陈瑞, 房祥军, 沈超怡, 等. 红芝固态发酵燕麦与蓝莓果渣复合底物工艺优化及其降血糖活性 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 259−268. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030044

CHEN Rui, FANG Xiangjun, SHEN Chaoyi, et al. Optimization of Solid-state Fermentation of *Ganoderma lucidum* on an Oat-Blueberry Pomace Composite Substrate and Its Hypoglycemic Activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 259−268. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030044

·工艺技术·

红芝固态发酵燕麦与蓝莓果渣复合底物工艺优化及其降血糖活性

陈　瑞[1,2], 房祥军[2,+], 沈超怡[2], 陈杭君[2], 许　凤[1], 杨海龙[3], 蔡成岗[4], 刘瑞玲[2,*], 郜海燕[2,*]

（1.宁波大学食品科学与工程学院, 浙江宁波 315211;
2.浙江省农业科学院食品科学研究所, 农业农村部果品采后处理重点实验室, 全省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室, 中国轻工业果蔬保鲜与加工重点实验室, 浙江杭州 310021;
3.温州大学生命与环境科学学院, 浙江温州 325035;
4.浙江科技大学生物与化学工程学院, 浙江杭州 310023）

摘　要: 针对蓝莓果渣资源化利用不足及单一底物发酵功能局限性问题，本研究首次构建燕麦-蓝莓果渣复合底物体系，采用红芝（*Ganoderma lucidum*）进行固态发酵以提升其活性成分。采用单因素实验结合 Box-Behnken 响应面法，系统优化物料装载量、接种量、磷酸二氢钾添加量对三萜类物质合成的影响，并通过非靶向代谢组学分析发酵前后差异代谢物；结果表明，固态发酵最优工艺参数为：总物料装载量 29 g，接种量 13%（v/w），磷酸二氢钾 0.1%（w/w）时，三萜含量为 0.345%（较未发酵组提升 1.3 倍）。发酵产物抗氧化性能显著增强，对 DPPH、羟基及超氧阴离子自由基的 IC_{50} 值分别降低 77.54%、66.90% 与 56.92%（$P<0.05$），同时对 α-淀粉酶与 α-葡萄糖苷酶的抑制率较未发酵组分别提高 1.10~1.57 倍。非靶向代谢组学分析鉴定出发酵前后共有 18 类 106 种差异代谢物，其中 70 种代谢物显著上调，包含 9 种萜类化合物。KEGG 代谢通路分析表明，红芝发酵激活了萜类等次级代谢途径。研究证实红芝生物转化可有效富集降血糖功能成分，为农产品及其加工副产物的高值化利用提供理论依据。

关键词: 红芝, 固态发酵, 燕麦, 蓝莓果渣, 抗氧化, 降血糖

中图分类号: TS255　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0259−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030044　　本文网刊:

Optimization of Solid-state Fermentation of *Ganoderma lucidum* on an Oat-Blueberry Pomace Composite Substrate and Its Hypoglycemic Activity

CHEN Rui[1,2], FANG Xiangjun[2,+], SHEN Chaoyi[2], CHEN Hangjun[2], XU Feng[1], YANG Hailong[3], CAI Chenggang[4], LIU Ruiling[2,*], GAO Haiyan[2,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2.Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Fruit Postharvest Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhejiang Key Laboratory of Intelligent Logistics and Processing of Fresh Products, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Preservation and Processing of China Light Industry, Hangzhou 310021, China;
3.College of Life and Environmental Sciences, Wenzhou University, Wenzhou 325035, China;

收稿日期: 2025−03−05　　+并列第一作者

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划（2023C04002;2023C02006）。

作者简介: 陈瑞（1998−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 13116669676@163.com。
房祥军（1977−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 食品物流保鲜与营养品质调控, E-mail: fangxiangjun2004@163.com。

*** 通信作者:** 刘瑞玲（1988−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 果蔬品质保持与保鲜技术, E-mail: ruilingliu2005@163.com。
郜海燕（1958−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品物流保鲜与营养品质调控, E-mail: spsghy@l63.com。

4.College of Biology and Chemical Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China）

Abstract: To address the underutilization of blueberry pomace and the limitations of single-substrate fermentation, this study developed a novel composite substrate composed of oats and blueberry pomace. *Ganoderma lucidum* was employed in solid-state fermentation to enhance the production of bioactive compounds. A combination of single-factor experiments and Box-Behnken response surface methodology was used to systematically optimize material loading, inoculum size, and potassium dihydrogen phosphate supplementation for maximal triterpenoid synthesis. Untargeted metabolomics was conducted to identify differential metabolites before and after fermentation. The optimal fermentation conditions were determined to be a total material loading of 29 g, an inoculum size of 13% (v/w), and potassium dihydrogen phosphate addition of 0.1% (w/w), resulting in a triterpenoid content of 0.35%—a 1.3-fold increase compared to the unfermented substrate. The fermented product exhibited significantly enhanced antioxidant activity, with IC_{50} values for DPPH, hydroxyl, and superoxide anion radicals reduced by 77.54%, 66.90%, and 56.92%, respectively (P<0.05). Furthermore, the inhibition rates against α-amylase and α-glucosidase increased by 1.10- to 1.57-fold relative to the unfermented substrate. Metabolomic analysis identified 106 differential metabolites across 18 categories, with 70 significantly upregulated, including nine terpenoids. KEGG pathway analysis indicated the activation of secondary metabolic pathways, particularly in terpenoid biosynthesis. These findings demonstrate that *Ganoderma lucidum* fermentation effectively enriches hypoglycemic bioactive components, offering a theoretical foundation for the high-value utilization of agricultural products and processing by-products.

Key words: *Ganoderma lucidum*; solid-state fermentation; oat; blueberry pomace; antioxidant; hypoglycemic

蓝莓（*Vaccinium uliginosum* L）是杜鹃花科越橘属的多年生浆果类植物[1]，主要作为新鲜水果食用，但总产量很大一部分被加工用于生产果汁和果酒等产品，大约 20%~30% 的果实最终以果渣的形式出现，通常被转化为动物饲料或农业肥料，造成严重的资源浪费[2−4]。尽管蓝莓果渣富含花色苷和多酚类物质，但其生物活性成分因细胞壁纤维包裹而难以释放[5]，现有物理化学提取方法存在能耗高、效率低等问题。与此同时，燕麦作为功能食品的重要原料，其 β-葡聚糖虽具有降血糖潜力[6]，但单一成分的作用靶点有限，难以满足慢性病管理的多元化需求。如何通过绿色生物技术实现农业副产物的高值转化，已成为食品科学与可持续发展领域的核心挑战。

固态发酵技术因其低能耗、高底物适应性等优势，被广泛用于功能成分富集。何静瑞等[7] 研究表明，燕麦发酵后，β-葡聚糖含量增加了 30.86%，生物利用率增加了 36.38%，自由基的 IC_{50} 值显著降低，提高了降血糖活性。此外真菌（如白腐菌）可通过分泌水解酶高效降解木质素，但其对酚类物质的氧化破坏限制了产物的生物活性[8]；而红芝（*Ganoderma lucidum*），属于灵芝科，又称赤芝，是我国主栽的灵芝品种，产量高，品质好，是可以入药的灵芝品种之一[9]。因独特的次级代谢过程，在抗氧化与降血糖活性调控中展现出潜力。谢晋奕等[10] 使用灵芝发酵后发现，发酵产物中三萜与多糖含量都得到不同程度的提高。孟缘等[11] 以青稞为发酵基质，利用灵芝发酵转化其营养物质，发酵基质中三萜含量与发酵前比显著提高了 129.92%。然而，现有研究多聚焦单一底物发酵，忽视了复合底物的协同效应，导致功能活性提升有限。

本研究首次将燕麦与蓝莓果渣纳入红芝生物转化体系，以红芝中主要生物活性物质三萜含量为指标，通过工艺优化促进活性成分的释放，利用复合底物的代谢协同突破单一成分的功能局限。整合响应面优化与非靶向代谢组学技术分析发酵前后物质成分变化，该研究为农业副产物的精准生物转化提供理论范式，并推动降血糖功能原料的产业化开发。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

燕麦米　黑龙江常仓天然生态农业有限公司；蓝莓果渣　凤阳健民蓝莓农业发展有限公司；红芝　广东微生物菌种保藏中心，编号：GDMCC5.250；齐墩果酸（纯度≥98%）、香草醛（纯度≥99.9%）、硫酸亚铁、磷酸二氢钾、乙酸乙酯、冰乙酸　上海阿拉丁生化科技股份有限公司；α-淀粉酶（35 U·mg^{-1}）、α-葡萄糖苷酶（50 U·mg^{-1}）　上海麦克林生化科技股份有限公司；以上所用试剂均为国产分析纯。

DGG-9140 A 恒温鼓风干燥箱　上海森信实验仪器有限公司；CHY-7001 高速粉碎机　金华市莫非家用电器有限公司；MIR-253 恒温培养箱　上海博讯实业有限公司医疗设备厂；ReadMax-1900 光吸收全波长酶标仪　上海闪普生物科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　红芝菌种的活化与培养　利用打孔器打取直径为 6 mm 菌饼，接种于葡萄糖琼脂固体培养基（PDA）上，于 28 ℃ 恒温培养 7 d，直至菌丝长满整个平板。用打孔器从培养好的菌板边缘打取直径约为 6 mm 的三块菌饼接种至装有 100 mL 葡萄糖液体培养基（PDB）中，于 28 ℃、120 r·min^{-1} 恒温摇床培养 6 d，直到培养基中生有透明、大小均匀的菌丝球。

1.2.2　固态培养基的制备　将燕麦米用蒸馏水清洗后，浸泡 10~12 h，沥干水分置于 250 mL 锥形瓶中，依次加入 10% 的经 80 目过筛三次后的蓝莓果渣粉末、0.2% 的磷酸二氢钾和 60% 物料量的蒸馏水混合均匀，于 121 ℃ 下灭菌 20 min，取出后冷却至室温后备用。

1.2.3　红芝接种与发酵　在已灭菌的燕麦蓝莓果渣固体培养基中加入 10% 的红芝菌液，将其混合后放入 28 ℃ 的培养箱中进行 10 d 避光培养（以下培养周期均为 10 d），直到整个瓶子填满菌丝为止。将发酵物放在 55 ℃ 烘箱中干燥至完全，粉碎后过 80 目筛制得最终发酵物。在 28 ℃ 下静置 10 d 的固体培养基中接种 10% 种子液，烘干、粉碎、过筛，得到未发酵产物，用于后期实验。

1.2.4　单因素实验　根据上述方法制备红芝种子液与固态培养基，为保证实验的准确性，种子液均来自同一时期，以三萜含量为评价标准优化工艺，保持磷酸二氢钾（KH_2PO_4）0.2%，接种量 10%，总物料量 20、25、30、35、40 g，确定物料量；保持物料量 30 g，KH_2PO_4 0.2%，接种量 6%、8%、10%、12%、14%、16%，确定接种量；保持物料量 30 g，接种量 12%，KH_2PO_4 添加量为 0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%，确定 KH_2PO_4 添加量。

1.2.5　响应面试验　在单因素的基础上，以三萜含量为响应值，确定物料量（g）、接种量（%）、磷酸二氢钾添加量（%）的参数范围，进行响应面试验优化工艺参数，采用 Design-Expert 13.0 软件设计三因素三水平 Box-Behnken 试验进行研究，如表 1 所示。

表 1　响应面试验设计及水平

Table 1　Response surface experimental design and levels

因素	水平		
	−1	0	1
A物料量(g)	25	30	35
B接种量(%)	10	12	14
C KH_2PO_4(%)	0	0.1	0.2

1.2.6　发酵产物三萜含量的检测　根据刘宇等[12]和 OLUDEMI 等[13]的方法并稍作修改，称取一定量的齐墩果酸标准品，配制成浓度 0.206 mg·mL^{-1} 的标准液，准确吸取标准液 0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mL 于 10 mL 离心管中，置于沸水浴中挥发至干，加入 5% 的香草醛溶液 200 μL，800 μL 高氯酸并吹打均匀后置于 70 ℃ 水浴中加热 10 min，取出立即置于冰浴冷却 5 min，利用乙酸乙酯定容至 5 mL，摇匀，546 nm 处测定吸光度值。以不加齐墩果酸标品样液为空白对照，绘制标准曲线为 y=4.2136x−0.0027，R^2=0.9976。

准确称取 2 g 发酵底物于 50 mL 容量瓶中，加入 20 mL 无水乙醇溶液混合均匀，随后将其超声 60 min，经 6000 r·min^{-1} 离心 10 min 后取上清液备用。吸取 0.1 mL 样品溶液于 10 mL 离心管中，按照标准曲线的方法加入相应试剂，充分反应后于 546 nm 处测定其吸光度值。计算公式如下：

$$三萜含量(\%)=\frac{m_1\times v_1\times f}{m_2\times v_2\times 10^6}\times 100 \qquad 式（1）$$

式中：m_1：标曲中算出的三萜含量（μg）；v_1：提取所用无水乙醇含量（mL）；f：样液稀释倍数；m_2：样品质量（g）；v_2：测定时样品提取液体积（mL）。

1.2.7　抗氧化性能测定　提取液的制备根据孟缘等[11]方法并稍作修改：称取 5 g 发酵产物，加入 80 mL 乙醇溶液，80 ℃ 提取 0.5 h，6000 r·min^{-1} 离心 20 min，回收上清液，用无水乙醇定容至 100 mL，所得提取液即为 50 mg·mL^{-1}。

1.2.7.1　DPPH 自由基清除率　参考贾乐等[14]的方法，并稍作修改。将提取液稀释成五种不同浓度梯度（1~5 mg·mL^{-1}），各取 1 mL 于离心管中，加入 1 mL 0.1 mmol·L^{-1} 的 DPPH 乙醇溶液，充分混匀后，在暗处反应 25 min，2000 r·min^{-1} 离心 20 min，517 nm 处测定吸光度。利用同体积的 95% 的乙醇溶液代替 DPPH 溶液作为对照组，同体积的蒸馏水取代样品溶液作为空白组。计算公式如下：

$$DPPH自由基清除率(\%)=\left(1-\frac{A_2-A_1}{A_0}\right)\times 100 \qquad 式（2）$$

式中：A_0：空白组吸光度值；A_1：对照组吸光度值；A_2：样品吸光度值。

1.2.7.2　羟基自由基清除率　参考谭冰等[15]的方法，吸取 0.5 mL 浓度为 1.5 mmol·L^{-1} 的邻菲罗啉溶液于离心管中，加入 1 mL 磷酸缓冲液（pH7.2），0.5 mL 浓度为 1.5 mmol·L^{-1} 的硫酸亚铁溶液，0.03% 的 H_2O_2 溶液 0.5 mL 和 0.5 mL 样液，混匀后置于 37 ℃ 水浴 1 h，加入同体积的水替代 H_2O_2 溶液作为对照组，于 510 nm 处测定吸光度值。计算公式如下：

$$羟基自由基清除率(\%)=\frac{A_2-A_1}{A_0-A_1}\times 100 \qquad 式（3）$$

式中：A_0：对照组吸光度值；A_1：空白组吸光度值；A_2：样品吸光度值。

1.2.7.3　超氧阴离子自由基清除率　参考 ZHENG 等[16]的方法，吸取 0.5 mL 不同浓度的样液，对照组采用等体积蒸馏水替代样品液，加入 2.5 mL 浓度为 50 mmol·L^{-1}、pH8.2 的 Tris-HCl 缓冲液混匀，25 ℃ 水浴 20 min，加入 2.5 mmol·L^{-1} 的邻苯三酚溶液 0.25 mL，快速混匀，每 20 s 测定一次 320 nm 处的吸光度值。以反应时间为自变量，吸光度作为因变量绘制回归方程，其斜率即为氧化速率。计算公式如下：

$$超氧阴离子自由基清除率(\%)=\frac{V_1-V_2}{V_1}\times 100 \quad 式（4）$$

式中：V_1：对照组邻苯三酚氧化速率；V_2：样品组邻苯三酚氧化速率。

1.2.8 降血糖活性测定

1.2.8.1 α-淀粉酶抑制率的测定 参考漆莹等[17]的方法并稍作修改，准确称取 2.5 g 底物粉末，加入 pH6.8 的磷酸缓冲液，混合均匀后于室温下超声 1 h，然后于 4 ℃ 下 10000×g 离心 15 min，其残渣重新提取一次，将两次上清液合并且定容至 50 mL，所得上清即为样品提取液。吸取 1 mL 经磷酸缓冲液稀释成不同浓度的提取液于离心管中，加入 60 U·mL^{-1} 的 α-淀粉酶溶液 1 mL，37 ℃ 水浴加热 8 min，加入 DNS 2 mL 混合均匀，在 100 ℃ 水浴中加热反应 5 min，冷却至室温后，在 540 nm 波长处测定吸光值，计算公式如下：

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0-A_3}\right)\times 100 \quad \text{式（5）}$$

式中：A_0：磷酸缓冲液代替提取液吸光值；A_1：样品反应组吸光值；A_2：磷酸缓冲液代替可溶性淀粉吸光值；A_3：磷酸盐缓冲液代替提取液及 α-淀粉酶溶液吸光值。

1.2.8.2 α-葡萄糖苷酶抑制率的测定 根据孔娜等[18]的方法并稍作修改，按照 1.2.8.1 方法提取样品，用磷酸缓冲液将提取液稀释至不同浓度，吸取 0.05 mL 不同浓度提取液于 2 mL 离心管中，加入 0.1 mL α-葡萄糖苷酶溶液，混匀后于 37 ℃ 水浴反应 15 min，加入 5 mmol·L^{-1} PNPG 溶液 0.1 mL，37 ℃ 反应 20 min，再加入 1 mL Na_2CO_3 溶液，反应结束。测定其反应液在 405 nm 波长处的吸光值，计算公式如下：

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0-A_3}\right)\times 100 \quad \text{式（6）}$$

式中：A_0：磷酸缓冲液代替提取液吸光值；A_1：样品反应组吸光值；A_2：磷酸缓冲液代替 α-葡萄糖苷酶吸光值；A_3：磷酸盐缓冲液代替提取液及 α-葡萄糖苷酶吸光值。

1.2.9 UPLC-MS/MS 分析

1.2.9.1 样本制备 取 100 mg 样本于 1.5 mL 离心管中，加入 10 μL 内标（100 ppm L-2-氯苯丙氨酸）、1000 μL 提取液（乙醇∶乙腈∶水=2∶2∶1）混合振荡 60 s，超声 0.5 h，随后以 12000 r/min、4 ℃ 条件下离心 5 min，取上清液进行真空浓缩 4 h，加入 200 μL 50% 甲醇溶液，振荡 40 s，超声 10 min，取 200 μL 样本用滤膜过滤，置于内插管中检测。

1.2.9.2 色谱条件 使用 Whater HSS T3 色谱柱（2.1 mm×100 mm，1.8 μm）；流动相（A）：超纯水（含 0.1% 甲酸）；B：乙腈溶液（含 0.1% 甲酸）；洗脱梯度：0~9 min，95%~5%A、5%~95%B，保持 1 min；10~11 min，5%~95%A、95%~5%B，持续 14 min；流速 0.35 mL/min，柱温 40 ℃，进样量 3 μL。

1.2.9.3 UPLC-MS/MS 数据处理 所得原始数据使用代谢组学处理软件 Compound Discoverer（Thermo Scientific），进行保留时间、质荷比等参数的简单筛选，然后对不同样品根据保留时间偏差 0.2 min 和质量偏差 5 ppm 进行峰对齐，使鉴定更准确，随后根据设置的质量偏差 5 ppm、信号强度偏差 30%、信噪比 3、最小信号强度 100000、加和离子等信息进行峰提取，同时对峰面积进行定量，再整合目标离子，然后通过分子离子峰和碎片离子进行分子式的预测并与 mzCloud、MZvault、Chemspider 数据库进行比对，最后得到数据的鉴定和半定量结果。

1.3 数据处理

使用 Graph Pad Prism 9.0 对所得数据进行作图处理，采用 Design Expert 13.0 进行响应面优化试验，使用 IBM SPSS 27.0 进行显著性与方差分析。以三次平行实验所得结果的平均值±方差作为最终实验结果。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 物料量、接种量、KH_2PO_4 对三萜含量的影响

如图 1A 所示，随着物料量的不断增加，三萜含量呈先上升后下降的趋势。红芝发酵是一个需氧过程，而氧气的供应受到设备空间大小的影响，当物料量较少时有利于氧气供给，但会使得底物水分蒸发速率较快，影响菌丝生长，而物料量较高时虽能缓解水分的损失，但会造成局部缺氧，会使物质转化受阻[19]。故选择 30 g 用于后续实验。

如图 1B 所示，在接种 6%~16% 的过程中，三萜含量呈先增长后下降的趋势，当接种量为 12% 时，三萜含量达到峰值，随后逐渐下降。接种量显著影响其营养转化，若菌液太少，则会使固态底物中的营养物质无法充分被吸收，造成菌丝延迟时间过长；当菌液较多时，菌丝体短时间内将快速吸收底物中营养物质，快速生长，但发酵后劲减弱，同时，菌丝体所产的许多代谢物对菌丝体的生长具有不利影响[20]。故选择 12% 的接种量用于后续实验。

钾离子和磷酸盐与菌丝发酵息息相关，钾离子和磷酸盐含量较低时，会影响红芝菌丝体的代谢及生长[21]，从而影响发酵底物中三萜的含量。如图 1C 所示，随着 KH_2PO_4 浓度的增加，三萜含量呈现先增加后降低的趋势，当 KH_2PO_4 的加入量在 0.1% 时，三萜含量达到最高，其值为 0.31%，继续增加用量时，含量逐渐下降，可能是过量的磷元素对某些核心代谢、次级代谢等相关基因起到抑制作用，阻碍了菌丝发酵和营养物质转化[22]。

2.2 响应面优化试验

2.2.1 响应面试验设计与结果 以单因素实验为基础，以三萜含量（Y）为实验评价标准，物料量（A）、接种量（B）、KH_2PO_4 添加量（C）为自变量，进行红芝发酵响应面优化试验。响应面试验设计与结果如表 2 所示，利用 Design-Expert13.0 软件对响应面试

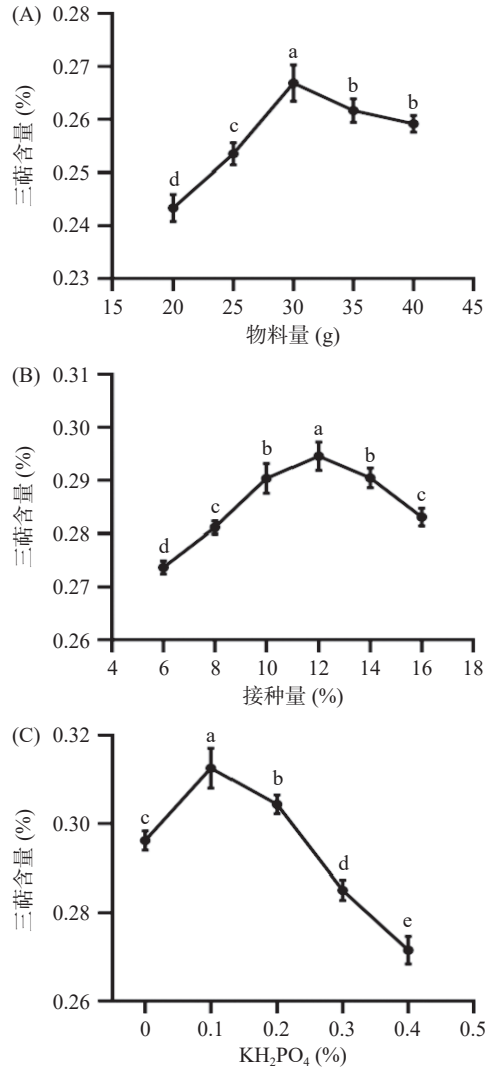


图 1　物料量(A)、接种量(B)、KH_2PO_4 添加量(C)对发酵产物中三萜含量的影响

Fig.1　Effect of material (A), inoculum (B), KH_2PO_4 (C) amount on triterpene content in fermentation products

注：不同小写字母表示处理组间差异显著(P<0.05)。

表 2　响应面试验设计及结果

Table 2　Response surface test design and results

试验号	A物料量	B接种量	C磷酸二氢钾添加量	三萜含量(%)
1	−1	−1	0	0.29±0.02
2	1	−1	0	0.31±0.02
3	−1	1	0	0.33±0.01
4	1	1	0	0.30±0.03
5	−1	0	−1	0.32±0.02
6	1	0	−1	0.29±0.02
7	−1	0	1	0.28±0.02
8	1	0	1	0.29±0.02
9	0	−1	−1	0.30±0.03
10	0	1	−1	0.33±0.01
11	0	−1	1	0.30±0.02
12	0	1	1	0.33±0.02
13	0	0	0	0.35±0.01
14	0	0	0	0.36±0.02
15	0	0	0	0.34±0.01
16	0	0	0	0.35±0.13
17	0	0	0	0.36±0.20

表 3　回归模型方差分析

Table 3　ANOVA of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.013	9	0.0015	128.37	<0.0001	**
A	0.0001	1	0.0001	9.81	0.0165	*
B	0.0004	1	0.0004	33.73	0.0007	**
C	0.0006	1	0.0006	49.65	0.0002	**
AB	0.0007	1	0.0007	59.94	0.0001	**
AC	0.0003	1	0.0003	28.23	0.0011	**
BC	0.0002	1	0.0002	16.74	0.0046	**
A^2	0.0038	1	0.0038	325.81	<0.0001	**
B^2	0.0016	1	0.0016	140.27	<0.0001	**
C^2	0.0046	1	0.0046	395.72	<0.0001	**
残差	0.0001	7	0.0001			
失拟项	6.528E-06	3	2.176E-06	0.1172	0.945	
纯误差	0.0012	4	0.0001			
总和	0.0134	16				

注：**表示差异极显著(P<0.01)；*表示差异显著(P<0.05)。

验结果进行线性拟合，所得二项多次回归模型方程如下。

$$Y=0.3564-0.0038A+0.0070B-0.0085C-0.0132AB+0.0090AC-0.0070BC-0.0299A^2-0.0196B^2-0.0329C^2$$

表 3 为发酵燕麦中三萜类成分的回归模型进行方差分析，由表可见此回归模型存在着极显著差异(P<0.01)，失拟项不显著(P>0.05)，并且决定系数 R^2 为 0.994，这说明测定的产物中三萜物质含量的结果与预期具有较好的拟合效果，表明所建立的模型能较好地反映各响应值的变化，其校正决定系数 R^2_{Adj} 为 0.986，因此，此模型可以解释三萜物质反映值的差异率为 98.62%，也表明此二元回归模型可以较好地用于三萜类成分的分析与预测。此外，其中一次项 B、C，交互项 AB、AC、BC 及二次项 A^2、B^2、C^2 均为极显著(P<0.01)，通过 F 值可以看出物料量(A)、接种量(B)、KH_2PO_4 添加量(C)三个单因素的影响大小顺序：C>B>A。

2.2.2　影响因素交互作用及验证实验结果　发酵基质中三萜含量的回归模型两两交互曲面图如图 2 所示，由图 2A 可得，物料量和接种量交互作用极显著，与方差结果一致，当两者加入量较低时，三萜含量较低，随着物料量和接种量的增加，三萜含量起初先增加，而后又逐渐降低。如图 2B 所示，物料量和磷酸二氢钾量两者之间呈现极显著作用，当物料量不变，磷酸二氢钾添加量增加时，底物中三萜含量先呈现逐渐上升而后又快速下降的趋势，可能是由于当底物中磷酸盐量较高时，会破坏菌丝膜透性，使红芝菌丝体发酵受阻。由图 2C 可知，接种量与磷酸二氢钾量之间的交互作用极显著，当磷酸二氢钾量处于较低水平时，随着接种量的增加，三萜含量逐渐增加，当接种量达到一定水平后，三萜含量缓慢下降。综上，随着各因素含量的增加发酵产物中三萜含量呈先增加后降低的趋势，当三因素处于最佳水平时，该回归模型具有最大值。

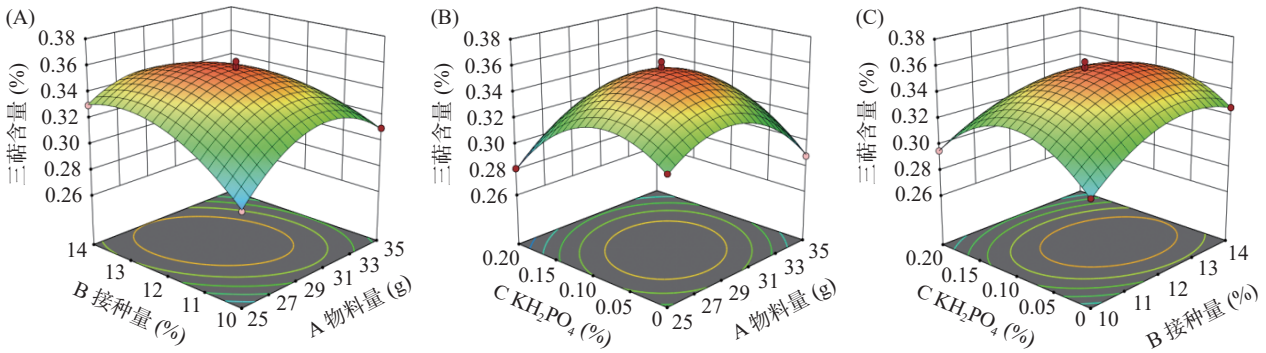


图 2 响应面试验交互作用曲面图

Fig.2 Response surface experiment interaction surface diagram

利用 Design Expert 13.0 软件对结果拟合后得出最佳的工艺参数为：总物料量 29.266 g，接种量 12.517%，KH_2PO_4 0.082%。在此参数下，发酵产物中三萜含量的预测值为 0.358%，出于对实际实验条件的可操作性，将上述工艺条件调整为：物料量 29 g，接种量 13%，磷酸二氢钾添加量 0.1%，在此参数下对发酵产物中三萜含量进行三次验证实验的平均值为 0.345%，与预测值相差较小，因此，建立的回归模型结果是可靠的。

2.3 体外抗氧化活性分析

2.3.1 红芝发酵产物对 DPPH 自由基清除率的影响

如图 3A 所示，发酵组提取液对 DPPH 自由基的清除率在 1~5 mg·mL^{-1} 浓度范围内显著高于未发酵组（P<0.05），且清除能力与浓度呈正相关。当浓度达到 5 mg·mL^{-1} 时，发酵组清除率为 89.57%，较未发酵组（45.09%）提高了近一倍。进一步分析表明，发酵组与未发酵组的 IC_{50} 值分别为 1.72 mg·mL^{-1} 和 7.66 mg·mL^{-1}，发酵使 IC_{50} 值降低了 77.54%，表明发酵显著提升了抗氧化效率。这一结果与李赵远等[23]的研究一致，其认为固态发酵可使功能活性成分增加，从而增强自由基清除能力。

2.3.2 红芝发酵产物对羟基自由基清除率的影响

对羟基自由基的清除率如图 3B 所示，在 1~5 mg·mL^{-1} 浓度范围内，随着浓度的增加，其清除率也随之增加，当浓度为 5 mg·mL^{-1} 时，发酵组对羟基自由基的清除率为 65.58%，较未发酵组（39.73%）显著提升了 65.06%（P<0.05）。此外，发酵组与未发酵组的 IC_{50} 值分别为 3.21、9.70 mg·mL^{-1}，通过发酵后，使得 IC_{50} 值显著降低了 66.90%，这一结果与顾丹丹等[24] 的结果一致，其认为通过灵芝发酵后，三萜等多种生物活性成分在清除自由基方面具有显著作用（P<0.05）。

2.3.3 红芝发酵产物对超氧阴离子自由基清除率的影响

对超氧阴离子自由基的清除率与前两者类似，如图 3C 所示，随着浓度的增加其清除率也随之上升，当浓度达到 5 mg·mL^{-1} 时，其发酵产物对超氧阴离子自由基的清除率达到最高，其值为 53.42%，较未发酵组显著提高了 46%（P<0.05）。同样，IC_{50} 值也呈现显著变化，发酵组 IC_{50} 值为 4.70 mg·mL^{-1}，与未发酵（10.91 mg·mL^{-1}）相比，发酵使 IC_{50} 值降低了 56.92%。综上所述，本研究发现，红芝固态发酵显著提升了产物的抗氧化性能。在 1~5 mg·mL^{-1} 浓度范围内，发酵组对 DPPH 自由基、羟基自由基及超氧阴离子自由基的清除率分别达到 89.57%、65.58% 与

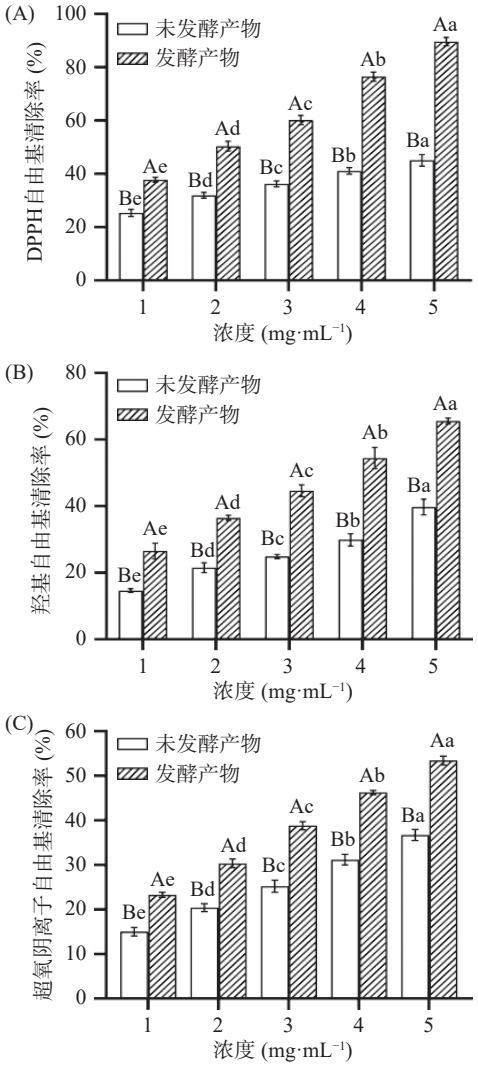


图 3 不同产物的抗氧化活性

Fig.3 Antioxidant activity of different products

注：不同大写字母表示相同浓度下组间差异显著（P<0.05）；不同小写字母表示相同处理组不同浓度间差异显著（P<0.05）；图 4 同。

53.42%，活性顺序为：DPPH 自由基>羟基自由基>超氧阴离子自由基（图 3），这一结果与 HSU 等[25] 在前期的研究报道一致，其认为通过发酵可以增加底物中的活性成分含量，如酚类和萜类等物质，使其抗氧化活性增强。

上述结果表明，红芝发酵显著提升了产物的抗氧化活性，而氧化应激的缓解与血糖稳态调控密切相关[26]，为验证其降血糖潜力，本研究进一步评估了发酵产物对 α-淀粉酶与 α-葡萄糖苷酶的抑制效应。

2.4　降血糖活性分析

2.4.1　红芝发酵产物对 α-淀粉酶的抑制作用　α-淀粉酶催化糖类物质生成低聚糖，再由 α-葡萄糖苷酶催化生成葡萄糖，燕麦具有降血糖和调节糖代谢的功效，其中 β-葡聚糖、多酚等成分可以通过抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性从而减缓葡萄糖的产生，使血糖下降[27−29]。如图 4A 所示，在浓度范围内（20~40 mg·mL^{-1}），α-淀粉酶的抑制率随着浓度的增大其抑制作用也呈现递增趋势，且抑制率对提取物浓度具有剂量依赖关系，当浓度为 40 mg·mL^{-1} 时，发酵组与未发酵组对 α-淀粉酶的抑制率分别为 72.57% 和 34.63%，与未发酵组相比，发酵组对其抑制率提高了 109.55%，经分析可能是发酵改变了燕麦中生物活性物质及结构[30]，如类黄酮母体结构上羟基数量、顺序，及生物活性物质含量等，当羟基数量增加时对 α-淀粉酶的抑制率也随之增加[31]，从而达到降血糖功效。同时，发酵组对 α-淀粉酶抑制率的 IC_{50} 值为 29.32 mg·mL^{-1}，相较于未发酵组降低了 56.19%，此结果与刘燕等[32] 的研究结果一致，通过发酵可能改变了燕麦三萜和多糖等活性成分的结构，从而提高了底物对 α-淀粉酶的抑制率，达到降血糖功效。

2.4.2　红芝发酵产物对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用　红芝发酵产物对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用如图 4B 所示，与 α-淀粉酶相比，两种底物对 α-葡萄糖苷酶的抑制率在浓度范围内变化趋势较小，在不同浓度下（20~40 mg·mL^{-1}）发酵组对 α-葡萄糖苷酶的抑制率分别为 54.43%、60.09%、67.23%、72.34% 和 76.26%，与未发酵组相比，分别提高了 157.83%、137.41%、132.22%、108.17% 和 108.30%。IC_{50} 值结果表明，发酵组提取物的半抑制浓度（18.12 mg·mL^{-1}）低于未发酵组（63.11 mg·mL^{-1}），这一结果与 ZHANG 等[30] 的研究结果一致，其归因于红芝菌丝体在发酵过程中可能会分泌出某些水解酶，如纤维素酶等，可促使蓝莓细胞壁发生不同程度降解，内部麦角甾醇、甘诺三酸等活性物质释放出来，使三萜含量增加，抑制 α-葡萄糖苷酶活性，促使葡萄糖摄取量增加，改善胰岛素敏感性，碳水化合物受到抑制，大大提高了发酵底物降血糖活性。在燕麦与蓝莓及红芝中含有的淀粉和纤维素等多糖成分，发酵后可能会发生改变，对多种代谢通路，如脂质代谢、氨基酸代谢等产生影响，且可通过调节肠道菌群的组成和功能来影响机体血糖水平，对此有相关研究表明多糖类物质可恢复患者肠道中有益菌属的丰富度，通过代谢物的变化改善属主代谢[33]，达到降血糖作用。综上所述，发酵产物对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶均有较好的抑制作用，在降血糖和营养保健领域具有较大潜力。

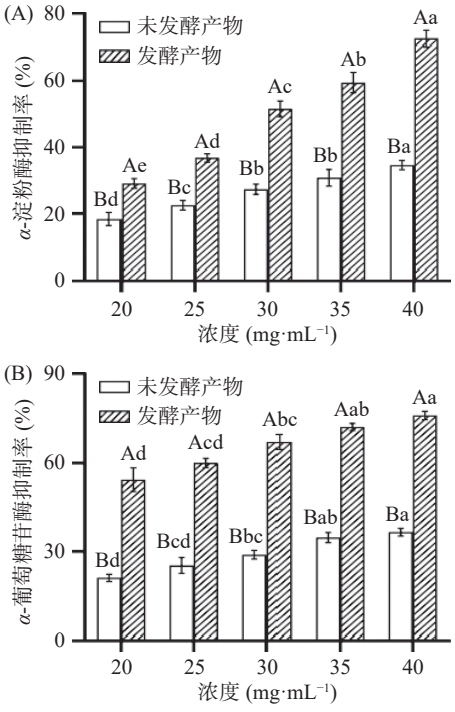


图 4　不同产物的降血糖活性

Fig.4　Hypoglycemic activity of different products

2.5　OPLS-DA

本实验主要研究发酵前后组间差异，目标明确，

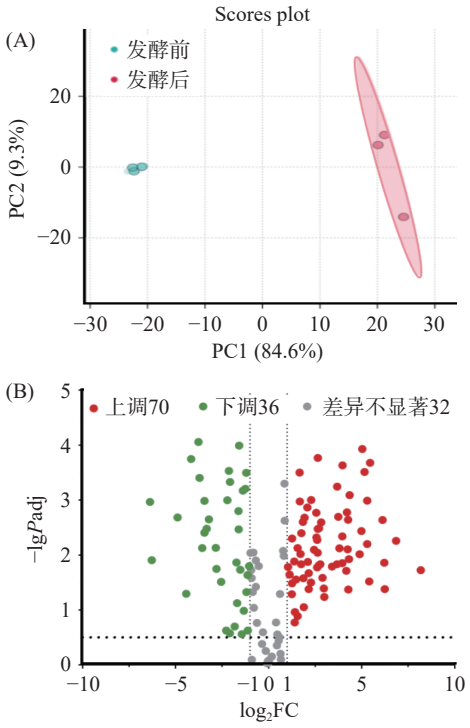


图 5　OPLS-DA 得分图与差异代谢物火山图

Fig.5　OPLS-DA score plot and differential metabolite volcano plot

且 OPLS-DA 可通过引入分组信息，其解析能力和有效性更高，更适合寻找显著差异代谢物，因此相较于 PCA 而言 OPLS-DA 更适用于本实验。故使用 OPLS-DA 将 PCA 中差异不显著变量去除，分析发酵前后主要差异代谢物。如图 5A 所示，发酵前后两组代谢物明显分离，说明两组间存在显著差异，发酵前后的 PC1 与 PC2 贡献率分别为 84.6%、9.3%，R^2x、R^2_Y 分别为 0.843、1，Q^2 为 0.994>0.9，说明此模型可靠。故可根据此分析计算−lg*P*adj 值及差异代谢物筛选。

2.6 差异代谢物筛选

基于 2.5 实验结果，以 P 值<0.05、$\log_2$FC=1 或 $\log_2$FC<−1 筛选出组间主要差异代谢物，如图 5B 所示，通过火山图可以看出，发酵组与对照组共筛选出 106 种差异代谢物，其中上调 70 种、下调 36 种。上调物质种类显著高于下调物质，说明通过发酵后产生更多种生物活性物质。

2.7 发酵前后差异代谢物分析

由表 4 可得，发酵前后共筛选出 18 类 106 种差异代谢物，包括了萜类化合物 14 种、酚类 1 种、羧酸及其衍生物 13 种、其他 78 种。结果显示，差异代谢物上调 70 种，下调 36 种，其中差异较大的是苯及取代衍生物、萜类化合物、羧酸及其衍生物、有机氧化合物和脂肪酸及其衍生物，其占比分别为 16.03%、13.21%、12.26%、12.26% 和 11.32%。

进一步分析表明，在植物中，酚类和黄酮类是主要的生物活性物质。发酵可使糖苷键水解，促进某些酚类物质的释放[34]，从而增强抗氧化活性。山奈酚和 7-葡萄糖苷等类黄酮物质显著上调，同时这两种物质已被证明具有极强的抗氧化作用[35]，可通过抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性，减少氧化应激，进而提高整体抗氧化能力[36]。此外，灵芝酸 S、灵芝酸 G 和齐墩果酸等三萜类化合物的上调同样对抗氧化活性的提升具有重要作用，可通过激活 Nrf2 信号通路（一种调控抗氧化反应的转录因子），促进抗氧化酶的表达，从而增强机体的抗氧化能力[37]。据报道，氨基酸是发酵过程中的重要代谢产物，从上表中可看出谷氨酸、L-酪氨酸等氨基酸上调，氨基酸的上调可提升基质的消化和吸收效率，使抗氧化、抗炎等作用增强[30]，因此，这可能是提高底物抗氧化活性的因素之一。

发酵过程中，三萜类化合物（如灵芝酸 S、灵芝酸 G 和齐墩果酸）的上调可能是降血糖活性提升的关键因素。研究发现，这些三萜类物质可通过抑制碳水化合物水解酶（如 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶）的活性，延缓对葡萄糖的吸收[38]，这与本研究中发酵组对 α-葡萄糖苷酶的抑制率提高 157.83% 的结果一致。此外，此类物质还可增强胰岛素信号通路，改善胰岛

表 4 发酵前后产物差异代谢物分析

Table 4 Analysis of differential metabolites in products before and after fermentation

物质种类	物质数量	上调数	物质名称	下调数	物质名称
香豆素及其衍生物	5	2	4-甲基伞形酮、6-甲基香豆素	3	甲氧沙林、黄曲霉毒素G、6,7-二甲氧基香豆素
酮酸及其衍生物	4	3	3-琥珀酰吡啶、丙酮酸、α-酮戊二酸	1	乙酰丙酸
类黄酮物质	2	2	山奈酚、7-葡萄糖苷		
酚类	1	1	α-生育三烯酚		
肉桂酸及其衍生物	4	3	咖啡酸、4-甲氧基肉桂酸、2-羟基肉桂酸	1	阿魏酸
吡啶及其衍生物	5	3	维生素B_6、吡啶甲酸、6-羟基烟酸	2	4-吡哆酸、烟酸
咪唑嘧啶类	6	5	腺嘌呤、茶碱、6-苄基氨基嘌呤、1,3,7-三甲基尿酸、6-糠酰腺嘌呤	1	7-甲基黄嘌呤
二噻类	1			1	硫胺素
苯并吡喃	3	2	5,7-二羟基-4H-1-苯并吡喃-4-酮、赫里斯酮F	1	3,4-二氢-6-羟基-2,5,7,8-四甲基-2H-1-苯并吡喃-2-羧酸
苯丙酸	2	1	3-苯基丙酸	1	苯乳酸
喹啉类	1			1	6-甲基喹啉
萘类	2	1	1,4-二羟基-2-萘酸盐	1	甲萘醌
苯及取代衍生物	17	12	龙胆酸、香草酸、苯丙酮酸、3-羟基邻氨基苯甲酸、没食子酸、2-甲氧基苯甲酸、原儿茶酸、水杨酸、3-氨基水杨酸、丁香酸、2,4-二羟基苯甲酸、没食子酸丙酯	5	酪胺、4-羟基苯基丙酮酸、苯甲酸、2-甲基苯甲酸、4-氯-3,5-二甲氧基苯甲醇
脂肪酸及其衍生物	12	8	柠檬康酸、庚酸、亚油酸、壬二酸、肉豆蔻酸、α-亚麻酸、γ-亚麻酸、茉莉酸酯	4	己二酸、己酸、十二烷酸、棕榈酰胺
苯丙素类	1	1	二氢玫瑰糖苷		
羧酸及其衍生物	13	7	β-丙氨酸、谷氨酸、组氨酸、L-天冬酰胺、3,4-二羟基苯丙氨酸、琥珀酸、L-酪氨酸	6	乙醛酸、延胡索酸、丙烯酸、5-氧代脯氨酸、4-胍基丁酸、4-乙酰氨基丁酸
萜类化合物	14	9	β-甘草次酸、小茴香醛、T2 三醇、刺囊酸、药用酸、齐墩果酸、灵芝酸S、灵芝酸G、菠葫元	5	D-樟脑、柠檬醛、吉尼平、二氢青蒿素、2,6-二叔丁基苯醌
有机氧化合物	13	10	维生素B5、葡萄糖酸、苏糖酸、甘露醇1-磷酸、L-阿拉伯糖醇、木糖醇、绿原酸、水杨苷、异绿原酸b、菜豆素	3	5-磷酸木酮糖、奎宁酸、泛醇
总数	106	70		36	

素敏感性，从而降低血糖水平[39]。齐墩果酸在调节糖代谢方面也表现出良好的潜力，LINDO 等[40] 通过提取植物中齐墩果酸活性成分，研究其对大鼠血糖的调节作用，结果表明，提取物在餐后高血糖方面具有明显的效果。同时，山奈酚和 7-葡萄糖苷的上调不仅具有抗氧化作用，还能通过抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性，延缓碳水化合物的消化吸收，从而辅助降低餐后血糖水平[35−36]。综上所述，这些多组分、多靶点的协同作用使发酵基质呈现出显著的降血糖功效，这一发现为农业副产物的高值化利用提供了理论依据。

2.8　KEGG 代谢途径分析

为进一步了解红芝发酵燕麦与蓝莓果渣复合底物中差异代谢物所涉及的相应代谢途径，将发酵与未发酵之间差异代谢物输入 KEGG 数据库进行通路富集分析。如图 6 所示，显示了差异代谢物的 20 条通路，其中萜类骨架合成通路显著富集（P<0.05），共含有 5 个差异代谢物，分别为齐墩果酸、灵芝酸 S 和灵芝酸 G 等三萜类化合物。此外，氨基酸的生物合成通路和类黄酮化合物生物合成通路也呈现显著富集（P<0.05），可能主要与底物中山奈酚、7-葡萄糖苷等活性物质的转化相关。这些通路的富集结果表明，红芝发酵可能通过激活次级代谢途径协同提升发酵底物功能活性。

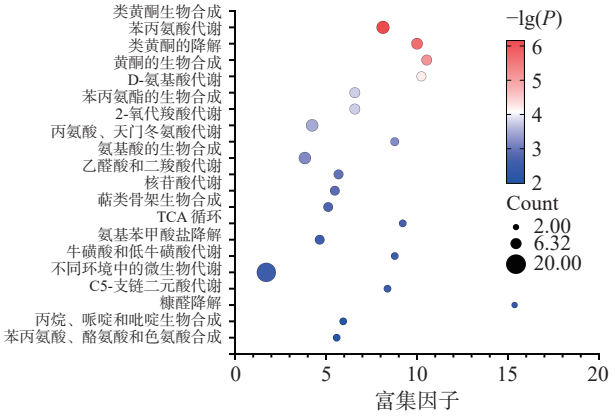


图 6　发酵前后差异代谢物 KEGG 富集图

Fig.6　KEGG enrichment of differential metabolites before and after fermentation

注：横坐标表示富集因子，纵坐标表示代谢通路名称，点的颜色越红表示富集越显著，点的大小表示所富集代谢物个数。

3　结论

本研究通过红芝生物转化技术，首次将燕麦与蓝莓果渣复合底物体系应用与生物活性成分的协同增效开发。通过单因素与响应面优化，确定了最佳工艺参数（物料量 29 g，接种量 13%，KH_2PO_4 0.1%），使三萜含量提升至 0.345%，较未发酵组提高 1.3 倍。代谢组学分析揭示了发酵过程中萜类（如灵芝酸 S、齐墩果酸）和类黄酮（如山奈酚-7-葡萄糖苷）化合物的显著上调，这些代谢物协同提升了产物的抗氧化（DPPH、羟基和超氧阴离子自由基清除率的 IC_{50} 值分别降低 77.54%、66.90% 和 56.92%）及降血糖活性（α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制率的 IC_{50} 值分别降低 56.19% 和 71.28%）。相较于单一底物发酵，复合体系不仅克服了功能活性单一的局限，还通过红芝生物降解作用，释放了蓝莓果渣中活性成分，实现了资源的高效利用。该研究为农业副产物的精准生物转化提供了新策略，同时为开发多靶点功能性食品原料奠定了理论基础，具有显著的生态与经济价值。

© 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] 矫馨瑶，田金龙，司旭，等. 蓝莓花青素的研究进展[J]. 中国果菜，2020，40(5)：26−31. [JIAO Xinyao, TIAN Jinlong, SI Xu, et al. Research progress of blueberry anthocyanins[J]. China Fruit AVegetable, 2020, 40(5): 26−31.]

[2] LUCHESE C L, GARRIDO T, SPADA J C, et al. Development and characterization of cassava starch films incorporated with blueberry pomace[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 106: 834−839.

[3] LIU H M, QIN S Y, SIROHI R, et al. Sustainable blueberry waste recycling towards biorefinery strategy and circular bioeconomy: A review[J]. Bioresource Technology, 2021, 332: 125181.

[4] CHENG Yuxin, WU Ting, CHU Xueqi, et al. Fermented blueberry pomace with antioxidant properties improves fecal microbiota community structure and short chain fatty acids production in an *in vitro* mode[J]. LWT, 2020, 125: 109260.

[5] CAPALDI G, AIMONE C, CALCIO G E, et al. The green extraction of blueberry by-products: An evaluation of the bioactive potential of the anthocyanin/polyphenol fraction[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(20): 11032.

[6] ZHANG Yi, LI Jinran, XIE Jing, et al. The impact of food processing on the structure and hypoglycemic effect of oat β-glucan[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2023, 78(3): 506−511.

[7] 何静瑞，张宜硕，马利华，等. 挤压、发酵对燕麦营养及抗氧化性影响的研究[J]. 中国粮油学报，2024，39(3)：56−63. [HE Jingrui, ZHANG Yishuo, MA Lihua, et al. Effects of extrusion and fermentation on nutrition and antioxidant activity of oat[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(3): 56−63.]

[8] 吴桐，贾锐鱼，路强强，等. 白腐菌在木质纤维素酶解中的研究进展[J]. 江苏农业科学，2021，49(5)：38−45. [WU Tong, JIA Ruiyu, LU Qiangqiang, et al. Research progress of white rot fungi in enzymatic hydrolysis of lignocellulose[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(5): 38−45.]

[9] LIU Xiaojin, YANG Luodan, LI Guangyao, et al. A novel promising neuroprotective agent: *Ganoderma lucidum* polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 229: 168−180.

[10] 谢晋奕，张天祎，熊智，等. 铁核桃壳与三七须根固态发酵灵芝研究[J]. 云南农业，2024(7)：76−79. [XIE Jinyi, ZHANG Tianyi, XIONG Zhi, et al. Research on solid-state fermented *Ganoderma lucidum* using iron walnut shells and radix atractylodis macrocephala[J]. Yunnan Agriculture, 2024(7): 76−79.]

[11] 孟缘，关颖贤，方潇，等. 灵芝菌丝体固态发酵青稞工艺优化及抗氧化、降血糖活性分析[J]. 食品工业科技，2025，46(6)：187−194. [MENG Yuan, GUAN Yingxian, FANG Xiao, et al. Optimization of the solid fermentation process of *Hordeum vulgare* Linn. by *Ganoderma lucidum* mycelium and its antioxidant and hypoglycemic activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 187−194.]

[12] 刘宇，苏海国，周勤梅，等. 不同种的灵芝醇提物对肝癌细胞

增殖的抑制作用[J]. 食用菌学报, 2018, 25(2): 121−125. [LIU Yu, SU Haiguo, ZHOU Qinmei, et al. Inhibitory effect of ethanol extracts of seven Ganodermataceae species on the proliferation of human hepatoma cell lines[J]. Acta Edulis Fungi, 2018, 25(2): 121−125.]
[13] OLUDEMI T, BARROS L, PRIETO M A, et al. Extraction of triterpenoids and phenolic compounds from *Ganoderma lucidum*: Optimization study using the response surface methodology[J]. Food & Function, 2018, 9(1): 209−226.
[14] 贾乐, 韩延超, 房祥军, 等. 褪黑素处理对香菇采后品质及活性氧代谢的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 229−236. [JIA Le, HAN Yanchao, FANG Xiangjun, et al. Effect of melatonin treatment on postharvest quality and reactive oxygen species metabolism of *Lentinus edodes*[J]. Food Science, 2021, 42(23): 229−236.]
[15] 谭冰, 严焕宁, 黄锁义, 等. 艾叶多糖的提取、含量测定及对羟自由基清除作用的研究[J]. 中国执业药师, 2012, 9(3): 10−13. [TAN Bing, YAN Huanning, HUANG Suoyi, et al. Study on the extraction of polysaccharides from Artemisiae Argyi Folum and the effects on scavenging of hydroxyl radicals[J]. China Licensed Pharmacist, 2012, 9(3): 10−13.]
[16] ZHENG Lan, LIU Min, ZHAI Guoyin, et al. Antioxidant and anti-ageing activities of mycelia zinc polysaccharide from *Pholiota nameko* SW-03[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(15): 3117−3126.
[17] 漆莹, 魏晓博, 马铖, 等. 益生菌发酵枸杞汁及其体外降血糖与抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(9): 142−151. [QI Ying, WEI Xiaobo, MA Cheng, et al. Study on probiotic fermented goji berry juice and its *in vitro* hypoglycemic and antioxidant activities[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(9): 142−151.]
[18] 孔娜, 潘少斌, 李长庚, 等. 不同提取方式对炒麦芽多糖抗氧化及降血糖活性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(16): 122−129. [KONG Na, PAN Shaobin, LI Changgeng, et al. Effects of different extraction methods on antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides from fried malt[J]. Food Research and Development, 2024, 45(16): 122−129.]
[19] 付铭, 江洁, 狄文婷, 等. 大米为基质灵芝菌丝体固态发酵条件的优化[J]. 食品工业科技, 2014, 35(2): 186−191. [FU Ming, GANG Jie, DI Wenting, et al. Optimization of the condition with rice of *Ganoderma lucidum* mycelium solid culture[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(2): 186−191.]
[20] 林威. 灵芝菌质发酵工艺及其抗氧化性研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2022. [LIN Wei. Study on fermentation technology and antioxidant properties of *Ganoderma lucidum* fungal substance[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2022.]
[21] 李刚, 李宝健. 灵芝发酵培养基的研究[J]. 中药材, 1998, 21(8): 379−381. [LI Gang, LI Baojian. The study on the fermentation medium of *Ganoderma lucidum*[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 1998, 21(8): 379−381.]
[22] YADAV K K, SINGH N, RAJASEKHARAN R. Responses to phosphate deprivation in yeast cells[J]. Current Genetics, 2016, 62(2): 301−307.
[23] 李赵远, 张文刚, 党斌, 等. 酶菌协同发酵产青稞多糖的工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 青海农林科技, 2025(1): 8−17. [LI Zhaoyuan, ZHANG Wengang, DANG Bin, et al. Enhanced synergistic enzyme-microbial fermentation for the bioconversion of highland barley into polysaccharides: Process optimization and antioxidant activity[J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2025(1): 8−17.]
[24] 顾丹丹, 董雪, 张金秀, 等. 利用灵芝发酵生产糙米灵芝菌粮[J]. 食品科学, 2025, 46(12): 148−155. [GU Dandan, DONG Xue, ZHANG Jinxiu, et al. Production of brown rice fermented by *Ganoderma lucidum*[J]. Food Science, 2025, 46(12): 148−155.]
[25] HSU J Y, CHEN M H, LAI Y S, et al. Antioxidant profile and biosafety of white truffle mycelial products obtained by solid-state fermentation[J]. Molecules, 2022, 27(1): 109.
[26] XIANG Gang, SUN Huaping, CHEN Yinyin, et al. Antioxidant and hypoglycemic activity of tea polysaccharides with different degrees of fermentation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 228: 224−233.
[27] 朱婷, 谢晶, 邵则淮, 等. 燕麦 *β*-葡聚糖降血糖性能研究进展[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(3): 381−386. [ZHU Ting, XIE Jing, SHAO Zehuai, et al. Research progress of hypoglycemic effect of oat *β*-glucan[J]. Journal of Triticeae Crops, 2020, 40(3): 381−386.]
[28] LIU Zehua, LI Bo. Procyanidin B1 and p-coumaric acid from highland barley grain showed synergistic effect on modulating glucose metabolism via IRS-1/PI3K/Akt pathway[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2021, 65(18): 2100454.
[29] WANG Binhui, CAO Juanjuan, ZHANG Bao, et al. Structural characterization, physicochemical properties and *α*-glucosidase inhibitory activity of polysaccharide from the fruits of wax apple[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 211: 227−236.
[30] ZHANG Rui, CEN Qin, HU Wenkang, et al. Metabolite profiling, antioxidant and anti-glycemic activities of Tartary buckwheat processed by solid-state fermentation (SSF) with *Ganoderma lucidum*[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101376.
[31] LI Fangliang, LUO Tongjie, HOU Jiale, et al. Natural *α*-glucosidase and *α*-amylase inhibitors from raspberry (*Rubus corchorifolius* L.) leaf-tea: Screening, identification and molecular docking analysis[J]. LWT, 2023, 181: 114763.
[32] 刘燕, 罗游, 魏岱岳, 等. 红曲菌固态发酵对燕麦多糖体外抗氧化及抑制淀粉酶活性的影响[J]. 现代食品科技, 2019, 35(5): 95−101,130. [LIU Yan, LUO You, WEI Daiyue, et al. Effect of solid-state fermentation with *Monascus anka* on the compositions, *in vitro* antioxidation and amylase-inhibitory activity of oat polysaccharides[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(5): 95−101,130.]
[33] TONG Aijun, LI Zhiqun, LIU Xiaoyan, et al. *Laminaria japonica* polysaccharide alleviates type 2 diabetes by regulating the microbiota-gut-liver axis: A multi-omics mechanistic analysis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258 (Pt 1): 128853.
[34] AUNG T, LEE W H, EUN J B. Metabolite profiling and pathway prediction of laver (*Porphyra dentata*) kombucha during fermentation at different temperatures[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133636.
[35] KATSUBE T, IMAWAKA N, KAWANO Y, et al. Antioxidant flavonol glycosides in mulberry (*Morus alba* L.) leaves isolated based on LDL antioxidant activity[J]. Food Chemistry, 2006, 97 (1): 25−31.
[36] WU Shutian, SHEN Danyu, WANG Ruohui, et al. Phenolic profiles and antioxidant activities of free, esterified and bound phenolic compounds in walnut kernel[J]. Food Chemistry, 2021, 350: 129217.
[37] WANG Xin, YE Xiaolong, LIU Rui, et al. Antioxidant activities of oleanolic acid *in vitro*: Possible role of Nrf2 and MAP kinases[J]. Chemico-Biological Interactions, 2010, 184(3): 328−337.
[38] KHATHI A, SERUMULA M R, MYBURG R B, et al. Effects of *Syzygium aromaticum*-derived triterpenes on postprandial blood glucose in streptozotocin-induced diabetic rats following carbohydrate challenge[J]. PLoS One, 2013, 8(11): e81632.
[39] INDU S, VIJAYALAKSHMI P, SELVARAJ J, et al. Novel triterpenoids from *Cassia fistula* stem bark depreciates STZ-induced detrimental changes in IRS-1/Akt-mediated insulin signaling mechanisms in type-1 diabetic rats[J]. Molecules, 2021, 26(22): 6812.
[40] LINDO R A, SALMON C, MCGROWDER D. The hypoglycaemic effect of oleanonic acid isolated from *Pilea elizabethae* in a rat model[J]. International Journal of Current Pharmaceutical Research, 2017, 9(6): 63.