

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241215001

引用格式: 孟祥钰, 田源源, 任洪瑞, 等. 乳酸菌发酵黄芪的风味及活性成分分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 199–209.

MENG XY, TIAN YY, REN HR, *et al.* Analysis of flavor and active components of *Astragalus* fermented by lactic acid bacteria [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 199–209. (in Chinese with English abstract).

乳酸菌发酵黄芪的风味及活性成分分析

孟祥钰^{1,2}, 田源源^{1,2}, 任洪瑞^{1,2}, 于艳军³, 齐翠萍^{1,2}, 刘锐^{1,2*}

(1. 天津科技大学省部共建食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457; 2. 天津科技大学食品科学与工程学院, 天津 300457; 3. 天津海关工业产品安全技术中心, 天津 300308)

摘要: **目的** 采用 3 种不同乳酸菌对黄芪进行固态发酵, 并对发酵黄芪的活性成分、抗氧化性、风味物质和微观结构进行分析。**方法** 采用副干酪乳杆菌、短双歧乳杆菌和植物乳杆菌对黄芪固态发酵 6 d, 测定其活性成分含量(总酚和总黄酮)和抗氧化性{1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)阳离子[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) cation, ABTS⁺]、羟(hydroxyl, OH)自由基清除率和总还原力}, 利用电子鼻、气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)和气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)进行风味分析, 并通过扫描电子显微镜观察微观结构。**结果** 植物乳杆菌发酵黄芪(HB-MR)总酚和总黄酮含量最高, 分别达到 1.02 mg GAE/g 和 13.69 mg RE/g; HB-MR 抗氧化能力最高, DPPH、ABTS⁺、OH 自由基清除率和总还原力分别达到 74.44%、65.60%、67.49%和 0.54; 不同乳酸菌发酵后降低了黄芪原有的刺激性气味, 但具有不同的挥发性风味特征, 其中 HB-MR 中增加了酯类、酸类、烃类含量, 丰富了椰子香味; 同时乳酸菌发酵后黄芪表面附着颗粒物明显减少, 结构紧密。**结论** 乳酸菌发酵黄芪提高了其活性成分含量和抗氧化能力, 减少了黄芪原有的刺激性风味, 为以后产品开发提供了有益菌种和技术支撑, 也为后续探索复合菌剂研发积累了数据。

关键词: 乳酸菌; 黄芪; 发酵; 风味; 活性成分

Analysis of flavor and active components of *Astragalus* fermented by lactic acid bacteria

MENG Xiang-Yu^{1,2}, TIAN Yuan-Yuan^{1,2}, REN Hong-Rui^{1,2}, YU Yan-Jun³,
QI Cui-Ping^{1,2}, LIU Rui^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
2. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;
3. Technical Center for Safety of Industrial Products, Tianjin Customs, Tianjin 300308, China)

ABSTRACT: Objective To analyze the active components, antioxidant activities, flavor compounds, and

收稿日期: 2024-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972012, 32111530082)

第一作者: 孟祥钰(2005—), 女, 主要研究方向为食品质量与安全。E-mail: 2573311796@qq.com

*通信作者: 刘锐(1986—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为食品化学。E-mail: lr@tust.edu.cn

microstructure of *Astragalus* fermented by 3 kinds of different lactic acid bacteria. **Methods** *Astragalus* was solid-state fermented for 6 d using *Lactobacillus paracasei*, *Bifidobacterium breve*, and *Lactobacillus plantarum*. The content of active components including total phenols and total flavonoids, as well as antioxidant activities including 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH), 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) cation (ABTS⁺), hydroxyl (OH) free radical scavenging rates and total reducing power was determined. The flavor analysis was conducted using electronic nose, gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS). In addition, the microstructure was observed by scanning electron microscopy.

Results *Lactobacillus plantarum* fermented *Astragalus* (HB-MR) showed the highest content of total phenols and flavonoids, reaching 1.02 mg GAE/g and 13.69 mg RE/g, respectively. HB-MR also demonstrated the highest antioxidant capacity, with DPPH, ABTS⁺, OH free radical scavenging rates and total reducing power reaching 74.44%, 65.60%, 67.49% and 0.54, respectively. Different lactic acid bacteria fermentation reduced the original stimulating odor of *Astragalus*, with producing distinct volatile flavor characteristics. HB-MR increased the content of esters, acids, and hydrocarbons, enriching the coconut aroma. Additionally, the amounts of absorbed particles on *Astragalus* surface were obviously reduced with compact microstructure after lactic acid bacteria fermentation.

Conclusion Lactic acid bacteria fermentation enhances the active component content and antioxidant capacity of *Astragalus*, and reduces its original stimulating flavor. This provides beneficial bacterial strains and technical support for future product development, and accumulates data for subsequent research on compound microbial agents.

KEY WORDS: lactic acid bacteria; *Astragalus*; fermentation; flavor; active component

0 引言

黄芪,为豆科植物蒙古黄芪[*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge var. *mongolicus* (Bge.) Hsiao]或膜荚黄芪[*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge]的干燥根,性味甘,微温,归属于肺经和脾经,是常用的补气类物质^[1]。现代药理学研究表明,黄芪中主要活性成分有皂苷、黄酮、氨基酸和多糖等,具有抗氧化、抗炎、抗肿瘤、降血压、降血糖、参与免疫调节等生理功效^[2]。

近年来,益生菌发酵黄芪成为研究热点。益生菌是一类促进宿主健康的活性微生物,具有调节肠道菌群平衡、增强免疫、促进营养吸收等功能^[3]。近年来,益生菌发酵黄芪成为研究热点,例如采用植物乳杆菌、保加利亚乳杆菌及热链球菌复合菌对黄芪提取液进行液态发酵,生产具有更强抗氧化能力的黄芪发酵液^[4]。菌种是发酵的关键,不同益生菌发酵黄芪产品性质存在差异,微生物通过直接作用及复杂的种内或种间相互作用,在发酵过程中分泌各种酶类,分解利用原料中有机成分同时产生大量的活性成分和独特的风味物质^[5-7]。

乳酸菌是指发酵糖类主要产物为乳酸的一类无芽孢、革兰氏阳性细菌的总称^[8]。本研究选取副干酪乳杆菌、短双歧乳杆菌、植物乳杆菌 3 种乳酸菌对黄芪进行固态发酵,其中副干酪乳杆菌是一种同型发酵、广泛分布于人体肠道、口腔及发酵食品中的一种乳杆菌^[9-10];短双歧乳杆菌属于双歧杆菌,是从母乳营养儿粪便中分离的一种厌氧革兰氏

阳性杆菌,被认为是最具有改善人体肠道健康的益生菌^[11];植物乳杆菌来源于植物发酵原料的乳杆菌^[12],呈球状或杆状的乳酸菌,主要存在于乳制品等发酵食品及人和动物的肠道中,具有较强的产酸能力,可调节肠道平衡、调节免疫及有效抑菌等作用^[13]。传统黄芪加工工艺主要包括净制、闷润、切制、干燥等^[14],采用固态发酵黄芪将对其理化性质、抗氧化能力和风味产生影响。

本研究拟利用 3 种乳酸菌(副干酪乳杆菌、短双歧乳杆菌、植物乳杆菌)对黄芪进行固态发酵,分析不同乳酸菌发酵对黄芪总酚和总黄酮含量、抗氧化性、风味物质和微观结构的影响,为益生菌发酵食药资源利用与开发提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄芪(甘肃);副干酪乳杆菌(西安米先尔生物科技有限公司);短双歧乳杆菌(山东中科嘉忆生物科技有限公司);植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum* HB5)(实验室自筛);氢氧化钠、无水碳酸钠、无水甲醇、十二水磷酸氢二钠、二水磷酸二氢钠、水杨酸、硫酸亚铁、硝酸铝、过氧化氢(分析纯)、无水三氯化铁(化学纯)(国药集团化学试剂有限公司);福林酚(生化试剂,上海源叶生物科技有限公司);无水乙醇(分析纯,天津市津东天正精细化学试剂厂);无水亚硝酸钠(分析纯,山东科源生化有限公司);铁氰化钾(分析纯,天津大学科威公司);过硫酸钾(分析纯,天津市风船化学试剂有限公司);2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺

酸)[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS⁺](纯度 98%)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)(纯度 98.5%)、芦丁(纯度 98%)、没食子酸(纯度 99%)、2-辛醇(纯度 99.5%)(上海麦克林生化科技有限公司); MRS 培养基(北京奥博星生物技术有限责任公司); 琼脂粉(天津鼎国生物技术有限责任公司)。

1.2 仪器与设备

SQP 分析天平(精度 0.1 mg, 北京赛多利斯科学仪器有限公司); JM-A6002 电子天平(精度 0.01 g, 诸暨市超泽衡器设备有限公司); SPX-250B-Z 生化培养箱(上海博迅实业有限公司医疗设备厂); DSX-24L 高压蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂); TU-1810PC 紫外分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); Multiskan FC 酶标仪(上海赛默飞世尔科技有限公司); TDZ5-WS 离心机(长沙湘仪离心机仪器有限公司); TGL-1650 高速冷冻离心机(四川蜀科仪器有限公司); PEN3 电子鼻(德国 Airsense 公司); GCMS-QP2010Ultra 气质联用仪、Rtx-5MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm)(日本岛津公司); SPME 手动进样手柄、50/30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取针(美国 Supelco 公司); 顶空瓶(20 mL, 天津鼎国生物技术有限责任公司); FlavourSpec®GC-IM 风味分析仪、MXT-WAX 色谱柱(15 m×0.53 mm, 1 μm)(德国 G.A.S 公司); JSM-IT300LV 扫描电镜(日本电子株式会社)。

1.3 实验方法

1.3.1 乳酸菌发酵黄芪的制备

黄芪磨粉过 40 目筛后, 称取 20 g 装在 250 mL 锥形瓶中, 调整水分含量至 60%, 在 121 °C 下高温高压灭菌 20 min; 待冷却后, 分别接种 20% 副干酪乳杆菌、短双歧乳杆菌、植物乳杆菌的菌悬液, 于 37 °C 发酵 6 d; 发酵后在 45 °C 下烘干备用, 分别得到副干酪乳杆菌发酵黄芪(LP-MR)、短双歧乳杆菌发酵黄芪(BR-MR)和植物乳杆菌发酵黄芪(HB-MR)样品。

1.3.2 总酚含量测定

称取一定量的未发酵黄芪(UF-MR)和发酵黄芪粉(LP-MR、BR-MR 和 HB-MR), 加入 70% 甲醇溶液, 料液比 1:20 (g:mL), 于 45 °C 超声提取 30 min, 提取液于 3500 r/min 离心 15 min, 收集上清液, 残渣重复提取 2 次, 合并提取液^[15]。以没食子酸作为标准曲线测定总酚含量。在试管中分别加入 1 mL 黄芪提取液、5 mL 福林酚试剂和 4 mL 碳酸钠溶液, 充分混匀; 在室温下避光反应 1 h, 于 765 nm 处测定其吸光度值^[16]。总酚含量表示为每克样品中没食子酸当量(gallic acid equivalents, GAE)的微克数。

1.3.3 总黄酮含量测定

称取一定量的黄芪粉, 以 1:20 (g:mL) 料液比加入 70%

甲醇溶液, 超声提取 15 min, 超声结束后 3500 r/min 离心 10 min, 得到上清溶液, 将残余物重复以上步骤, 重复萃取 2 次, 合并上清液, 用于后续的检测实验。以芦丁作为标准曲线测定总酚含量。以 70% 甲醇溶液作为空白, 反应体系为 3 mL 黄芪提取液、2 mL 60% 乙醇溶液和 0.3 mL 亚硝酸钠, 放置 6 min; 加入 0.3 mL 硝酸铝溶液, 混匀, 放置 6 min; 最后加入 4.4 mL 氢氧化钠溶液混匀, 放置 12 min 后, 于 506 nm 处测定其吸光度值^[17]。总黄酮含量表示为每克样品中芦丁当量(rutin equivalents, RE)的毫克数。

1.3.4 抗氧化性测定

按照 ZHOU 等^[18]方法稍作修改, 制备黄芪溶液样品。称取 1 g 黄芪粉, 加入 10 mL 70% 甲醇溶液, 于 45 °C 超声提取 20 min, 提取液于 3500 r/min 离心 15 min, 收集上清液, 残渣重复提取 2 次, 合并提取液, 用于抗氧化性测定。

(1) DPPH 自由基清除率测定

量取 2 mL 黄芪提取液, 加入含有等量 0.1 mmol/L 的 DPPH 溶液试管中, 将混合物剧烈摇晃并在室温弱光下放置 30 min, 于 517 nm 处测定其吸光度值^[18], 记为 A_1 ; 同样的, 2 mL 黄芪提取液和 2 mL 无水甲醇反应体系, 测定其吸光度值 A_2 ; 2 mL DPPH 和 2 mL 70% 的甲醇溶液反应体系, 测定其吸光度值 A_0 。DPPH 自由基清除率计算如公式(1):

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = 1 - [(A_1 - A_2)/A_0] \times 100\% \quad (1)$$

(2) ABTS⁺自由基清除率测定

ABTS 工作液: 7 mmol/L ABTS 和 2.45 mmol/L 过硫酸钾溶液以 1:1 (V:V) 混合, 在室温黑暗条件下反应 12~16 h, 生成工作液; 采用甲醇稀释工作液, 使其吸光度值在 734 nm 处达到 0.7±0.02。量取 1 mL 黄芪提取液和 4 mL ABTS 工作液, 充分混匀, 在黑暗中反应 10 min, 于 735 nm 处测定其吸光度值 A_i ^[19]; 同上述步骤, 采用 70% 甲醇溶液替换 ABTS 工作液, 测定吸光度值为 A_j ; 采用 70% 甲醇溶液替换黄芪提取液, 测定吸光度值为 A_0 。ABTS⁺自由基清除率计算如公式(2)。

$$\text{ABTS}^+ \text{自由基清除率}/\% = 1 - [(A_i - A_j)/A_0] \times 100\% \quad (2)$$

(3) 羟自由基清除率测定

羟(hydroxyl, OH)自由基清除率参照 SHEN 等^[20]方法进行测定。在试管中加入 1 mL 黄芪提取液和 1 mL 9 mmol/L 硫酸亚铁、1 mL 9 mmol/L 水杨酸和 1 mL 8.8 mmol/L 过氧化氢溶液混合, 在 37 °C 下反应 30 min, 于 520 nm 处测定其吸光度值 A_{sample} ; 采用 70% 甲醇溶液替代样品, 测定空白样品吸光度值为 A_{control} ; 采用 70% 甲醇替代过氧化氢溶液, 测定背景吸光度值为 $A_{\text{background}}$ 。OH 自由基清除率的计算如公式(3)。

$$\text{OH 自由基清除率}/\% = [(A_{\text{sample}} - A_{\text{background}})/A_{\text{control}}] \times 100\% \quad (3)$$

(4) 总还原力测定

量取 1 mL 黄芪提取液, 加入 2 mL 0.2 mol/L 的磷酸缓

冲液(pH 6.6)和 2 mL 1%的铁氰化钾溶液,混匀,于 50 °C 水浴锅中反应 20 min,冷却;加入 2 mL 10%三氯乙酸终止反应;于 3500 r/min 离心 15 min;量取 2 mL 反应液,分别加入 2 mL 蒸馏水和 0.4 mL 0.1%三氯化铁,避光反应 30 min,测量波长 700 nm 处的吸光度值^[21]。

1.3.5 电子鼻测定

称取 2.0 g 黄芪样品置于容量为 20 mL 的顶空瓶中,于 60 °C 下平衡 0.5 h 后进行测定,每个样品重复 3 次平行实验,样品数据以 3 次平均值为基准^[22]。电子鼻参数为:洁净空气为载气,探头准备时间为 5 s,仪器清洁时间为 60 s,检测时间为 180 s,载气流速为 150 mL/min。

1.3.6 气相色谱-质谱法测定

精确称取 2.0 g 黄芪样品,置于 20 mL 固相萃取瓶中并加盖密封;样品在磁力搅拌器上热平衡 30 min,温度为 60 °C;将固相萃取头在温度 250 °C 下老化 30 min,老化好的固相微萃取头插入固相萃取瓶中,深度约 1 cm,按压固相萃取手柄推出萃取纤维,吸附 30 min,取出插入气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)仪进样口进行解析,在温度 25 °C 下解析 15 min 后进行测定^[23]。

GC 操作条件:色谱柱为 Rtx-5MS (30 m×0.25 mm, 0.25 μm),进样口温度 250 °C;载气为氦气,流速为 1.00 mL/min,分流进样,分流比为 10:1;色谱柱程序升温,初始 40 °C,保持 3 min,4 °C/min 升至 150 °C,保持 4 min,以 8 °C/min 升至 250 °C,保持 3 min。MS 条件:电子轰击(electron impact, EI)源,电子能量 70 eV;离子源温度 220 °C,接口温度 240 °C;扫描类型为全扫描;扫描范围 35~500 *m/z*。数据通过 NIST14 标准谱库进行对比,取匹配度大于 80 的检索结果进行分析。

1.3.7 气相色谱-离子迁移谱法测定

参考严红光等^[24]方法稍作修改。称取 1 g 黄芪样品,置于 20 mL 顶空瓶中,60 °C 孵育 30 min,孵化转速为 500 r/min,进样量为 500 μL。气相色谱-离子迁移谱法(gas

chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)操作条件:采用 MXT-WAX 色谱柱(30 m×0.53 mm, 1.0 μm),柱温 60 °C,进样针温度 85 °C,载气及漂移气为高纯度氮气(≥99.999%),分析时间 30 min。GC 操作条件:漂移气为 150 mL/min 保持不变;0~2 min,载气为 2 mL/min;2~10 min,载气由 2 mL/min 提升到 10 mL/min;10~20 min,载气由 10 mL/min 提升到 100 mL/min;20~30 min,载气为 100 mL/min。

使用 GC-IMS 仪器自带配套的软件 VOCal 查看 GC-IMS 分析谱图和数据的定性结果,采用 NIST 数据库和 IMS 数据库,根据保留时间对挥发性风味物质进行定性分析,运用 Reporter 插件对比样品之间的谱图差异,Gallery Plot 插件生成挥发性成分指纹图谱。

1.3.8 微观结构观察

采用扫描电子显微镜对黄芪样品的微观结构进行测定,加速电压 10 kV,放大倍数 1000 倍和 2000 倍。

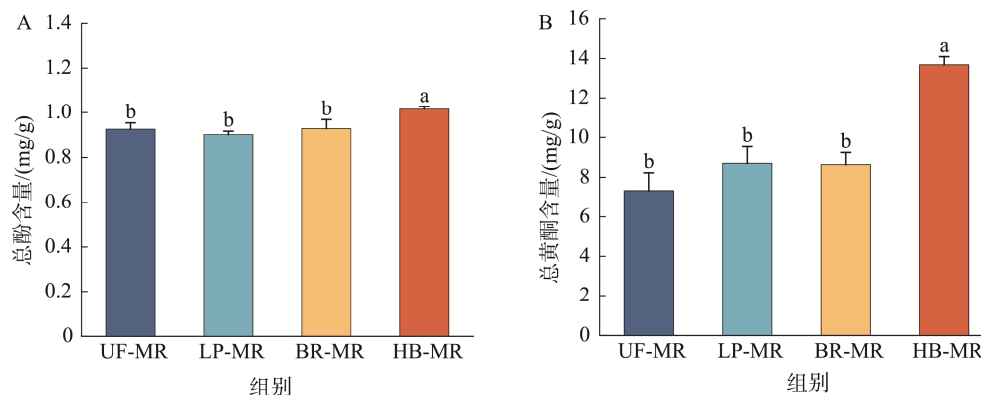
1.4 数据处理

每个样品进行 3 次独立平行实验,结果以平均值±标准偏差表示,采用 Origin 2021 版本以及 SPSS 27 进行数据统计分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2 结果与分析

2.1 不同乳酸菌发酵黄芪的总酚和总黄酮含量测定

3 种不同乳酸菌(副干酪乳杆菌、短双歧乳杆菌、植物乳杆菌)发酵黄芪的总酚和总黄酮含量测定结果如图 1 所示。酚类物质在抗炎、抗氧化、化学预防和神经预防等方面发挥重要功能^[25];由图 1A 可知,HB-MR 总酚含量显著高于其他 3 种发酵黄芪($P<0.05$),达到 1.02 mg GAE/g;UF-MR、LP-MR 和 BR-MR 总酚含量之间无显著性差异($P>0.05$),总酚含量均值为 0.92 mg GAE/g。黄酮含量也通常作为衡量样品质量和活性的重要参数之一^[26];由图 1B 可知,HB-MR 的总黄酮含量显



注:不同小写字母表示组间具有显著性差异($P<0.05$),图 2 同。

图 1 不同乳酸菌发酵黄芪的总酚含量(A)和总黄酮含量(B)

Fig.1 Total phenolic content (A) and total flavonoid content (B) of *Astragalus* fermented by different lactic acid bacteria

显著高于 UF-MR、LP-MR 和 BR-MR, 达到 13.69 mg RE/g; UF-MR、LP-MR 和 BR-MR 总黄酮含量之间无显著性差异 ($P>0.05$), 总黄酮含量均值为 8.23 mg RE/g。因此, 采用植物乳杆菌发酵能够显著提高黄芪中总酚和总黄酮含量。

2.2 不同乳酸菌发酵黄芪的抗氧化性分析

不同乳酸菌发酵黄芪的抗氧化性测定结果如图 2 所示。结果表明, 3 种乳酸菌发酵后 DPPH、ABTS⁺和 OH 自由基清除率以及总还原力均显著提高 ($P<0.05$); 与总酚和总黄酮含量结果一致, HB-MR 的 DPPH、ABTS⁺和 OH 自由基清除率以及总还原力均为最高, 分别达到 74.44%、65.60%、67.49% 和 0.54, 相对于 UF-MR, 分别增加

27.81%、26.03%、27.07% 和 0.21; 而 LP-MR 和 BR-MR 之间的抗氧化性指标无显著性差异 ($P>0.05$)。因此, 3 种不同乳酸菌发酵均能够增强黄芪的抗氧化性, 其中 HB-MR 的抗氧化能力提高最高。

2.3 不同乳酸菌发酵黄芪的电子鼻分析

不同乳酸菌发酵黄芪的电子鼻分析结果如图 3 所示。由图 3A 可知, 主成分分析(principal component analysis, PCA)的累积贡献为 94.52%, 其中第一主成分(PC1)和第二主成分(PC2)贡献分别为 86.81%和 7.71%; 不同黄芪样品在 PC1 上发生分离, 同时乳酸菌发酵黄芪与 UF-MR 在 PC1 轴上距离明显, 表明 3 种乳酸菌发酵后均显著地改变了黄

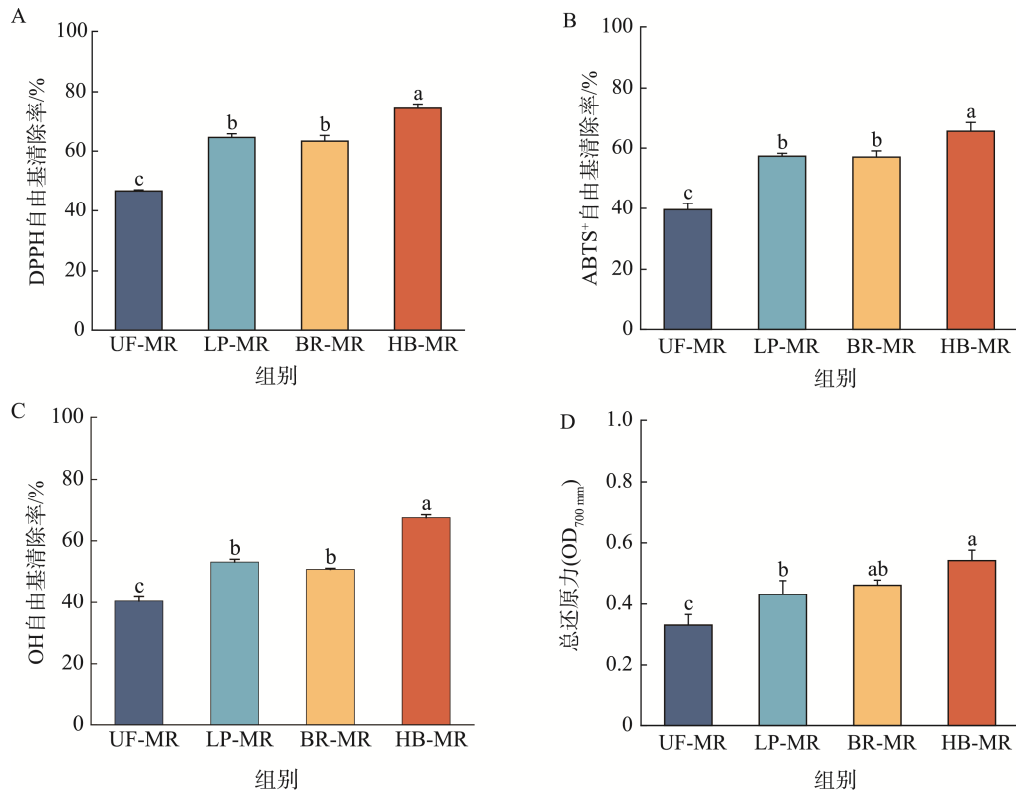


图 2 不同乳酸菌发酵黄芪的 DPPH (A)、ABTS⁺ (B) 和 OH (C) 自由基清除率以及总还原力 (D)
Fig.2 DPPH (A), ABTS⁺ (B) and OH (C) radical scavenging rates and total reducing power (D) of *Astragalus* fermented by different lactic acid bacteria

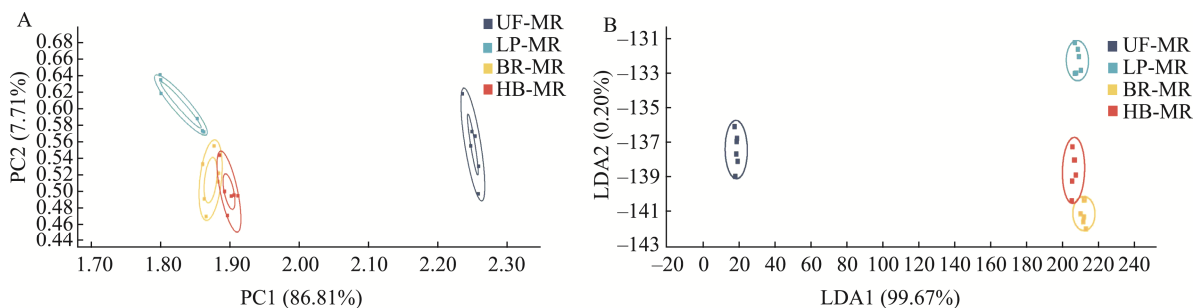


图 3 不同乳酸菌发酵黄芪的电子鼻主成分分析图(A)和线性判别分析图(B)
Fig.3 Principal component analysis (A) and linear discriminant analysis (LDA) (B) by electronic nose for *Astragalus* fermented by different lactic acid bacteria

芪的风味,但具有不同的挥发性风味特征。图 3B 为电子鼻线性判别分析(linear discriminant analysis, LDA)图,样品气味越相似,其在 LDA 图上距离越相近;LDA 的累积贡献为 99.87%,其中第一个线性判别(LDA1)和第二个线性判别(LDA2)贡献分别为 99.67%和 0.20%;不同乳酸菌发酵黄芪均与 UF-MR 的风味存在明显差异;LP-MR 与其他两种菌产生不同风味;而 BR-MR 和 HB-MR 在 PCA 和 LDA 图上均有交集,表明二者挥发性风味物质具有一定程度的相似性。

2.4 基于 GC-MS 的不同乳酸菌发酵黄芪挥发性风味成分分析

不同乳酸菌发酵黄芪挥发性风味成分分析结果如表 1 所示。结果表明,UF-MR 中共检测出挥发性风味成分:醇类 8 种、醛类 4 种、酮类 3 种、酯类 9 种、酸类 4 种、烃类 7 种、其他类 3 种;LP-MR 中共检测出挥发性风味成分:醇类 9 种、醛类 7 种、酮类 4 种、酯类 6 种、酸类 5 种、烃类 11 种、酚类 1 种、其他类 4 种;BR-MR 中共检测出挥

表 1 基于 GC-MS 的不同乳酸菌发酵黄芪挥发性风味成分分析
Table 1 GC-MS analysis of volatile flavor compounds in Astragalus fermented by different lactic acid bacteria

分类	化合物	CAS 号	含量/(μg/100 g)			
			UF-MR	LP-MR	BR-MR	HB-MR
醇类	1-戊醇	71-41-0	8.52±4.98 ^a	0.94±0.50 ^b	1.08±0.48 ^b	1.08±0.34 ^b
	2,3-丁二醇	513-85-9	3.84±0.23 ^a	2.52±0.97 ^a	2.24±0.21 ^a	2.85±0.96 ^a
	1,2-丁二醇	584-03-2	ND	0.38±0.12	ND	ND
	正己醇	111-27-3	ND	3.38±0.15 ^b	3.96±0.34 ^a	2.50±0.18 ^{ab}
	正庚醇	111-70-6	1.99±1.22 ^a	2.42±0.01 ^a	2.41±0.51 ^a	2.50±0.13 ^a
	1-辛烯-3-醇	339-86-4	4.64±2.47 ^a	2.09±0.30 ^b	2.25±0.21 ^b	2.48±0.26 ^b
	1-十三醇	112-70-9	0.38±0.08 ^a	0.66±0.54 ^a	ND	ND
	绿花白千层醇	552-02-3	1.52±0.34 ^a	1.58±0.30 ^a	ND	1.78±0.16 ^a
	苯甲醇	100-51-6	ND	0.91±0.17 ^a	0.83±0.18 ^a	ND
	1,2-庚二醇	3710-31-4	2.00±1.14	ND	ND	ND
	2-己基-1-癸醇	2425-77-6	0.82±0.67	ND	ND	ND
醛类	紫罗醇	128-37-0	ND	ND	ND	1.70±0.57
	己醛	66-25-1	42.17±23.40 ^a	11.12±4.27 ^b	16.81±2.28 ^b	12.34±4.19 ^b
	壬醛	124-19-6	5.30±1.00 ^a	3.43±0.75 ^b	4.02±0.17 ^{ab}	3.87±0.46 ^b
	癸醛	112-31-2	1.17±0.39 ^a	1.07±0.49 ^a	1.43±0.05 ^a	1.50±0.37 ^a
	2-丁基-2-辛烯醛	13019-16-4	7.49±4.48 ^a	4.73±1.49 ^a	4.67±1.40 ^a	7.49±2.41 ^a
	4-氧代-2-己烯醛	20697-55-6	ND	1.31±0.85 ^a	ND	1.90±0.78 ^a
	(E)-2-庚烯醛	18829-55-5	ND	1.49±0.30 ^a	1.64±0.18 ^a	1.25±0.68 ^a
	庚醛	111-71-7	ND	0.51±0.14 ^b	ND	0.62±0.03 ^a
酮类	2-己烯醛	505-57-7	ND	ND	0.74±0.54 ^a	0.98±0.16 ^a
	3-辛烯-2-酮	1669-44-9	4.65±0.86 ^a	1.53±0.28 ^b	1.80±0.19 ^b	1.90±0.21 ^b
	(3E,5E)-辛-3,5-二烯-2-酮	38284-27-4	18.02±1.36 ^a	6.86±0.42 ^b	8.10±0.66 ^b	8.58±1.37 ^b
	二正戊基酮	927-49-1	0.97±0.17	ND	ND	ND
	2-乙基环己酮	4423-94-3	ND	2.27±0.86 ^a	1.75±0.03 ^a	ND
	3-壬烯-2-酮	14309-57-	ND	3.69±1.03 ^b	4.57±0.01 ^{ab}	5.53±0.22 ^a
酯类	乙酸甲酯	79-20-9	5.94±1.78	ND	ND	ND
	己酸甲酯	106-70-7	17.31±7.98 ^a	0.38±0.05 ^b	0.49±0.13 ^b	0.38±0.10 ^b
	γ-己内酯	695-06-7	6.64±0.66 ^a	2.04±0.03 ^b	2.55±0.51 ^b	2.56±0.26 ^b
	己酸乙酯	3050-69-9	5.06±0.42 ^a	ND	1.65±1.20 ^b	1.78±0.85 ^b
	壬酸甲酯	1731-84-6	1.53±0.14	ND	ND	ND
	丙位辛内酯	104-50-7	1.64±0.60 ^a	ND	1.59±0.89 ^a	23.54±14.44 ^a
	己酸戊酯	540-07-8	3.49±1.44 ^a	2.43±0.68 ^a	2.48±0.24 ^a	3.68±0.49 ^a
	γ-壬内酯	104-61-0	20.51±7.59 ^a	14.18±5.34 ^a	15.43±6.54 ^a	ND
	己酸己酯	6378-65-0	2.64±1.33 ^a	2.01±0.42 ^a	2.45±0.97 ^a	3.11±2.07 ^a
	棕榈酸甲酯	112-39-0	ND	1.48±1.16 ^a	ND	0.74±0.15 ^a
	正己酸乙酯	3050-69-9	ND	ND	1.65±1.20 ^a	1.78±0.85 ^a
	γ-丁内酯	96-48-0	ND	ND	ND	1.17±0.26
	丙位壬内酯	104-61-0	ND	ND	ND	23.53±14.44

表 1(续)

分类	化合物	CAS 号	含量/(μg/100 g)			
			UF-MR	LP-MR	BR-MR	HB-MR
酸类	乙酸	64-19-7	54.20±4.55 ^a	49.48±0.85 ^a	55.92±12.01 ^a	61.52±8.63 ^a
	庚酸	111-14-8	7.24±0.31 ^a	4.41±0.47 ^a	5.27±1.28 ^a	6.78±2.74 ^a
	辛酸	124-07-2	3.81±0.62 ^a	4.08±0.81 ^a	3.70±0.43 ^a	6.02±3.20 ^a
	壬酸	112-05-0	0.74±0.28	ND	ND	ND
	丙酸	1979-9-4	ND	3.32±0.10 ^a	3.51±0.59 ^a	3.74±0.28 ^a
	正戊酸	109-52-4	ND	4.10±0.98 ^a	5.22±1.70 ^a	4.47±0.46 ^a
	棕榈酸	1957-10-3	ND	ND	ND	0.78±0.41
烃类	十二烷	112-40-3	1.65±0.21 ^a	2.14±0.50 ^a	3.00±1.08 ^a	2.65±0.17 ^a
	螺二环己烷	180-43-8	2.00±1.40	ND	ND	ND
	十四烷	629-59-4	4.29±0.76 ^b	6.06±1.04 ^{ab}	7.11±0.62 ^{ab}	8.44±2.29 ^a
	二十烷	112-95-8	0.85±0.31 ^a	0.89±0.25 ^a	0.91±0.12 ^a	1.21±0.58 ^a
	正十六烷	544-76-3	2.24±0.93 ^a	3.25±1.20 ^a	2.53±0.65 ^a	2.56±0.82 ^a
	2,6,11-三甲基十二烷	31295-56-4	0.66±0.29	ND	ND	ND
	植烷	638-36-8	0.66±0.20	ND	ND	ND
	4,6-二甲基十二烷	61141-72-8	ND	0.62±0.85	ND	0.63±0.03
	十五烷	629-62-9	ND	1.09±0.24 ^a	0.98±0.24 ^a	1.32±0.18 ^a
	2-溴十二烷	13187-99-0	ND	2.17±0.41 ^a	2.75±0.33 ^a	ND
	正十七烷	629-78-7	ND	1.68±0.04 ^a	1.38±0.32 ^a	1.99±1.32 ^a
	十九烷基环己烷	22349-03-7	ND	2.33±0.41	ND	ND
	正二十一烷	629-94-7	ND	1.14±0.09	1.38±0.33	ND
	3-甲基十七烷	6418-44-6	ND	0.48±0.29	ND	ND
酚类	苯酚	1980-5-7	ND	1.27±0.13 ^a	1.38±0.35 ^a	2.32±1.47 ^a
其他类	白菖烯	17334-55-3	0.80±0.15 ^a	0.66±0.05 ^a	0.65±0.09 ^a	0.73±0.05 ^a
	十六氢苈	2435-85-0	1.05±0.13 ^a	1.18±0.03 ^a	ND	1.24±0.18 ^a
	异榄香脂素	5273-85-8	1.77±0.09	ND	ND	ND
	硫代氨基脲	79-19-6	ND	1.48±0.18	ND	ND
	己腈	628-73-9	ND	0.63±0.46 ^a	0.47±0.04 ^a	0.46±0.09 ^a
	氨基硫脲	79-19-6	ND	ND	1.23±0.23	ND
	2,3-二氢噻吩	1120-59-8	ND	ND	ND	0.70±0.04

注: 结果表示为平均值±标准偏差; 同一行不同小写字母表示平均值之间存在显著性差异($P<0.05$), 同一行相同小写字母表示平均值之间不存在显著性差异($P>0.05$); ND 表示样品中未检测到该化合物。

发性风味成分: 醇类 6 种、醛类 6 种、酮类 4 种、酯类 8 种、酸类 5 种、烃类 8 种、酚类 1 种、其他类 3 种; HB-MR 中共检测出挥发性风味成分: 醇类 7 种、醛类 8 种、酮类 3 种、酯类 10 种、酸类 6 种、烃类 7 种、酚类 1 种、其他类 4 种。醇类化合物一般具有花香、清香及木质香等独特的气味^[27], 被认为是黄芪的标志性香气成分。UF-MR 中 1-戊醇含量最高, 为(8.52±4.98) μg/100 g, 且与其他 3 种乳酸菌发酵黄芪样品存在显著性差异; LP-MR 和 BR-MR 中正己醇含量最高, HB-MR 中 2,3-丁二醇含量最高, 分别为(3.38±0.15)、(3.96±0.34)、(2.85±0.96) μg/100 g, 丰富了黄芪中温和的甜味。

醛类化合物方面, UF-MR 和 3 种乳酸菌发酵黄芪中已醛含量均最高; UF-MR 中已醛含量为(42.17±23.40) μg/100 g, 而 LP-MR、BR-MR 和 HB-MR 中已醛含量分别为(11.12±4.27)、(16.81±2.28)、(12.34±4.19) μg/100 g; 乳酸菌发酵后黄芪中已醛含量均显著降低, 削弱了清新的风味^[28]。

酮类化合物方面, UF-MR 和 3 种乳酸菌发酵黄芪中(3*E*,5*E*)-辛-3,5-二烯-2-酮含量均最高; UF-MR 中(3*E*,5*E*)-辛-3,5-二烯-2-酮含量为(18.02±1.36) μg/100 g, 而 LP-MR、BR-MR 和 HB-MR 中(3*E*,5*E*)-辛-3,5-二烯-2-酮含量分别为(6.86±0.42)、(8.10±0.66)、(8.58±1.37) μg/100 g; 乳酸菌发酵后黄芪中(3*E*,5*E*)-辛-3,5-二烯-2-酮含量均显著降低, 削弱了花果香、清香的风味^[29]。

酯类化合物通过酯化反应产生, 提供甜香味和油脂味^[30]。UF-MR、LP-MR 和 BR-MR 中 γ-壬内酯含量最高, 分别为(20.51±7.59)、(14.18±5.34)、(15.43±6.54) μg/100 g, 但三者之间无显著性差异; HB-MR 中没有检测出 γ-壬内酯, 但丙位辛内酯和丙位壬内酯含量丰富, 分别为(23.54±14.44) μg/100 g 和(23.53±14.44) μg/100 g, 均为椰子型香气^[31]。

酸类化合物方面, UF-MR 和 3 种乳酸菌发酵黄芪中乙酸含量均最高; UF-MR 中乙酸含量为(54.20±4.55) μg/100 g, 而 LP-MR、BR-MR 和 HB-MR 中乙酸含量分别为(49.48±

0.85)、(55.92±12.01)、(61.52±8.63) μg/100 g, 但乳酸菌发酵后黄芪与 UF-MR 样品之间无显著性差异。

烃类化合物方面, UF-MR 和 3 种乳酸菌发酵黄芪中十四烷含量均最高; UF-MR 中十四烷含量为(4.29±0.76) μg/100 g, 而 LP-MR、BR-MR 和 HB-MR 中十四烷含量分别为(6.06±1.04) μg/100 g、(7.11±0.62) μg/100 g、(8.44±2.29) μg/100 g; 乳酸菌发酵后黄芪中十四烷含量显著增加, 但其无色、无味^[32], 对发酵黄芪风味无明显影响。

酚类化合物方面, UF-MR 中未检出苯酚, 而 LP-MR、BR-MR 和 HB-MR 中均检测出苯酚, 含量分别为(1.27±0.13)、(1.38±0.35)、(2.32±1.47) μg/100 g, 但三者之间无显著性差异。其中苯酚是具有酚醛树脂橡胶味^[33]。

对于其他类化合物, LP-MR 中增加了硫代氨基脲和己腈含量; BR-MR 中增加了己腈和氨基硫脲含量; HB-MR 中增加了己腈和 2,3-二氢噻吩含量。

综上, 与 UF-MR 相比, LP-MR 中增加了醇类、醛类、酮类、酸类、烃类、酚类和其他类, 降低了酯类; BR-MR 中增加了醛类、酮类、酸类、烃类和酚类, 降低了醇类和酯类; HB-MR 中增加了醛类、酯类、酸类、酚类和其他类, 降低了醇类挥发性风味成分数量。此外, 乳酸菌发酵后降

低了醇类、醛类、酮类含量, 如(3*E*,5*E*)-辛-3,5-二烯-2-酮属于酮类, 具有刺激性气味, 发酵后削减了花香气以及刺激气味; 而经植物乳杆菌发酵, 黄芪增加了酯类、酸类、烃类含量, 丰富了椰子香味。

2.5 基于 GC-IMS 的不同乳酸菌发酵黄芪挥发性风味物质分析

为进一步比较不同乳酸菌发酵黄芪中挥发性风味物质的差异, 利用指纹图谱识别不同乳酸菌发酵黄芪的特征峰区域, 如图 4A 所示。每一列代表同一物质在不同样品中的挥发性风味物质变化, 峰的颜色越暗代表物质浓度越低, 反之则越高。由图 4A 可知, UF-MR 与 3 种乳酸菌发酵黄芪差异明显, 3 种乳酸菌风味成分斑点分布较相似; UF-MR 中挥发性风味物质含量明显高于乳酸菌发酵黄芪中的含量, 表现为叔丁醇、环戊酮和 1,3-丁二烯含量较高(a 区域); 而不同乳酸菌发酵黄芪中挥发性风味物质含量高于 UF-MR 中的含量, 表现为乙醛和未知样品含量较高(b 区域); BR-MR 和 HB-MR 中氟里昂-11 和丙酮含量相对较高(c 区域)。因此, 不同乳酸菌发酵黄芪中挥发性风味物质存在较大差异。推测 3 种乳酸菌发酵黄芪会影响到黄芪的挥发性风味物质,

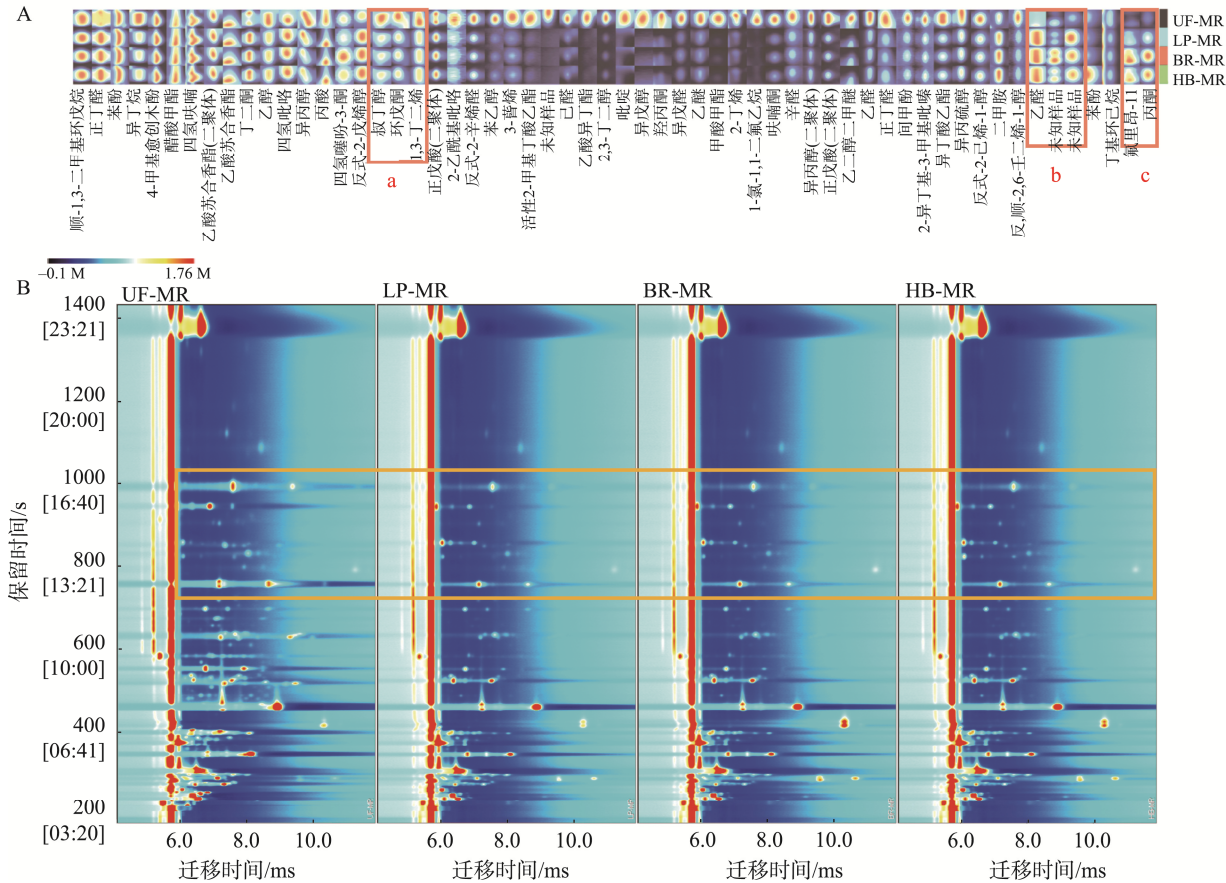


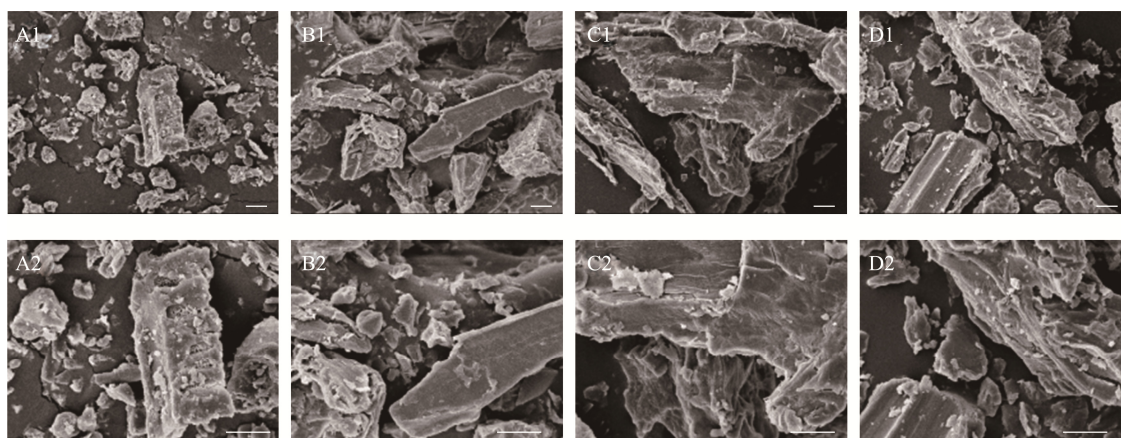
图 4 不同乳酸菌发酵黄芪的挥发性风味物质指纹图谱(A)和俯视图(B)
Fig.4 Gallery plot (A) and top view (B) of volatile flavor compounds in *Astragalus* fermented by different lactic acid bacteria

原因可能是发酵过程中微生物进行代谢,会分解有机物质,产生新的代谢产物^[34],从而改变了 UF-MR 中的挥发性风味物质。不同乳酸菌发酵黄芪中挥发性风味物质的 GC-IMS 二维俯视图,如图 4B 所示。反应离子峰右侧的每一个点代表一种挥发性风味物质,红色代表信号强度高,蓝色代表信号强度低。与 GC-MS 定量分析结果一致,乳酸菌发酵改变了黄芪挥发性风味成分,标注橙黄色区域中挥发性风味物质在 UF-MR 中含量较多,而在 LP-MR、BR-MR 和 HB-MR 中含量下降;3 种乳酸菌发酵黄芪中的挥发性风味物质种类

相似,但挥发性风味物质含量存在较大差异。

2.6 不同乳酸菌发酵黄芪的微观结构观察

不同乳酸菌发酵黄芪的微观结构(放大 1000 和 2000 倍)如图 5 所示。结果表明,UF-MR 结构粗糙,表面附着大量颗粒物质,无孔洞但存在细微裂隙;不同乳酸菌发酵后,黄芪样品表面结构紧密,表面附着颗粒物质明显减少,裂隙也变少,推测可能是由于乳酸菌发酵将黄芪中的淀粉降解,从而对黄芪微观结构产生影响^[35-36]。



注: A1. UF-MR (1000×); A2. UF-MR (2000×); B1. LP-MR (1000×); B2. LP-MR (2000×); C1. BR-MR (1000×); C2. BR-MR (2000×); D1. HB-MR (1000×); D2. HB-MR (2000×)。

图 5 不同乳酸菌发酵黄芪的扫描电子显微镜图

Fig.5 Scanning electron microscope images of *Astragalus* fermented by different lactic acid bacteria

3 结论

本研究对 UF-MR 和 3 种不同乳酸菌发酵黄芪的总酚和总黄酮含量、抗氧化性、风味物质和微观结构进行分析。结果表明,HB-MR 中总酚和总黄酮含量最高,分别达到 1.02 mg GAE/g 和 13.69 mg RE/g;3 种不同乳酸菌发酵均能够增强黄芪的抗氧化性,其中 HB-MR 的抗氧化能力提高最高, DPPH、ABTS⁺、OH 自由基清除率和总还原力分别达到 74.44%、65.60%、67.49%和 0.54,相对于 UF-MR 分别增加 27.81%、26.03%、27.07%和 0.21;总体上,不同乳酸菌发酵黄芪均与 UF-MR 的风味存在明显差异,发酵后降低了黄芪原有的刺激性气味,但具有不同的挥发性风味特征,其中 HB-MR 中增加了酯类、酸类和烃类含量,丰富了椰子香味;同时乳酸菌发酵后黄芪表面附着颗粒物质明显减少,结构紧密。综上,HB-MR 提高了黄芪的活性成分含量和抗氧化能力,降解了其原有的刺激性风味,为以后产品开发提供了有益菌种和技术支撑,也为后续探索复合菌剂研发积累了数据。

参考文献

- [1] 曹佳蕾,梁绿圆,刘宜杭,等. 基于“病-药-量”探索黄芪古代用药规律[J]. 中国中药杂志, 2024, 1-19. DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20241114.501
- CAO JL, LIANG LY, LIU YH, et al. Medication rules of *Astragali radix* in ancient Chinese medical books based on “disease-medicine-dose” pattern [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2024, 1-19. DOI: 10.19540/j.cnki.cjcmm.20241114.501
- [2] 庄珏,黄艳婷,吴凤丹,等. 高效液相色谱-串联质谱法分析不同产地黄芪化学成分[J]. 广东化工, 2024, 51(22): 148-151.
- ZHUANG Y, HUANG YT, WU FD, et al. Determination of the differential compounds in *Astragali radix* from different origins by high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(22): 148-151.
- [3] 张丽华,查蒙蒙,李顺峰,等. 益生菌发酵果蔬汁研究进展[J]. 轻工学报, 2021, 36(4): 29-36.
- ZHANG LH, ZHA MM, LI SF, et al. Research progress on probiotic fermentation of fruit and vegetable juice [J]. Journal of Light Industry, 2021, 36(4): 29-36.
- [4] 王萍,王长福,韩士林,等. 益生菌发酵黄芪对 LPS 诱导的人正常结肠上皮细胞 NCM-460 氧化损伤保护作用的机制研究[J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(9): 1464-1471.

- WANG P, WANG CF, HAN SL, *et al.* Mechanism of the protective effect of probiotic fermented *Astragali radix* on lipopolysaccharide-induced oxidative damage in normal human colon epithelial cell NCM-460 [J]. Natural Product Research and Development, 2024, 36(9): 1464–1471.
- [5] 毛方华, 陈倩倩, 史怀, 等. 酵母菌和乳酸菌发酵对棕榈粕-豆粕发酵饲料品质的影响 [J]. 中国饲料, 2024, 1-5. DOI: 10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.2023070030-11
- MAO FH, CHEN QQ, SHI H, *et al.* Effects of *Saccharomyces* and *Lactobacillus* on solid state fermentation of palm meal-soybean meal [J]. China Feed, 2024, 1-5. DOI: 10.15906/j.cnki.cn11-2975/s.2023070030-11
- [6] 毛红艳, 祖力皮牙·买买提, 王佳敏, 等. 基于电子感官技术结合 HP-SPME-GC-MS 分析不同饴的关键风味物质 [J]. 中国粮油学报, 2024, 1-14. DOI: 10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001025.
- MAO HY, MAIMAITI ZLPY, WANG JM, *et al.* Analysis of key aroma components of different Naan by HS-SPME-GC-MS coupled with electric-sense technology [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 1-14. DOI: 10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.001025.
- [7] 陈臣, 莫海文, 于海燕, 等. 发酵食品中微生物相互作用与风味品质塑造的研究进展 [J]. 食品科学, 2024, 1-16. DOI: 11.2206.ts.20241127.1129.024
- CHEN C, MO HW, YU HY, *et al.* Research progress on the role of microbial interactions in shaping flavor and quality in fermented foods [J]. Food Science, 2024, 1-16. DOI: 11.2206.ts.20241127.1129.024
- [8] 亥比拜木·阿不迪克热木, 古丽皮艳·托乎提, 凯迪日亚·阿布拉, 等. 新疆传统发酵酸奶中乳酸菌的分离鉴定及复合菌株发酵剂的研制 [J]. 新疆师范大学学报 (自然科学版), 2024, 1-13. DOI: 10.14100/j.cnki.1008-9659.20241126.001
- HEBIBEIMU ABDKRM, GULIPIYAN THT, KAIDIRIYA ABL, *et al.* Isolation and identification of lactic acid bacteria in traditional fermented yogurt of Baicheng County, Xinjiang and preparation of compound fermentation starter [J]. Journal of Xinjiang Normal University (Natural Sciences Edition), 2024, 1-13. DOI: 10.14100/j.cnki.1008-9659.20241126.001
- [9] 方诗会, 熊尧, 张召, 等. 副干酪乳杆菌 Lp.R3 的高密度培养工艺优化 [J]. 食品工业科技, 2024, 1-15. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060197
- FANG SH, XIONG Y, ZHANG Z, *et al.* Optimization of high-density culture process of *Lactocaseibacillus paracasei* Lp.R3 [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 1-15. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060197
- [10] 梁梓华, 李嘉仪, 谢林惠, 等. 副干酪乳杆菌 FZU103 对小鼠酒精性肝损伤的防控作用 [J]. 食品科学, 2024, 45(7): 135–144.
- LIANG ZH, LI JY, XIE LH, *et al.* Prevention effect of *Lactobacillus paracasei* FZU103 on alcoholic liver injury in mice [J]. Food Science, 2024, 45(7): 135–144.
- [11] 中国食品科学技术学会益生菌分会. 人体肠道菌群主要特征的专家共识 [J]. 中国食品学报, 2024, 24(7): 460–470.
- Probiotics Society of the Chinese Institute of Food Science and Technology. Scientists consensus on human gut microbiota [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(7): 460–470.
- [12] 强艺, 张大革, 徐广谦, 等. 植物乳杆菌转录调控子 YesN 对蔗糖代谢及发酵香肠风味形成的影响 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 1-10. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040655
- QIANG Y, ZHANG DG, XU GQ, *et al.* Research on the impact of the transcriptional regulator YesN in *Lactobacillus plantarum* on sucrose metabolism and flavor formation in fermented sausages [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 1-10. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.040655
- [13] 刘小翠, 赵静姝. 植物乳杆菌益生菌粉干燥工艺的研究 [J]. 粮食与饲料工业, 2024(5): 29–33.
- LIU XC, ZHAO JS. A study on the drying process of *Lactobacillus plantarum* powder [J]. Cereal & Feed Industry, 2024(5): 29–33.
- [14] 张婕, 董安东, 谢允东, 等. 产地加工炮制一体化对黄芪质量的影响研究 [J]. 时珍国医国药, 2024, 35(13): 1–8.
- ZHANG J, DONG AND, XIE YD, *et al.* Study on the influence of origin processing integration on the quality of *Astragalus membranaceus* [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2024, 35(13): 1–8.
- [15] DERAKHSHAN Z, FERRANTE M, TADI M, *et al.* Antioxidant activity and total phenolic content of ethanolic extract of pomegranate peels, juice and seeds [J]. Food Chemical Toxicol, 2018, 114: 108–111.
- [16] CAI S, WANG O, WU W, *et al.* Comparative study of the effects of solid-state fermentation with three filamentous fungi on the total phenolics content (TPC), flavonoids, and antioxidant activities of subfractions from oats (*Avena sativa* L.) [J]. The Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(1): 507–513.
- [17] ZHANG M, CAO JG, DAI XL, *et al.* Flavonoid contents and free radical scavenging activity of extracts from leaves, stems, rachis and roots of *Dryopteris erythrosora* [J]. Iranian Journal of Pharmaceutical Research, 2012, 11(3): 991–997.
- [18] ZHOU KQ, YU LL. Effects of extraction solvent on wheat bran antioxidant activity estimation [J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(7): 717–721.
- [19] ZHANG J, WEN C, CHEN M, *et al.* Antioxidant activities of *Sagittaria sagittifolia* L. polysaccharides with subcritical water extraction [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 134: 172–179.
- [20] SHEN SG, JIA SR, WU YK, *et al.* Effect of culture conditions on the physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides from *Nostoc flagelliforme* [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 198: 426–43.
- [21] XUE Y, CUI X, ZHANG Z, *et al.* Effect of beta-endoxylanase and alpha-arabinofuranosidase enzymatic hydrolysis on nutritional and technological properties of wheat brans [J]. Food Chemistry, 2020, 302: 125332–125341.
- [22] WANG M, LEI M, SAMINA N, *et al.* Impact of *Lactobacillus plantarum* 423 fermentation on the antioxidant activity and flavor properties of rice bran and wheat bran [J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127156.
- [23] LI N, WANG S, WANG T, *et al.* Valorization of wheat bran by three fungi solid-state fermentation: Physicochemical properties, antioxidant activity and flavor characteristics [J]. Foods, 2022, 11(12): 2–15.
- [24] 严红光, 张建杨, 霍羽佳, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同酵母菌发酵蓝莓酒风味物质 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 235–241.
- YAN HG, ZHANG JY, HUO YJ, *et al.* Volatile compounds analysis in blueberry wine fermented with different yeasts by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 235–241.
- [25] 吴江娜, 魏冠棉, 毛娜, 等. 不同乳酸菌发酵对雪梨汁营养成分、抗氧化活性及挥发性风味物质的影响 [J]. 中国食品学报, 2024, 24(9): 310–321.

- WU JN, WEI GM, MAO N, *et al.* Effects of different lactic acid bacteria fermentation on nutrient composition, antioxidant activity and volatile flavor substances of snow pear juice [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(9): 310–321.
- [26] 于春荣, 董莹, 王英诺, 等. 复方黄芪提取物的体外抗氧化活性及活性物质含量测定[J]. 国际药学研究杂志, 2019, 46(6): 479–484.
- YU CR, DONG Y, WANG YN, *et al.* The *in vitro* antioxidative activity of the compound *Astragalus*, *Glycyrrhiza* and *Schisandra* extract and the determination of bioactive component contents [J]. Journal of International Pharmaceutical Research, 2019, 46(6): 479–484.
- [27] 杨子玺, 朱圆敏, 谢燕霞, 等. HS-SPME-GC-MS 结合化学计量学分析曲霉液态发酵对晒青毛茶汤挥发性成分的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 41(2): 1–19.
- YANG ZX, ZHU YM, XIE YX, *et al.* HS-SPME-GC-MS combined with chemometrics to analyze the effect of liquid fermentation of *Aspergillus* on the volatile components of sun-dried green tea infusion [J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 41(2): 1–19.
- [28] 孟掉琴, 徐洪涛, 侯林, 等. 基于 GC-MS 探究不同类型牛奶感官和风味物质特性[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(12): 89–95.
- MENG DQ, XU HT, HOU L, *et al.* Exploration of sensory and flavor compounds characteristics of different types of milk based on GC-MS [J]. China Food Additives, 2024, 35(12): 89–95.
- [29] 王丽, 张耀, 刘光宪, 等. 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法分析桂花板鸭加工过程中挥发性风味物质的变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(19): 111–121.
- WANG L, ZHANG Y, LIU GX, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds during processing of Guihua dry-cured duck based on headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(19): 111–121.
- [30] 陈家齐, 李佳霖, 赵吉春, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 HS-GC-IMS 联用分析不同干燥方式对红托竹荪挥发性物质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 1–16. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070074
- CHEN JQ, LI JL, ZHAO JC, *et al.* Effects of different drying methods on the volatile substances of *Dictyophora rubrovolvata* based on HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 1–16. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070074
- [31] 石芬. 火龙果籽多酚对椰子油品质的影响研究[D]. 海口: 海南大学, 2022.
- SHI F. Effect of pitaya seed polyphenols on coconut oil quality [D]. Haikou: Hainan University, 2022.
- [32] 陈舜胜, 蒋根栋. 中华绒螯蟹蟹肉挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2009, 30(20): 308–311.
- CHEN SS, JIANG GD. Volatile flavor components in meat of Chinese Mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Food Science, 2009, 30(20): 308–311.
- [33] 李燕敏, 杨克玉, 孙洁雯, 等. SPME-GC-MS 分析不同产地干黄芪中挥发性风味成分[J]. 中国酿造, 2016, 35(5): 175–181.
- YANG YM, YANG KY, SUN JW, *et al.* Volatile compounds analysis of dried *Astragali radix* from different areas by SPME-GC-MS [J]. China Brewing, 2016, 35(5): 175–181.
- [34] 谢华丽. 微生物代谢调控在食品与发酵工业中的应用与发展前景[J]. 中国食品工业, 2024(8): 138–140.
- XIE LH. The application and development prospect of microbial metabolism regulation in food and fermentation industry [J]. China Food Industry, 2024(8): 138–140.
- [35] 姜莉, 王成, 邢颖, 等. 不同提取方法对黄芪提取液活性成分及抗氧化性的影响[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(16): 119–126.
- JIANG L, WANG C, XING Y, *et al.* Effects of different extraction methods on active components and antioxidant activity of *Astragalus radix* extract [J]. Food Research and Development, 2022, 43(16): 119–126.
- [36] 闵聪. 亚麻籽蛋白-绿豆淀粉复合凝胶的形成机制及其质构分级变化规律的研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2023.
- MIN C. Fabrication and molecular insight of flaxseed linseed protein-mung bean starch composite gels varying in texture classification [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2023.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)