杨月杭, 刘廷辉, 夏陈, 等. 红曲霉发酵对黑青稞麸皮化学成分的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 179−188. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060268

YANG Yuehang, LIU Tinghui, XIA Chen, et al. Effect of *Monascus* Fermentation on the Phytochemical Components of Black Highland Barley Bran[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 179−188. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060268

· 生物工程 ·

红曲霉发酵对黑青稞麸皮化学成分的影响

杨月杭[1], 刘廷辉[2], 夏　陈[1], 向卓亚[1], 陈修林[3], 张文会[4], 万　燕[3,*], 邓俊琳[1,*]

（1.四川省农业科学院农产品加工研究所（四川省农业科学院食物与营养健康研究所）, 四川成都 610066;
2.甘孜藏族自治州农业科学研究所, 四川甘孜藏族自治州 626000;
3.成都大学食品与生物工程学院, 四川成都 610106;
4.西藏自治区农牧科学院农产品开发与食品科学研究所, 西藏拉萨 850000）

摘　要: 为提高青稞麸皮利用率，本研究利用红曲霉对黑青稞麸皮进行固态发酵，通过综合抗氧化能力指数（Anti-oxidant Potency Composite，APC）评估，并运用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用技术（Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry，HS-SPME-GC-MS）及液相色谱串联质谱（Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry，LC-MS/MS）技术对未发酵样品与最佳发酵时间点的样品进行定量比较，系统分析其挥发性风味物质组成及非靶向代谢组学物质差异。结果表明，在发酵过程中，总多酚与总黄酮含量均呈先升后降的趋势。而对羟基苯甲酸、对香豆酸、木犀草素及其糖苷形式等成分则在未发酵时含量最高，并随发酵进程持续下降。此外，阿魏酸的两种异构体及原儿茶酸等也表现出先增后减的动态变化。通过 APC 评估确定红曲霉发酵黑青稞麸皮最佳时间为 5 d（APC=98.45%），发酵前后共鉴定出 215 种挥发性成分，其中发酵组中酯类、酮类、醇类、醛类和酚类化合物的相对含量显著上升。非靶向代谢组学分析共筛选到 2914 种差异代谢物（VIP≥1、FC≥2 或 FC≤0.5 以及 P<0.05），发酵 5 d 组与未发酵组相比，1671 种代谢物显著（P<0.05）上调，其中 8-脱氧花青素的含量变化最为显著。KEGG 通路富集及相关性分析表明，发酵可有效改善黑青稞麸皮的风味特性，这为其在功能食品开发中的应用提供了理论依据。

关键词: 黑青稞麸皮, 红曲霉, 代谢组学, 固态发酵, 活性成分

中图分类号: TS214.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0179−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060268

本文网刊:

Effect of *Monascus* Fermentation on the Phytochemical Components of Black Highland Barley Bran

YANG Yuehang[1], LIU Tinghui[2], XIA Chen[1], XIANG Zhuoya[1], CHEN Xiulin[3], ZHANG Wenhui[4], WAN Yan[3,*], DENG Junlin[1,*]

（1.Institute of Agro-Products Processing, Sichuan Academy of Agricultural Sciences (Institute of Food Nutrition and Health, Sichuan Academy of Agricultural Sciences), Chengdu 610066, China;
2.Ganzi Tibetan Autonomous Prefecture Institute of Agricultural Sciences, Garzê Zang Autonomous Prefecture 626000, China;
3.School of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Chengdu 610106, China;
4.Institute of Agro-Products Development and Food Sciences, Xizang Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lhasa 850000, China）

收稿日期: 2025−06−23

基金项目: 四川省农业科学院-甘孜藏族自治州合作项目（2025）; 四川省农业科学院科技成果中试熟化与示范转化项目（2025ZSSFTP28）。

作者简介: 杨月杭（1998−）, 女, 硕士, 研究方向: 功能食品研究开发, E-mail: 383728574@qq.com。

*** 通信作者:** 万燕（1983−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 特色杂粮栽培生理及产品研发, E-mail: yanwan@cdu.edu.cn。

邓俊琳（1988−）, 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 功能食品研究开发, E-mail: junlinr@scsaas.cn。

Abstract: This study applied solid-state fermentation with *Monascus* to black highland barley bran to enhance its utilization. The fermentation process was optimized by monitoring the antioxidant potency composite (APC) index. Comparative analysis of unfermented samples and those from the optimal fermentation time point was conducted using headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) and liquid chromatography-tandem mass spectrometry (LC-MS/MS) to systematically profile volatile flavor compounds and untargeted metabolomes. The results demonstrated that the contents of total polyphenols and total flavonoids exhibited an initial increase followed by a decrease during fermentation. In contrast, compounds including 4-hydroxybenzoic acid, p-coumaric acid, luteolin, and its glycoside derivatives peaked in the unfermented samples and declined continuously thereafter. Levels of cis- and trans-ferulic acid, as well as protocatechuic acid, also showed an initial increase followed by a decrease. Based on the APC assessment, the optimum fermentation duration for black barley bran using *Monascus* was established at 5 days, achieving an APC of 98.45%. A total of 215 volatile compounds were identified. Fermentation led to significant increases in the relative contents of esters, ketones, alcohols, aldehydes, and phenols. A total of 2914 differential metabolites were identified in the untargeted metabolomics analysis (VIP≥1, FC≥2 or FC≤0.5, and P<0.05). Compared to the unfermented group, 1671 metabolites were significantly upregulated (P<0.05) in the 5-day fermentation group, with the most notable change observed in the content of 8-deoxyanthocyanin. KEGG pathway enrichment and correlation analyses indicated that fermentation effectively enhanced the flavor profile of black highland barley bran, providing a theoretical foundation for its development into functional foods.

Key words: black highland barley bran; *Monascus purpureus*; metabolomics; solid-state fermentation; bioactive components

青稞,又被称为裸大麦、元麦或米大麦。青稞耐寒性强、生长周期短、适应力强,在中国已有 3500 年的栽培历史[1],主要分布在中国的西藏、青海、四川的甘孜和阿坝、甘肃的甘南、云南的迪庆等高海拔地区[2],在尼泊尔、墨西哥、不丹等高海拔地区也有种植[3]。青稞具有良好的抗氧化、抗癌、改善肠道菌群的作用[4],是一种非常优质的谷物。在青稞加工过程中,麸皮作为副产物的占比约 20%~30%[5]。据报道青稞麸皮具有 β-葡聚糖、膳食纤维、多酚、黄酮、花青素等活性成分[6],这些活性成分赋予青稞麸皮抗氧化、降血糖等生物功效[7]。虽然麸皮具有良好的活性功能,但由于口感不佳,导致大部分麸皮常被当作家畜饲料或直接丢弃,造成营养与经济价值的双重损失。

固态发酵是一种在有限游离水条件下进行的微生物发酵过程,其水分含量既能维持微生物的生长代谢需求,又不超过固体基质的最大持水能力[8]。该技术能有效提升固体基质中的总多酚含量,从而增强其抗氧化能力,并提高酚类化合物的生物利用度[9]。黑青稞麸皮含有大量与纤维素结合的多酚类物质,难以被人体直接吸收利用[10]。已有研究表明青稞麸皮固态发酵后可以释放部分结合酚,提高多酚的利用率[11]。

食药用真菌因其独特的营养特性、风味口感及生理功能优势,在功能性食品开发中备受关注。利用这类真菌进行固态发酵,已成为开发新型功能性食品的有效途径[12]。丝状真菌是固态发酵的典型微生物,因为它们能够适应低湿度环境并产生各种水解酶[13]。相关研究表明,采用红曲霉对谷物进行固态发酵,可有效提升其营养品质与功能特性[14]。

近年来,关于青稞麸皮的研究主要集中在活性成分的提取、营养特性的分析、产品开发以及加工工艺的优化等领域。然而,随着组学技术的不断进步,研究视角逐渐扩展,为青稞麸皮的深入探索提供了新的契机。本研究采用固态发酵处理,并利用代谢组学技术对红曲霉对黑青稞麸皮的最佳发酵时间点的提取物进行深入研究,揭示红曲霉发酵过程中风味物质的转化与积累规律,并分析发酵前后关键差异代谢物及其合成途径的变化。通过以上研究,旨在探索黑青稞麸皮的高值化利用策略,提升青稞资源的综合利用率,为其可持续开发奠定理论基础,并探索创新的技术路径。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

‘隆子’黑青稞麸皮　西藏春光食品有限公司;红曲霉(*Monascus purpureus*, BNCC336199)　河南省工业微生物菌种工程技术研究中心(BeNa Culture Collection, BNCC);氯化钠、甲醇、无水乙醇、福林酚、碳酸钠、结晶氯化铝、亚硝酸钠、氢氧化钠、过硫酸钾、三水醋酸钠、六水合氯化铁、双氧水、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、冰乙酸、盐酸　分析纯,成都市科隆化学品有限公司;马铃薯葡萄糖琼脂　青岛高科技工业园海博生物技术有限公司;芦丁、水溶性维生素 E(Trolox)、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)二铵盐(2,2’-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS)(以上为分析纯)、对羟基苯甲酸、原儿茶酸、对香豆酸、顺式阿魏酸、反式阿魏酸、木犀草素-7-O-葡萄糖醛酸、柯伊利素-7-O-葡萄糖醛酸、柯伊利素、木犀草素(以上为标准品,大于 98%)　上海源叶生物科技有限公司;甲醇、乙腈、正己烷　色谱纯,德国达姆施塔特默克

集团；乙酸　色谱纯，上海易恩化学技术有限公司；甲酸铵、氨水、甲酸　色谱纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

1290 超高效液相色谱仪、Poroshell 120 PFP 色谱柱（4.6×100 mm, 2.7 μm）、8890-7000D GC-MS/MS、DB-5MS（30 m×0.25 mm×0.25 μm）色谱柱、萃取头 120 μm DVB/CWR/PDMS　美国安捷伦科技有限公司；ACQUITY Premier HSS T3 色谱柱（100 mm×2.1 mm, 1.8 μm）　沃特世科技（上海）；Synergy-HTX 多功能酶标仪　美国伯腾仪器有限公司；SPME Arrow 固相微萃取装置、Fiber Conditioning Station 老化装置、Agitato 样品加热箱　CTC Analytics AG；Q Exactive HF-X 质谱仪、Vanquish 超高效液相色谱仪　Thermo Scientific；CentriVap 离心浓缩仪 LABCONCO；Biomek i5 自动化工作站 Beckman Coulter。

1.2　实验方法

1.2.1　原料预处理　将黑青稞麸皮打粉过 60 目筛，得黑青稞麸皮粉，备用；将−80 ℃ 保存的红曲霉菌株复苏并接种于 PDA 培养基，28 ℃ 培养至孢子成熟。收集孢子并用无菌生理盐水制成悬液，经血球计数板调整浓度至 10^7 CFU/mL，于 4 ℃ 储存备用。

1.2.2　样品制备及活性成分提取　固态发酵组：灭菌黑青稞麸皮粉末按 1∶1（v/m）加无菌水混匀。接种 10%（v/v）的红曲霉孢子悬液（10^7 CFU/mL），28 ℃ 固态发酵。分别收集发酵 1、3、5、7、9 d 的样品，冷冻干燥，−80 ℃ 保存。

未发酵组：灭菌黑青稞麸皮粉末按 1∶1（v/m）加无菌水混匀。加入 10%（v/v）生理盐水代替孢子悬液，混匀后立即冷冻干燥，−80 ℃ 保存。

样品活性成分提取参照文献 [15]，具体操作为：称取 4 g 样品，加入 40 mL 80%（v/v）甲醇，于 40 ℃、200 W 功率下依次进行 3 次超声提取（每次 30 min），合并提取液后经 7000 r/min 离心 10 min，收集上清液并通过 0.22 μm 有机滤膜过滤，最终制得浓度约为 100 mg/mL 的提取液，保存于−20 ℃ 备用，供后续功能活性分析使用。

1.2.3　总多酚含量测定　总多酚含量参照文献 [11] 并稍作修改：于 96 孔板中依次加入 20 μL 稀释样品提取液和 20 μL 福林酚试剂，混匀避光反应 5 min；再加入 160 μL 5% Na_2CO_3 溶液，避光反应 60 min 后于 765 nm 测定吸光度。以没食子酸标准曲线（y=0.0057x+0.0012，R^2=0.9993，线性范围 1~100 μg/mL），结果以没食子酸当量（mg GAE/g 干提取物）表示。

1.2.4　总黄酮含量测定　总黄酮含量参照文献 [16] 并稍作修改：于 96 孔板中依次加入 20 μL 稀释样液、15 μL 5% $NaNO_2$ 溶液，反应 6 min；加入 15 μL 10% $AlCl_3 \cdot 6H_2O$ 溶液，反应 5 min；再加入 100 μL 1 mol/L NaOH 溶液，混匀后于 510 nm 测定吸光度。依据芦丁标准曲线（y=0.0006x+0.0016，R^2=0.9992，线性范围 5~150 μg/mL）定量，结果以芦丁当量（mg RE/g 干提取物）表示。

1.2.5　单体酚含量测定　采用高效液相色谱法测定单体酚含量[17]，样品提取液经 0.22 μm 微孔有机相膜过滤后进行进样分析。采用安捷伦 Poroshell 120 PFP 色谱柱（4.6×100 mm, 2.7 μm），配备 DAD 检测器，多酚检测波长分别设置为 254、280、320 和 350 nm。色谱条件：柱温 30 ℃，流速 0.8 mL/min，进样量 5 μL。流动相 A 为含 0.1% 甲酸的水溶液，流动相 B 为乙腈。梯度洗脱程序：0~10 min（5%~10% B），10~20 min（10%~20% B），20~35 min（20%~40% B），35~40 min（40%~70% B），40~45 min（70%~95% B），通过标准品进行定量。

1.2.6　抗氧化活性测定及 APC 指数计算

1.2.6.1　DPPH 自由基清除能力测定　参照文献 [18] 的方法并稍作修改：将 100 μL 样品提取液与等体积 80% DPPH 甲醇溶液混合，室温避光反应 30 min 后于 517 nm 测定吸光度。以 Trolox 标准溶液（母液 54 μg/mL）建立标准曲线（y=0.0684x+0.1406，R^2=0.9961，线性范围 1~12.5 μg/mL），单位为 mg Trolox/g。

1.2.6.2　$ABTS^+$ 自由基清除能力测定　参照文献 [19] 的方法并稍作修改：将 40 μL 样品提取液与 160 μL ABTS 工作液（ΔA≈0.7，80% 甲醇配制）混合，避光反应 6 min 后于 734 nm 测定吸光度。以 Trolox 标准品（母液 54 μg/mL）建立标准曲线（y=0.0454x+0.076，R^2=0.9961，线性范围 1~20 μg/mL），单位为 mg Trolox/g。

1.2.6.3　FRAP 还原能力　参照文献 [15] 的方法并稍作修改：取 30 μL 样品提取液与 265 μL FRAP 工作液于 96 孔板混匀，37 ℃ 反应 30 min 后于 593nm 测定吸光度。同样以 Trolox 标准品（母液 48 μg/mL）建立标准曲线（y=0.0118x+0.0213，R^2=0.9997，线性范围 0.5~30 μg/mL），单位为 mg Trolox/g。

1.2.6.4　APC 指数测定　参考使用抗氧化活性综合（Antioxidant Potency Composite，APC）指数法[20] 进行酚类标准物质单体抗氧化活性比较，按照下式计算 APC 指数[21]。

$$\text{APC 指数}(\%) = \left(\frac{A}{A_{max}} + \frac{B}{B_{max}} + \frac{C}{C_{max}}\right) \Big/ 3 \qquad \text{式（1）}$$

式中，A 为 DPPH 测定值；A_{max} 为 DPPH 最大值；B 为 ABTS 测定值；B_{max} 为 ABTS 最大值；C 为 FRAP 测定值；C_{max} 为 FRAP 最大值；3 为使用方法（DPPH、ABTS、FRAP）的数量。

1.2.7　发酵青稞麸皮挥发性成分测定

1.2.7.1　样品前处理　参考文献 [22] 并稍作修改：冷冻干燥样品经液氮研磨后，准确称取 500 mg，置于顶空瓶中，加入饱和 NaCl 溶液及 20 μL（10 μg/mL）3-己酮溶液内标溶液。于 60 ℃ 下振荡 5 min 后，采用

DVB/CWR/PDMS(120 μm)萃取头在 60 ℃ 顶空吸附 15 min,随后于 GC-MS 进样口 250 ℃ 解吸 5 min,进行 GC-MS 分析。

1.2.7.2 GC 条件 参考文献 [23] 并稍作修改:采用 DB-5MS 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm),高纯氦气载气,流速 1.2 mL/min。进样口温度 250 ℃,不分流进样,溶剂延迟 3.5 min。程序升温:初始 40 ℃(保持 3.5 min),以 10 ℃/min 升至 100 ℃,7 ℃/min 升至 180 ℃,25 ℃/min 升至 280 ℃(保持 5 min)。

1.2.7.3 MS 条件 参考文献 [23] 并稍作修改:采用 EI 离子源,离子源温度 230 ℃,四极杆 150 ℃,接口 280 ℃,电子能量 70 eV。SIM 模式扫描,依据 GB 23200.8-2016 对目标物进行定性与定量分析。

1.2.8 发酵青稞麸皮代谢组学色谱质谱采集条件 参考文献 [24] 并稍作修改:采用 Waters ACQUITY Premier HSS T3 色谱柱(100 mm×2.1 mm, 1.8 μm),以 0.1% 甲酸水溶液-乙腈为流动相进行梯度洗脱(5%→99% B, 10 min),流速 0.4 mL/min,柱温 40 ℃,进样量 4 μL。电喷雾离子源(ESI):正负离子模式切换,离子化电压 3500 V(+)/2500 V(−);鞘气 30 L/min;辅助气 5 L/min;离子传输管 320 ℃;雾化温度 300 ℃;一级质谱全扫描范围 m/z 75~1000,分辨率 35000。

1.3 数据处理

在 HS-SPME-GC-MS 分析中,对每组 6 个平行样本的数据,采用最小值五分之一的规则进行缺失值填补,并基于 GC-MS 平台结合自建植物数据库完成代谢物的定性与定量。在 LC-MS/MS 分析中,对每组 6 个平行样,首先通过 XCMS 进行峰提取、对齐与校正,并过滤缺失率高的峰及填补空白值,继而采用支持向量回归(SVR)校正峰面积,综合参考多个公共数据库,最终基于多数据库综合比对完成代谢物鉴定。为评估组间代谢差异,首先进行主成分分析(PCA),进一步采用正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA)模型增强分类效果。差异代谢物的筛选标准包括变量投影重要性(VIP≥1、FC≥2 或 FC≤0.5 以及 P<0.05)。对所得差异代谢物,利用 KEGG 等数据库开展代谢通路富集分析,以识别其显著关联的关键生物学途径。数据处理与成分析使用 Excel 2010 完成,图形绘制基于迈维代谢云平台(https://cloud.metware.cn/)和 Origin 2019;采用 SPSS27.0 进行 Pearson 相关系数和显著性分析,结果用“平均值±标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 红曲霉发酵对黑青稞麸皮总多酚、总黄酮含量的影响

黑青稞麸皮经红曲霉发酵后,在发酵过程中总多酚含量、总黄酮含量趋势均先上升后下降,呈时间依赖,该结果与马贺等[25] 报道的曲霉发酵总黄酮含量变化趋势以及李达等[26] 关于固态发酵青稞中总多酚与总黄酮的变化规律一致。

如表 1 所示,未发酵黑青稞麸皮中总多酚含量为 4.43±0.04 mg GAE/g,红曲霉组的总多酚在 5 d 含量最高为 6.83±0.12 mg GAE/g,这是由于在发酵过程中,微生物代谢产生多种功能各异的酶类物质[27],这些酶对黑青稞麸皮中多酚含量的变化起到重要作用:一方面,它们能够催化结合态酚类物质的释放,从而促使多酚含量增加[28];另一方面,多酚在多酚氧化酶作用下被分解,当结合态酚类物质释放量低于分解的量,多酚含量就随之下降[29]。

表 1 黑青稞麸皮总多酚含量与总黄酮含量

Table 1 Total poyphenol content and total flavonoid content of black highland barley bran

发酵时间(d)	TPC(mg GAE/g)	TFC(mg RE/g)
0	4.43±0.04^{e}	8.42±0.12^{c}
1	4.98±0.11^{d}	8.80±0.06^{b}
3	5.59±0.05^{c}	9.08±0.05^{a}
5	6.83±0.12^{a}	8.01±0.06^{d}
7	5.91±0.12^{b}	7.22±0.07^{e}
9	5.69±0.07^{c}	6.66±0.14^{f}

注:TPC为总多酚含量;TFC为总黄酮含量;同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05);表3同。

如表 1 所示,未发酵黑青稞麸皮中总黄酮含量为 8.42±0.12 mg RE/g,红曲霉发酵组的总黄酮含量在 3 d 达到最高值为 9.08±0.05 mg RE/g,然后随着发酵时间延长,总黄酮含量呈现下降趋势。发酵初期总黄酮含量增加可能是来源于结合态黄酮的释放,但随着发酵时间延长,营养物质消耗及细胞活性的降低导致酶合成能力下降,从而减少了黄酮类物质的生成[30]。此外,黄酮类化合物本身稳定性较差,在发酵过程中易受多酚氧化酶、温度、微生物代谢产物及氧化性物质的影响,从而发生降解或转化导致含量降低[31]。

2.2 红曲霉发酵对黑青稞麸皮单体酚定量分析

本次实验共使用了 9 种单体酚对照品对红曲霉在黑青稞麸皮发酵过程中的变化进行定量分析。根据表 2 的结果,其中原儿茶酸、反式阿魏酸、木犀草素-7-O-葡萄糖醛酸及柯伊利素-7-O-葡萄糖醛酸、木犀草素、柯伊利素在红曲霉的发酵过程中均被检测到,且木犀草素-7-O-葡萄糖醛酸及柯伊利素-7-O-葡萄糖醛酸在未发酵和发酵的任意时间含量均远高于其他单体酚。对香豆酸仅在 0 d 和 1 d 被检出,之后被分解。顺式阿魏酸在发酵后的样品中均被检出。9 种多酚单体在红曲霉发酵下黑青稞麸皮中的具体变化情况如下。

在红曲霉发酵黑青稞麸皮的过程中,原儿茶酸和柯伊利素-7-O-葡萄糖醛酸的含量变化呈现先下降后上升至峰值,再次下降的趋势。如表 2 所示,这两种化合物在发酵第 5 d 的含量分别为 421.35±3.06 μg/g 和 2750.87±8.94 μg/g,显著高于其他发酵时间(P<

表 2　不同发酵时间的 UPLC 单体酚定量分析（μg/g）

Table 2　Quantitative analysis of UPLC monomeric phenols at different fermentation times (μg/g)

样品	R^2	标准曲线	线性范围（μg/mL）	0 d	1 d	3 d	5 d	7 d	9 d
原儿茶酸	0.9998	y=24.28x−66.845	7.8125~1000	146.82±1.08^{d}	140.45±0.91^{d}	53.35±3.95^{e}	421.35±3.06^{a}	200.35±9.89^{b}	174.44±5.10^{c}
对羟基苯甲酸	0.9997	y=56.819x−50.207	7.8125~250	21.25±0.48^{a}	20.51±0.07^{b}	13.13±0.17^{d}	16.57±0.13^{c}	9.76±0.21^{e}	/
对香豆酸	0..9997	y=39.238x−61.989	7.8125~1000	33.10±0.27^{a}	31.91±0.21^{b}	/	/	/	/
反式阿魏酸	0.9999	y=28.483x−98.858	7.8125~1000	74.12±0.32^{c}	70.92±0.50^{d}	110.32±0.64^{b}	154.49±0.13^{a}	56.36±0.07^{e}	51.73±0.18^{f}
顺式阿魏酸	0.9998	y=36.244x−21.973	7.8125~1000	/	9.65±0.22^{e}	10.65±0.05^{d}	15.46±0.51^{a}	12.20±0.07^{c}	12.80±0.11^{b}
木犀草素-7-O-葡萄糖醛酸	0.9997	y=9.1019x−323.88	7.8125~1000	1245.45±13.06^{a}	1238.38±6.34^{a}	1157.99±0.59^{b}	1121.80±7.99^{c}	507.51±2.32^{d}	320.46±10.09^{e}
柯伊利素-7-O-葡萄糖醛酸	0.9995	y=15.551x−258.98	7.8125~1000	2656.56±22.89^{b}	2586.09±10.98^{c}	2351.43±12.88^{d}	2750.87±8.94^{a}	839.81±2.23^{e}	216.13±0.34^{f}
木犀草素	0.9999	y=22.887x−27.029	7.8125~1000	95.12±7.24^{a}	91.98±2.78^{a}	91.02±3.88^{a}	83.44±2.58^{b}	76.33±2.44^{c}	60.14±2.53^{d}
柯伊利素	0.9997	y=23.105x+36.083	7.8125~1000	424.20±11.93^{a}	412.79±7.56^{b}	254.38±5.19^{c}	149.61±3.21^{d}	101.54±2.72^{e}	90.03±3.78^{f}

注：“/”表示未检出；同行不同小写字母表示差异显著（P<0.05）。

0.05）。然而，对羟基苯甲酸和对香豆酸在未发酵时的含量显著（P<0.05）高于发酵后的含量。与此同时，木犀草素-7-O-葡萄糖醛酸、木犀草素和柯伊利素的含量在未发酵时达到最高，且在发酵过程中逐渐下降。Deng 等[7] 和 Xiang 等[32] 在黑青稞麸皮中也检测到高含量的木犀草素-7-O-葡萄糖醛酸及柯伊利素-7-O-葡萄糖醛酸，这两种化合物都具有良好的生理活性。木犀草素-7-O-葡萄糖醛酸具有抗氧、抗炎等功效[33]，柯伊利素-7-O-葡萄糖醛酸表现出良好的抗氧化能力[34]。此外，红曲霉中顺式阿魏酸与反式阿魏酸的含量变化均呈现出先升高后降低的趋势，与赵苏苏等[35]、李丹青等[36] 的研究结果一致，均呈现出先升高后降低的趋势，可能是随着发酵时间的延长多阿魏酸酯酶活性降低[37]。

2.3　红曲霉发酵对黑青稞麸皮抗氧化能力及 APC 结果分析

体外抗氧化测试已成为评估抗氧化特性的广泛研究手段。依据作用机制差异，这些方法主要分为两大类：一类是基于自由基清除效率的检测体系，包括 $ABTS^{+}$、DPPH 等测定方法；另一类则是基于还原能力的评估体系，如 Fe^{3+}还原能力测定等[38]。基于此，本研究通过 $ABTS^{+}$自由基清除率、DPPH 自由基清除率以及铁离子还原能力三个指标，共同分析评价了三种曲霉发酵体系中黑青稞麸皮的抗氧化特性的动态变化。

发酵过程中，各抗氧化指标（DPPH、$ABTS^{+}$和 FRAP）均呈现先上升后下降的趋势，这与总多酚含量变化趋势一致。其中，DPPH 与 FRAP 值在第 5 d 达到峰值，分别为 7.84±0.16 mg Trolox/g 和 13.26±0.17 mg Trolox/g，而 $ABTS^{+}$清除能力则在第 7 d 相对含量最高为 0.95±0.00 mg Trolox/g。发酵过程中总酚和黄酮等活性成分含量的提升，是抗氧化能力增强的主要原因，已有研究表明抗氧化活性与总多酚含量和总黄酮含量具有显著相关性[39]。但随着发酵时间的延长，多酚氧化酶等活性增强，多酚类物质被快速降解或转化，抗氧化能力降低[30]。这一发现进一步证实了红曲霉发酵在提升谷物功能性成分方面的潜力。

表 3　不同发酵时间抗氧化能力（mg Trolox/g）

Table 3　Antioxidant capacity at different fermentation times (mg Trolox/g)

发酵时间（d）	DPPH	$ABTS^{+}$	FRAP
0	4.86±0.16^{c}	0.83±0.01^{c}	7.12±0.13^{e}
1	4.94±0.20^{c}	0.84±0.02^{c}	9.95±0.20^{d}
3	5.16±0.19^{bc}	0.89±0.02^{b}	10.85±0.17^{b}
5	7.84±0.16^{a}	0.90±0.01^{b}	13.26±0.17^{a}
7	5.47±0.19^{b}	0.95±0.00^{a}	10.56±0.08^{bc}
9	5.10±0.09^{bc}	0.91±0.01^{b}	10.23±0.15^{cd}

抗氧化活性综合评价指数（APC）能够综合多种抗氧化实验数据，实现对样品抗氧化性能的系统化评估。通过数据标准化处理、权重分配及综合计算，APC 方法有效克服了单一检测指标的局限性，为抗氧化能力的量化分析提供了科学依据。如表 4 所示，黑青稞麸皮抗氧化活性综合评价指数在发酵 5 d 得分最高，表明在发酵 5 d 黑青稞麸皮的功能活性最强。

表 4　红曲霉发酵黑青稞麸皮不同发酵时间抗氧化活性综合评价指数

Table 4　Comprehensive antioxidant activity index of *Monascus*-fermented black highland barley bran at different fermentation time

发酵时间（d）	DPPH-APC	ABTS-APC	FRAP-APC	APC指数（%）
0	61.94	88.05	53.74	67.91
1	63.07	88.45	75.04	75.52
3	65.78	93.99	81.85	80.54
5	100.00	95.34	100.00	98.45
7	69.78	100.00	79.67	83.15
9	65.08	95.51	77.15	79.25

2.4　红曲霉发酵对黑青稞麸皮挥发性成分分析

2.4.1　黑青稞麸皮发酵前后挥发性成分相对含量

基于 HS-SPME-GC-MS 技术对黑青稞麸皮的挥发性成分进行检测，发酵前后共检测到的物质，分为 15 大类（如图 1 所示），其中酯类占 20.2%、萜类占

15.4%、酮类占 12.3%、杂环类化合物占 10%、烃类 8.2%、醇类占 7.8%、醛类占 6.9%、酸类占 5.9%、酚类占 3.7%、胺类 2.8%、芳烃类占 2.3%、醚类 1.9%、含氮化合物 1.8%、卤代烃 0.5%、含硫化物 0.2%。青稞籽粒中含有多种挥发性成分，主要包括醇类、醛类、酮类和酯类化合物，这些成分赋予了青稞独特气味特征[40]。

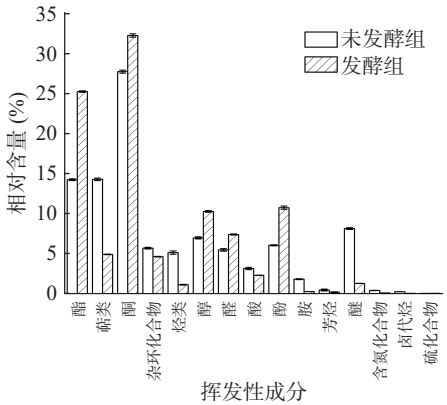


图 1 黑青稞麸皮发酵前后挥发性成分相对含量

Fig.1 Relative content of volatile components in black highland barley bran as affected by fermentation

未发酵组中酮类、萜类和酯类化合物是主要的香气来源，与黄月等[41]在带皮青稞中检出高含量酮类的结果一致。张文刚等[42]研究表明不同品种青稞均以醇类作为关键挥发性物质。本研究中发现，高压灭菌可能导致部分低沸点醇类损失，这与张敏等[43]结论一致。马美荣等[44]在红曲霉发酵麸皮提取物中检出更丰富的醛类、酯类及酮类化合物，其风味物质组成显著优于大米红曲。文豪等[45]在红曲发酵低脂香肠中也发现类似风味组成，表明醛类、酯类、醇类和酮类是红曲发酵食品风味的重要贡献物质。

与未发酵组相比，发酵组中酯类、酮类、醇类、醛类和酚类化合物的相对含量明显上升，具体包括丁香酚、(+)-L-酒石酸二乙酯、1-甲氧基-2-硝基苯、苯丙酮酸及庚基苯、2'-乙氧基苯乙酮、丁酸-1-苯乙酯、1-(2,6,6-三甲基-1,3-环己二烯基)-2-丁烯酮、乙酸橙花酯等物质，这些差异性挥发性成分主要呈果香、甜香、花香、焦糖坚果香等令人愉悦的风味，这与香气感官评价结果基本一致。

2.4.2 黑青稞麸皮发酵前后挥发性成分 OPLS-DA 分析 黑青稞麸皮发酵前后差异挥发性成分 OPLS-DA 分析如图 2，采用监督分析方法即 OPLS-DA 评价模型探究发酵前后挥发性成分的差异。如图 2a，可看出明显的分离趋势，这表明黑青稞麸皮发酵前后组之间的挥发性成分存在显著差异。这一结果进一步验证了 OPLS-DA 模型能够有效地揭示样品间挥发性成分的差异。与此同时，图 2b 展示了 OPLS-DA 模型的验证图。通过对数据进行 200 次随机排列组合实验，模型对 X 矩阵的解释率(R^2X)分别为 82.69%，而对 Y 矩阵的解释率几乎接近 1，表明模型对自变量和因变量的解释能力均较强。此外，模型的

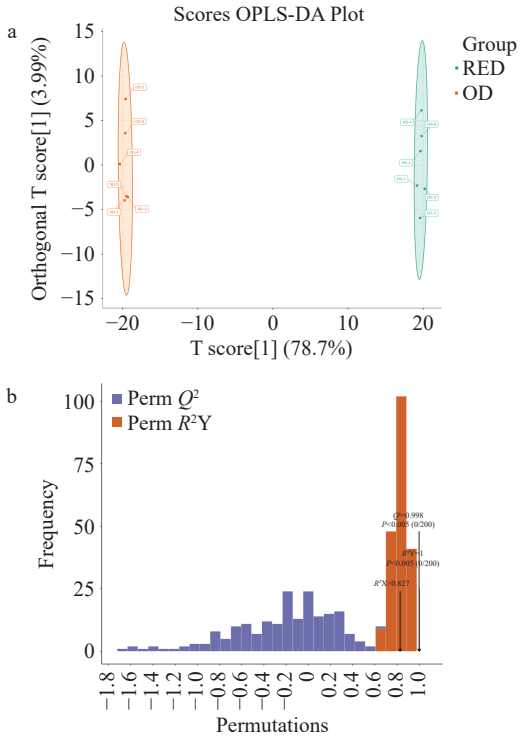


图 2 黑青稞麸皮发酵前后挥发性成分 OPLS-DA 分析

Fig.2 OPLS-DA of volatile components in black highland barley bran before and after fermentation

注：a 为 OPLS-DA 得分图；b 为 OPLS-DA 模型验证图，RED 为红曲霉发酵样品，OD 为未发酵样品。

预测能力(Q^2)分别为 0.998，显示出模型具有良好的稳定性和较强的预测性能。

2.5 红曲霉发酵对黑青稞麸皮代谢组学分析

2.5.1 黑青稞麸皮发酵前后差异代谢物 通过图 3a 可知，发酵组与未发酵组相比，共鉴定出 2914 种具有统计学意义的差异代谢物(P<0.05)，其中 1671 种代谢物呈现显著上调趋势(P<0.05)，1243 种代谢物表达水平显著下调(P<0.05)，3207 种代谢物未表现出显著差异(P>0.05)。这些差异代谢物主要涵盖多个代谢类别，包括氨基酸及其代谢物、苯及其衍生物、有机酸及其衍生物、杂环类化合物、醛、酮、酯类、甘油磷脂类等。与未发酵组相比，发酵组中氨基酸及其代谢物、杂环类化合物显著增加，有机酸及其衍生物显著减少。

通过图 3b 可知，与未发酵组相比，发酵组的前 20 种差异代谢物的 $\log_2$FC 均超过 10，这些代谢物的含量均显著上调(P<0.05)。发酵组与未发酵组相比，8-脱氧花青素这种杂环类化合物的含量变化最为显著，变化倍数为 15.04。Nauman 等[46]在山竹果中同样检测到 8-脱氧花青素，表明该化合物对乳腺癌和前列腺癌等恶性肿瘤具有生长抑制作用。基于上述研究，可以合理推断经红曲霉发酵处理的黑青稞麸皮可能具有潜在的抗癌活性。

2.5.2 黑青稞麸皮发酵前后 KEEG 及相关性分析 如图 4 可看出辅因子的生物合成、ABC 转运蛋白、

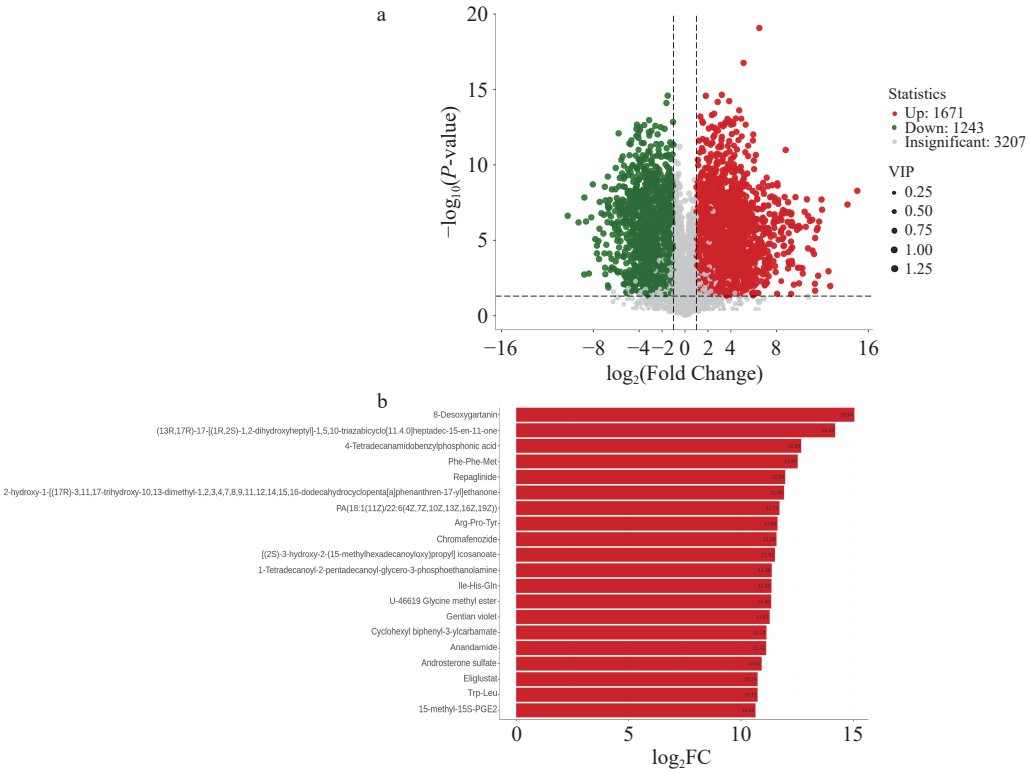


图 3　黑青稞麸皮发酵前后差异的非靶向代谢组学分析

Fig.3　Untargeted metabolomics analysis of black highland barley bran before versus after fermentation

注：a 发酵前后火山图；b 发酵前后差异条形图，以 VIP≥1、FC≥2 或 FC≤0.5 以及 P<0.05 为标准。

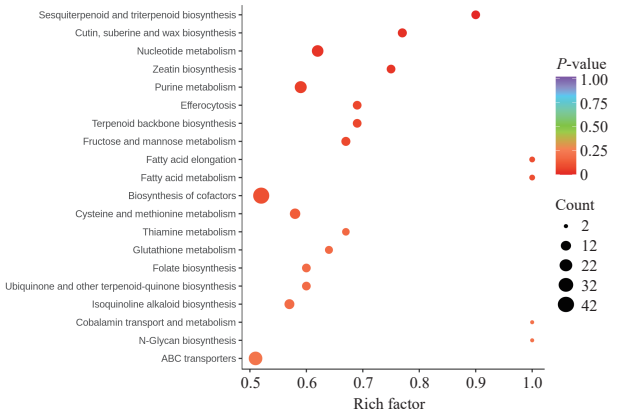


图 4　黑青稞麸皮发酵前后差异代谢物 KEGG 富集通路

Fig.4　Enriched KEGG pathways of differential metabolites in black highland barley bran before and after fermentation

核苷酸代谢、嘌呤代谢在代谢通路途径中的差异代谢物数量居多。通过显著富集及通路得分，对倍半萜类和三萜类的生物合成通路进行着重分析，倍半萜类和三萜类的生物合成通路具有一定药理性，在抗炎、抗肿瘤、抗胃溃疡以及保肝等方面表现出较好的活性[47]。

从图 5 可知，发酵组前 20 种差异挥发性成分与前 20 种差异代谢物均呈正相关。通过 KEGG 数据库对代谢物进行功能注释，并结合前 20 种差异挥发性成分进行分析，仅有丁香酚（map00940）和苯丙酮酸（map00360）两种代谢物被成功注释到 KEGG 通路，即具有对应的 KEGG PATHWAY 编号，其余检出代谢物暂未匹配到 KEGG 数据库中的明确代谢通路；在前 20 种差异代谢物中发现仅有 [（2S）-3-hydroxy-2-（15-methylhexadecanoyloxy）propyl] icosanoate（map00562）和 1-Tetradecanoyl-2-pentadecanoyl-glycero-3-phosphoethanolamine（map00564）这两种物质存在 KEGG 通路，因此主要对这 4 种物质进行分析。U-46619 Glycine methyl ester 与前 20 种差异挥发性成分相关度都较低，与丁香酚最低。[（2S）-3-hydroxy-2-（15-methylhexadecanoyloxy）propyl] icosanoate 和 1-Tetradecanoyl-2-pentadecanoyl-glycero-3-phosphoethanolamine 这 2 种物质与前 20 种差异挥发性成分均呈极其显著正相关（P<0.001）。丁香酚主要富集于苯丙素生物合成通路，该通路产生的苯丙素类化合物是一类重要的植物次生代谢产物，其前体物质为芳香族氨基酸苯丙氨酸或酪氨酸[48]。作为一种重要的食品添加剂和香料成分，丁香酚在食品和香料工业中应用广泛，同时研究表明其具有多种生物活性，包括抗氧化、抗炎、降血糖以及心血管保护等作用[49]。苯丙氨酰-苯丙氨酰-蛋氨酸的代谢途径主要涉及苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸的生物合成，这些芳香族氨基酸对食品风味的形成具有重要影响[50]。此外，KEGG 通路分析表明苯丙氨酸、酪氨酸和色氨酸的生物合成通路不仅参与风味物质的生成，还具有缓解慢性炎性疼痛[51] 以及改善癌症相关疲劳[52] 等功能特性。[（2S）-3-hydroxy-2-（15-methylhexadecanoyloxy）propyl] icosanoate 和 1-Tetradecanoyl-2-

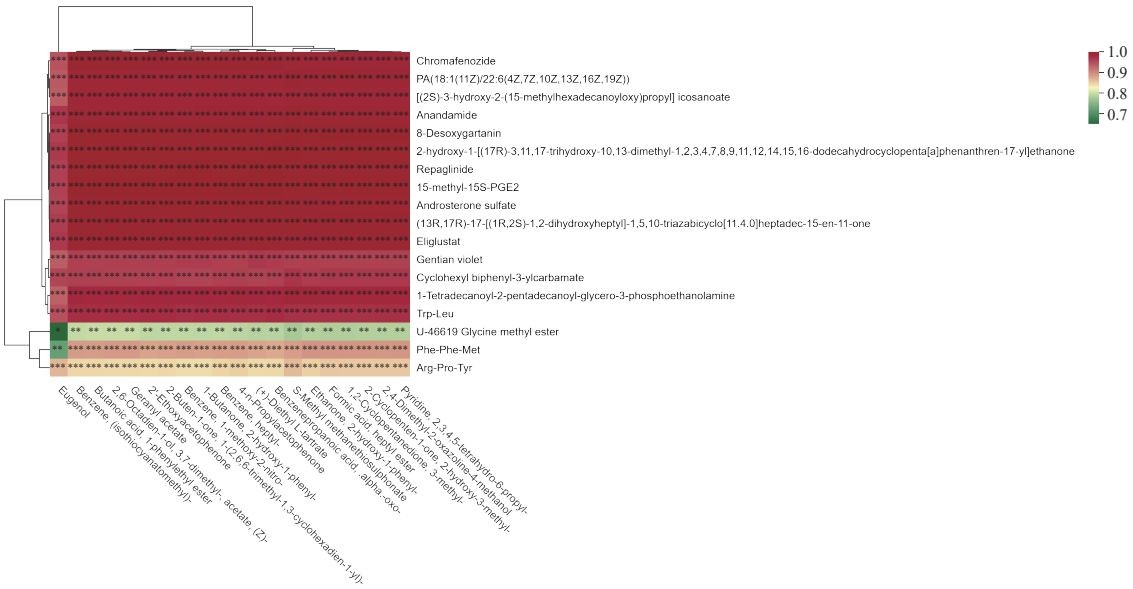


图 5 黑青稞麸皮发酵组前 20 种差异挥发性成分与前 20 种差异代谢物相关性分析图

Fig.5 Correlation analysis of the top 20 differential volatile components and metabolites in fermented black highland barley bran

注: *: 相关性具有显著性, $P<0.05$; **: 相关性具有极显著性, $P<0.01$; ***: 相关性具有高度显著性, $P<0.001$; 红色表示正相关; 绿色表示负相关。

pentadecanoyl-glycero-3-phosphoethanolamine 这 2 种差异代谢物均富集在甘油磷脂代谢通路上, 王婧等[53] 研究认为甘油磷脂代谢通路中有许多代谢物具有改善代谢紊乱的功效, 包括磷脂酰乙醇胺、磷脂酰丝氨酸、磷脂酰胆碱、PE(20:0/18:1(9Z))。综上, 表明利用红曲霉发酵在改善黑青稞麸皮风味特性、增强黑青稞麸皮附加值方面具有显著优势, 为其在功能食品开发中的应用提供了理论依据。

3 结论

本研究通过红曲霉固态发酵黑青稞麸皮, 系统评价了其抗氧化活性、挥发性成分及代谢组学变化。结果表明, 5 d 为最优发酵时间点, 该时间点下样品的综合抗氧化能力指数(APC)达 98.45%。发酵显著提高了酯类、酮类、醇类、醛类和酚类等风味物质的含量, 并筛选到 2914 种差异代谢物, 其中 1671 种显著上调, 尤以具潜在抗癌活性的 8-脱氧花青素变化最为显著。通过 KEGG 通路分析, 发现辅因子的生物合成、ABC 转运蛋白、核苷酸代谢、嘌呤代谢在代谢通路途径中的差异代谢物数量居多, 其中对倍半萜类和三萜类的生物合成通路表达最为显著, 提示发酵可能通过调控此类具有抗炎、抗肿瘤、胃保护及保肝药理活性的代谢途径, 提升青稞麸皮功能性。相关性分析进一步表明, 发酵组中排名前 20 的差异挥发性成分与差异代谢物均呈正相关, 证实发酵在协同改善风味与提升活性成分方面的综合潜力。

与现有研究相比, 本研究不仅延续了微生物发酵可增强谷物副产物抗氧化能力与风味的共识, 还通过多组学整合分析, 探讨了红曲霉发酵对黑青稞麸皮中倍半萜与三萜类化合物生物合成通路的影响, 并初步构建了挥发性组分与非挥发性代谢物之间的关联关系, 从风味与功能协同的角度为该体系的代谢机制提供了进一步解释。

虽然本研究为黑青稞麸皮的高值化开发利用提供了活性成分与工艺参考。但目前对若干关键活性成分(如 8-脱氧花青素及部分萜类化合物)在加工与消化过程中的稳定性、生物利用度及体内活性尚需进一步验证, 其作用机制也有待通过细胞与动物实验深入探讨。后续可侧重于活性成分的分离纯化、量效关系研究及工艺放大试验, 以促进该技术在功能食品中的应用转化。

© 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] ZENG X, GUO Y, XU Q, et al. Origin and evolution of qingke barley in Tibet[J]. Nature Communications, 2018, 9(1): 5433.

[2] OBADI M, SUN J, XU B, Highland barley: Chemical composition, bioactive compounds, health effects, and applications[J]. Food Research International, 2021, 140: 110065.

[3] GE X, JING L, ZHAO K, et al. The phenolic compounds profile, quantitative analysis and antioxidant activity of four naked barley grains with different color[J]. Food Chemistry, 2021, 335: 127655.

[4] XIA X, XING Y, LI G, et al. Antioxidant activity of whole grain Qingke (Tibetan *Hordeum vulgare* L.) toward oxidative stress in d-galactose induced mouse model[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 45: 355−362.

[5] XI H, WANG A, QIN W, et al. The structural and functional properties of dietary fibre extracts obtained from highland barley bran through different steam explosion-assisted treatments[J]. Food Chemistry, 2023, 406: 135025.

[6] ŠIMIĆ G, HORVAT D, LALIĆ A, et al. Distribution of β-Glu-

can, phenolic acids, and proteins as functional phytonutrients of hulless barley grain[J]. Foods, 2019, 8(12): 680.
[7] DENG J, YU M, YANG Y, et al. Studies of phytochemical constituents by UPLC-QTOF-MS/MS of black hulless barley bran and its antioxidation and α-glucosidase inhibition effect[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2024, 17(3): 105644.
[8] ARORA S, RANI R, GHOSH S. Bioreactors in solid state fermentation technology: Design, applications and engineering aspects [J]. Journal of Biotechnology, 2018, 269: 16−34.
[9] BHANJA DEY T, CHAKRABORTY S, JAIN K KR, et al. Antioxidant phenolics and their microbial production by submerged and solid state fermentation process: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 53: 60−74.
[10] LI J, ZHANG H, YANG X, et al. The fiber-bound polyphenols from highland barley with inhibitory effects against carbonyls during *in vitro* digestion of cookies and French fries[J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102685.
[11] ZHANG Q, LI M, CHENG Z, et al. Optimization of polyphenols release from highland barley bran by solid-state fermentation and antioxidant activity characterization[J]. Fermentation, 2024, 10(8): 438.
[12] WU J Y, SIU K C, GENG P. Bioactive ingredients and medicinal values of *Grifola frondosa* (Maitake)[J]. Foods, 2021, 10(1): 95.
[13] WANG J, HUANG Z, JIANG Q, et al. Fungal solid-state fermentation of crops and their by-products to obtain protein resources: The next frontier of food industry[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 138: 628−644.
[14] IVANIšOVá E, RAJTAR M, TOKáR M, et al. Characterization of bioactive compounds from monascus purpureus fermented different cereal substrates[J]. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences, 2017, 11(1): 183−189.
[15] 刘佳, 向卓亚, 朱柏雨, 等. 赶黄草叶不同溶剂提取物中活性成分、抗氧化活性及胰脂肪酶抑制活性对比[J]. 食品工业科技, 2024, 45(20): 223−231. [LIU J, XIANG Z Y, ZHU B Y, et al. Comparison of active components, antioxidant activity and pancreatic lipase inhibitory activity in different solvent extracts of *Penthorum chinense* leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(20): 223−231.]
[16] MOHAMMED E A, ABDALLA I G, ALFAWAZ M A, et al. Effects of extraction solvents on the total phenolic content, total flavonoid content, and antioxidant activity in the aerial part of root vegetables[J]. Agriculture, 2022, 12(11): 1820.
[17] XIA C, YANG K, ZHU Y, et al. Distribution of free and bound phenolic compounds, β-glucan, and araboxylan in fractions of milled hulless barley[J]. LWT, 2022, 169: 113935.
[18] KHOMSI M E, IMTARA H, KARA M, et al. Antimicrobial and antioxidant properties of total polyphenols of *Anchusa italica* Retz[J]. Molecules, 2022, 27(2): 416.
[19] LI J, ZHAO W, PAN X, et al. Improvement of antioxidant properties of jujube puree by biotransformation of polyphenols via *Streptococcus thermophilus* fermentation[J]. Food Chemistry: X, 2022, 13: 100214.
[20] 张华, 周志钦, 席万鹏. 15 种柑橘果实主要酚类物质的体外抗氧化活性比较[J]. 食品科学, 2015, 36(11): 64−70. [ZHANG H, ZHOU Z Q, XI W P. Comparison of *in vitro* antioxidant activities of main phenolic compounds in 15 citrus fruits[J]. Food Science, 2015, 36(11): 64−70.]
[21] LÓPEZ-FROILÁN R. Evaluation of the antioxidant potential of mixed fruit-based beverages: A new insight on the Folin-ciocalteu method[J]. Food Anal. Methods, 2018, 11: 2897−2906.
[22] 卢春霞, 徐俊豪, 余杰, 等. HS-SPME-GC-MS/MS 结合非靶向代谢组学分析涪陵榨菜发酵过程中挥发性成分[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 206−213. [LU C X, XU J H, YU J, et al. Analysis of volatile components during fermentation of Fuling pickle by HS-SPME-GC-MS/MS combined with untargeted metabolomics[J]. Food Science, 2024, 45(20): 206−213.]
[23] HU Y, JIA F, LIU Z, et al. Impact of storage time on microbial communities and flavor profiles in highland barley grains[J]. Journal of Stored Products Research, 2024, 107: 102321.
[24] HUANG H, LI Y, GAO X, et al. Metabolic profiling of highland barley (*Hordeum vulgare* var. nudum) genotypes[J]. Discover Applied Sciences, 2024, 6(3): 83.
[25] 马贺, 孙培利, 雷梅英, 等. 猴头菌固态发酵青稞基质活性成分及抗氧化能力研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(20): 6764−6771. [MA H, SUN P L, LEI M Y, et al. Study on active components and antioxidant capacity of highland barley substrate solid-state fermented by *Hericium erinaceus*[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2022, 13(20): 6764−6771.]
[26] 李达, 朱婷, 刘地, 等. 不同菌种固态发酵时间对甘草黄酮含量及其抗氧化特性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2025(1): 63−68. [LI D, ZHU T, LIU D, et al. Effects of solid-state fermentation time with different strains on flavonoid content and antioxidant properties of licorice[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2025(1): 63−68.]
[27] SHIFERAW TEREFE N, AUGUSTIN M A. Fermentation for tailoring the technological and health related functionality of food products[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60(17): 2887−2913.
[28] 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]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(1): 507−513.
[29] 易军鹏, 高炎, 李欣, 等. 冠突散囊菌发酵对豫西‘西瓜红’薯叶酚类物质、酶活性及抗氧化性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 1−9. [YI J P, GAO Y, LI X, et al. Effects of *Eurotium cristatum* fermentation on phenolic compounds, enzyme activity and antioxidant activity of ‘Xiguahong’ sweet potato leaves in western Henan[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 1−9.]
[30] 李茜, 闵瑞雪, 吴家源, 等. 杏鲍菇固态发酵豆渣过程中的营养成分与抗氧化活性变化[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(17): 232−238. [LI Q, MIN R X, WU J Y, et al. Changes in nutritional components and antioxidant activity during solid-state fermentation of soybean residue by *Pleurotus eryngii*[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(17): 232−238.]
[31] 李家华, 赵明, 胡艳萍, 等. 普洱茶发酵过程中黄酮醇类物质含量变化的研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2012, 34(2): 59−65. [LI J H, ZHAO M, HU Y P, et al. Study on the content changes of flavonols during Pu-erh tea fermentation[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2012, 34(2): 59−65.]
[32] XIANG Z, DENG J, YANG K, et al. Effect of processing on the release of phenolic compounds and antioxidant activity during *in vitro* digestion of hulless barley[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2021, 14(12): 103447.
[33] CHO Y C, PARK J, CHO S. Anti-inflammatory and anti-ox-

idative effects of luteolin-7-O-glucuronide in LPS-stimulated murine macrophages through TAK1 inhibition and Nrf2 activation[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2020, 21(6): 2007.
[34] 王欣, 杨开俊, 刘廷辉, 等. 黑青稞麸皮的功能因子结构解析及其抗氧化功能研究[J]. 食品科技, 2023, 48(7): 142−148. [WANG X, YANG K J, LIU T H, et al. Structural analysis of functional factors and antioxidant function of black highland barley bran[J]. Food Science and Technology, 2023, 48(7): 142−148.]
[35] 赵苏苏, 高佳, 吕冰, 等. 黑曲霉发酵麸皮产总阿魏酸工艺优化及其抑菌活性初探[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(12): 167−175. [ZHAO S S, GAO J, LÜ B, et al. Process optimization for total ferulic acid production from bran by *Aspergillus niger* fermentation and preliminary study on its antibacterial activity[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2023, 38(12): 167−175.]
[36] 李丹青, 范娜. 黑曲霉发酵对麦麸多酚及其抗氧化活性的影响[J]. 商洛学院学报, 2016, 30(6): 48−52. [LI D Q, FAN N. Effects of *Aspergillus niger* fermentation on polyphenols in wheat bran and their antioxidant activity[J]. Journal of Shangluo University, 2016, 30(6): 48−52.]
[37] CPSTA R D S, de ALMEIDA S S, CAVALCANTI E D' AVILA C, et al. Enzymes produced by solid state fermentation of agro-industrial by-products release ferulic acid in bioprocessed whole-wheat breads[J]. Food Research International, 2021, 140: 109843.
[38] YU D, FENG M Q, SUN J, et al. Protein degradation and peptide formation with antioxidant activity in pork protein extracts inoculated with *Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus simulans*[J]. Meat Science, 2020, 160: 107958.
[39] BOZKUŞ T N. Correlation of total polyphenol and flavonoid content with antioxidant activity of Caucasian bee honey[J].
[40] ZHANG W, YANG Y, ZHANG J, et al. Study of the effect of milling on nutritional and sensory quality and volatile flavor compounds of cooked highland barley rice[J]. LWT, 2024, 198: 115972.
[41] 黄月, 杨昳津, 邱华振, 等. 脱皮与不脱皮青稞酿造营养黄酒风味差异的研究[J]. 工业微生物, 2018, 48(3): 9−16. [HUANG Y, YANG Y J, QIU H Z, et al. Study on flavor differences of nutritious yellow rice wine brewed from peeled and unpeeled highland barley[J]. Industrial Microbiology, 2018, 48(3): 9−16.]
[42] 张文刚, 张垚, 杨希娟, 等. 不同品种青稞炒制后挥发性风味物质 GC-MS 分析[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 192−201. [ZHANG W G, ZHANG Y, YANG X J, et al. GC-MS analysis of volatile flavor compounds in fried highland barley of different varieties[J]. Food Science, 2019, 40(8): 192−201.]
[43] 张敏, 苏慧敏, 王子元. 稻米加工对米饭风味的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(9): 8−14. [ZHANG M, SU H M, WANG Z Y. Effects of rice processing on the flavor of cooked rice[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 8−14.]
[44] 马美荣, 张坤, 李洪媛, 等. 麸皮红曲发酵工艺研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(7): 167−170,181. [MA M R, ZHANG K, LI H Y, et al. Study on fermentation process of bran with *Monascus*[J]. China Condiment, 2022, 47(7): 167−170,181.]
[45] 文豪, 邬应龙. 红曲低脂香肠风味成分的测定[J]. 中国酿造, 2011(7): 183−185. [WEN H, WU Y L. Determination of flavor components in low-fat sausage with *Monascus*[J]. China Brewing, 2011(7): 183−185.]
[46] NAUMAN M C, TOCMO R, VEMU B, et al. Inhibition of CDK2/CyclinE1 by xanthones from the mangosteen (*Garcinia mangostana*): A structure-activity relationship study[J]. Natural Product Research, 2021, 35(23): 5429−5433.
[47] 吕燕慧, 陈威, 魏艳平, 等. 川木香属植物的化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(6): 1463−1482. [LÜ Y H, CHEN W, WEI Y P, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of *Dolomiaea* plants[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2023, 48(6): 1463−1482.]
[48] DENG Y, LU S. Biosynthesis and regulation of phenylpropanoids in plants[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2017, 36(4): 257−290.
[49] LAO Y, GUO J, FANG J, et al. Beyond flavor: The versatile roles of eugenol in health and disease[J]. Food & Function, 2024, 15(21): 10567−10581.
[50] CORDEBTE A G, SCHMIDT S, BELTRAB G, et al. Harnessing yeast metabolism of aromatic amino acids for fermented beverage bioflavouring and bioproduction[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2019, 103(11): 4325−4336.
[51] SUN Y J, ZHANG Q Y, LIU F, et al. Polysaccharides isolated from *Cibotium barometz* attenuate chronic inflammatory pain: Molecular chemical structure and role of phenylalanine[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 297: 139911.
[52] 陈磊, 杨莹莹, 连让平, 等. 基于核磁共振代谢组学揭示黄精通过调控苯丙氨酸、酪氨酸及色氨酸的生物合成发挥抗疲劳作用机制[J]. 山西中医药大学学报, 2025, 26(1): 27−34. [CHEN L, YANG Y Y, LIAN R P, et al. Revealing the anti-fatigue mechanism of *Polygonatum sibiricum* by regulating biosynthesis of phenylalanine, tyrosine and tryptophan based on NMR metabolomics[J]. Journal of Shanxi University of Chinese Medicine, 2025, 26(1): 27−34.]
[53] 王婧, 赵付霞, 雒荣荣, 等. 远志散通过调控脂质代谢改善大鼠记忆障碍[J]. 中药药理与临床, 2025, 41(7): 9−15. [WANG J, ZHAO F X, LUO R R, et al. Yuanzhi powder improves memory impairment in rats by regulating lipid metabolism[J]. Pharmacology and clinics of Chinese Materia Medica, 2025, 41(7): 9−15.]