钟姝凝, 李佳宁, 唐开红, 等. 基于代谢组学及电子鼻解析人参发酵-炮制挥发性代谢物特征 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 298−309. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050332

ZHONG Shuning, LI Jianing, TANG Kaihong, et al. Volatile Metabolite Characteristics in Ginseng Fermentation and Processing Based on Metabolomics and Electronic Nose Analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 298−309. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050332

· 分析检测 ·

基于代谢组学及电子鼻解析人参发酵-炮制挥发性代谢物特征

钟姝凝[1], 李佳宁[1], 唐开红[2], 刁梦雪[3], 杨　轶[1], 江璐秀[1], 肖语馨[1], 张园园[1,*]

（1.吉林工商学院粮食学院, 吉林长春 130507;
2.长春市疾病预防控制中心理化检验所, 吉林长春 130119;
3.吉林大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130062）

摘　要: 本研究旨在解析人参经乳酸菌发酵结合传统炮制后挥发性代谢物的变化规律及其对风味的影响。采用戊糖乳杆菌对人参进行发酵，并进一步实施炮制加工，运用非靶向 GC-MS 代谢组学与电子鼻技术对处理前后样品进行系统性分析。结果表明，发酵及发酵-炮制处理显著降低了总糖含量，由 556 mg/g 降至 335 mg/g 和 221 mg/g，而总皂苷含量则由 194 mg/g 先下降至 140 mg/g 后回升至 221 mg/g，发酵与炮制显著改变了人参挥发性成分组成，共鉴定出 77 种显著差异代谢物，主要包括醇类、萜类、烃类、酮类、杂环化合物及酯类等 11 大类。芳樟醇、α-蒎烯等关键香气活性成分的 OAV 变化表明处理后人参整体风味由青草气与刺激味向柔和、协调的果香与焦糖香转变。电子鼻分析结果与 GC-MS 及 OAV 分析一致，发酵增强了人参酸香与果香特征，炮制过程生成焦糖香与甜香物质。本研究揭示了发酵与炮制的协同作用机制，为人参深加工及其风味品质调控提供了重要的理论依据与技术参考。

关键词: 人参, 挥发性代谢物, 非靶向代谢组学, 电子鼻, 发酵, 炮制

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0298−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050332

本文网刊:

Volatile Metabolite Characteristics in Ginseng Fermentation and Processing Based on Metabolomics and Electronic Nose Analysis

ZHONG Shuning[1], LI Jianing[1], TANG Kaihong[2], DIAO Mengxue[3], YANG Yi[1], JIANG Luxiu[1], XIAO Yuxin[1], ZHANG Yuanyuan[1,*]

（1.College of Grain Science and Technology, Jilin Business and Technology College, Changchun 130507, China;
2.Changchun Center for Disease Control and Prevention, Physical and Chemical Laboratory, Changchun 130119, China;
3.College of Food Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130062, China）

Abstract: This study aimed to analyze the variation patterns of volatile metabolites in ginseng after lactic acid bacteria fermentation combined with traditional processing and their influence on flavor. Ginseng was fermented with *Lactobacillus pentosus* and further processed. Non-targeted GC-MS metabolomics and electronic nose technology were used to conduct systematic analysis of the samples before and after treatment. The results showed that fermentation and fermentation-processing treatment significantly reduced the total sugar content from 556 mg/g to 335 mg/g and 221 mg/g, while the total saponin content first decreased from 194 mg/g to 140 mg/g and then rebounded to 221 mg/g. Fermentation and processing significantly changed the composition of volatile components in ginseng. A total of 77 significantly differentiated metabolites were identified, mainly including 11 major categories such as alcohols, terpenoids, hydrocarbons, ketones, hetero-

收稿日期: 2025−06−01

基金项目: 吉林省教育厅科学技术研究项目（JJKH20261887KJ）。

作者简介: 钟姝凝（1993−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 食品生物技术, E-mail: zhongsn@jlbtc.edu.cn。

*** 通信作者:** 张园园（1983−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 功能性食品开发与检测, E-mail: yyz20@mails.jlu.edu.cn。

cyclic compounds and esters. The changes in OAV of key aroma active components such as linalool and α-pinene indicated that the overall flavor of ginseng after treatment had transformed from grassy and pungent to a soft and harmonious fruity and caramel aroma. The analysis results of electronic nose were consistent with those of GC-MS and OAV. Fermentation enhanced the sour and fruity aroma characteristics of ginseng, and the processing process generated caramel aroma and sweet aroma substances. This study reveals the synergistic mechanism of fermentation and processing, providing an important theoretical basis and technical reference for the deep processing of ginseng and the regulation of its flavor and quality.

Key words: ginseng; volatile metabolites; non-targeted metabolomics; electronic nose; fermentation; processing

挥发性代谢组学作为代谢组学的重要分支，专注于解析生物体系中挥发性有机化合物（VOCs）的组成与动态变化规律[1]。在发酵食品与中药材加工中，VOCs 不仅决定产品的风味与香气，还反映了微生物代谢活动与物质转化过程的复杂性[2]。微生物发酵作为中药材加工的重要手段，能够通过酶促反应转化难以吸收的成分，生成新的活性物质，提升药材的功效与安全性，并改善其风味特性。已有研究表明，特定菌种和工艺可显著改变中药材提取液中的风味组成，如六神曲发酵可提升酸、酯类等风味物质[3]，祛湿汤经乳酸菌发酵后风味更加丰富，感官品质显著改善[4]。人参作为传统名贵中药材，富含人参皂苷、多糖、黄酮等活性成分，具有显著的药理作用，但其原材料风味强烈、部分成分生物利用度低，限制了其在食品化和功能化产品中的应用。

近年来，乳酸菌因其益生特性和强大代谢能力而成为发酵研究的热点，在酸奶、泡菜等发酵食品中被广泛应用，能改善肠道功能[5]、降低血液胆固醇[6]，并通过产生多种酶类促进代谢物转化，生成新的有益物质。在食品原料如麻竹笋、雪花梨汁和芸豆乳的发酵中，乳酸菌显著提升了 VOCs 含量和抗氧化活性，从而改善了产品品质。鉴于人参在传统医学中的重要地位及其在现代功能食品开发中的潜力，探索其风味改良路径具有重要意义。国内外研究证实乳酸菌发酵可有效增强人参皂苷的转化率[7]，提升稀有皂苷（如 Rg_3、Rh_2 和 CK 等）含量，并同步改善基质的口感和风味品质。例如，副干酪乳杆菌发酵人参可使稀有皂苷总含量提升[8]，而植物乳杆菌与酵母混合发酵西洋参显著增加酯类物质、降低苦味[9]，并提升抗氧化活性[10]。此外，电子鼻与 GC-MS 联用技术已逐步应用于发酵风味物质的定性与定量分析，如发酵奶油中关键风味成分的鉴定[11] 及鱼露发酵中鱼腥味的削减机制研究[12]，为风味组学研究提供了可靠方法。然而，现有研究多聚焦于皂苷转化及非挥发性代谢物，对人参发酵过程中 VOCs 的动态变化、关键香气活性成分的形成机制及其与微生物代谢的关联仍缺乏系统解析[13]。

基于此，本研究以戊糖乳杆菌发酵联用传统炮制工艺处理人参，结合非靶向 GC-MS 挥发性代谢组学与电子鼻技术，系统分析发酵与炮制阶段人参 VOCs 的组成变化，鉴定关键香气活性成分，并探讨风味改善的代谢基础。本研究不仅有助于揭示乳酸菌发酵对人参风味的重塑机制，也为中药发酵产品的感官品质优化与功能化开发提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

人参皂苷标准品 Rg1　色谱纯，中国 Bio-BioPha 公司；人参皂苷标准品 Re、Rb1　色谱纯，德国 Sigma-Aldrich 公司；氯化钠、甲醇、正丁醇　分析纯，中国国药公司；苯酚、浓硫酸、正己烷、环氧七氯内标溶液　分析纯，美国 Merck 公司；五年生鲜人参　吉林省长白山人参有限公司；戊糖乳杆菌菌株（*Lactiplantibacillus pentosus*，*L. pentosus*）　从泡菜中提取，现贮存于吉林工商学院（GenBank 数据库登录号：SRR29937423）；玉米淀粉　新良集团；红糖　甘汁园糖业有限公司；正构烷烃混合标准品（C7~C30）　分析纯，北京谱标科技有限公司。

8890-7000E 型 GC-MS、DB-5MS（配有 30 m×0.25 mm×0.25 μm 色谱柱）、2 cm 30 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头、PHS-3BW 型数显 pH 计　德国 Agilent 公司；MM400 型球磨仪　德国 Retsch 公司；MS105DU 电子天平　瑞士 METTLER TOLEDO 公司；SPME Arrow 型固相微萃取装置、Fiber Conditioning Station 型老化装置、Agitator 样品加热箱　瑞士 CTC Analytics AG 公司；PEN3 型电子鼻　德国 AIRSENSE 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　人参发酵工艺　原料按照如下的发酵工艺加工，具体操作如图 1 所示。选择无霉变、无虫害的鲜人参作为原料，称取一定量的人参清洗干净，按照料液比 1∶20（g∶mL）添加 100 ℃ 沸水浸泡灭菌，放于恒温箱自然冷却至 20 ℃。



图 1　人参发酵-炮制流程图

Fig.1　Flow chart of ginseng fermentation and processing

将−80 ℃ 甘油保藏的戊糖乳杆菌菌种室温解冻后，于 MRS 固体培养基划线，37 ℃ 恒温培养 24 h，挑取单菌落转接至 MRS 液体培养基，37 ℃ 静置培养 24 h，再以 2%(v/v)接种量连续传代 2 次，获得实验用活化菌种。以 50~80 g/L 的总添加量向培养基中加入 1∶1 的玉米淀粉和红糖，并接入接种量为 2% 的戊糖乳杆菌，放入已灭菌的整株人参，37 ℃ 的温度培养 3.5 d[14]。发酵结束后，立即 95 ℃，10 min 灭菌，终止发酵，得到发酵人参。

将人参从培养基中取出，干燥至表面无明显水分放入灭菌锅中 100 ℃ 焖蒸 60 min，再放入干燥箱 95 ℃ 干燥 60 min[15]，交替进行蒸制与干燥共 5 个循环，得到发酵-炮制人参。

1.2.2 菌落对数、pH 及酸度的测定 将发酵液按比例进行梯度稀释，涂布于平板上进行计数分析[16]。采用 PHS-3BW 型数显 pH 计，以 12 h 为间隔监测 pH 变化，pH 计在 25 ℃ 下校准。按照 GB 5009.239-2016《食品安全国家标准 食品酸度的测定》测定发酵人参液的可滴定酸度(TA)[17]。

1.2.3 人参总糖、总皂苷的测定

1.2.3.1 人参总糖的测定 参考杨芳等[18] 实验方法，取人参粉末 1 g，放入三角瓶中，加入蒸馏水 100 mL，沸水浴提取 2 次，每次 3 h。过滤，合并滤液，并转移至 250 mL 容量瓶中，加蒸馏水稀释至刻度，摇匀，作为供试品溶液。精密吸取 0.5 mL 供试样品液置于小试管中，加入 1 mL 水后，再加入 0.50 mL 5% 苯酚溶液和 2.50 mL 浓硫酸，摇匀混合物置 90 ℃ 恒温水浴 15 min 后立即在冰水浴中冷却，每个样品重复三次，另取一试管加 1.5 mL 纯化水、0.50 mL 5% 苯酚溶液和 2.50 mL 浓硫酸，作为空白对照，在 490 nm 波长处测定吸光度，代入葡萄糖标准曲线 Y=0.0106X+0.0311，R^2=0.9990，计算总糖的含量。

1.2.3.2 人参总皂苷的测定 参考杨芳等[18] 的实验方法，取冷冻干燥后人参样品粉末 3 g，经破壁机粉碎后过 40 目筛，精密称取，置于回流装置中，加入甲醇 100 mL，在 60 ℃ 水浴中回流提取 1 h，过滤；残渣再加甲醇同法提取一次，合并滤液并定容至 250 mL，作为供试品溶液。另取人参皂苷 Rb_1 标准品，精密称取后用甲醇配制成一系列标准溶液。分别取 0.5 mL 供试品溶液或标准溶液于具塞比色管中，依次加入 0.5 mL 5% 香草醛-冰醋酸溶液和 5 mL 高氯酸，充分混匀后于 60 ℃ 水浴中加热 15 min，立即取出并置于冰水浴中冷却，以试剂空白作对照，在 540 nm 波长下测定吸光度。以人参皂苷 Rb_1 标准溶液为对照，绘制标准曲线 Y=0.4719X−0.0583，R^2=0.9995，计算供试品中总皂苷的含量。

1.2.4 样品提取 将鲜人参、发酵人参和发酵-炮制人参放入−80 ℃ 冰箱，24 h 后取出进行液氮研磨[19]，加入无水乙醇超声 30 min，8000 r/min 离心 10 min，取上清液为提取液，涡旋混合均匀，每个样本约取提取液 0.2 mL 于顶空瓶中。分别向样品中加入 0.2 g NaCl 和 20 μL 环氧七氯内标溶液(10 μg/mL)，充分混匀后进样。萃取前，将 2 cm 30 μm DVB/CAR/PDMS 固相微萃取(SPME)纤维在 Fiber Conditioning Station 中 250 ℃ 下老化 5 min，在 60 ℃ 恒温条件下，振荡 5 min，120 μm DVB/CWR/PDMS 萃取头插入样品顶空瓶，顶空萃取 15 min，于 250 ℃ 下解吸 5 min，然后进行 GC-MS 分离鉴定各组挥发性代谢物。

1.2.5 GC-MS 色谱质谱采集 使用 DB-SMS 毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)对人参、发酵人参和发酵-炮制人参提取液进行检测，载气为高纯氦气(纯度不小于 99.999%)，恒定流速设为 1.2 mL/min，进样口温度 250 ℃，溶剂延迟时间为 3.5 min，使用正构烷烃混合标准品(C7~C30)。温控程序为先升温至 40 ℃ 并保持 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。电子轰击离子源(EI)参数设定为 230 ℃，四极杆温度 150 ℃，质谱接口温度 280 ℃，电子能量 70 eV，使用离子全扫描模式进行离子精确扫描和定量[20]。

1.2.6 代谢物定性与定量分析 基于多物种数据库、文献以及人参皂苷标准品进行比对，根据得到的质谱数据与 NIST(2020)谱库提供的标准物质的质谱图进行物质鉴定，再计算各挥发物的保留指数(Rentention Index, RI)，以辅助化合物鉴定。通过南京派森诺基因科技有限公司自建数据库进行匹配比对，该数据库包含参考保留时间(RT)及定性、定量离子信息。当样品保留时间与标准参考一致，且扣除背景后的质谱图中选定离子均出现时，即判定该化合物存在。内标物为环氧七氯，为减少基质的影响，定量用标准溶液应采用基质混合标准工作溶液，标准溶液的浓度应与待测化合物的浓度相近[21]。

$$RI = 100Z + 100 \times \frac{TR(x) - TR(z)}{TR(z+1) - TR(z)} \quad 式（1）$$

式中：RI 表示挥发物的保留指数；TR(x)表示目标化合物的保留温度，℃；TR(z)、TR(z+1)表示相邻正构烷烃(碳数 z 与 z+1)的保留温度，℃，且满足 TR(z)<TR(x)<TR(z+1)。

1.2.7 气味活性值(OAV)的计算 参考 Ye 等[22] 的方法检测气味活性值(odor activity value, OAV)。OAV 是结合化合物的感觉阈值建立的确定食品关键风味化合物的方法[23]，用于阐明每种香气化合物对样品整体香气特征的贡献。OAV≥1，表明该化合物对样品风味有直接的贡献，而 OAV<1 时化合物的贡献较小。

$$OAV_i = \frac{C_i}{T_i} \quad 式（2）$$

式中：OAV_i 为化合物 i 的气味活性值；C_i 为化

合物的相对含量，μg/mL；T_i 为化合物的阈值，μg/mL。

其中，所有样品均独立重复 3 次实验，所得数据以均值表示。数据处理与统计分析在 SPSS 中完成，采用单因素方差分析（ANOVA）结合 Duncan 多重比较法评估不同组间差异，显著性水平设定为 $P<0.05$，化合物的相对定量基于 GC-MS 峰面积归一化法，阈值数据则参考公开文献与数据库。

1.2.8　电子鼻分析　电子鼻分析是一种基于气体传感器阵列和模式识别技术模拟生物嗅觉的系统，PEN3 型电子鼻共有十个传感器，分别为 W1C、W5S、W3C、W6S、W5C、W1S、W1W、W2S、W2W、W3S（表 1）。准确称取 2 mL 样品于 10 mL 顶空瓶中，加盖密封并编号，待测。采用手动进样方式，顶空加热 5 min，温度 75 ℃；载气为合成干燥空气，进样量 1500 μL，进样速度 150 mL/s，数据采集周期 1.0 s，数据采集时间 2 min，数据采集延迟 3 min，数据采集流量 150 mL/min。平行测定 5 次，取后 3 次传感器获得的稳定信号进行分析各组人参挥发性风味[24]。

表 1　传感器型号与对应的检测对象

Table 1　Sensor models corresponding to detection objects

传感器型号	检测对象
W1C	苯类和芳香成分
W5S	氮氧化合物
W3C	芳香成分
W6S	氢化物
W5C	烷烃化合物
W1S	甲基类物质
W1W	硫化物
W2S	醇类、醛酮类物质
W2W	有机硫化物
W3S	长链烷烃类物质

1.3　数据处理

单元统计分析：结合变异倍数（FC）和 T 检验筛选显著差异代谢物（$P<0.05$），通过火山图可视化差异倍数（$\log_2$FC）与显著性（$-\log_{10}P$），直观展示两组代谢物水平差异及生物学意义。

多元统计主成分分析（PCA）：通过线性组合重新分配代谢物变量权重，生成新的特征变量，生成得分图展示样本聚类与离散程度，识别离群样本并初步判断组间差异趋势。

多元统计正交-偏最小二乘判别分析（OPLS-DA）：在多元统计 PCA 的基础上对样本进行指定并分组，模型自动引入一个隐含的数据集 Y，该隐含数据集中的变量数量等于组别的数量，用于进一步描述各分组间的潜在关联或差异[25]。

在色谱质谱采集的原始数据的基础上，使用每行代谢物最小值的 1/5 对缺失值进行填充，然后计算 QC 样本 CV 值，保留 CV 值小于 0.5 的物质得到最终数据。所有数据以平均值±标准偏差（n=3）表示。使用 SPSS 25.0 软件中的单因素方差（ANOVA）进行差异显著性统计分析（$P<0.05$ 为差异显著），基于 ggplot2 的可视化数据分析图形绘制系统完成绘图。

2　结果与分析

2.1　人参在发酵过程中菌落对数曲线、pH 变化及总酸变化

由图 2a 可知，发酵 4 h 后菌体增殖显著加快，8 h 达到最高增殖速率，并在 12 h 趋于稳定。这一变化表明发酵早期戊糖乳杆菌能够适应该发酵条件并快速生长，在培养基营养逐渐耗尽或代谢产物累积影响生长时进入平稳期。

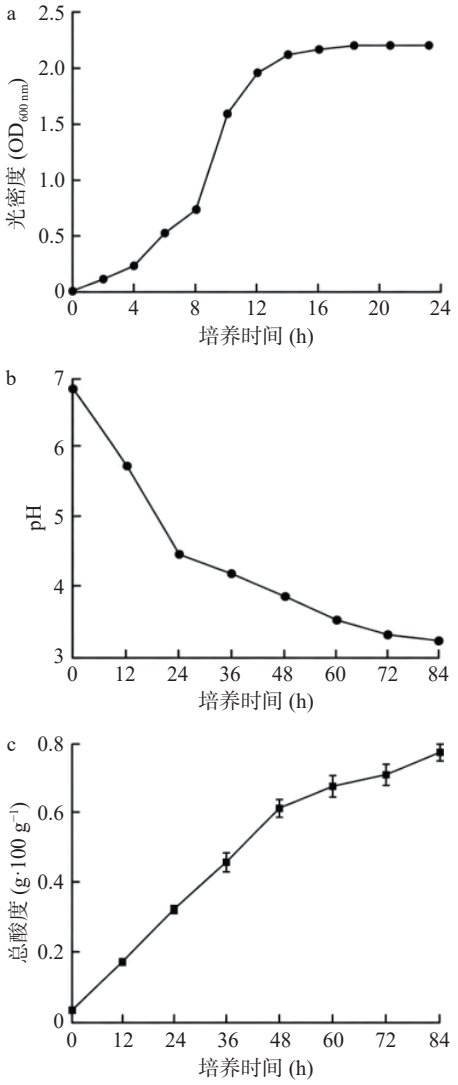


图 2　人参发酵液菌落对数曲线、pH 变化及总酸变化

Fig.2　Panax ginseng fermentation broth colony logarithmic curve, pH variation, and total acid variation

注：a 为发酵中戊糖乳杆菌生长对数曲线；b 为发酵中 pH 变化；c 为发酵中总酸变化。

在发酵过程中，培养基的 pH 由初始的 6.7 逐步下降，约在 72 h 后趋于稳定，如图 2b 所示，这表明发酵过程大约在 3 d 达到最佳状态。发酵初期，微生物代谢活跃，产生有机酸等代谢产物，pH 不断下降。随

着发酵的进行，微生物的活性逐渐减弱，酸性产物的生成也趋于平衡，因此 pH 在 72 h 左右不再明显下降，趋于稳定。通过监测 pH 的变化，能够较准确地确定发酵的最合适时间，即在人参发酵至 pH 稳定时，其次生皂苷的转化达到最佳水平。

如图 2c 所示，酸度在整个发酵过程中持续升高，至 60 h 后趋于缓慢。这表明有机酸持续产生，但速度逐渐减慢，说明菌体代谢活性逐步下降，进入稳定期。这种 pH 和酸度的变化与乳酸菌的典型代谢模式一致，在前期快速活跃、后期稳定[26]。

2.2 人参在发酵及炮制过程中总糖与总皂苷含量变化

图 3 结果显示，人参在不同处理方式下总糖和总皂苷含量均发生了显著变化。鲜人参的总糖含量最高，约为 556 mg/g；经发酵处理后显著下降至约 335 mg/g，进一步经发酵-炮制处理后，总糖含量仅约 221 mg/g，降幅更为明显。这表明发酵过程中总糖含量下降，可能与微生物生长繁殖所消耗糖类底物，以及部分可溶性糖类在发酵液中的流失有关，炮制过程中高温条件下的美拉德反应及糖类热降解亦可能导致总糖水平进一步下降。其中，多糖降解产物更易被机体吸收利用，并可能在调节肠道菌群、增强免疫反应等方面表现出更高的生物活性[27]。

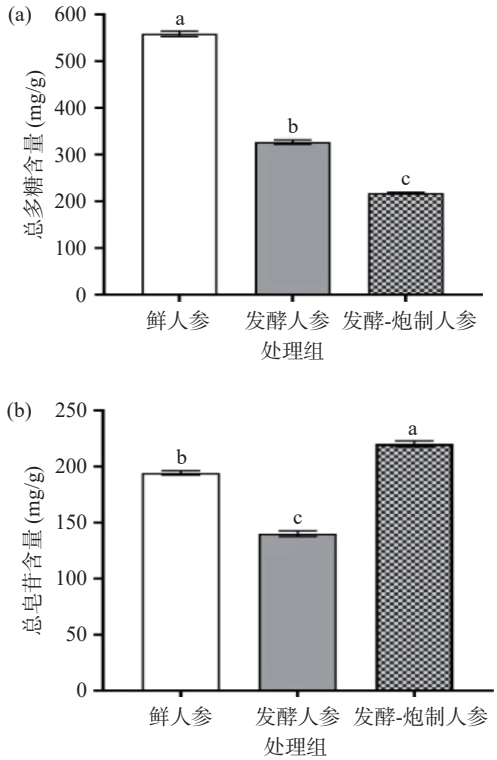


图 3 不同处理条件对人参总糖和总皂苷含量的影响

Fig.3 Effect of different treatments on total polysaccharide and saponin contents of ginseng

注：不同小写字母表示具有显著性差异，$P<0.05$。

鲜人参的总皂苷含量约为 194 mg/g，发酵后下降至约 140 mg/g，但在发酵-炮制处理后呈现回升趋势至 221 mg/g，明显高于鲜人参水平。结合文献报道，发酵过程中部分原型皂苷会发生水解和转化，导致总量下降[28]，而炮制环节中的热作用可能促进稀有皂苷生成，使总皂苷水平显著回升。稀有皂苷因其分子结构修饰程度较高，表现出更强的生物学活性，已被证实在抗氧化、抗炎及抗肿瘤等方面具有更强的药理效应。因此，发酵与炮制可能存在叠加或协同影响的趋势，不仅改变了人参主要活性成分的含量，而且可能优化其功能成分构成，从而提升其药理作用与健康价值。

2.3 差异代谢物分析

2.3.1 正交-偏最小二乘判别分析（OPLS-DA） 基于 GC-MS 平台获取的代谢物数据，采用多元统计方法对人参、发酵人参以及发酵-炮制人参的挥发性代谢物进行差异性分析[29]。图 4 中点表示各组内生物学重复，同一颜色点为组间样本点，分布较集中，表明样本中所含分子的组成和浓度接近。不同颜色点的分布状态可明显区分 3 组样本，说明人参、发酵人参及发酵-炮制人参代谢物存在一定的差异，发酵人参与发酵-炮制人参代谢物较为相近，可对样本数据进行下一步分析研究[30]。

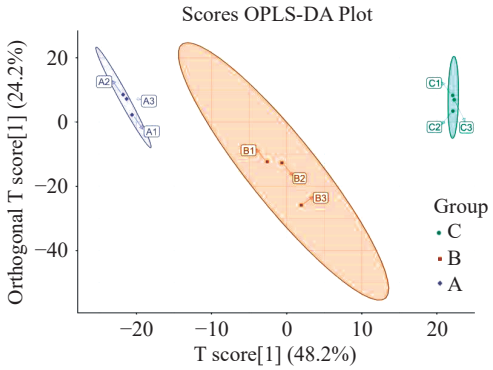


图 4 不同处理条件组 OPLS-DA 得分图

Fig.4 OPLS-DA score plots of different treatments groups

注：A：鲜人参组，B：发酵人参组，C：发酵-炮制人参组；图 6、图 8 同。

OPLS-DA 在不降低模型预测能力的前提下，有效减少模型的复杂性，能够最大程度查看组间差异[31]。样本经 OPLS-DA，R^2X 为 0.814，R^2Y 为 1，Q^2 为 0.961，均大于 0.5，表明该模型可靠，不存在过度拟合现象，可进行后续差异代谢物的筛选及分析。

2.3.2 单变量统计分析 基于单元统计分析，对正、负离子模式下检测到的所有人参、发酵人参以及发酵-炮制人参的代谢物（含未被鉴定的代谢物）进行差异分析。筛选标准为 P 值小于 0.05 的显著差异代谢物，并以火山图可视化展示结果。图 5 中横坐标为差异表达倍数（Fold Change）的 $\log_2$ 的对数值，纵坐标为显著性 P 的 $-\log_{10}$ 的对数值[32]。筛选出倍数变化大于 1 或者小于-1 且 $P<0.05$ 的代谢物，对人参、发酵人参以及发酵-炮制人参显著差异代谢物进行筛选。人参与发酵人参之间共有 88 个上调差异代谢物，69 个下调差异代谢物，576 个非显著差异代

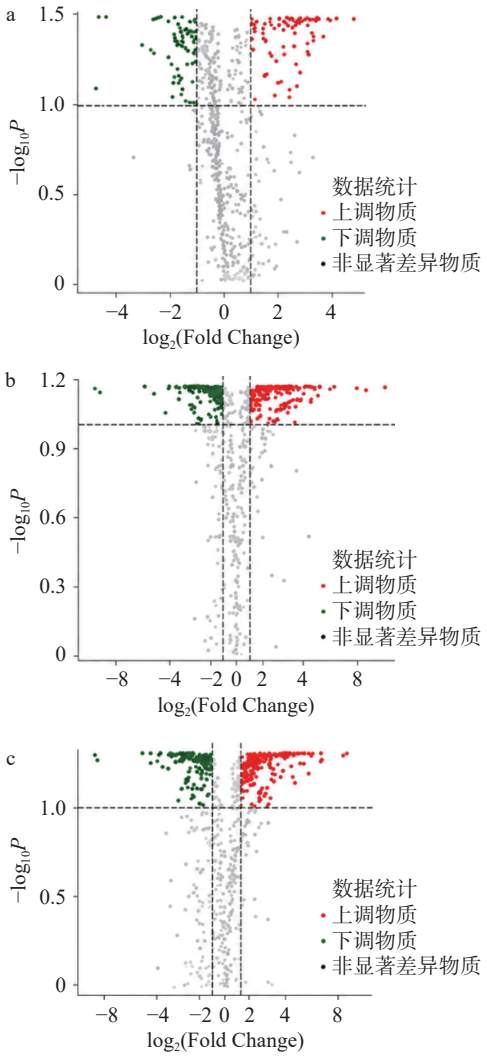


图 5　三组人参代谢物火山图

Fig.5　Volcano plots of metabolites in three groups

注：a 为人参与发酵人参代谢物火山图；b 为人参和发酵-炮制人参代谢物火山图；c 为发酵人参和发酵-炮制人参代谢物火山图。

谢物；人参与发酵-炮制人参之间共有 221 个上调差异代谢物，202 个下调差异代谢物，332 个非显著差异代谢物；发酵人参与发酵-炮制人参之间共有 207 个上调差异代谢物，183 个下调差异代谢物，365 个非显著差异代谢物。

发酵过程对人参的代谢物有一定影响，但发酵与炮制结合使用影响更为显著。发酵-炮制人参与原始人参相比，变化的代谢物数量更多，说明炮制在发酵基础上对人参成分的作用显著。

结果显示，发酵和炮制均能显著改变人参的代谢谱特征，其中发酵-炮制联合处理对代谢物的调控作用更为显著。与原始人参相比，发酵-炮制人参中共检测到 423 个差异代谢物，数量明显多于单纯发酵所产生的差异，二者存在协同效应，可能与发酵过程中微生物分泌的糖苷酶、氧化还原酶等催化作用有关，从而促进前体物质的转化与结构修饰，小分子及初生代谢物相对趋势下降，与高温炮制导致的降解或转化相关。综合来看，这种代谢物的变化可能是发酵和炮制改善药用效果的关键，对于丰富活性成分和提升功能价值方面具有更为深远的意义。

2.3.3　差异代谢物筛选及分析　运用 GC-MS 非靶向代谢组学技术测定样品中挥发性代谢物质[33]，以 $\log_2(FC)>3$ 或 $\log_2(FC)<-1$，$P<0.05$ 为筛选标准，对人参、发酵人参以及发酵-炮制人参显著差异代谢物进行筛选。结合 KEGG、HMDB、PUBCHEM 等在线数据库，通过化合物 m/z 和保留时间进行代谢物的鉴定，结果如表 2 和表 3 所示，液氮提取的各组样品共筛选出 11 大类差异代谢物，主要为醇类、烃类、萜类、酮类、杂环化合物以及酯类。

2.4　代谢物 OAV 分析

2.4.1　OAV 分析　各化合物的气味阈值及香气特征参考风味数据库 The Good Scents Company，以确保 OAV 分析与感官描述的科学性与准确性。图 6 中横坐标表示不同组别，纵坐标表示风味物质 OAV。图 6 显示，人参风味物质的 OAV 大部分集中于 0，少数值位于 250000~750000，整体风味物质组成相

表 2　正负离子模式下发酵人参与人参共有显著差异代谢化合物分析

Table 2　Analysis of significant metabolic compounds of fermented ginseng and ginseng in the positive and negative ion mode

物质一级分类	物质英文名称	物质中文名称	分子式	CAS	$\log_2$FC	类型
胺	N,N-dimethyl-1-Tetradecanamine	N,N-二甲基-1-十四烷胺	$C_{16}H_{35}N$	112-75-4	3.1291238	↑
	BenzenAmine, 2,4-dimethyl-	2,2,4—二甲基苯甲胺	$C_8H_{11}N$	95-68-1	3.900090679	↑
醇	trans-1,4-Cyclohexanedimethanol	反-1,4-环己烷二甲醇	$C_8H_{16}O_2$	3236-48-4	−1.289635495	↓
	1-butyl-Cyclobutanol	1-丁基-环丁醇	$C_8H_{16}O$	20434-34-8	−1.091390721	↓
	1-Pentanol	1-戊醇	$C_5H_{12}O$	71-41-0	3.116448032	↑
	Ethanol, 2-phenoxy-	乙醇, 2-苯氧基-	$C_8H_{10}O_2$	122-99-6	3.982587382	↑
烃类	1-Methyl-2-n-hexylbenzene	1-甲基-2-正己基苯	$C_{13}H_{20}$	1595-10-4	−1.116892055	↓
	Phenol, 4-(2-propenyl)-	4-烯丙基苯酚	$C_9H_{10}O$	501-92-8	−1.103951609	↓
	Benzoic Acid, 4-hydroxy-	4-羟基-苯甲酸	$C_7H_6O_3$	99-96-7	3.36600828	↑
	1-(3-methylbutyl)-Cyclopentene	1-(3-甲基丁基)-环戊烯	$C_{10}H_{18}$	37689-15-9	−1.190431462	↓
	Hexadecane, 2-methyl-	2-甲基-十六烷	$C_{17}H_{36}$	1560-92-5	−1.022184467	↓
	Cetene	十六烯	$C_{16}H_{32}$	629-73-2	3.744488256	↑
酚	3-Methyl-4-(methylamino)phenol	3-甲基-4-(甲氨基)苯酚	$C_8H_{11}NO$	74789-37-0	−1.125185975	↓
含氮化合物	4-butyl-N,N-dimethyl-Benzamide	4-丁基-N, N-二甲基苯甲酰胺	$C_{13}H_{19}NO$	1000340-29-8	3.304926098	↑

续表 2

物质一级分类	物质英文名称	物质中文名称	分子式	CAS	log_2FC	类型
酸	Pentanoic Acid	戊酸	$C_5H_{10}O_2$	109-52-4	3.17152615	↑
	Butanoic Acid	丁酸	$C_4H_8O_2$	107-92-6	3.494253882	↑
萜类	1H-3a,7-Methanoazulene, 2,3,4,7,8,8a-hexahydro-3,6,8,8-tetramethyl-, (3R,3aS,7S,8aR)-	(1R, 2S, 5S, 7R)-2,6,6,8-四甲基三环[5.3.1.01,5]十一碳-8-烯	$C_{15}H_{24}$	65354-33-8	−1.081912521	↓
	Cyclohexanol, 1-methyl-4-(1-methylethylidene)-	1-甲基-4-(1-甲基亚乙基)-环己醇	$C_{10}H_{18}O$	586-81-2	5.955112303	↑
	1,3-Cyclohexadiene-1-carboxaldehyde, 2,6,6-trimethyl-	脱氢B-环柠檬醛	$C_{10}H_{14}O$	116-26-7	6.217841383	↑
	alpha.-Terpineol	α-松油醇	$C_{10}H_{18}O$	98-55-5	6.44875145	↑
	L-.alpha.-Terpineol	L-α-松油醇	$C_{10}H_{18}O$	10482-56-1	6.44875145	↑
酮	2,5-Dimethylcyclohexanone	2,5-二甲基环己酮	$C_8H_{14}O$	932-51-4	−1.135874668	↓
	Cyclopentanone, 3,3,4-trimethyl-4-(4-methylphenyl)-	3,3,4-三甲基-4-(4-甲基苯基)-环戊酮	$C_{15}H_{20}O$	56077-23-7	−1.029734692	↓
	Benzophenone	二苯甲酮	$C_{13}H_{10}O$	119-61-9	3.193762527	↑
杂环化合物	Quinazoline, 4-methyl-	4-甲基喹唑啉	$C_9H_8N_2$	700-46-9	−1.247289729	↓
	Quinoxaline, 2-methyl-	甲基喹喔啉	$C_9H_8N_2$	7251-61-8	−1.247289729	↓
	2-n-Octylfuran	2-n-辛基呋喃	$C_{12}H_{20}O$	4179-38-8	−1.179856283	↓
	Pyrazine, trimethyl-	三甲基吡嗪	$C_7H_{10}N_2$	14667-55-1	3.347831042	↑
	1H-Pyrrole-2,5-dione, 1-ethyl-	1-乙基吡咯-2,5-二酮	$C_6H_7NO_2$	128-53-0	4.252350269	↑
酯	Ethyl {[(ethylthio) carbonyl]thio}acetate	{[(乙硫基)羰基]硫基}乙酸乙酯	$C_7H_{12}O_3S_2$	1000461-04-5	−1.202565489	↓
	.gamma.-Dodecalactone	γ-十二内酯	$C_{12}H_{22}O_2$	2305-05-7	−1.080162199	↓
	6-Nonynoic acid, methyl ester	6-壬酸甲酯	$C_{10}H_{16}O_2$	20731-17-3	4.991066402	↑

表 3 正负离子模式下发酵-炮制人参与发酵人参共有显著差异代谢化合物分析

Table 3 Analysis of significant differences in metabolic compounds of fermented-processed ginseng and fermented ginseng in the positive and negative ion mode

物质一级分类	物质英文名称	物质中文名称	分子式	CAS	log_2FC	类型
醇	3-Cyclohexene-1-ethanol	3-环己烯-1-乙醇	$C_8H_{14}O$	18240-10-3	−1.435643926	↓
	3-Cyclopentyl-1-propanol	3-环戊基-1-丙醇	$C_8H_{16}O$	767-05-5	−1.429132477	↓
烃类	(1-butyloctyl)-Benzene	(1-丁基辛基)-苯	$C_{18}H_{30}$	2719-63-3	−1.216556977	↓
	(1-methylundecyl)-Benzene	(1-甲基十一烷基)-苯	$C_{18}H_{30}$	2719-61-1	−1.216556977	↓
	(1-pentylheptyl)-Benzene	(1-戊基庚基)-苯	$C_{18}H_{30}$	2719-62-2	−1.216556977	↓
	1,5,5-trimethyl-3-methylene-Cyclohexene	1,5,5-三甲基-3-亚甲基-环己烯	$C_{10}H_{16}$	16609-28-2	−1.319758033	↓
	3-ethenyl-Cyclooctene	3-乙烯基-环辛烯	$C_{10}H_{16}$	2213-60-7	−1.303178314	↓
	2-methyl-2-Decene	2-甲基-2-癸烯	$C_{11}H_{22}$	23381-92-2	−1.290248438	↓
	Cyclooctane	环辛烷	C_8H_{16}	292-64-8	−1.253988563	↓
	ethyl-Cyclopentane	乙基环戊烷	C_7H_{14}	1640-89-7	5.484507698	↑
	3-(2-methylpropyl)-Cyclohexene	3-(2-甲基丙基)-环己烯	$C_{10}H_{18}$	4104-56-7	5.65782758	↑
含氮化合物	tetraethyl-Urea	四乙基脲	$C_9H_{20}N_2O$	1187-03-7	−1.494185427	↓
	4-Cyanocyclohexene	4-氰基环己烯	C_7H_9N	100-45-8	−1.315717793	↓
	5-Hydroxymethylfurfural	5-氧甲基糠醛	$C_6H_6O_3$	67-47-0	−1.264278332	↓
醛	Tonalid	吐纳麝香	$C_{18}H_{26}O$	21145-77-7	−1.383607466	↓
	Heptadecanal	十七醛	$C_{17}H_{34}O$	1000376-70-0	4.932174219	↑
	2,4-Nonadienal	2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	6750-03-4	6.341004162	↑
	2,4-Nonadienal, (E,E)-	(E,E)-2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	5910-87-2	6.341004162	↑
酸	3-FurAldehyde	3-甲醛	$C_5H_4O_2$	498-60-2	11.48442572	↑
	2-Methylheptanoic Acid	2-甲基庚酸	$C_8H_{16}O_2$	1188-02-9	−1.188319743	↓
萜类	beta.-Phellandrene	β-水芹烯	$C_{10}H_{16}$	555-10-2	−1.443177957	↓
	Bicyclo[2.2.1]heptane, 7,7-dimethyl-2-methylene-	7,7-二甲基-2-亚甲基-双环[2.2.1]庚烷	$C_{10}H_{16}$	471-84-1	−1.224217831	↓
	Linalool	芳樟醇	$C_{10}H_{18}O$	78-70-6	−1.135417713	↓
	Naphthalene, decahydro-4a-methyl-1-methylene-7-(1-methylethenyl)-,[4aR-(4a.alpha.,7.alpha.,8a.beta.)]-	β-芹子烯	$C_{15}H_{24}$	17066-67-0	6.276553738	↑

续表 3

物质一级分类	物质英文名称	物质中文名称	分子式	CAS	log_2FC	类型
酮	2-Nonanone	2-壬基酮	$C_9H_{18}O$	821-55-6	−1.492186138	↓
	4-Nonanone	4-壬酮	$C_9H_{18}O$	4485-09-0	−1.492186138	↓
	Acetophenone, 4'-hydroxy-	4'-羟基-苯乙酮	$C_8H_8O_2$	99-93-4	−1.437007753	↓
	Ethanone, 1-(3-hydroxyphenyl)-	1-(3-羟苯基)-乙酮	$C_8H_8O_2$	121-71-1	−1.437007753	↓
	Cyclohexanone, 2,2,6-trimethyl-	2,2,6-三甲基-环己酮	$C_9H_{16}O$	2408-37-9	−1.313851897	↓
	2-Tridecanone	2-十三酮	$C_{13}H_{26}O$	593-08-8	4.144735087	↑
	2,4-dimethyl-3-Pentanone	2,4-二甲基-3-戊酮	$C_7H_{14}O$	565-80-0	4.802531145	↑
	2(5H)-Furanone	2(5H)-呋喃酮	$C_4H_4O_2$	497-23-4	5.499095054	↑
	4-acetyl-3-Carene	4-乙酰基-3-胡萝卜素	$C_{12}H_{18}O$	1000156-14-1	6.268625699	↑
	2-methyl-2-Cyclopenten-1-one	2-甲基-2-环戊烯-1-酮	C_6H_8O	1120-73-6	12.38634438	↑
杂环化合物	6-methyl-7-Oxa-8-azabicyclo[4.2.1]non-8-ene	6-甲基-7-氧杂-8-氮杂双环[4.2.1]非-8-烯	$C_8H_{13}NO$	1000362-10-7	−1.347814539	↓
	3-Amino-5-pyrazolol	3-氨基-5-吡唑洛尔	$C_3H_5N_3O$	6126-22-3	−1.236940166	↓
	Indole	吲哚	C_8H_7N	120-72-9	4.133784066	↑
	Acetylpyrazine	乙酰吡嗪	$C_6H_6N_2O$	22047-25-2	4.578863699	↑
	Ethanone, 1-(2-furanyl)-	乙酰呋喃	$C_6H_6O_2$	1192-62-7	7.974593965	↑
酯	Acetic acid, pentyl ester	乙酸戊酯	$C_7H_{14}O_2$	628-63-7	−1.395842314	↓
	2-Ethylhexyl 2-ethylhexanoate	2-乙基己酯 2-乙基己酸酯	$C_{16}H_{32}O_2$	7425-14-1	−1.275080266	↓
	Ethyl 4-oxo-2-phenylpentanoate	4-氧代-2-苯基戊酸乙酯	$C_{13}H_{16}O_3$	1000427-11-2	4.380966315	↑
	3-hydroxy-Benzoic acid, methyl ester	3-羟基苯甲酸甲酯	$C_8H_8O_3$	19438-10-9	4.959674642	↑
	Butanoic acid, ethyl ester	丁酸乙酯	$C_6H_{12}O_2$	105-54-4	5.179177345	↑

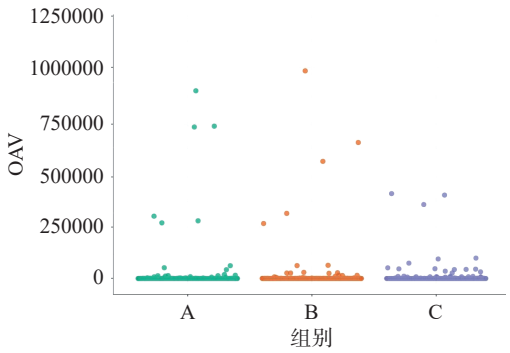


图 6　三组人参 OAV 散点图

Fig.6　Scatter plots of OAV of three groups of ginseng

对单一，主要由少数关键化合物主导，这与原始人参以青草气、轻微苦味和少量醇类香气为主的感官特征相一致；发酵人参有一种风味物质的 OAV 超过 750000，发酵风味明显，发酵过程极大地放大了某些特征化合物的香气贡献。这些化合物大多与乳酸菌代谢相关，如由脂肪酸裂解产生的醛类或由氨基酸代谢生成的酯类，通常会赋予明显的酸香、果香或乳香。由此可以看出，发酵不仅提高了香气物质的复杂性，也显著强化了其感官识别度；发酵-炮制人参大部分位于 0~250000，推测这是由于炮制过程中的高温和美拉德反应对挥发性成分的调节作用：一方面抑制了部分高强度气味物质的贡献，另一方面产生了带有温和焦糖香、甜香和药香的杂环类与吡嗪类化合物，风味轮廓更加柔和、协调[34]。

2.4.2　特征香气成分 OAV 差异分析　在总体 OAV 分布趋势的基础上，为进一步探讨各组样品香气差异的具体来源，利用 GC-MS 对鲜参、发酵参及发酵-炮制参的特征香气成分进行了深入分析，并以 OAV 评估其香气贡献大小[35]。根据前期数据筛选变化最为显著的物质设定范围，从原始数据中选取各组 OAV 比值绝对值排名前 20 的化合物，去除重复后共得到十大类 60 种特征成分（表 4）。计算结果表明，人参中 OAV>1 的挥发性物质有 36 种，发酵参为 38 种，发酵-炮制参为 39 种，整体呈逐步增加趋势，表明发酵与炮制共同促进了香气成分的丰富化。

人参特征香气成分中含有丁香酚，这是一种具有抑制细菌真菌作用的刺激性植物挥发油，热稳定性高，有抗氧化、抗炎、降血糖、神经保护等作用[36]。主要为人参提供烟熏味和木质香，在发酵炮制后相对趋势下降，减少了鲜人参的一些刺激气味。

三组人参中，醛类物质的 OAV 均较高，除 5-氧甲基糠醛外，发酵和炮制使各醛类物质贡献度都有提升，主要为人参贡献了更浓郁的果味以及脂肪味，可能会提高市场对人参的接受度。

萜类物质是人参主要活性成分之一，同时也是人参风味丰富性的主要来源[37]，主要为人参提供花香、草药香和木质香。α-蒎烯是人参的主要香气成分之一，具有抗炎抗菌的作用。月桂烯广泛存在于啤酒花、香叶、柠檬草、百里香等多种植物中，具有浓郁的草本和辛香气息，还带有些许果香，为人参提供了芳香气味，并且有抗炎镇痛的功效[38]。β-罗勒烯是一种天然倍半萜类化合物，常见于罗勒、洋甘菊、姜、柑橘皮等多种植物的精油中，具有温暖的木香和轻微的甜香，赋予人参特有香气[39]。

2.5　电子鼻分析

2.5.1　电子鼻雷达图分析　为进一步验证 GC-MS 与

表 4 三组人参特征香气成分 OAV 分析结果

Table 4 OAV analysis results of ginseng aroma components in three groups

物质一级分类	物质	分子式	香气描述	阈值[40]（μg/mL）	OAV		
					A	B	C
醇	2-苯氧基乙醇	$C_8H_{10}O_2$	玫瑰, 脂肪味	6.90×10^{2}	4.39×10^{-9}	1.01×10^{-7}	1.13×10^{-7}
	1-戊醇	$C_5H_{12}O$	坚果, 燃油	5	3.88×10^{-4}	4.75×10^{-3}	4.05×10^{-3}
	十四醇	$C_{14}H_{30}O$	果味, 鸢尾花香, 椰子	5	2.27×10^{-2}	1.28×10^{-3}	1.11×10^{-2}
	5-甲基-2-(1-甲基乙基)-环己醇	$C_{10}H_{20}O$	薄荷脑, 薄荷香	5.00×10^{-1}	9.16×10^{-4}	1.30×10^{-3}	1.79×10^{-2}
	壬醇	$C_9H_{20}O$	脂肪味, 花香, 玫瑰花	5.30×10^{-3}	2.48×10^{3}	3.19×10^{3}	3.19×10^{2}
	1-庚醇	$C_7H_{16}O$	草味	3.00×10^{-3}	1.58×10^{4}	4.05×10^{4}	2.10×10^{3}
	3-(甲硫基)-1-丙醇	$C_4H_{10}OS$	卷心菜, 熟土豆, 大蒜	3.60×10^{-2}	5.89×10^{1}	1.74×10^{1}	8.01
烃类	萘	$C_{10}H_8$	辛辣味, 柏油味	5.00×10^{-2}	2.78×10^{1}	3.34×10^{1}	4.1
	十五烷	$C_{15}H_{32}$	蜡烛味	1.30×10^{4}	2.81×10^{-9}	1.83×10^{-9}	1.32×10^{-9}
酚	异丁香酚	$C_{10}H_{12}O_2$	甜味, 辣味, 丁香花香, 木质香, 花香	1.00×10^{-1}	1.28	1.82	2.26×10^{-1}
	丁香酚	$C_8H_{10}O_3$	烟熏味, 苯酚味, 香醋味, 培根味, 木质香	2.90×10^{-2}	7.7	1.05×10^{1}	4.59
	草蒿脑	$C_{10}H_{12}O$	甜味, 茴香味, 香辛料, 草药味	3.50×10^{-2}	1.39×10^{1}	1.49×10^{1}	2.1
	对甲酚	C_7H_8O	苯酚, 水仙花味	2.40×10^{-4}	9.90×10^{3}	9.38×10^{4}	6.66×10^{5}
	间甲酚	C_7H_8O	烟熏味, 石油味	3.80×10^{-1}	3.95×10^{-3}	3.74×10^{-2}	2.66×10^{-1}
	对苯三酚	$C_{10}H_{14}O$	甜味, 果味, 樱桃, 香豆素, 花香, 樟脑	5.1	1.16×10^{-4}	1.04×10^{-3}	8.02×10^{-4}
醛	(Z)-3-己烯醛	$C_6H_{10}O$	脂肪味, 青草味, 水果香, 苹果味	4.00×10^{-3}	3.33×10^{1}	4.18×10^{2}	1.69×10^{3}
	庚醛	$C_7H_{14}O$	醛味, 脂肪味, 草药味, 葡萄酒	2.80×10^{-3}	1.58×10^{3}	1.39×10^{4}	1.99×10^{4}
	2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	脂肪味, 黄瓜	5.00×10^{-5}	1.97×10^{6}	5.69×10^{6}	4.97×10^{8}
	(E,E)-2,4-壬二烯醛	$C_9H_{14}O$	脂肪味, 蜡质, 黄瓜	1.60×10^{-4}	1.92×10^{5}	5.56×10^{5}	4.85×10^{7}
	己醛	$C_6H_{12}O$	醛味, 青草味, 醋味	5.00×10^{-3}	1.05×10^{3}	1.15×10^{3}	1.44×10^{4}
	5-氧甲基糠醛	$C_6H_6O_3$	脂肪味, 黄油, 蜡质, 焦糖	1.00×10^{3}	4.30×10^{-7}	5.65×10^{-7}	2.19×10^{-7}
酸	戊酸	$C_5H_{10}O_2$	酸味	1.50×10^{-4}	2.47×10^{5}	3.28×10^{6}	2.77×10^{5}
	十一碳烯酸	$C_{11}H_{20}O_2$	甜味, 木质味	2.3	8.99×10^{-3}	6.60×10^{-3}	7.82×10^{-4}
	十一碳酸	$C_{11}H_{22}O_2$	蜡质, 奶油, 奶酪, 脂肪味, 椰子	1.00×10^{1}	7.85×10^{-4}	7.16×10^{-4}	1.13×10^{-4}
萜类	L-α-松油醇	$C_{10}H_{18}O$	丁香花香, 花香	3.30×10^{-1}	2.56×10^{-1}	3.31×10^{1}	3.48
	α-松油醇	$C_{10}H_{18}O$	松香, 鸢尾花香	3.00×10^{-1}	3.09×10^{-1}	4.00×10^{1}	4.21
	脱氢B-环柠檬醛	$C_{10}H_{14}O$	青草味, 苯酚, 迷迭香, 烟草, 辛辣味	3.00×10^{-3}	4.21×10^{2}	4.54×10^{4}	6.46×10^{3}
	松油烯-4-醇	$C_{10}H_{18}O$	松香, 肉豆蔻	1.2	9.57×10^{-4}	1.36×10^{-3}	1.93×10^{-2}
	薄荷醇	$C_{10}H_{20}O$	薄荷味	9.00×10^{-1}	2.83×10^{-4}	4.02×10^{-4}	5.53×10^{-3}
	3,6-二氢-4-甲基-2-(2-甲基-1-丙烯基)-2H-吡喃	$C_{10}H_{16}O$	青草味, 水仙花香, 芹菜	8.00×10^{-2}	5.67×10^{-1}	7.70×10^{-1}	8.11
	α-蒎烯	$C_{10}H_{16}$	樟脑, 甜味, 木质香	2.74×10^{-1}	6.34×10^{1}	6.54×10^{1}	5.94
	茴香脑	$C_{10}H_{12}O$	甜的, 花香的	1.50×10^{-2}	9.31×10^{1}	2.26×10^{2}	1.31×10^{1}
	(Z)-β-辛二烯	$C_{10}H_{16}$	花香, 青草香, 花香, 甜味	3.40×10^{-2}	8.14×10^{3}	7.29×10^{3}	7.5
	香芹酮	$C_{10}H_{14}O$	薄荷味, 甘草	6.70×10^{-2}	5.09	7.16	7.40×10^{-1}
	(+)-香芹酮	$C_{10}H_{14}O$	香料, 薄荷味, 面包, 香菜味	1.00×10^{-2}	2.29×10^{2}	3.22×10^{2}	3.32×10^{1}
	β-石竹烯	$C_{15}H_{24}$	甜味, 木质香, 香料, 丁香花香	1.54	9.42×10^{-1}	1.06	1.68
	月桂烯	$C_{10}H_{16}$	香醋, 香料	1.50×10^{-2}	2.18×10^{3}	2.12×10^{3}	1.69×10^{3}
	β-罗勒烯	$C_{10}H_{16}$	甜的, 草药味	3.40×10^{-2}	8.14×10^{3}	7.29×10^{3}	7.5
	芳樟醇	$C_{10}H_{18}O$	花香	6.00×10^{-3}	3.21×10^{4}	4.61×10^{4}	2.01×10^{4}
酮	(Z)-3-甲基-2-(2-戊烯基)-2-环戊烯-1-酮	$C_{11}H_{16}O$	木质, 草本, 花香, 辛辣, 茉莉, 芹菜	2.60×10^{-4}	7.27×10^{3}	7.00×10^{4}	1.36×10^{5}
	2(5H)-呋喃酮	$C_4H_4O_2$	黄油味	6.00×10^{-2}	1.64	2.34	9.90×10^{1}
	2,4-二甲基-3-戊酮	$C_7H_{14}O$	丙酮	8.00×10^{-2}	1.95×10^{-2}	2.77×10^{-2}	7.25×10^{-1}
	十一烷酮	$C_{11}H_{22}O$	蜡质, 果味, 奶油, 脂肪, 鸢尾花香	6.20×10^{-3}	1.52×10^{2}	7.05×10^{2}	1.24×10^{4}
	2-十三酮	$C_{13}H_{26}O$	脂肪味, 蜡质, 乳制品, 椰子, 坚果, 青草香	5.00×10^{-1}	4.78×10^{-2}	6.35×10^{-2}	1.1

续表 4

物质一级分类	物质	分子式	香气描述	阈值[40]（μg/mL）	OAV		
					A	B	C
杂环化合物	三甲基吡嗪	$C_7H_{10}N_2$	坚果味，可可味，烘焙，土豆，花生，榛子	2.90×10^{-1}	1.06×10^{-2}	1.51×10^{-1}	1.79×10^{-1}
	戊基呋喃	$C_9H_{14}O$	果香，豆类，蔬菜	6.00×10^{-3}	3.53×10^{2}	5.60×10^{2}	2.87×10^{4}
	吲哚	C_8H_7N	花香，樟脑丸	4.00×10^{-2}	3.33	6.71	1.10×10^{2}
	1-甲基-1H-吡咯-2-甲醛	C_6H_7NO	烧烤味，坚果味	3.70×10^{-2}	3.46×10^{2}	4.61×10^{2}	4.11×10^{3}
	异丙基甲氧基吡嗪	$C_8H_{12}N_2O$	豆类，巧克力味，坚果味	2.00×10^{-6}	1.12×10^{11}	1.63×10^{11}	1.81×10^{10}
	吡嗪	$C_4H_4N_2$	辛辣，甜味，玉米，榛子，大麦	1.80×10^{2}	1.53×10^{-8}	1.17×10^{-7}	3.57×10^{-7}
酯	γ-非内酯	$C_9H_{16}O_2$	椰子，木质香	7.90×10^{-3}	5.85×10^{1}	8.51×10^{2}	2.35×10^{3}
	γ-十一内酯	$C_{11}H_{20}O_2$	果味，桃子味，奶油味，脂肪味，乳酸味，杏味，椰子味	2.10×10^{-3}	3.34×10^{3}	3.30×10^{4}	4.95×10^{4}
	水杨酸甲酯	$C_8H_8O_3$	焦糖味，薄荷味	4.00×10^{-2}	3.21	3.14×10^{1}	4.36
	丁酸乙酯	$C_6H_{12}O_2$	酒精	5.30×10^{-5}	7.85×10^{5}	4.78×10^{5}	1.62×10^{7}
	乙酸松油酯	$C_{12}H_{20}O_2$	青草香，佛手柑，薰衣草，酸橙，柑橘	2.5	1.07	5.43×10^{-1}	4.01×10^{-2}
	乙酸香茅酯	$C_{12}H_{22}O_2$	花香，玫瑰，水果，柑橘，木质香，热带水果	1	6.16×10^{-1}	2.99×10^{-1}	6.06×10^{-2}
	环戊烷乙酸3-氧-2-戊基甲酯	$C_{13}H_{22}O_3$	花香，脂肪味，茉莉花香	1.30×10^{-2}	5.28×10^{1}	3.61	1.57×10^{1}
	月桂酸乙酯	$C_{14}H_{28}O_2$	甜的，蜡质，花香，肥皂味	5.00×10^{-1}	2.36×10^{-3}	4.45×10^{-3}	3.61×10^{-2}
	顺-3-己烯基水杨酸酯	$C_{13}H_{16}O_3$	花香，青草香，脂肪味	1.15×10^{-1}	6.85×10^{-1}	9.95×10^{-1}	7.19
	乙酸苄酯	$C_9H_{10}O_2$	甜味，花香，果香，茉莉香	3.64×10^{-1}	2.77×10^{-1}	4.70×10^{-1}	2.69×10^{-2}

OAV 分析所得的香气差异结果，采用 PEN3 快速气相电子鼻对三组样品的整体风味特征进行检测[41]，并以雷达图形式进行可视化表达，如图 7 所示。电子鼻能够综合识别样品的挥发性气味轮廓，其响应模式可与前述 OAV 结果相互印证。

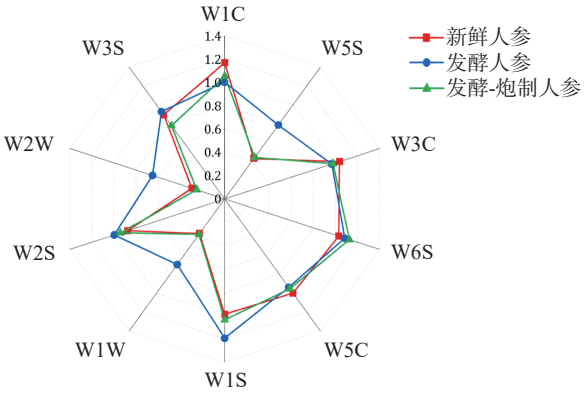


图 7　鲜人参、发酵人参及发酵-炮制人参电子鼻雷达图

Fig.7　Fresh ginseng, fermented ginseng and fermented-processed ginseng electronic nose radar

三组样品在多个传感器上均表现出明显响应差异，尤其在 W3S 与 W1C 传感器处差异最为突出，说明发酵与炮制过程显著影响了人参中长链烷烃、芳香物质及氢化物的含量与释放。检测器 W3S 对应的主要差异物质为十五烷，具有蜡烛气味；W1C 检测出的特征物质包括对甲酚、萘和草蒿脑，带有水仙花、辛辣、茴香及草药气息。结合前述 OAV 结果可知，发酵促进了人参中醛类与酯类物质的生成，增强了酸香与果香特征，而炮制过程通过高温和美拉德反应抑制了部分刺激性成分，生成焦糖香与甜香物质。电子鼻雷达图的结果与此一致。发酵-炮制人参在芳香类与烷烃类传感器上的响应强度整体较低，其整体香气轮廓更加柔和、协调，与参考文献一致[42]。

2.5.2　电子鼻 PCA　由图 8 的 PCA 可知，第一主成分的方差贡献率为 59.4%，第二主成分的方差贡献率为 24.2%，两者的总贡献率为 83.6%，表明此三者风味差异较大，整体区分度较好[43]。其中人参的挥发性气味主要被 W3C、W1C、W3S、W1W、W2W 传感器接收，发酵人参的挥发性气味主要被 W3C、W3S、W5S 传感器接收，发酵-炮制人参的挥发性气味主要被 W3C、W6S、W5S、W3S 传感器接收。因此，说明发酵人参和发酵-炮制人参感官特征变化显著，可以采用电子鼻技术对不同加工工艺的人参进行区分。

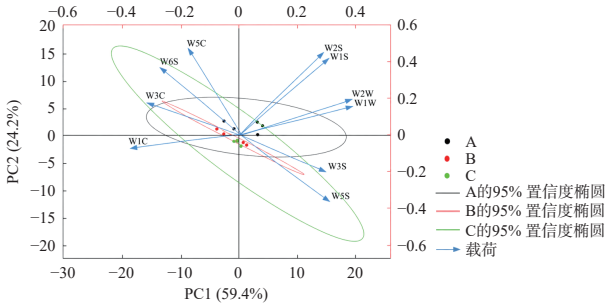


图 8　鲜人参、发酵人参及发酵-炮制人参电子鼻 PCA

Fig.8　PCA of fresh ginseng, fermented ginseng and fermented-processed ginseng electronic nose

3　结论

本研究通过整合质谱分析、代谢组学与电子鼻技术，系统阐明了“乳酸菌发酵-热炮制”联合工艺对

人参挥发性代谢物的协同重塑机制。研究证实在 72 h 的最佳发酵时间内，微生物的酶促作用主导了多糖的降解与原人参皂苷的生物转化，为风味物质的形成提供了关键前体。代谢组学分析揭示发酵与炮制在代谢调控上表现出互补性与协同效应，发酵阶段主要通过脂质降解与酯化反应富集醛类与酯类等挥发性代谢物，赋予产品酸香与果香特征；而后续炮制则通过高温诱导的美拉德反应，促进杂环化合物（如吡嗪类、呋喃类）大量生成，引入焦糖香与甜香。通过生物转化与热化学反应的叠加效应显著提升了人参化学成分多样性，同时优化了整体风味品质。

在风味品质与检测应用方面，联合工艺成功实现了人参整体风味的优化与改性。OAV 分析表明，发酵和炮制使各醛类物质贡献度都有提升，主要为人参贡献了更浓郁的果味以及脂肪味，有效解决了人参原料风味接受度低的问题。联合工艺还促进了稀有皂苷的生成，特征萜类成分（如 α-蒎烯、月桂烯、β-罗勒烯）的保留不仅贡献了草本花香，也维持了药理活性。同时，电子鼻分析结果与 GC-MS 代谢组学数据呈现高度一致性，能够灵敏区分不同加工阶段的样本，验证了该技术在人参风味监控中的适用性。本研究结果揭示了发酵与炮制协同增效的物质基础，为人参增香工艺的标准化及新型发酵功能产品的开发提供了理论依据。

© 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] PARK K M, KIM S Y. Mass spectrometry based metabolomics approach on the elucidation of volatile metabolites formation in fermented foods: A mini review[J]. Food Science and Biotechnology, 2021, 30(7): 1−10.

[2] JIANG L, CHEN Y, ZHAO T, et al. Analysis of differential metabolites in Liuyang Douchi at different fermentation stages based on untargeted metabolomics approach[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102097−102097.

[3] ZHANG A, ZHANG W, GUO X, et al. Sequential bioaugmentation of the dominant microorganisms to improve the fermentation and flavor of cereal vinegar[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 101952.

[4] 陈扬, 梁泓波, 李雅琪, 等. 双菌发酵对祛湿汤理化特性及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 160−170. [CHEN Y, LIANG H B, LI Y Q, et al. Effects of two-bacteria fermentation on physical, chemical properties and flavor of danpness-eliminating decoction[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 160−170.]

[5] KAMBER A, ALBAYRAK B C, HARSA S H. Studies on the probiotic, adhesion, and induction properties of artisanal lactic acid bacteria: To customize a gastrointestinal niche to trigger anti-obesity functions[J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins, 2024(prepublish): 1−23.

[6] NAHEED M, MASOUMEH B, NARGES V. *In vitro* and *in vivo* analysis of human milk lactic acid bacteria isolates for their anti-hypercholesterolemia actions[J]. Indian Journal of Microbiology, 2024, 64(1): 175−185.

[7] 高兴, 高燕, 赵璇, 等. 基于微生物发酵的人参皂苷转化研究进展[J]. 中国现代中药, 2025, 27(7): 1379−1391. [GAO X, GAO Y, ZHAO X, et al. Progress in the study on ginsenoside transformation based on microbial fermentation[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2025, 27(7): 1379−1391.]

[8] 严建刚, 陆路, 付少委, 等. 乳酸菌发酵转化人参皂苷 Rg3 工艺研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(16): 222−230. [YAN J G, LU L, FU S W, et al. Study on the process of ginsenoside Rg3 transformation by lactic acid bacteria fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(16): 222−230.]

[9] 刘士伟, 刘胜楠, 米倩雯, 等. 植物乳杆菌发酵人参中活性成分改变及抗氧化作用[J]. 食品科学, 2023, 44(20): 252−259. [LIU S W, LIU S N, MI Q W, et al. Changes in active components and antioxidant activity of ginseng fermented by *Lactiplantibacillus plantarum*[J]. Food Science, 2023, 44(20): 252−259.]

[10] JIHYEON J, JINHYANG P, YEON S J, et al. Concomitant administration of red ginseng extract with lactic acid bacteria increases the plasma concentration of deglycosylated ginsenosides in healthy human subjects[J]. Biomolecules, 2022, 12(12): 1896−1896.

[11] ZHANG F, GU Y, GUO Y, et al. Process optimization and flavor characteristics of cream cheese fermented with avocado co-cultures[J]. Food Chemistry: X, 2025, 29: 102745.

[12] 吴金峰, 章航嘉, 胡释, 等. 基于微生物群落调控的尼泊尔葡萄球菌对低盐发酵鱼露风味品质的改善[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 101−113. [WU J F, ZHANG H J, HU S, et al. Improvement of flavor quality of low-salt fermented fish sauce by *Staphylococcus nepalensis* based on microbial community regulation[J]. Food Science, 2025, 46(8): 101−113.]

[13] WEN T G, LIN Y L, WEN J R, et al. Non-targeted metabolomic analysis of variation of volatile fractions of ginseng from different habitats by HS-SPME-GC-MS coupled with chemometrics[J]. Analytical Methods:Advancing Methods and Applications, 2022, 14(36): 3583−3597.

[14] 蔡金文. 人参及其发酵工艺研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022(3): 149−151. [CAI J W. Research progress on ginseng and its fermentation technology[J]. China Food Safety Magazine, 2022(3): 149−151.]

[15] JANG Y G, LEE J Y, LI M, et al. Changes in ginsenoside compositions by high temperature processing under various soaking conditions[J]. Food Science and Technology Research, 2017, 23(5): 689−696.

[16] MO J S, KIM J E, LEE H Y, et al. Fermented cultured wild ginseng roots (*Panax ginseng* C. A. Meyer) using *Limosilactobacillus fermentum* hy7303 enhances the intestinal barrier by bioconversion of ginsenosides and extracellular vesicle production[J]. Fermentation, 2024, 10(7): 362−362.

[17] 郭巨先, 黄家昕, 李桂花, 等. 芋头挥发性代谢物分析及其品质综合评价[J]. 作物杂志, 2022(6): 167−173. [GUO J X, HUANG J X, LI G H, et al. Volatiles metabolites analysis and evaluationon quality traits of different tora var[J]. Crop Journal, 2022(6): 167−173.]

[18] 杨芳, 龙泽霞, 卢文艳, 等. 天麻洋参含片中天麻素和人参总皂苷的含量测定[J]. 现代食品, 2023, 29(2): 218−222. [YANG F, LONG Z X, LU W Y, et al. Determination of gastrodin and total ginsenosides in *Gastrodia elata*-ginseng lozenges[J]. Modern Food, 2023, 29(2): 218−222.]

[19] GONG Z, WU Z, YANG Q, et al. Influences of lactic acid bacteria strains on the flavor profiles, metabolites and quality characteristics of red yeast rice produced by solid-state fermentation[J]. Food Research International, 2024, 197(P1): 115172.

［20］ ZHANG G J, ZHANG Y, ZHANG W W, et al. Differential metabolites analysis in *Lycium barbarum* and *Platycodon grandiflorus* fermented wine by untargeted metabolomics[J]. Applied Food Research, 2024, 4(2): 100631.
［21］ SHAN X, LI L, LIU Y, et al. Untargeted metabolomics analysis using UPLC-QTOF/MS and GC-MS to unravel changes in antioxidant activity and compounds of almonds before and after roasting[J]. Food Research International, 2024, 194: 114870.
［22］ YE Y H, ZHENG S Y, WANG Y X. Analysis of aroma components changes in Gannan navel orange at different growth stages by HS-SPME-GC–MS, OAV, and multivariate analysis[J]. Food Research International, 2024, 175: 113622.
［23］ 严学芬, 许应芬, 李海燕, 等. 基于顶空固相微萃取法-气相色谱-质谱法和相对气味活度值分析 13 种凤凰单丛茶香气成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(17): 5459−5467. ［YAN X F, XU Y F, LI H Y, et al. Analysis of aroma components of 13 kinds of Fenghuang Dancong tea basedon headspace solid phase microextraction-gas chromatography-massspectrometry and relative odor activity value[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(17): 5459−5467.］
［24］ 杨芳, 杨莉, 粟立丹. 基于电子鼻和气相-离子迁移谱对美人椒酱的风味分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(23): 193−198,206. ［YANG F, YANG L, SU L D. Flavor analysis of beauty pepper sauce based on electronic nose and gas-phase-ion mobility spectrometry[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(23): 193−198,206.］
［25］ LEE Y M, SEO S H, SINGH D, et al. Unraveling dynamic metabolomes underlying different maturation stages of berries harvested from *Panax ginseng*[J]. Journal of Ginseng Research, 2020, 44(3).
［26］ 贾勇磊, 张宿义, 许德富, 等. 泸型酒糟醅中微生物组学和挥发性代谢物关联性分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 72−81. ［JIA Y L, ZHANG S Y, XU D F, et al. Correlation analysis of microbiomics and volatile metabolites in fer-mented grains from Luzhou-flavor liquor[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(13): 72−81.］
［27］ 黄小红, 梁愿, 黄莉梅, 等. 青稞 β-葡聚糖降解物对 II 型糖尿病小鼠降糖效果及其机制[J]. 食品工业科技, 2025, 46(20): 409−418. ［HUANG X H, LIANG Y, HUANG L M, et al. Hypoglycemic effect and mechanism of highland barley β-glucan degradation products on type II diabetic mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(20): 409−418.］
［28］ TANG X, LIU C, WANG B, et al. Enhancing the anti-fatigue effect of ginsenoside extract by *Bifidobacterium animalis* subsp. lactis CCFM1274 fermentation through biotransformation of Rb1, Rb2 and Rc to Rd[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105251.
［29］ BATRA N, DEY P. Untargeted metabolomics of Aloe volatiles: Implications in pathway enrichments for improved bioactivities[J]. Heliyon, 2025, 11(3): e42268.
［30］ SANGHEE L, SUNMIN L, SEUNGHWA L, et al. Integrated metabolomics and volatolomics for comparative evaluation of fermented soy products[J]. Foods, 2021, 10(11): 2516.
［31］ 张玉超, 朱思洁, 刘良禹, 等. 基于 16S rRNA 技术与代谢组学探究枳椇果梗多糖对酒精暴露小鼠肠损伤的改善作用[J]. 食品科学, 2025, 46(3): 110−118. ［ZHANG Y C, ZHU S J, LIU L Y, et al. Ameliorative effect of hovenia dulcis fruit pedicel polysaccharides on alcohol-induced intestinal injury inmice investigated using 16S rRNA sequencing and metabolomics[J]. Food Science, 2025, 46(3): 110−118.］
［32］ MA Q, LIU L, JIAO Y, et al. Insights into flavor quality and metabolites profiles of fresh cheese with different probiotics by SPME-GC-MS and untargeted metabolomics[J]. Food Research International, 2024, 197(P1): 115154−115154.
［33］ TIANYAN C, HANYU W, WEI S, et al. Analysis of the formation mechanism of volatile and non-volatile flavor substances in corn wine fermentation based on high-throughput sequencing and metabolomics[J]. Food Research International, 2023, 165: 112350.
［34］ CAO W, SUN H, SHAO C, et al. Exploring the effects of nitrogen and potassium on the aromatic characteristics of ginseng roots using non-targeted metabolomics based on GC-MS and multivariate analysis[J]. Foods, 2025, 14(17): 2981.
［35］ 郭小雨, 李梦丽, 张涛. 百香果发酵型果酒制备及其风味品质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(20): 290−299. ［GUO X Y, LI M L, ZHANG T. Preparation of fermented passion fruit wine and its flavor quality analysis[J]. Science andTechnology of Food Industry, 2024, 45(20): 290−299.］
［36］ KASHANI T N, HASANPOUR M, RAHIMI B V, et al. Pharmacodynamic, pharmacokinetic, toxicity, and recent advances in Eugenol's potential benefits against natural and chemical noxious agents: A mechanistic review[J]. Toxicon, 2024, 238: 107607.
［37］ YEJIN K, JUNGWOO L, ICKHYUN J, et al. Volatile compositions of *Panax ginseng* and *Panax quinquifolium* grown for different cultivation years[J]. Foods, 2022, 12(1): 136.
［38］ YAVUZ T B, COKELI K E, HACIOGLU G, et al. Endoplasmic reticulum stress modulation by alpha-pinene in a rotenone-induced rat model of Parkinson's disease[J]. European Journal of Pharmacology, 2025, 1005: 178125.
［39］ WEI Z Z, YIN K J, XIAO Y S, et al. Engineering *Saccharomyces cerevisiae* for synthesis of β-myrcene and (E)-β-ocimene [J]. 3 Biotech, 2023, 13(12): 384.
［40］ 粟紫慧, 曲映红, 施文正, 等. 利用顶空-气相色谱-离子迁移谱结合电子鼻分析黑鱼蒸制过程中挥发性风味物质的变化[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(1): 322−329. ［LI Z H, QU Y G, SHI W Z, et al. Evaluation of aroma characteristics in snakehead fish(*Channa argus*) during steaming using an HS-GC-IMS and E-nose[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(1): 322−329.］
［41］ YANG Y, CHEN J, ZHENG F, et al. Assessment of characteristic flavor and taste quality of sugarcane wine fermented with different cultivars of sugarcane[J]. Fermentation, 2024, 10(12): 628.
［42］ ZHU S, WENWEN Z, YAPING L, et al. An exploration of pepino (*Solanum muricatum*) flavor compounds using machine learning combined with metabolomics and sensory evaluation[J]. Foods, 2022, 11(20): 3248.
［43］ ZHANG P, LIU N J, LI X H, et al. Based on electronic nose and multi-omics, investigate the dynamic changes of volatile and non-volatile organic compounds in waxy wheat Baijiu from different years[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101864.