of differential metabolites

注：(a)为 MCK vs. SCK；(b)为 S7D vs. SCK；(c)为 M7D vs. SCK；(d)为 M7D vs. MCK；(e)为 M7D vs. S7D。

调，3,4-二甲基-2-己酮、2-丙基戊酸、3-(甲硫基)丙酸乙酯、S-戊硫代甲酯、S-3-甲基丁硫代甲酯、1(3H)-异苯并呋喃酮、辛酸甲酯等代谢物在 M7D 组显著上调，并发现酯类物质在发酵组的上调物质中最为突出。同时，对 M7D 和 MCK 组进行比较，共有 519 个代谢物上调(主要为醇类、酯类等物质，如 4-甲氧基苯甲醇、4-甲基戊酸甲酯、乙酸异戊酯、2-甲基丁基乙酸酯、3-己烯酸乙酯等)，327 个代谢物下调；M7D 和 S7D 两个发酵组对比分析，共有 204 个代谢物上调，152 个代谢物下调，两组差异代谢物主要集中在酮类、醛类等物质(如二氢-3-甲基-2,5-呋喃二酮、1-(2,4-二甲基苯基)乙酮、4-(1-甲基乙基)苯甲醛、4-苯基-2-丁酮等)，说明酶解发酵显著增加了酮、醛类物质积累，即酶解发酵方式更利于风味物质的形成。

### 2.6 感官品评

感官结果如图 7 所示。在色泽方面，未发酵组(SCK、MCK)颜色呈红褐色，得分较低(5~6 分)；经微生物发酵后，样品颜色明显变浅，呈浅绿色，S7D 与 M7D 组得分均提升至 8 分以上，表明发酵过程改善了产品色泽，更符合消费者对发酵饮品的视觉期待。在气味方面，SCK 具有较明显的药材固有气味及赶黄草清香，得分较低(14.2)；MCK 经酶解后药材气息略有减弱，呈清香(15.8)；而发酵处理显著丰富了香气组成，S7D 和 M7D 组得分大幅提高(22.6 和 26.5)，尤其 M7D 组表现出最佳风味协调性。该结果与其挥发性成分数据高度吻合：苯乙醇(ROAV=178.68)赋予其蜂蜜与花香底蕴，乙酸异戊酯(ROAV=159.86)提供清新果香，β-紫罗兰酮(ROAV=30995.08)则贡献温和的木质和花香基调，共同构成层次丰富、协调统一的香气特征。

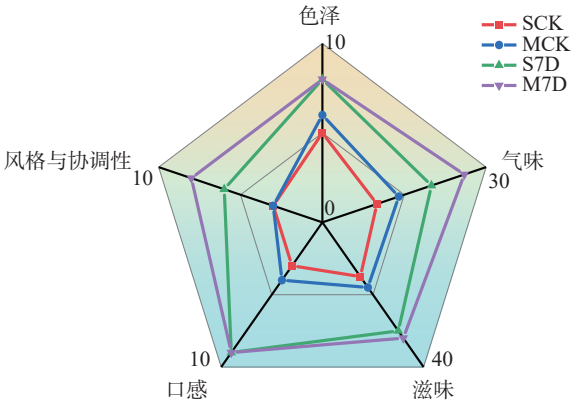



图 7 不同组样品感官品评分析

Fig.7 Sensory evaluation analysis of different sample groups

在滋味方面，未发酵组 SCK 和 MCK 具有较强药材本味，得分居中(25.5 和 26.3)；发酵后，S7D 与 M7D 组得分显著提升(32.5 和 36.4)，表明发酵有效改善了口感接受度。M7D 组滋味最佳，表现为酸味适中、甜苦协调、涩感减弱，原有药材风味与发酵产生的有机酸、醇类物质融合良好。在口感方面，发酵组(S7D、M7D)的得分(8.4、8.5)明显高于未发酵组(3.2、4.1)，说明发酵过程使饮品口感更趋清爽、细腻。最终，在整体风味协调性上，M7D 组获得最高分(8.2)，显著优于其他组别，证明酶解与发酵协同处理不仅保留了原料特性，更促进了药香、果香、发酵香的自然融合，形成了愉悦和谐的感官体验。

## 3 结论

本试验表明，酶解与微生物发酵协同处理可显著优化葛根-赶黄草-枳椇子复方的活性成分与风味品质。酶解预处理有效释放葛根素、阿福豆苷等活性物质；复合微生物发酵进一步促进赶黄草苷 A 等大分子转化为小分子酚酸，并显著提升抗氧化能力(FRAP 及 DPPH 清除率)。挥发性成分分析显示，发酵后醇、醛、酯类物质大幅增加，β-紫罗兰酮、乙酸异戊酯等关键风味物赋予体系优良果香与花香气。感官评价确认酶解发酵组(M7D)风味协调性最佳。该研究为药食同源发酵饮品的开发提供了有效策略，并为后续优化酶解与发酵工艺参数提供基础数据与理论依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

## 参考文献

[1] CHEN Y, LAI F, XU H, et al. Chinese herb pairs for cardiovascular and cerebrovascular diseases: Compatibility effects, pharmacological potential, clinical efficacy, and molecular mechanisms [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2025, 347: 119516.

[2] LI C, LI J, WANG Y. A review of *Gastrodia elata* bl.: Extraction, analysis and application of functional food[J]. Critical Reviews in Analytical Chemistry, 2024: 2397994.

[3] 周怡霞, 覃璐琪, 刁娆, 等. 药食同源植物中干预糖尿病的活性物质研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(11): 333−342. [ZHOU Y X, QIN L Q, DIAO R, et al. Research progress on bioactive compounds from medicinal and edible homologous plants for diabetes intervention[J]. Food Science, 2025, 46(11): 333−342.]

[4] 李清筱. 纤维素酶辅助提取马齿苋总黄酮工艺优化及抑菌分析研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(4): 131−139. [LI Q X. Optimization of cellulase-assisted extraction process and antibacterial analysis of total flavonoids from *Portulaca oleracea* L.[J]. China Food Additives, 2024, 35(4): 131−139.]

[5] 刘京, 李荣乔, 张胜楠, 等. 山楂多糖酶解法和水提法的工艺优化和比较[J]. 现代食品, 2024, 30(1): 65−70. [LIU J, LI R Q, ZHANG S N, et al. Process optimization and comparison of enzymatic hydrolysis and water extraction methods for hawthorn polysaccharides[J]. Modern Food, 2024, 30(1): 65−70.]

[6] AN G, WEI M, WANG Z, et al. Effects of enzymolysis method on the preparation of peptides from wheat flour[J]. Food Bioscience, 2022, 49: 101956.

[7] WANG L, DUAN H, JIANG J, et al. A simple and rapid infrared-assisted self enzymolysis extraction method for total flavonoid aglycones extraction from *Scutellariae radix* and mechanism exploration[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2017, 409(23): 5593−5602.

[8] LU X, LI X, ZHAO J. Improving enzymatic efficiency of β-

glucosidases in cellulase system by altering its binding behavior to the insoluble substrate during bioconversion of lignocellulose[J]. Bioresource Technology, 2024, 391: 129974.
[9] ZHOU X, ZHAO Y, DAI L, et al. Bacillus subtilis and bifidobacteria bifidum fermentation effects on various active ingredient contents in cornus officinalis fruit[J]. Molecules, 2023: 28.
[10] 陈凯, 魏平慧, 史琳. 葛根异黄酮类成分的药理作用研究进展[J]. 药物评价研究, 2022, 45(12): 2602−2610. [CHEN K, WEI P H, SHI L. Research progress on pharmacological effects of pueraria isoflavones[J]. Drug Evaluation Research, 2022, 45(12): 2602−2610.]
[11] 蔡煜涵, 龙敏娟, 于芷芩, 等. 赶黄草化学成分、药理活性及质量标志物预测分析[J]. 中成药, 2025, 47(2): 523−532. [CAI Y H, LONG M J, YU Z Q, et al. Chemical constituents, pharmacological activities and predictive analysis of quality markers of *Penthorum chinense* Pursh[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2025, 47(2): 523−532.]
[12] 许多, 李双全, 李嘉茜, 等. 李双全教授基于“清泄法”论治酒精性肝病经验撷菁[J]. 山西中医药大学学报, 2023, 24(11): 1231−1235. [XU D, LI S Q, LI J Q, et al. Professor LI Shuangquan's experience in treating alcoholic liver disease based on the "Clearing and Purging Method"[J]. Journal of Shanxi University of Chinese Medicine, 2023, 24(11): 1231−1235.]
[13] 王欢, 张军, 白长胜, 等. 3 种复合益生菌发酵对玉米-豆粕型饲料的品质及营养指标的影响[J]. 饲料研究, 2024, 47(9): 127−131. [WANG H, ZHANG J, BAI C S, et al. Effects of three compound probiotics fermentation on the quality and nutritional indicators of corn-soybean meal feed[J]. Feed Research, 2024, 47(9): 127−131.]
[14] 马勇, 慕永利, 周硕, 等. 沙棘百香果复合饮料发酵工艺优化及抗疲劳特性研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(1): 141−147. [MA Y, MU Y L, ZHOU S, et al. Optimization of fermentation process and anti-fatigue properties of sea buckthorn passion fruit composite beverage[J]. China Brewing, 2025, 44(1): 141−147.]
[15] 向卓亚, 朱柏雨, 朱永清, 等. 赶黄草活性成分提取及不同部位成分分布对比[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 165−172. [XIANG Z Y, ZHU B Y, ZHU Y Q, et al. Extraction of bioactive compounds from *Penthorum chinense* Pursh and comparative analysis of their distribution in different plant parts[J]. Food and Machinery, 2024, 40(3): 165−172.]
[16] 梁红春, 夏陈, 邓俊琳, 等. 5 种处理方法对赶黄草功效成分、体外抗氧化性和抑菌活性的影响[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 134−141. [LIANG H C, XIA C, DENG J L, et al. Effects of five processing methods on functional components, *in vitro* antioxidant and antibacterial activities of *Penthorum chinense* Pursh[J]. Food and Machinery, 2025, 41(3): 134−141.]
[17] 罗棵濒, 邓俊琳, 向卓亚, 等. 金花藏茶醇提物不同极性部位的多酚成分及体外抗氧化和抗肿瘤活性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(13): 383−389. [LUO K B, DENG J L, XIANG Z Y, et al. Polyphenolic composition and *in vitro* antioxidant/anti-tumor activities of different polarity fractions from ethanol extracts of Jinhuazang tea[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(13): 383−389.]
[18] 杨月杭, 邱爱东, 夏陈, 等. 不同酸性溶剂提取黑青稞麸皮多酚及其体外抗氧化和降血糖活性[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(3): 34−40. [YANG Y H, QIU A D, XIA C, et al. Extraction of polyphenols from black highland barley bran using different acidic solvents and evaluation of their *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activities[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(3): 34−40.]
[19] RUAN W, LIU J, LI P, et al. Dynamics of microbial communities, flavor, and physicochemical properties during *Ziziphus jujube* vinegar fermentation: Correlation between microorganisms and metabolites[J]. Foods, 2022, 11(21): 3334.
[20] 曾习, 曾思敏, 龙维贞. 食品感官评价技术应用研究进展[J]. 中国调味品, 2019, 44(3): 198−200. [ZENG X, ZENG S M, LONG W Z. Research progress on the application of food sensory evaluation technology[J]. China Condiment, 2019, 44(3): 198−200.]
[21] 刘敏卓, 张小月, 张灵芝, 等. 竹茹总黄酮超声波处理与纤维素酶协同提取工艺优化及其体外抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 221−229. [LIU M Z, ZHANG X Y, ZHANG L Z, et al. Process optimization and *in vitro* antioxidant activity analysis of synergistic extraction of total flavonoids from bamboo shavings using ultrasonic-assisted cellulase treatment[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 221−229.]
[22] 李丹, 李晓磊, 李荣和. 纤维素酶水解大豆异黄酮糖苷混合物的抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2008(8): 1−4. [LI D, LI X L, LI R H. Antioxidant activity of soybean isoflavone glycosides mixture hydrolyzed by cellulase[J]. Food Research and Development, 2008(8): 1−4.]
[23] 杜静, 王琪琪, 王云胜, 等. 冠突散囊菌发酵对葛根的活性物质和抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 121−125. [DU J, WANG Q Q, WANG Y S, et al. Effects of *Eurotium cristatum* fermentation on active substances and antioxidant activity of *Pueraria lobata*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 121−125.]
[24] 王帅, 宋奇, 范影, 等. 桑葚酵素发酵过程中理化指标及抗氧化活性的变化[J]. 中国酿造, 2022, 41(11): 84−88. [WANG S, SONG Q, FAN Y, et al. Changes in physicochemical indexes and antioxidant activity during fermentation of mulberry enzymolysis[J]. China Brewing, 2022, 41(11): 84−88.]
[25] 陈帅, 王慧竹, 薛健飞, 等. 响应面法优化超声提取野葛茎中葛根素的工艺[J]. 广东农业科学, 2015, 42(4): 60−66. [CHEN S, WANG H Z, XUE J F, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction process for puerarin from *Pueraria lobata* stems using response surface methodology[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015, 42(4): 60−66.]
[26] ZHANG X Q, LIANG D, LIU N, et al. Preparation and characterization of resistant starch type 3 from yam and its effect on the gut microbiota[J]. TMR Traditional Medicine Research, 2022, 7(2): 11−19.
[27] 张继斌, 江丹, 王玉, 等. 不同桑叶提取物对 α-淀粉酶、α-葡萄糖苷酶和蔗糖酶的抑制作用研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(9): 146−153. [ZHANG J B, JIANG D, WANG Y, et al. Inhibitory effects of different mulberry leaf extracts on alpha-amylase, alpha-glucosidase and sucrase[J]. China Food Additives, 2024, 35(9): 146−153.]
[28] 黄本宸, 唐雅利, 李菊梅, 等. 青稞固态发酵产 1-脱氧野尻霉素工艺优化及其体外降糖能力研究[J]. 中国酿造, 2025, 44(5): 219−225. [HUANG B C, TANG Y L, LI J M, et al. Process optimization of 1-deoxynojirimycin production by highland barley solid-state fermentation and its *in vitro* hypoglycemic capacity[J]. China Brewing, 2025, 44(5): 219−225.]
[29] 王倩, 王娟, 傅金凤, 等. 青香蕉果肉多酚成分鉴定及其对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 61−68. [WANG Q, WANG J, FU J F, et al. Identification of polyphenols in green banana pulp and their inhibitory effects on α-amylase and α-glucosidase[J]. Food Science, 2024, 45(7): 61−

68. ］
［30］ 薛琛, 王怡婷, 刘芬芬, 等. 没食子酸衍生物抑制 α-葡萄糖苷酶的机理研究[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2023, 46(1): 74−80. ［XUE C, WANG Y T, LIU F F, et al. Mechanism of α-glucosidase inhibition by gallic acid derivatives[J]. Journal of Zhejiang Normal University (Natural Sciences), 2023, 46(1): 74−80. ］
［31］ YANG Y, LI H, XIA Y, et al. Unraveling physicochemical characteristics, microbial community structure and functional enzymes governing fatty acid ethyl esters formation during Chinese rice wine brewing[J]. LWT, 2024, 198: 116035.
［32］ 孙慧峰, 朱钧溢, 国立东, 等. 乳酸菌生物转化药食同源植物活性成分研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 474−481. ［SUN H F, ZHU J Y, GUO L D, et al. Research progress on bioactive components transformation of medicinal and edible homologous plants by lactic acid bacteria[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(7): 474−481. ］
［33］ XUE S, LIU J, LI X, et al. First natural yeast strain *Trichosporon asahii* HZ10 with robust flavonoid productivity and its potential biosynthetic pathway[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2023, 71(45): 17130−17140.
［34］ 谢锦明, 赵秀芳, 袁江兰, 等. 陕西民间醋醅中高产酸醋酸菌的筛选和发酵特性[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 173−178. ［XIE J M, ZHAO X F, YUAN J L, et al. Screening and fermentation characteristics of high acid-producing acetic acid bacteria from Shaanxi traditional vinegar fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(10): 173−178. ］
［35］ LIANG X, WANG Y, SHEN W, et al. Genomic and metabolomic insights into the selection and differentiation of bioactive compounds in citrus[J]. Molecular Plant, 2024, 17(11): 1753−1772.
［36］ 李玉铭, 王硕, 罗淮良, 等. 中药佛手风味的冷链发酵大头菜泡菜的研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(12): 266−274. ［LI Y M, WANG S, LUO H L, et al. Development of cold-chain fermented mustard tuber pickle with bergamot flavor[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(12): 266−274. ］