

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250312001

引用格式: 靳雅楠, 吴蕊, 孙琛, 等. 黑曲霉改性梨渣膳食纤维的工艺优化及其生理活性和保健功能研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(11): 314–320.

JIN YN, WU R, SUN C, *et al.* Process optimization of altering the properties of pear residue soluble dietary fiber by *Aspergillus niger* and study on its physiological activity and health function [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(11): 314–320. (in Chinese with English abstract).

黑曲霉改性梨渣膳食纤维的工艺优化及其生理活性和保健功能研究

靳雅楠^{1*}, 吴蕊², 孙琛¹, 王权¹, 朱晓炜³

(1. 衡水市综合检验检测中心, 衡水 053000; 2. 衡水市质量和标准化研究院, 衡水 053000;

3. 衡水市疾病预防控制中心, 衡水 053000)

摘要: **目的** 优化黑曲霉改性梨渣膳食纤维(pear residue soluble dietary fiber, PSDF)发酵工艺, 并对其特性进行研究。**方法** 利用单因素实验, 优化黑曲霉的接种量、发酵温度和发酵时间, 确定最佳发酵工艺; 通过测定 PSDF 的持水性(water holding capacity, WHC), 持油性(oil holding capacity, OBC), 果糖、葡萄糖、阿拉伯糖、木糖和鼠李糖含量, 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH)自由基清除能力, 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS]阳离子自由基清除能力, 葡萄糖吸附能力(glucose adsorption capacity, GAC), 胆固醇吸附能力(cholesterol adsorption capacity, CAC), 确定改性后 PSDF 的特性。**结果** 最佳发酵工艺为: 黑曲霉的接种量为 8%, 发酵温度为 36 °C, 发酵时间为 7 d; PSDF 的 WHC 为 15.89 g/g, OBC 为 4.02 g/g; 葡萄糖、阿拉伯糖的含量提高, 果糖、木糖和蔗糖的含量降低; DPPH 自由基清除能力和 ABTS 阳离子自由基清除能力均显著提高; GAC 提高至 0.77 mg/g, CAC 提高至 0.56 mg/g。**结论** 适宜的发酶工艺改性 PSDF, 有助于提高得率。黑曲霉改性 PSDF 有效地改善了其生理活性和保健功能。

关键词: 梨渣膳食纤维; 黑曲霉; 工艺优化; 生理活性; 保健功能

Process optimization of altering the properties of pear residue soluble dietary fiber by *Aspergillus niger* and study on its physiological activity and health function

JIN Ya-Nan^{1*}, WU Rui², SUN Chen¹, WANG Quan¹, ZHU Xiao-Wei³

(1. Hengshui Comprehensive Inspection and Testing Center, Hengshui 053000, China; 2. Hengshui Quality and Standardization Research Institute, Hengshui 053000, China; 3. Hengshui Center for Disease Control and Prevention, Hengshui 053000, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the fermentation process of pear residue soluble dietary fiber (PSDF) modified by *Aspergillus niger* and study its characteristics. **Methods** Using single factor experiments to optimize

收稿日期: 2025-03-12

第一作者/*通信作者: 靳雅楠(1989—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为食品检测及工艺研究。E-mail: jin123456780513@163.com

the inoculation amount, fermentation temperature, and fermentation time of *Aspergillus niger*, and determine the optimal fermentation process; determine the characteristics of the modified PSDF: The water holding capacity (WHC), oil holding capacity (OBC), fructose, glucose, arabinose, xylose and xylose content, 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical (DPPH) free radical scavenging ability, 2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate) (ABTS) cationic radical scavenging ability, glucose adsorption capacity (GAC) and cholesterol adsorption capacity (CAC). **Results** By optimizing the fermentation process, the optimal inoculation amount, fermentation temperature, and fermentation time of *Aspergillus niger* were determined to be 8%, 36 °C and 7 d. Based on the optimal fermentation process, the characteristic analysis of PSDF was conducted: WHC was 15.89 g/g, and OBC was 4.02 g/g; the content of glucose and arabinose increases, while the content of fructose, xylose and xylose decreases; the DPPH radical scavenging ability and ABTS cationic radical scavenging ability were significantly improved; GAC increased to 0.77 mg/g, and CAC increased to 0.56 mg/g. **Conclusion** Modifying PSDF with suitable fermentation processes can help improve yield. The use of *Aspergillus niger* modified pear pomace dietary fiber effectively improve its physiological activity and health function.

KEY WORDS: pear residue soluble dietary fiber; *Aspergillus niger*; process optimization; physiological activity; health function

0 引言

膳食纤维具有良好的加工特性、生理活性和保健功能^[1],且简单易得、成本低,在促进肠道蠕动^[2]、减肥食品^[3]、家畜生物饲料研发^[4-5]等方向具有较大的研究潜力。目前,关于石榴渣膳食纤维、竹笋渣膳食纤维、山楂渣膳食纤维、甘薯渣膳食纤维等研究已屡见不鲜^[6-9],但罕见对于梨渣膳食纤维(pear residue soluble dietary fiber, PSDF)的研究。

梨渣膳食纤维是天然食物产物^[10-11],由梨皮、核和干瓢组成,主要为不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF),具有促进肠道蠕动、降血糖、降血清胆固醇、调节肠道菌群、促进禽畜养殖业健康发展等多种功效^[12-15]。目前,膳食纤维的提取方法有化学法、酶解法和生物发酵法等。其中,化学法会影响膳食纤维色泽、口感和气味均较差;酶解法提取膳食纤维具有成本高的弊端,不适用于大规模工业生产;生物发酵提取法具有环境友好、条件温和、成本低、生物活性物质丰富等优点。黑曲霉是广泛应用于发酵降解的一种真菌,可以产生丰富的纤维素酶^[16]、改善 PSDF 的理化功能性质和饲喂效果、可以通过其转化作用增加生物活性物质^[17]、提高抗氧化能力和营养成分。如符慧珍等^[18]选用黑曲霉发酵改性葛根,通过优化料液比、接种量、发酵时间、发酵温度等确定了最佳发酵条件,膳食纤维得率增加到 13.75%,结构更为疏松多孔,持水力(water holding capacity, WHC)和溶胀力均提高了 0.2 倍,葡萄糖吸附能力提高了 0.70 倍,胆固醇吸附能力 0.28 倍;裴曾薇^[19]选用黑曲霉发酵香菇柄,通过探讨料液比、接种量、发酵温度、发酵时间对膳食纤维的理化功能性质的影响,确定了最佳改性条件,持水力、

持油力、膨胀性、胆固醇吸附能力提升 24.04%、27.37%、8.26%、19.64%。

本研究通过优化黑曲霉的接种量、发酵温度和发酵时间,确定最佳发酵工艺。在最佳发酵工艺的基础上,对 PSDF 的 WHC、持油性(oil holding capacity, OBC)、单糖组成、抗氧化性、葡萄糖吸附能力(glucose adsorption capacity, GAC)和胆固醇吸附能力(cholesterol adsorption capacity, CAC)进行测定和分析,确定其生理活性和保健功能,以期后续研究提供有效的数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

雪花梨、胡姬花生油、无抗鸡蛋均购自衡水吉美超市;黑曲霉菌株购自中国普通微生物菌种保藏管理中心。

氢氧化钠、硫酸镁、磷酸氢二钾、三氟乙酸、醋酸钠、葡萄糖、酒石酸钾钠、无水亚硫酸钠、3,5-二硝基水杨酸、邻苯二甲醛、胆固醇(分析纯,天津市大茂化学试剂厂);1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical, DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS](分析纯,北京酷来博科技有限公司);无水乙醇、冰乙酸、甲醇(分析纯,天津市永大化学试剂有限公司);98%硫酸[分析纯,默克化工技术(上海)有限公司]。

1.2 仪器与设备

DFT-100 粉碎机(冠森生物科技上海公司);DHG-9000-9005 烘箱(上海合恒仪器设备有限公司);214DDFBA 电子天平(精度 0.01 g,赛多利斯科学仪器有限公司);LGJ-12A-80 冷冻干燥机(上海继谱电子科技有限公司);

司); SX-700 高压蒸汽灭菌锅(三洋电机株式会社); HS-1300-U 洁净工作台(苏州安泰空气技术有限公司); DK-98-II 电热恒温水浴锅(天津泰斯特科技有限公司); UV2700 紫外分光光度计(上海岛津实验器材有限公司); MJ-500-II 恒温生化培养箱(上海一恒科学仪器有限公司); ST3100 pH 计(奥豪斯集团有限公司); 1260 高效液相色谱仪(美国安捷伦科技有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 培养基的配制

马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基: 土豆汁、葡萄糖 20 g/L、琼脂粉 20 g/L。

种子培养基: 3%葡萄糖、1.5%蛋白胨、0.1%硫酸镁、0.3%磷酸氢二钾、100 mL 蒸馏水, 中性 pH, 121 °C 灭菌 20 min。

发酵培养基: 梨渣 5 g, 葡萄糖 1 g, (NH₄)₂SO₄ 0.4 g, 蒸馏水 100 mL, 121 °C 灭菌 20 min。

1.3.2 黑曲霉的活化和扩大培养

将黑曲霉接种于 PDA 斜面培养基上, 37 °C 下培养 6 d 得到新鲜孢子, 用无菌水洗涤获得孢子悬液。

采用血球计数板计数 1×10^7 个孢子, 接种于 30 mL 种子培养基中, 36 °C、220 r/min 条件下于摇床上培养 24 h, 得到黑曲霉种子液。

1.3.3 单因素实验

将雪花梨渣粉碎过 40 目筛, 粉碎样品置于 80 °C 烘箱中至恒重。接种 6% 的黑曲霉种子液于发酵培养基中, 36 °C、220 r/min 条件下于摇床上培养 8 d 后得到梨渣发酵液。过滤发酵液, 在滤液中加入 4 倍体积的乙醇, 静置过夜, 收集沉淀, 冷冻干燥得到 PSDF。在此基础上进行单因素试验, 探究菌接种量(4%、6%、8%、10%、12%)、发酵温度(32、34、36、38、40 °C)、发酵时间(6、7、8、9、10 d)对得率的影响。得率得率的计算见公式(1)。

得率/%=沉淀得到的冷冻干燥组分质量/未发酵前干燥梨渣质量 $\times 100\%$ (1)

1.3.4 PSDF 的特性

在单因素实验结果基础上进行发酵, 提取 PSDF, 并对其 WHC、OBC、单糖组成、抗氧化性、GAC 和 CAC 进行测定。

(1) WHC

参考刘鹏等^[20]的方法, 准确称取 1.0 g 样品于 50 mL 干燥离心管中, 加入 20 mL 蒸馏水, 上下颠倒摇匀 3 次后, 涡旋 1 min, 室温下静置 18 h, 3500 r/min 离心 25 min, 弃去上清液, 记录残余物质量 m_2 , 计算见公式(2):

$$\text{WHC}/(\text{g/g})=(m_2-m_1)/m_1 \quad (2)$$

式中: m_1 为沉淀得到的冷冻干燥组分质量, g; m_2 为残余物质量, g。

(2) OBC

参考黄芮等^[21]的方法, 准确称取 5.0 g 样品于 50 mL

干燥离心管中, 加入 15 mL 花生油, 上下颠倒摇匀 3 次后, 涡旋 10 min, 2000 r/min 离心 20 min, 弃去上清液, 记录残余物质量 m_4 , 计算见公式(3):

$$\text{OBC}/(\text{g/g})=(m_3-m_4)/m_3 \quad (3)$$

式中: m_3 为沉淀得到的冷冻干燥组分质量, g; m_4 为残余物质量, g。

(3) 单糖组成测定

参考金书涵等^[22]的方法, 准确称取 10.0 mg 样品于 10 mL 色谱瓶中, 加入 2 mol/L 三氟乙酸溶液 1 mL, 120 °C 加热 2 h, 氮气吹干。加入甲醇清洗并吹干, 重复 3 次。加入 1 mL 甲醇, 混匀, 过 0.45 μm 滤膜后待测。采用 Dionex™ CarboPac™ PA20 (150 mm \times 3.0 mm, 10 μm) 液相色谱柱; 进样量为 5 μL 。流动相 A (H₂O), 流动相 B (0.1 mol/L 氢氧化钠), 流动相 C (0.1 mol/L 氢氧化钠, 0.2 mol/L 醋酸钠), 流速 0.5 mL/min; 柱温为 30 °C。

(4) DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基清除率

参考 WANG 等^[23]的方法测定样品的 DPPH 自由基清除率; 参考于佳琪等^[9]的方法测定样品的 ABTS⁺ 自由基清除率。

(5) GAC

参照郭道等^[24]的方法, 准确称取 1.0 g 样品, 加入 20 mL 的 1.0 mg/mL 葡萄糖溶液, 37 °C 水浴培养 2 h, 4000 r/min 离心 20 min, 采用 3,5-二硝基水杨酸(3,5-dinitrosalicylic acid, DNS)法测定上清液中葡萄糖浓度, 计算见公式(4):

$$\text{GAC}/(\text{mg/g})=(C_1-C_2)/m \times V_1 \quad (4)$$

式中: C_1 为吸附前葡萄糖质量浓度, mg/mL; C_2 为吸附后葡萄糖质量浓度, mg/mL; V_1 为溶液体积, mL; m 为样品质量, g。

(6) CAC

参考沈琳^[25]的方法, 取新鲜蛋黄一枚, 加 9 倍质量的蒸馏水, 搅拌均匀配制成蛋黄溶液。准确称取 0.5 g 样品于离心管中, 加入 50 mL 蛋黄溶液上下颠倒摇匀 3 次后, 涡旋 10 min, 分别调节 pH 到 2.0 和 7.0, 于 37 °C 振荡 2 h 后离心。采用邻苯二甲醛(1,2-Phthalic dicarboxaldehyde, OPA)法测定胆固醇含量, 记录待测液在波长为 550 nm 处的吸光度, 计算为公式(5):

$$\text{CAC}/(\text{mg/g})=(C_4-C_3)/M \times V_2 \quad (5)$$

式中: M 为样品质量, g; C_4 为空白组中胆固醇质量浓度, mg/mL; C_3 为经过样品吸附后胆固醇质量浓度, mg/mL; V_2 为加入的蛋黄液体积, mL。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据统计; 采用 SPSS 22.0 软件进行显著性差异分析(Duncan), 显著差异水平取 $P < 0.05$; 实验重复次数 $n \geq 3$ 。

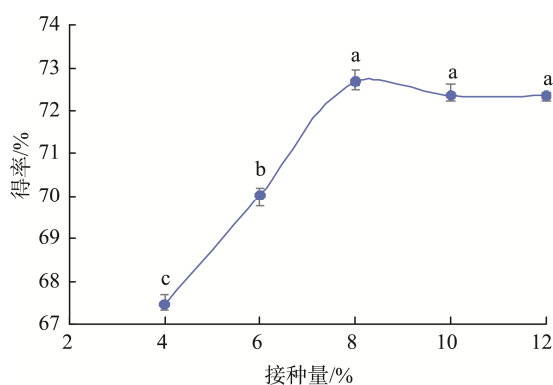
2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 菌接种量对得率的影响

不同菌接种量对得率的影响见图 1。由图 1 可知, 不

同接种量提高 PSDF 得率的作用: 8% > 10% > 12% > 6% > 4%。得率随着接种量的提高, 呈现出先升高后降低的现象。其中, 通过添加 8% 黑曲霉进行发酵, PSDF 的得率最高, 为 72.68%。接种量为 4%、6%、10% 和 12% 时, PSDF 的得率分别为 67.46%、70.03%、72.36% 和 72.35%。在 4%~8% 接种量范围内, 得率随着接种量的提高而显著提高。这是由于菌体总量的增加, 通过更多微生物的代谢活动可以释放更多的酶, 加快了降解速率, 进而提高了得率。但在 8%~12% 接种量范围内, 得率随着接种量的提高而缓慢降低。这可能是由于过量的微生物竞争营养物质, 对发酵效果产生了负面影响, 从而降低了得率。综上, 确定 8% 为最适接种量。



注: 不同小写字母表示组内差异显著 ($P < 0.05$), 图 2~3 同。

图 1 菌接种量对得率的影响

Fig.1 Effects of bacterial inoculation volume on extraction rate

2.1.2 发酵温度对得率的影响

不同发酵温度对得率的影响见图 2。由图 2 可知: 不同发酵温度提高 PSDF 得率的作用: 36 °C > 38 °C > 34 °C > 40 °C > 32 °C。当发酵温度为 36 °C 时, PSDF 的得率最高, 为 72.33%; 当发酵温度为 32 °C 时, PSDF 的得率最低, 为 57.85%。得率随着发酵温度的提高, 呈现出先显著升高后缓慢降低的现象。这可能是由于温度低时, 黑曲霉生长缓慢限制了发酵进程。当温度超过最适温度后, 不仅菌的代谢活动受抑制, 酶的结构性还产生变化导致活性降低。综上, 确定最适发酵温度为 36 °C。

2.1.3 发酵时间对得率的影响

不同发酵时间对得率的影响见图 3。由图 3 可知: 不同发酵时间提高 PSDF 得率的作用: 7 d > 8 d > 9 d > 10 d > 6 d。其中, PSDF 的得率在 7 d 时最高 (71.26%), 在第 6 d 时最低 (70.25%)。PSDF 的得率随着发酵时间的延长先提高后缓慢降低。这可能是随着发酵的时间延长, 发酵更充分, 进而提高了得率。但考虑到发酵时间越长 PSDF 的得率越低, 且时间、人力、生产周期等经济成本相应提高。综上, 确定最佳发酵时间是 7 d。

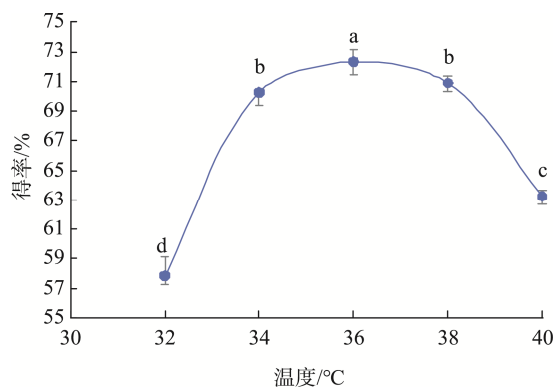


图 2 发酵温度对得率的影响

Fig.2 Effects of fermentation temperature on extraction rate

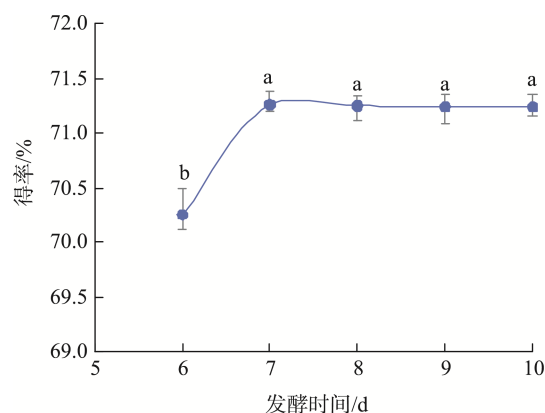


图 3 发酵时间对得率的影响

Fig.3 Effects of fermentation time on extraction rate

2.2 PSDF 的特性分析

在接种 8% 黑曲霉, 温度为 36 °C 发酵 7 d 后, 对 PSDF 进行分析研究。

2.2.1 PSDF 的 WHC 和 OBC

WHC 是指其与水分的物理吸附能力^[26], 可以增加粪便的含水量及体积, 有助于粪便的排泄; 可以延长胃排空时间, 有助于调节血糖和血脂水平; 可以产生饱腹感, 有助于控制体重。OBC 指其对油脂的吸附能力, 可以阻止肠道对多余胆固醇的吸收, 有助于预防高血脂、动脉粥样硬化等疾病^[27]; 可以减少食品加工中脂质的损失^[28]。PSDF 的羟基易通过氢键与水分子结合, 又携带亲油基团, 同时兼具疏松多孔结构, 使其有良好的持水性和持油性^[29]。

雪花梨渣发酵前后的 WHC 和 OBC 对比分析见表 1。由表 1 可知, 经黑曲霉发酵后, PSDF 的持水力提高了近 1.22 倍, PSDF 的持油力提高了近 1.26 倍, PSDF 的 WHC 为 15.89 g/g, OBC 为 4.02 g/g。此外, 有研究发现蒸汽爆破有助于提高膳食纤维的持水力和持油力^[6]。因此, 在后续研究中, 有潜力的研究方向有: 对比蒸汽爆破与生物发酵对 PSDF 特性的影响; 不同菌种发酵对 PSDF 特性的影响。

表 1 雪花梨渣发酵前后的 WHC 和 OBC 对比分析(g/g)
Table 1 Comparative analysis of WHC and OBC of snowflake pear residue before and after fermentation (g/g)

名称	WHC	OBC
发酵前梨渣	7.15±0.16	1.78±0.10
发酵后 PSDF	15.89±0.08**	4.02±0.12**

注: 与发酵前梨渣相比, **表示差异极显著($P<0.01$), 表 2 同。

2.2.2 PSDF 的单糖组成

雪花梨渣发酵前后的单糖组成对比分析见图 4。由图 4 可知, 发酵结束后, PSDF 中葡萄糖、阿拉伯糖含量提高, 果糖、木糖和蔗糖的含量降低。糖的含量发生变化是由于黑曲霉的生长代谢改变了多糖的结构, 导致分子链不同位置的断裂^[30]。黑曲霉产生的果糖基转移酶能够催化蔗糖生成低聚果糖。双糖和多糖被分解成葡萄糖, 黑曲霉的生长代谢会消耗部分葡萄糖, 因分解产物大于消耗所需导致了葡萄糖含量提高。部分半纤维素被水解, 提高了阿拉伯糖和木糖的含量。此外, 不同的改性操作和不同的菌种发酵破坏的糖苷键的位置不同, 也会导致糖的比例不同^[31]。

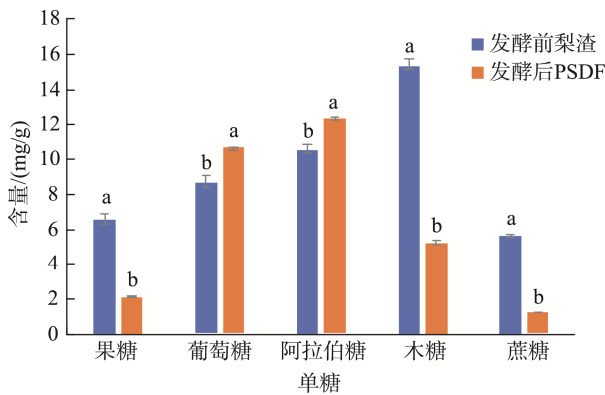


图 4 雪花梨渣发酵前后的单糖组成对比分析

Fig.4 Comparative analysis of monosaccharide composition of snowflake pear residue before and after fermentation

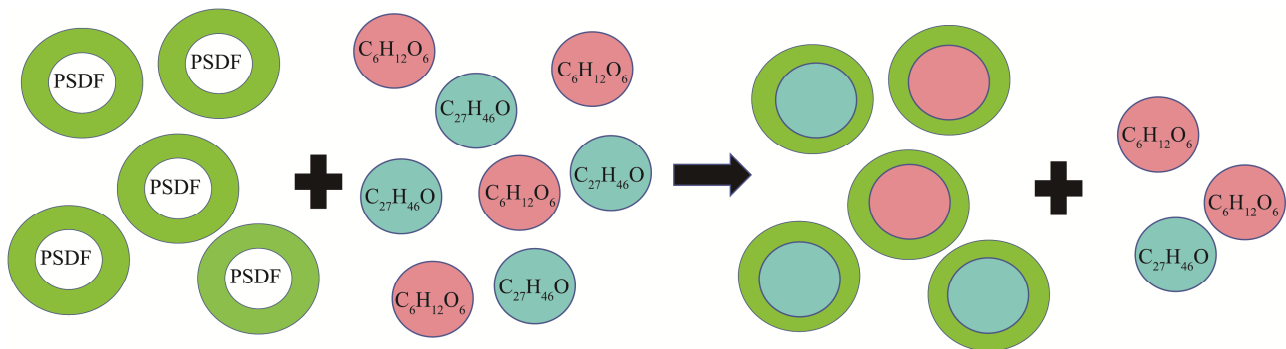


图 5 雪花梨渣发酵前后对葡萄糖和胆固醇的吸附

Fig.5 Adsorption of glucose and cholesterol of snowflake pear residue before and after fermentation

2.2.3 PSDF 的抗氧化性

雪花梨渣发酵前后的抗氧化能力对比分析见表 2。由表 2 可知, 黑曲霉发酵梨渣后, PSDF 的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS⁺自由基清除能力均显著提高, 说明黑曲霉改性 PSDF 可以提高其抗氧化能力。唐孝青^[32]也有相似的研究结论: 梨渣膳食纤维对 DPPH· 和 O²⁻具有一定清除能力, 最高清除率分别为 60.28%和 41.32%。这可能是由于黑曲霉改性 PSDF 后, 总酚含量显著增加。此外, 改性后的 PSDF 的比表面积增大, 增强了与自由基的物理接触效率, 从而提升了抗氧化能力。

表 2 雪花梨渣发酵前后的抗氧化能力对比分析(%)
Table 2 Comparative analysis of antioxidant capacity of snowflake pear residue before and after fermentation (%)

名称	DPPH 自由基清除率	ABTS ⁺ 自由基清除率
发酵前梨渣	60.45±1.25	48.54±1.10
发酵后 PSDF	75.47±2.87**	57.18±2.18**

2.2.4 PSDF 的 GAC 和 CAC

GAC 和 CAC 分别是评价膳食纤维抑制餐后血糖升高、抑制胆固醇吸收的重要指标。雪花梨渣发酵前后对葡萄糖和胆固醇的吸附作用见图 5。PSDF 的黏性可以阻碍葡萄糖扩散, 从而延缓碳水化合物的吸收和消化, 改善人体对血糖浓度的调节能力^[33]。PSDF 可以直接抑制胆固醇在胶束中的溶解度, 降低胆固醇在肠道中的吸收水平^[34], 可以与胆汁酸结合间接降低血清和肝脏的胆固醇水平^[35]。GAC 由发酵前的 0.42 mg/g 上升到发酵后的 0.77 mg/g, 这是由于游离羟基、醚基、酚基和羧基等基团得以暴露, 使其更加疏松多孔, 增大了 PSDF 与葡萄糖分子之间的相互作用。CAC 由发酵前的 0.35 mg/g 上升到发酵后的 0.56 mg/g, 这与符慧珍等^[18]的研究结果相似。这可能是由于发酵能够改变 PSDF 的物理结构, 增大了比表面积, 为胆固醇的吸附提供了更多的接触位点和吸附空间。

3 结 论

PSDF 的得率随着接种量的提高, 呈现出先升高后降低的现象; 随着发酵温度的提高, 先显著升高后缓慢降低; 随着发酵时间的延长先提高后缓慢降低。通过优化发酵工艺, 确定了黑曲霉的最佳接种量为 8%, 最适发酵温度为 36 °C, 最佳发酵时间为 7 d。黑曲霉改性的 PSDF 具有良好的持水性和持油性, 且显著提高了 GAC 和 CAC。这一特性可能有助于粪便的排泄、调节血糖和血脂水平、控制体重、预防高血脂、动脉粥样硬化等疾病。生物发酵可以改变 PSDF 的含糖比例, 提高其抗氧化能力。综上, 利用黑曲霉改性 PSDF, 有效地改善了其生理活性和保健功能。此外, 对比蒸汽爆破与生物发酵对 PSDF 特性的影响和不同菌种发酵对 PSDF 特性的影响均可作为后续的研究方向。

参考文献

- [1] 杨妍. 石榴皮渣(籽)膳食纤维制备与降脂功能研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
YANG Y. Preparation of dietary fiber from pomegranate marcs (seed) and its antiobesity function [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Diddertation, 2018.
- [2] 周迪, 黄健意. 膳食纤维能保障鸡肠道健康[J]. 养禽与禽病防治, 2022(12): 2-4.
ZHOU D, HUANG JY. Dietary fiber can ensure the health of chicken intestinal tract [J]. Poultry Husbandry and Disease Control, 2022(12): 2-4.
- [3] YANG Y. Preparation of dietary fiber from pomegranate marcs (seed) and its antiobesity function [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018.
- [4] APAJALAHTI J, RINTIL T, KETTUNEN A, 等. 传统生产模式下肠道菌群对肉鸡饲料转化率的影响[J]. 中国家禽, 2012, 34(8): 37-39.
APAJALAHTI J, RINTIL T, KETTUNEN A, *et al.* The effect of gut microbiota on feed conversion rate of broiler chickens under traditional production mode [J]. China Poultry, 2012, 34(8): 37-39.
- [5] 张瀚文, 余秋文, 张一凡, 等. 膳食纤维的生理功能及改性方法研究进展[J]. 农业科技与装备, 2021(1): 64-65, 68.
ZHANG HW, YU QW, ZHANG YF, *et al.* Research progress on physiological function and modification method of dietary fiber [J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2021(1): 64-65, 68.
- [6] 于佳琪, 马静怡, 张静静, 等. 蒸汽爆破对石榴皮渣膳食纤维结构、理化及功能性质的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 2024(9): 1-13.
YU JQ, MA JY, ZHANG JJ, *et al.* Effects of steam explosion on structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber from pomegranate peel residue [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2024(9): 1-13.
- [7] LUO XL, WANG Q, ZHENG BD, *et al.* Hydration properties and binding capacities of dietary fibers from bamboo shoot shell and its hypolipidemic effects in mice [J]. Food and Chemical Toxicology, 2017(109): 1003-1009.
- [8] 王勇, 孙若男, 刘坡, 等. 气流超微粉碎对山楂果渣膳食纤维结构及功能特性的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(12): 89-97.
WANG Y, SUN RN, LIU P, *et al.* Effect of airflow ultrafine grinding on the structure and functional characteristics of dietary fiber in hawthorn fruit residue [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(12): 89-97.
- [9] 渠琦, 马舒宁, 梁静怡, 等. 酶改性甘薯渣膳食纤维对酥性饼干品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(7): 142-149.
QU Q, MA SN, LIANG JY, *et al.* Effect of enzyme-modified dietary fiber from sweet potato residue on the quality of cookies [J]. Food Research and Development, 2024, 45(7): 142-149.
- [10] MANDAL A, MANDAL RK, YANG Y, *et al.* *In vitro* characterization of chicken gut bacterial isolates for probiotic potentials [J]. Poultry Science, 2021, 100(2): 1083-1092.
- [11] 向雪松, 朱婧. 膳食纤维定义与来源科学共识(2021)[J]. 营养学报, 2022, 44(1): 1-5.
XIANG SY, ZHU J. Scientific consensus on the definition and source of dietary fiber (2021) [J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2022, 44(1): 1-5.
- [12] 朱仁威, 谭沙, 刘庆庆, 等. 不同处理方法对刺梨果渣可溶性膳食纤维结构和体外降脂功能的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 1-8.
ZHU RW, TAN S, LIU QQ, *et al.* Effects of different treatments on the structure and *in vitro* hypolipidemic function of soluble dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt pomace [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 1-8.
- [13] 朱仁威, 谭沙, 黄亮. 刺梨果渣膳食纤维提取改性及生物活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(14): 290-297.
ZHU RW, TAN S, HUANG L. Research progress of dietary fiber extraction modification and bioactivity of *Rosa roxburghii* Tratt pomace [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(14): 290-297.
- [14] 马凤, 张振宇, 陈启苗, 等. 梨渣可溶性膳食纤维提取工艺优化及功能特性分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 229-238.
MA F, ZHANG ZY, CHEN QM, *et al.* Extraction process optimization and analysis of functional characteristics of soluble dietary fibers of pear pomace [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 229-238.
- [15] 王振杰, 冉冉, 王彩虹, 等. 梨渣膳食纤维研究进展[J]. 阜阳师范学院学报(自然科学版), 2020, 37(3): 30-35.
WANG ZJ, RAN R, WANG CH, *et al.* Research progress of pear pomace dietary fiber [J]. Journal of Fuyang Normal University: Natural Science, 2020, 37(3): 30-35.
- [16] 张婷, 吕青阳, 闫志英, 等. 高产纤维素酶黑曲霉菌株的筛选、鉴定及产酶条件优化[J]. 饲料研究, 2025(3): 1-17.
ZAHNG T, LV QY, YAN ZY, *et al.* Screening, characterization and optimization of enzyme-producing conditions of high cellulase-producing *Aspergillus niger* strains [J]. Feed Research, 2025(3): 1-17.
- [17] XU LN, GUO S, ZHANG SW. Effects of solid-state fermentation with three higher fungi on the total phenol contents and antioxidant properties of diverse cereal grains [J]. FEMS Microbiology Letters, 2018(16): 8-16.
- [18] 符慧珍, 邓梅, 张名位, 等. 黑曲霉改性葛渣膳食纤维的工艺优化及其理化功能特性[J]. 中国农业科学, 2023, 56(12): 2380-2394.
FU HZ, DENG M, ZHANG MW, *et al.* The optimal fermentation technique of *Radix puerariae* residues by *Aspergillus niger* for dietary fiber modification and the consequent changes of physicochemical and functional properties of dietary fibers [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(12): 2380-2394.
- [19] 裴曾薇. 黑曲霉发酵改性香菇柄膳食纤维及其性质研究与应用[D]. 沈

- 阳: 辽宁大学, 2021.
- PEI CW. Study on properties and application of dietary fiber from *Lentinus edodes* stem modified by *Aspergillus niger* fermentation [D]. Shenyang: Liaoning University, 2021.
- [20] 刘鹏, 于潇淳, 周家鹏, 等. 菠萝果渣中不溶性膳食纤维提取工艺优化及其功能特性研究[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(1): 110–115.
- LIU P, YU XC, ZHOU JP, *et al.* Optimization of extraction process and functional characteristics of insoluble dietary fiber from pineapple pomace [J]. *Cereals & Oils*, 2024, 37(1): 110–115.
- [21] 黄芮, 李力, 马森, 等. 麦麸膳食纤维混菌固态发酵的条件优化及特性分析[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 81–89.
- HUANG R, LI L, MA S, *et al.* Fermentation optimization and characterization of wheat bran dietary fiber mixed with microbes in solid state [J]. *Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition*, 2024, 45(1): 81–89.
- [22] 金书涵, 崔蓬勃, 姚雨馨, 等. 竹叶可溶性膳食纤维的高效提取及其结构、功能特性分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(5): 203–210.
- JIN SH, CUI PB, YAO YX, *et al.* Efficient extraction of soluble dietary fiber from bamboo leaves and analysis of its structure and function [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2025, 51(5): 203–210.
- [23] WANG JJ, ZHANG WW, GUAN ZJ, *et al.* Effect of fermentation methods on the quality and *in vitro* antioxidant properties of *Lycium barbarum* and *Polygonatum cyrtoneura* compound wine [J]. *Food Chemistry*, 2023, 409: 135277.
- [24] 郭道, 罗诗焯, 林炎鑫, 等. 提取方法对米糠纤维素理化性质的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(7): 43–51.
- GUO X, LUO SY, LIN YX, *et al.* Effects of extraction methods on physicochemical properties of rice bran cellulose [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2024, 39(7): 43–51.
- [25] 沈琳. 大黄茎可溶性膳食纤维的提取、改性及其应用[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- SHEN L. Extraction, modification and application of soluble dietary fiber from rhubarb stem [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022.
- [26] 陶建明, 颜才植, 赵国华. 膳食纤维与水的相互作用与其组分和颗粒结构的相关性研究[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 1–9.
- TAO JM, YAN CZ, ZHAO GH. Correlation of the water-interacting property of dietary fiber powder with its composition and particle structure [J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(8): 1–9.
- [27] 何晓琴, 刘昕, 李苇舟, 等. 蒸汽爆破处理苦荞麸皮膳食纤维改性分析[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 46–54.
- HE XQ, LIU X, LI WZ, *et al.* Modification of dietary fiber from tartary buckwheat bran by steam explosion [J]. *Food Science*, 2021, 42(9): 46–54.
- [28] LIU HC, ANIWAN D, LIU YX, *et al.* Adsorption and controlled release performances of flavor compounds by rice bran insoluble dietary fiber improved through steam explosion method [J]. *Current Research in Food Science*, 2023, 7: 100550.
- [29] GUO Y, ZHANG X, HAO W, *et al.* Nano-bacterial cellulose/soy protein isolate complex gel as fat substitutes in ice cream model [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 198: 620–630.
- [30] 汤洁. 高纤维素酶活菌株发酵联合电脉冲改性酸橙皮膳食纤维及其理化功能活性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- TANG J. Fermentation of high cellulase-activated bacterial strains combined with electric pulse modification of dietary fibre from *Citrus aurantium* L. and its physicochemical functional activities [D]. Nanchang: Nanchang University, 2024.
- [31] DU X, WANG L, HUANG X, *et al.* Effects of different extraction methods on structure and properties of soluble dietary fiber from defatted coconut flour [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 143: 111031.
- [32] 唐孝青, 焦凌霞, 樊明涛, 等. 梨渣可溶性膳食纤维的提取及抗氧化特性[J]. 西北农业学报, 2010, 19(9): 93–98.
- TANG XQ, JIAO LX, FAN MT, *et al.* Extraction and antioxidant properties of soluble dietary fiber from pear residue [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2010, 19(9): 93–98.
- [33] 涂宗财, 李志, 陈钢, 等. 大豆可溶性膳食纤维降血糖功效的研究[J]. 食品科学, 2009, 30(17): 294–297.
- TU ZC, LI Z, CHEN G, *et al.* Hypoglycemic effect of soluble soybean dietary fiber [J]. *Food Science*, 2009, 30(17): 294–297.
- [34] YANG YQ, LIN LZ, ZHAO MM, *et al.* The hypoglycemic and hypolipemic potentials of moringa leaf polysaccharide and polysaccharide-flavonoid complex [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 210: 518–529.
- [35] WU QQ, WANG QT, FU JF, *et al.* Polysaccharides derived from natural sources regulate triglyceride and cholesterol metabolism: A review of the mechanisms [J]. *Food & Function*, 2019, 10(5): 2330–2339.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)