

乳酸菌发酵辅助酶法制备香蕉皮可溶性膳食纤维及功能性质分析

何玲玲, 刘彩华, 胡秦佳宝, 麦馨允, 黄斌, 黎添杰, 胡方洋*

(百色学院农业与食品工程学院, 百色学院亚热带特色农业产业学院, 百色学院广西芒果生物学重点实验室, 广西百色 533000)

摘要: 为有效利用废弃香蕉皮资源并提高产品附加值, 该研究采用乳酸菌发酵辅助酶法制备香蕉皮膳食纤维 (BP-SDF) 并优化其工艺条件, 进一步分析了最佳工艺下香蕉皮粉 (BP)、BP-SDF 及香蕉皮不溶性膳食纤维 (BP-IDF) 的理化及功能性质。结果表明: 最佳发酵工艺为鼠李糖乳杆菌接种量为 3.0 wt.%、发酵温度 38 ℃、发酵时间 18 h, BP-SDF 得率为 32.18%, 鼠李糖乳杆菌发酵辅助酶法对 BP-SDF 提取率较传统酶法提高了 2.0 倍。与酶法提取香蕉皮膳食纤维相比, BP-SDF 的溶解性、持水力及吸水膨胀力均极显著提升, 溶解性增强 7.1 倍, 持油力变化不明显。BP-SDF 对 DPPH·、O₂⁻、ABTS⁺·、OH· 具有一定清除能力, 表现出较好的抗氧化活性。BP-SDF 和 BP-IDF 对胆固醇、亚硝酸盐吸附能力均显著提升, 且两者在胃环境 (pH 值 2) 中吸附能力显著高于肠道环境 (pH 值 7), 此外 BP-SDF 还表现出良好的降血糖活性。因此, 乳酸菌发酵辅助酶法是一种可行的香蕉皮膳食纤维制备方法, 可为香蕉皮粉膳食纤维功能研究提供理论依据。

关键词: 乳酸菌; 香蕉皮; 可溶性膳食纤维; 功能性质

文章编号: 1673-9078(2025)10-98-106

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0048

Preparation and Functional Property Analysis of Banana Peel Soluble Dietary Fiber via *Lactobacillus* Fermentation-assisted Enzymatic Method

HE Lingling, LIU Caihua, HU Qinjiabao, MAI Xinyun, HUANG Bin, LI Tianjie, HU Fangyang*

(College of Agriculture and Food Engineering, Industrial College of Subtropical Characteristic Agriculture, Guangxi Key Laboratory of Biology for Mango, Baise University, Baise 533000, China)

Abstract: To effectively utilize waste banana peel resources and increase the added value of products, the *Lactobacillus* fermentation-assisted enzymatic method was used to extract banana peel soluble dietary fibers (BP-SDF), and the process conditions were optimized. Further analysis was performed to determine the physicochemical properties and functional characteristics of banana peel powder (BP), BP-SDF, and banana peel insoluble dietary fiber (BP-IDF) obtained under optimized conditions. The results showed that the optimal fermentation process was as follows: inoculation with 3.0 wt.% *Lactobacillus rhamnosus*, fermentation temperature of 38 ℃, and fermentation time of 18 h. Under these conditions, the yield of BP-SDF was 32.18%; its extraction rate

引文格式:

何玲玲, 刘彩华, 胡秦佳宝, 等. 乳酸菌发酵辅助酶法制备香蕉皮可溶性膳食纤维及功能性质分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 98-106.

HE Lingling, LIU Caihua, HU Qinjiabao, et al. Preparation and functional property analysis of banana peel soluble dietary fiber via *Lactobacillus* fermentation-assisted enzymatic method [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 98-106.

收稿日期: 2025-01-10; 修回日期: 2025-04-16; 接受日期: 2025-04-21

基金项目: 广西高校中青年教师科研基础能力提升项目 (2023KY0764; 2023KY0765; 2024KY0756); 百色市科学研究与技术开发计划自筹经费项目 (百科 20241550); 百色市科学研究与技术开发计划项目 (百科 20222009); 广西一流学科 (农业资源与环境) (Guijiaokeyan[2022])

作者简介: 何玲玲 (1990-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向: 农产品加工与其副产物中生物活性物质提取分离, E-mail: 1164856027@qq.com

通讯作者: 胡方洋 (1996-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 亚热带果蔬资源综合利用, E-mail: 1634110449@qq.com

was 2.0-fold higher than that obtained using the traditional enzymatic method. Compared with the enzymatic extraction of dietary fibers from banana peels, BP-SDF showed significant improvements in solubility, water-holding capacity, water absorption, and swelling capacity, with solubility increasing by 7.1-fold. The oil-holding capacity showed no significant changes. In addition, BP-SDF scavenged DPPH $\cdot$, O $_2^{\cdot-}$, ABTS $^{\cdot+}$, and OH $\cdot$ free radicals, demonstrating good antioxidant activity. The adsorption capacity of BP-SDF and BP-IDF for cholesterol and nitrite was significantly improved, whereas the adsorption capacity of BP-SDF in the gastric environment (pH 2) was significantly higher than that in intestinal environment (pH 7). Furthermore, BP-SDF showed better glucose-lowering activity. Therefore, the *Lactobacillus* fermentation-assisted enzymatic method is a feasible approach for preparing BP-SDF. This study provides a theoretical basis for the high-value utilization of BP-SDFs.

Key words: *Lactobacillus*; banana peel; soluble dietary fiber; functional property

香蕉隶属芭蕉属,是我国重要的热带水果之一,产量全球排名第三,主要集中于南方热带和亚热带地区,其中90%以上香蕉以鲜食为主,加工香蕉产品单一主要包括香蕉果汁、香蕉脆片、香蕉饮品等食品,精深加工综合产业有待进一步发展^[1,2]。鲜食及加工过程中产生大量的香蕉皮,香蕉皮约占鲜果重量的35%左右,香蕉加工业每年有数万吨的香蕉皮资源^[3,4]。研究发现香蕉皮含有多种生物活性物质,包括膳食纤维、多酚、黄酮、单宁等,具有抗氧化、抑菌、降糖及消炎的功效^[5-9],其中膳食纤维含量高达50%以上^[10],目前香蕉皮膳食纤维的提取方式主要有酶法和化学法,庄远红等^[11]、朱中原^[12]、张丰等^[13]采用酸法和碱法对香蕉皮粉末进行了萃取,再用乙醇沉淀法提取了膳食纤维;王梦阳^[14]、邓艺杰等^[15]、Phirom-On K^[16]采用酶法制备香蕉皮膳食纤维;然而利用微生物发酵法制备香蕉皮膳食纤维的研究报道未曾发现。但是利用真菌发酵法提取谷类制品膳食纤维^[17,18]及细菌发酵法提取农副产品如甘蔗渣^[19]、梨渣^[20,21]、蓝莓果渣^[22]、柚子皮^[23]、芒果皮^[24]、榴莲皮^[25]膳食纤维不胜其数,经过微生物发酵制备得到膳食纤维功能性质均得到一定提升。

本研究探讨乳酸菌辅助酶法生产香蕉皮膳食纤维的最佳工艺,采用单因素及响应面试验优化乳酸菌、接种量、发酵温度及发酵时间等发酵工艺,提高香蕉皮可溶性膳食纤维得率,降低香蕉皮不溶性膳食纤维含量。对香蕉皮粉、香蕉皮可溶性膳食纤维及不溶性膳食纤维进行理化性质、体外抗氧化性和吸附功能性质分析,为深入研究香蕉皮膳食纤维功能及资源再利用提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

香蕉皮,广西百色学院澄碧校区茶饮店;大豆油,欢乐购超市;保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、

鼠李糖乳杆菌、植物乳杆菌、嗜热链球菌,山东中科嘉亿生物工程有限公司; α -淀粉酶(3 000 U/g)、中性蛋白酶(100 U/mg)、胆固醇标准品(纯度 $\geq 98\%$),上海源叶生物科技有限公司;DPPH、ABTS试剂盒,南京建成生物工程研究所;超氧阴离子试剂盒,北京索莱宝科技有限公司;亚硝酸钠、葡萄糖、氢氧化钠及盐酸,国药集团化学试剂有限公司。

AH-BASIC30可调高速匀质质量机,广西南宁尊德隆实验科技有限公司;DHG-9140鼓风干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司;ZN-20小型粉碎机,广西南宁尊德隆实验科技有限公司;LRH-150-S培养箱,韶关市泰宏医疗器械有限公司;HH-4数显恒温水浴锅,江苏金坛市恒丰仪器有限公司;P5紫外-可见分光光度计,上海美谱达仪器有限公司;TGL-16C高速离心机,上海安亭科学仪器有限公司;PHS-3C数字式精密pH计,上海精密科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 香蕉皮(BP)粉制备

将香蕉果皮进行煮沸漂烫三分钟左右,放入鼓风干燥器(50℃)烘干,粉碎机粉碎(运行30 s,间歇30 s),过筛(80目)制得BP粉,贮藏于自封袋,保存到干燥器中备用。

1.2.2 乳酸菌辅助酶法香蕉皮膳食纤维提取方法

采用乳酸菌发酵香蕉皮辅助酶法旨在提高香蕉皮可溶性膳食纤维得率,降低香蕉皮不溶性膳食纤维含量。乳酸菌发酵法参考黄晓兵等^[24]、李家洲^[25]提取膳食纤维的方法略有修改。将香蕉皮粉按照1:20(g/mL)比例加入蒸馏水、添加质量分数为1.5 wt.%白砂糖、2 wt.%低脂奶粉,均质2 min,分装,121℃灭菌15 min;待样品冷却后接种乳酸菌、放入发酵箱进行发酵。参考王梦阳^[14]酶法提取步骤制备得到香蕉皮可溶性膳食纤维(BP-SDF)及香蕉皮不溶性膳食纤维(BP-IDF)。具体流程如下:乳酸菌发酵后发

酵液 200 mL，加热煮沸并冷却至室温，用 0.1 mol/L HCl 调节溶液 pH 值为 5.5，加入 α -淀粉酶 0.5 g 置于 60℃ 恒温水浴锅酶解 1.0 h，煮沸灭酶，冷却至室温，用 0.1 mol/L NaOH 调节溶液 pH 值为 7.0，加入中性蛋白酶 0.15 g 于 60℃ 恒温水浴锅酶解 50 min，煮沸灭酶，冷却至室温，减压抽滤得到滤渣，分别用蒸馏水、无水乙醇润洗 3 次后，真空干燥制备得到 BP-IDF；减压抽滤后的滤液于旋转蒸发仪浓缩至 50 mL，加入 4 倍体积分数为 95% 的乙醇溶液，置于 4℃ 冰箱冷藏 4 h，离心（6 000 g，20 min），抽滤所得滤渣分别用体积分数 80% 乙醇、95% 乙醇润洗 3 次，真空干燥得到 BP-SDF。

1.2.3 单因素及响应面优化实验

参考王梦阳^[14]方法及预试验，称量 5 g 香蕉皮粉，加入 100 mL 蒸馏水、1.5 g 白砂糖、2 g 脱脂奶粉均质，灭菌，冷却至室温后接种质量分数为 3 wt.% 乳酸菌，置入 38℃ 发酵培养箱发酵 20 h，考察了乳酸菌品种（保加利亚乳杆菌、嗜热链球菌、鼠李糖乳杆菌、植物乳杆菌、保加利亚乳杆菌与嗜热链球菌 1:1 混合^[24,25]），乳酸菌接种量（1、2、3、4、5 wt.%），发酵温度（36、37、38、39、40℃），发酵时间（16、17、18、19、20 h）对 BP-SDF 及 BP-IDF 得率的影响。根据单因素试验结果，采用 Box-Behnken 试验设计，选接种量（A）、发酵温度（B）、发酵时间（C）3 因素作为自变量，以发酵后香蕉皮可溶性膳食纤维得率（BP-SDF）为响应值，进行 3 因素 3 水平的响应面试验，响应面试验因素和水平设置见表 1。

Table 1 Factors and levels of response surface experiment			
水平	因素		
	A 接种量/(wt.%)	B 发酵温度/℃	C 发酵时间/h
-1	2	37	17
0	3	38	18
1	4	39	19

1.2.4 理化性质测定

- （1）持水力（WHC）、持油力（OHC）及膨胀力（EC）：均参考王梦阳^[14]的方法进行测定。
- （2）溶解性（Solubility）：参考马凤等^[26]的方法进行测定。

1.2.5 体外抗氧化能力的测定

- （1）DPPH 自由基清除能力：采用 DPPH 自由基测定试剂盒测定。
- （2）O₂⁻ 自由基清除能力：采用 O₂⁻ 自由基测定试

- 剂盒测定。
- （3）ABTS⁺ 自由基清除能力：采用 ABTS⁺ 自由基测定试剂盒测定。
- （4）OH 自由基清除能力：采用 OH 自由基测定试剂盒测定。

1.2.6 香蕉皮膳食纤维体外吸附性能测定

对胆固醇吸附能力、NO₂⁻ 清除率、葡萄糖吸附能力和葡萄糖透析延迟指数的测定，均参考王梦阳^[14]的方法进行测定。

1.2.7 数据处理

每组试验 3 组平行，最终数据以平均值 ± 标准偏差表达。响应面试验设计及结果分析利用 Design-Expert 13，作图均采用 origin 2019a，单因素方差分析利用软件 IBM SPSS Statistics 26。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

乳酸菌在生长过程中能产生分解糖类、蛋白质相关的酶，从而使得膳食纤维中残留的淀粉、多糖大分子水解生成低聚糖等可溶性膳食纤维，同时植物细胞壁分解使得一些大分子物质转变为小分子，不溶性膳食纤维转变为可溶性膳食纤维，使得膳食纤维的品质提高^[27]。乳酸菌发酵不同因素对于香蕉皮膳食纤维的得率影响如图 1 所示。

由图 1a 可知，与王梦阳^[14]酶法制备香蕉皮膳食纤维相比，嗜热链球菌发酵后 BP-SDF 与 IDF 含量变化不大，保加利亚乳杆菌、保加利亚乳杆菌与嗜热链球菌 1:1 混合、植物乳杆菌及鼠李糖乳杆菌发酵后 BP-SDF 含量都逐渐增大，BP-IDF 含量降低^[24,25]。其中鼠李糖乳杆菌发酵后 BP-SDF 得率由 17.1% 提高至 31.1%，BP-IDF 得率降低了 16.5%。这是因为乳酸菌发酵果实残渣降低了不溶性膳食纤维含量，提高了可溶性膳食纤维含量^[23,28]。因此，后期发酵菌种采用鼠李糖乳杆菌进行后续实验。

由图 1b 可知，随着接种量的增加，BP-SDF 得率先上升后下降，BP-IDF 得率先降低后升高。其原因可能是由于乳酸菌接入过少时，导致整个发酵完成不充分，产生的水解酶不足以破坏膳食纤维紧密的网状结构，导致 BP-SDF 增长率和 BP-IDF 降解率减缓；但是接种量超过 3 wt.% 以后，乳酸菌活菌数繁殖迅速，底物营养物质不足以维持菌体生长导致可溶性膳食纤维降解，不溶性膳食纤维增加，而总膳食纤维含量基本不变^[23]。因此，确定最适接种量为 3 wt.%。

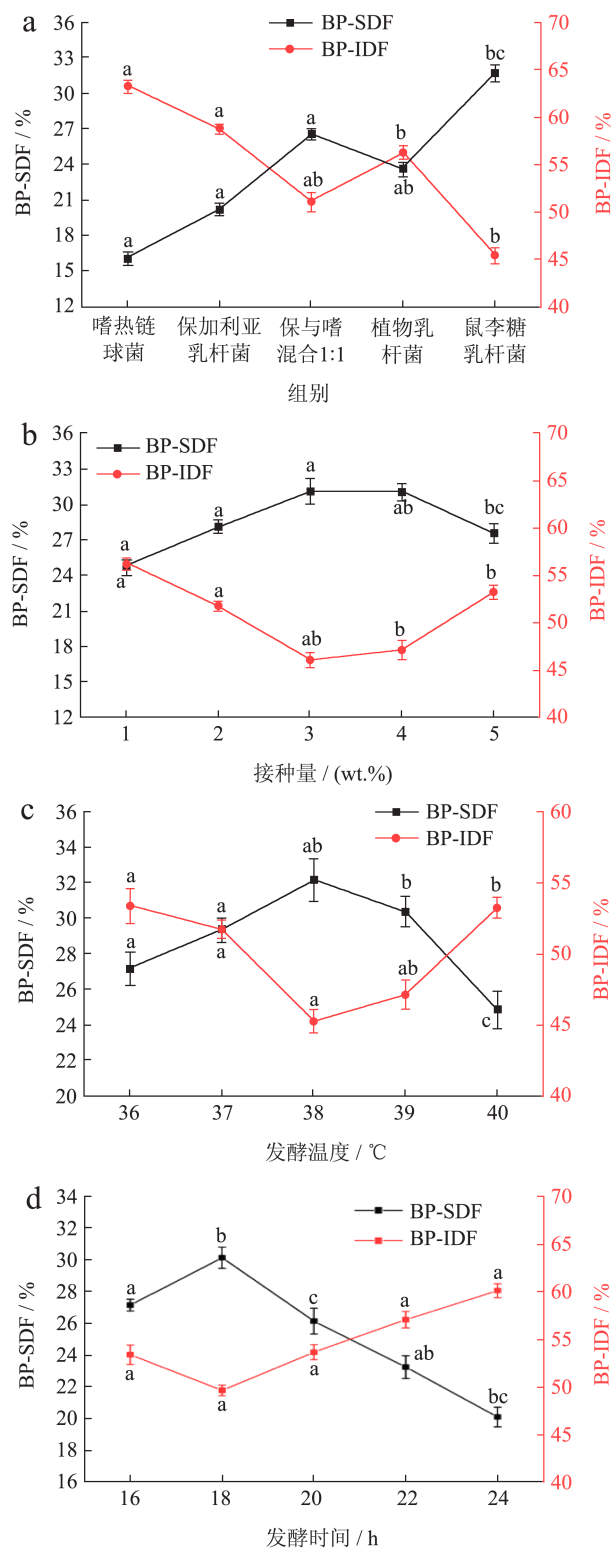


图1 乳酸菌发酵不同因素对香蕉皮膳食纤维得率的影响

Fig.1 Effect of *Lactobacillus* fermentation independent variables on yield of Banana peel dietary fiber

注：图中不同小写字母表示平行之间具有统计学意义， $P < 0.05$ 。图3~6同。

由图1c可知，随着发酵温度的增加，BP-SDF得率呈现先升后降，BP-IDF呈现相反的波动现象。当发

酵温度在38℃时，BP-SDF得率最高31.65%，BP-IDF得率最低46.82%。发酵温度高于38℃，鼠李糖乳杆菌可能发生老化，产酶能力下降，使得不溶性膳食纤维降解速率减慢。因此，确定最适发酵温度为38℃。

由图1d可知，当发酵时间为18h，BP-SDF得率最大，BP-IDF得率最低。当继续增加发酵时间至24h，BP-SDF得率逐渐降低，BP-IDF得率反而升高。可能得原因是由于延长发酵时长使得菌株快速繁殖消耗营养基质，可溶性膳食纤维降解，可溶性膳食纤维得率降低。因此，确定最适发酵时间为18h。

2.2 响应面优化结果

在单因素试验基础上，以香蕉皮可溶性膳食纤维得率为指标，采用Design-Expert 13软件Box-Behnken法进行试验设计，确定乳酸菌发酵辅助酶法提取香蕉皮膳食纤维的最优方法，试验设计及结果见表2。

对表2试验数据进行二次多项回归拟合，获得BP-SDF得率对接种量(A)、发酵温度(B)、发酵时间(C)的多元回归方程为： $Y = 31.96 + 0.4075A - 1.03B + 0.2788C + 0.0625AB + 1.39AC - 0.29BC - 0.8A^2 - 2.8B^2 - 1.51C^2$ 。

该模型的方差分析见表3，该回归模型 $F=15$ ， $P < 0.001$ ，极显著；失拟项 $P=2.14 > 0.05$ ，不显著，表明该模型的实验值与预测值线性相关，具有较好的拟合度。回归模型相关系数 $R^2=0.9507$ ， $R_{Adj}^2=0.8873$ ，拟合程度良好，可用于预测BP-SDF得率。单因素B极显著($P < 0.01$)，三因素 F 值分别为2.65、16.97、1.24，表明影响大小排序为B(发酵温度) $>$ A(接种量) $>$ C(发酵时间)。

响应面和等高线图可以反映自变量之间相互作用强弱，若两个因素与响应值形成响应面陡峭程度与交互作用显著性成正比，等高线形状越接近椭圆形，则表明两个因素交互作用越强，反之越弱^[29]。乳酸菌接种量、发酵温度与发酵时间对香蕉皮可溶性膳食纤维含量影响的响应面图如图2所示。由图2a、2c可知，等高线接近圆形表明发酵温度与接种量的交互作用及发酵温度与发酵时间的交互作用均不明显；由图2b可知，接种量与发酵时间等高线为椭圆形，说明接种量和发酵时间交互作用显著；与表3回归模型方差分析结果一致。根据软件回归模型计算预测当接种量(A)为3.09wt.%，发酵温度(B)为37.95℃，发酵时间(C)为18.24h时，BP-SDF得率为32.34%。进行验证试验，接种量为3.0wt.%，发酵温度为38℃，发酵时间18h，平行3次，BP-SDF得率为32.18%，误差

为 0.82%，误差值较小，表明该模型具有重现性和可行性。

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 The response surface experimental design and results				
试验号	A 接种量/ (wt.%)	B 发酵温度 /℃	C 发酵时间 /h	BP-SDF 得率 /%
1	2	37	18	28.89 ± 0.28 ^a
2	4	37	18	29.07 ± 0.35 ^{ab}
3	2	39	18	27.54 ± 0.19 ^b
4	4	39	18	27.97 ± 0.39 ^{bc}
5	2	38	17	30.27 ± 0.48 ^{cd}
6	4	38	17	28.81 ± 0.52 ^{de}
7	2	38	19	27.71 ± 0.40 ^c
8	4	38	19	31.82 ± 0.56 ^{ef}
9	3	37	17	28.37 ± 0.37 ^{ab}
10	3	39	17	26.05 ± 0.83 ^{fg}
11	3	37	19	29.84 ± 0.28 ^a
12	3	39	19	26.36 ± 0.91 ^g
13	3	38	18	31.09 ± 0.82 ^f
14	3	38	18	32.65 ± 0.64 ^e
15	3	38	18	31.76 ± 0.58 ^d
16	3	38	18	32.08 ± 0.29 ^a
17	3	38	18	32.24 ± 0.48 ^{cd}

注：表中不同小写字母表示平行之间的显著性。

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance for the regression model						
变异源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
Model	67.70	9	7.52	15	0.000 9	**
A	1.33	1	1.33	2.65	0.147 6	
B	8.51	1	8.51	16.97	0.004 5	**
C	0.621 6	1	0.621 6	1.24	0.302 3	
AB	0.015 6	1	0.015 6	0.031 2	0.864 9	
AC	7.76	1	7.76	15.47	0.005 7	**
BC	0.336 4	1	0.336 4	0.670 9	0.439 7	
A ²	2.69	1	2.69	5.37	0.053 6	*
B ²	32.94	1	32.94	65.69	<10 ⁻⁴	**
C ²	9.63	1	9.63	19.2	0.003 2	**
残差误差	3.51	7	0.501 4			
失拟项	2.14	3	0.714 7	2.09	0.243 9	不显著
纯误差	1.37	4	0.341 4			
总和	71.21	16				
$R^2=0.950\ 7$			$R_{Adj}^2=0.887\ 3$			

注：* 为差异显著 ($P<0.05$), ** 为差异极显著 ($P<0.01$)。

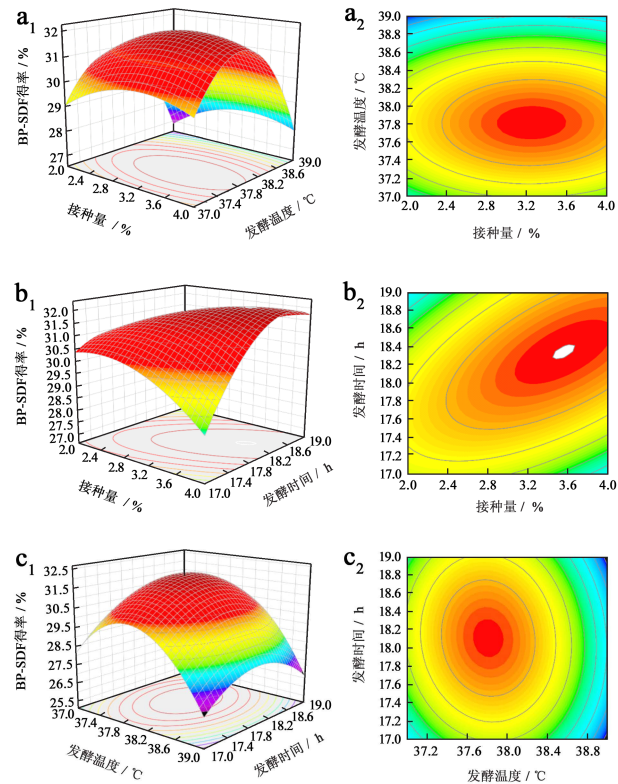


图 2 交互因素对 BP-SDF 得率影响的响应面图

Fig.2 Response surface plot of interactive factors on the yield of BP-SDF

2.3 理化性质

香蕉皮粉及乳酸菌辅助酶法制备的香蕉皮膳食纤维水合理化性质见表 4，BP-SDF 与 BP-IDF 的持水力、持油力、膨胀力和溶解性均大于 BP。与王梦阳^[14]酶法制备的香蕉皮膳食纤维相比，发酵后 BP-SDF 溶解性提高了 7.1 倍，持水能力由 2.99 g/g 增加到 6.31 g/g，膨胀力由 2.65 mL/g 增加至 8.67 mL/g；BP-IDF 的持水力增加了 27.0%，吸水膨胀力增加了 49.2%。但是 BP-SDF 和 BP-IDF 的持油力略微增加，变化不显著，这可能由于乳酸菌发酵制备的香蕉皮膳食纤维结构松散，比表面积大，暴露出更多羟基、羧基等亲水基团，可有效提高膳食纤维持水力及膨胀力等物化特性^[17,23,30]。

表 4 香蕉皮粉及膳食纤维理化性质

Table 4 Physicochemical properties of banana peel powder and dietary fiber				
试样	WHC/(g/g)	OHC/(g/g)	EC/(mL/g)	Solubility/(wt %)
BP	1.20 ± 0.24 ^c	1.73 ± 0.32 ^{ab}	1.41 ± 0.11 ^b	9.17 ± 0.08 ^b
BP-SDF	6.31 ± 0.25 ^a	3.21 ± 0.14 ^b	8.67 ± 0.52 ^{ac}	65.27 ± 0.14 ^a
BP-IDF	23.18 ± 0.46 ^b	9.88 ± 0.32 ^b	6.34 ± 0.28 ^c	10.07 ± 0.21 ^{bc}

注：同列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.4 体外抗氧化活性

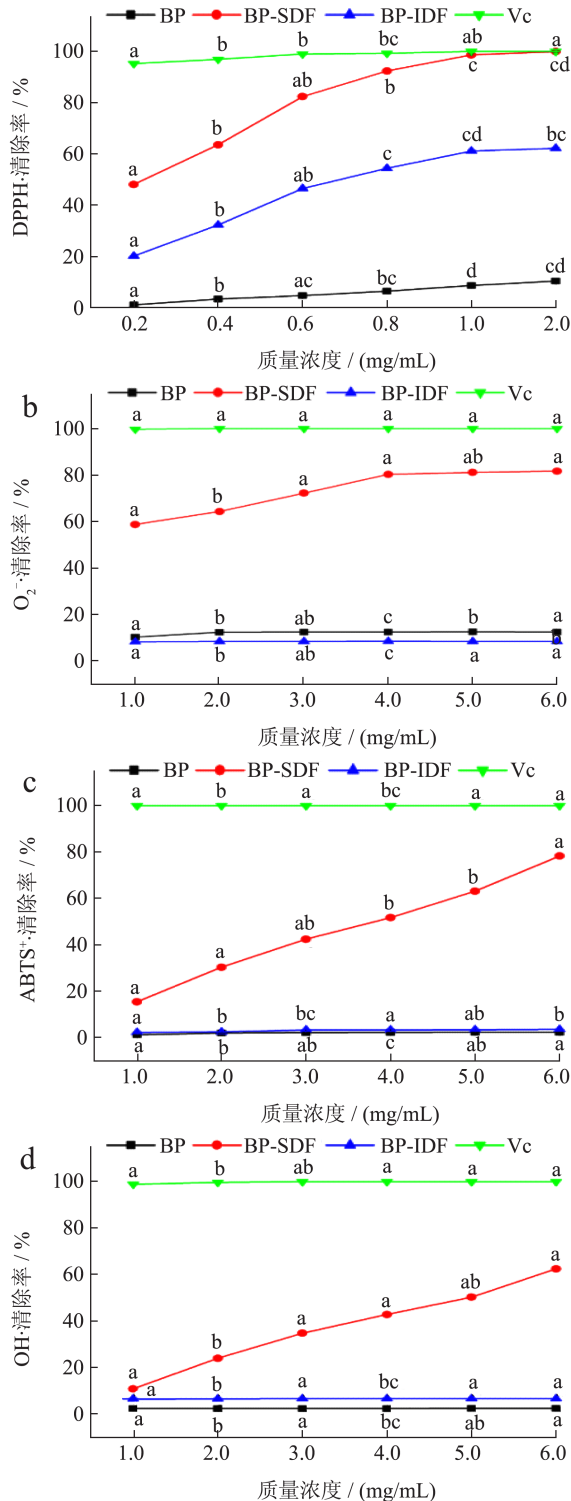


图3 香蕉皮粉及其膳食纤维的抗氧化性能

Fig.3 Antioxidant activity of banana peel powder and dietary fiber

香蕉皮中富含多种生物活性物质如多酚、黄酮、单宁、色素等,赋予其良好的抗氧化性能^[31]。以抗坏血酸为参照,通过 DPPH·、O₂·、ABTS·和 OH· 清除能力,评价了 BP、BP-SDF 及 BP-IDF 的抗氧化能力,

结果如图3所示,BP-SDF对4种不同的自由基均匀清除效果,且BP-SDF清除DPPH自由基能力最强,当质量浓度达到2 mg/mL时,BP-SDF清除DPPH·能力与Vc旗鼓相当;在最大浓度条件下,BP-SDF清除O₂·、ABTS·、OH·能力分别约是Vc的80.2%、80.0%、60.4%。BP-IDF仅仅具有一定DPPH自由基清除效果,且远小于BP-SDF。可能的原因是乳酸菌发酵后,可溶性膳食纤维中多酚类物质含量增加。综上所述,乳酸菌发酵使得膳食纤维疏松多孔,提取过程中更利于可溶性纤维中的多酚类物质溶出^[32,33],发酵后香蕉皮膳食纤维抗氧化性能显著提高。

2.5 胆固醇吸附能力分析

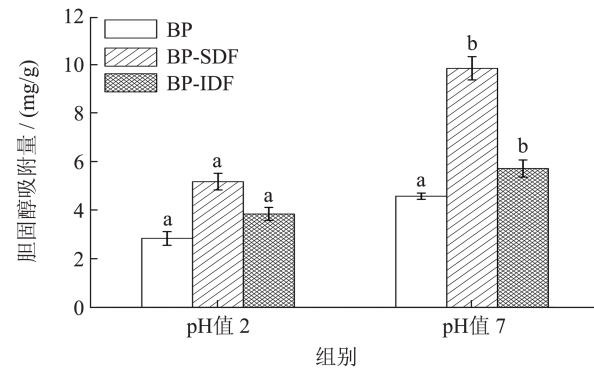


图4 香蕉皮粉及其膳食纤维的胆固醇吸附能力

Fig.4 Adsorption capacity of banana peel powder and dietary fiber to cholesterol

膳食纤维经过乳酸菌发酵改性对于脂肪代谢诱导产生的心血管疾病等有显著疗效^[34]。膳食纤维吸附胆固醇能力常作为亲脂性物质的评价指标^[35]。香蕉皮粉及其膳食纤维对胆固醇的吸附能力如图4所示。pH值为2和pH值为7分别模拟胃液和小肠液。由图4可以看出BP-SDF对于胆固醇的吸附能力高于BP-IDF, BP-IDF吸附能力高于BP粉,且三者在小肠液环境对于胆固醇的吸附能力均高于胃液环境,原因可能由于胃液的强酸环境产生大量游离氢离子,吸附于膳食纤维和胆固醇表面,整体带正电荷,相互排斥,降低了其吸附胆固醇的吸附量。与王梦阳^[14]酶法制备的香蕉皮膳食纤维相比,采用鼠李糖乳酸杆菌发酵辅助酶法制备的BP-SDF与BP-IDF在肠胃液环境中,其吸附胆固醇能力均有一点的提高。其中,BP-SDF吸附能力分别提高了45.1% (pH值2)、25.3% (pH值7); BP-IDF吸附能力分别提高了30.2% (pH值2)、35.4% (pH值7),这可能由于乳酸菌发酵辅助酶法制备得到BP-SDF和BP-IDF结构更加多孔,这与关玉婷^[17]利用微生物改性黑米膳食纤维吸附胆固醇能力特征相似。

2.6 NO₂⁻吸附能力分析

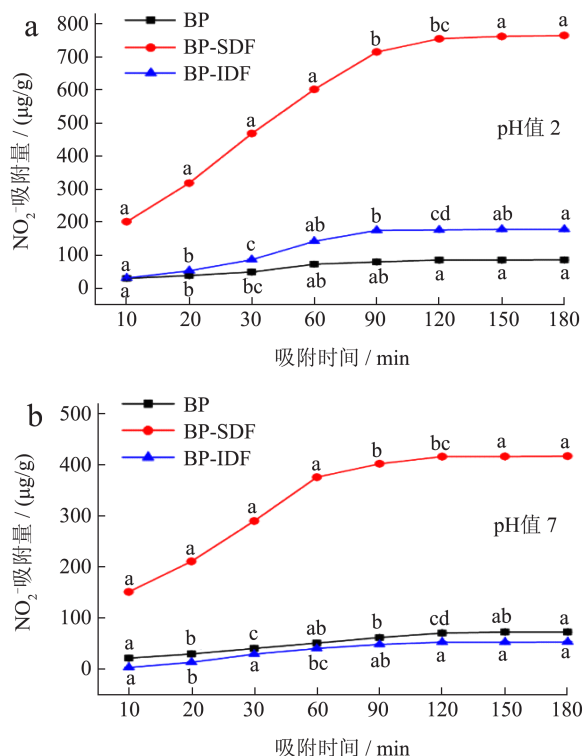


图5 香蕉皮粉及其膳食纤维的NO₂⁻吸附能力

Fig.5 Adsorption capacity of banana peel powder and dietary fiber for NO₂⁻

亚硝酸盐作为常见一类食品添加剂，如肉类制品常用作发色剂和助色剂，其与胃酸接触后，与氨基酸降解产物形成致癌的亚硝胺^[36]。膳食纤维能有效吸附胃肠道的亚硝酸盐，促进排泄。图5为胃肠道环境中香蕉皮粉及其膳食纤维对NO₂⁻吸附能力，BP-SDF吸附平衡时，在体外模拟胃肠液环境下吸附量分别为764.1 μg/g (pH值2) 和416.8 μg/g (pH值7)，BP-IDF吸附量为178.2 μg/g (pH值2) 和52.3 μg/g (pH值7)，pH值2.0胃液环境BP-SDF与BP-IDF对亚硝酸盐的吸附量显著高于pH值7.0肠液环境，且明显高于王梦阳^[14]酶法制备的香蕉皮膳食纤维吸附亚硝酸盐能力，吸附平衡时间无差异，但是BP-SDF对亚硝酸盐吸附量提高了184.0 μg/g (pH值2)、149.0 μg/g (pH值7)，BP-IDF降低了22.0 μg/g (pH值2)、提高了16.3 μg/g (pH值7)。这可能由于乳酸菌发酵提高了BP-SDF含量，降解了BP-IDF，溶解后比表面积增大，暴露出膳食纤维更多的亲水性基团，增强了BP-SDF吸附亚硝酸盐能力^[37]。

2.7 体外降血糖能力分析

随着人民生活水平提升，肥胖人群占比逐年递

增，膳食纤维可减弱机体对于葡萄糖吸收，削弱膳食葡萄糖在机体的扩散，控制餐后血糖具有良好的效果。图6a为BP、BP-SDF及BP-IDF对葡萄糖吸附量随葡萄糖浓度的变化情况，由图可知，香蕉皮粉或香蕉皮膳食纤维加入葡萄糖溶液后，均随葡萄糖浓度增加吸附量增加，其中BP-SDF吸附葡萄糖能力远大于BP-IDF，BP-IDF略优于BP粉末，其原因可能由于乳酸菌发酵提升了BP-SDF，降低了BP-IDF，溶解度提升，溶胶结构增加比表面积及发酵后更加松散多孔，对于葡萄糖吸附量递增。且不同葡萄糖浓度条件下，该法制备BP-DF对葡萄糖吸附量明显高于王梦阳^[14]酶法制备的BP-DF。

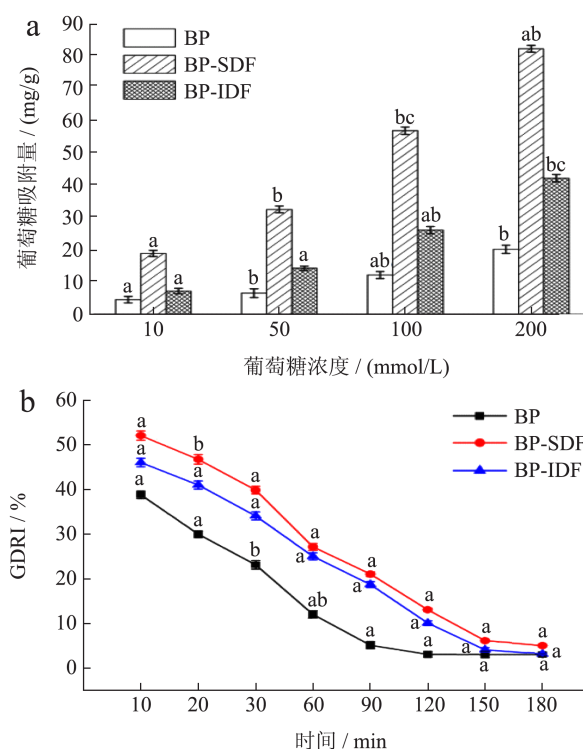


图6 香蕉皮粉及其膳食纤维的体外降血糖能力

Fig.6 Hypoglycemic ability of banana peel powder and its dietary fiber *in vitro*

注: (a) 葡萄糖吸附能力; (b) 葡萄糖透析延迟指数。

葡萄糖透析延迟指数 (GDRI) 可以预测膳食纤维延缓肠道对葡萄糖吸收的能力，如图6b为BP、BP-SDF及BP-IDF延迟葡萄糖透析能力，由图可知随着透析时间延长，三者的GDRI值均逐渐降低，达到平衡，其中BP-SDF的葡萄糖透析指数始终高于BP-IDF，BP-IDF高于BP粉末。其原因可能与香蕉皮粉和其膳食纤维含量及吸附葡萄糖的能力相关，溶解度高样液黏度大，与葡萄糖结合更紧密，其GDRI越大^[38]。

3 结论

该研究中,我们利用了乳酸菌辅助酶法制备香蕉皮膳食纤维,最佳发酵工艺条件为鼠李糖乳杆菌接种量为3.0 wt.%、发酵温度38℃、发酵时间18 h,此条件下BP-SDF得率为32.18%。该方法对香蕉皮可溶性膳食纤维提取率较传统酶法提高了2.0倍。此外,与酶法提取香蕉皮膳食纤维相比,BP-SDF的溶解性、持水力及吸水膨胀力均极显著提升,溶解性增强7.1倍。BP-IDF持水力和膨胀力分别提升了27.0%、49.2%。体外抗氧化结果表明一定浓度条件下,BP-SDF与Vc抗氧化能力旗鼓相当,且鼠李糖乳酸杆菌发酵辅助酶法制备的BP-SDF与BP-IDF在肠胃液环境中,其吸附胆固醇能力、NO₂⁻吸附能力、降血糖能力均得到明显提升;BP-SDF对于不同浓度葡萄糖吸附量提高了约1.6倍,葡萄糖透析延迟指数吸附平衡时间缩短了约30 min。进一步说明发酵辅助酶法是一种可行的香蕉皮膳食纤维制备方法,该研究结果可为香蕉果皮废弃资源综合利用和香蕉皮粉膳食纤维功能研究提供理论依据。

参考文献

- [1] 孙健,何雪梅,唐雅园,等.香蕉加工研究进展[J].热带作物学报,2020,41(10):2022-2033.
- [2] 江东文,鲍金勇,袁根良,等.香蕉皮膳食纤维的研究进展[J].食品研究与开发,2009,30(10):146-149.
- [3] BHANGER R, MUHAMMAD S, IQBAL O, et al. Banana peel: an effective biosorbent for aflatoxins [J]. Food Additives & Contaminants Part A Chemistry Analysis Control Exposure & Risk Assessment, 2016, 33(5): 849-860.
- [4] MALIGI B, SONIA, DEEPIKA, et al. Bioactive, antioxidant, industrial, and nutraceutical applications of banana peel [J]. International Journal of Food Properties, 2023, 26(1): 1277-1289.
- [5] ADETUYI B O, OGUNDIPE A E, OGUNLANA O O, et al. Banana Peel As a Source of Nutraceuticals [M]. Springer, 2022.
- [6] BISHNOI S, SHARMA S, AGRAWAL H. Exploration of the potential application of banana peel for its effective valorization: A review [J]. Indian Journal of Microbiology, 2023, 4: 63-72.
- [7] MEHREZ M, CHAARI I, MEDHIOUB M. Biosorption of a leather dye (Dycem TTO) onto banana peel: Characterization, isotherm, kinetic, thermodynamic, and mechanism studies [J]. Water, Air and Soil Pollution, 2024, 235: 119.
- [8] RODRIGUE M C K, ORO C E D, PUTON B M S, et al. Potential use of green banana peel waste: modeling of drying and determination of physicochemical and antioxidant properties [J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2024, 14(13): 14095-14106.
- [9] 盛倩茹,王娟.大孔树脂纯化香蕉皮缩合单宁的吸附特性分析与工艺优化[J].农业工程学报,2024,40(13):302-310.
- [10] PHATCHARAPORN W, SIRIPAN J, SORADA W. The effects of banana peel preparations on the properties of banana peel dietary fibre concentrate [J]. Songklanakarin Journal of Science & Technology, 2010, 31(6): 605-611.
- [11] 庄远红,林娇芬,刘静娜.微粉碎对香蕉皮可溶性膳食纤维功能特性的影响[J].四川农业大学学报,2015,33(3):289-293.
- [12] 朱中原.香蕉皮中水不溶性膳食纤维提取工艺研究[J].食品工程,2012,3:29-31.
- [13] 张丰,李远,韦琴,等.香蕉皮不溶性膳食纤维提取工艺优化及其在面包中的应用研究[J].安徽农学通报,2016,22(6):136-138.
- [14] 王梦阳.香蕉皮膳食纤维的理化性质及其降血糖效果的研究[D].合肥:合肥工业大学,2022.
- [15] 邓艺杰,张奕恺.香蕉皮膳食纤维提取工艺优化及其应用研究[J].中国调味品,2023,48(8):131-134.
- [16] KONLARAT P, JIRAWAN A. Development of cellulose-based prebiotic fiber from banana peel by enzymatic hydrolysis [J]. Food Bioscience, 2021, 41(1): 1120-1131.
- [17] 关玉婷.改性黑米膳食纤维功能特性、降胆固醇功效及应用研究[D].邯郸:河北工程大学,2022.
- [18] 张竞一,洪滨,张珊,等.发酵对糙米营养品质影响及其在米制产品中的应用研究进展[J].食品科学,2024,6(10):1-15.
- [19] 张丽君,木泰华,马梦梅.不同乳酸菌发酵甘薯渣产物组分分析[J].核农学报,2023,37(1):98-106.
- [20] 何兰兰,马四补,姜特,等.固态发酵刺梨果渣改性膳食纤维工艺优化及结构特性分析[J].食品工业科技,2024,45(2):183-191.
- [21] 储兆琳,邱鹤翔,李振宏,等.发酵法提取梨渣、姜渣和豆渣膳食纤维的分离纯化及表征[J].食品安全质量检测学报,2024, 15(2):296-306.
- [22] 曹江伟.蓝莓果渣吸附性能研究[D].合肥:合肥学院,2022.
- [23] 叶佳敏,张名位,卢琦,等.乳酸菌半固态发酵对沙田柚果苦味及活性成分的影响[J].中国农业科学,2024,57(13):2662-2673.
- [24] 黄晓兵,彭芍丹,李积华,等.发酵法制备芒果皮膳食纤维工艺研究[J].食品工业科技,2017,38(15):153-156,163.
- [25] 李家洲.发酵法制备榴莲皮膳食纤维的工艺研究[J].现代食品科技,2012,28(8):995-997,994.
- [26] 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.
- [27] SONG L L, HUO S H, HU R R, et al. Effect of solid-state fermentation with compound lactic acid bacteria on the physicochemical properties, biological activities and functional characteristics of defatted rice bran [J]. Journal of Light Industry, 2024, 39(3): 21-28.
- [28] CHEN M H, JIANG D, GUAN E Q, et al. Dynamic changes of wheat bran components during lactic acid bacteria solid-state fermentation [J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2024, 43(2): 30-37.
- [29] A T D M CRIZEL, A JABLONSKI, A A D O RIOS, et al. Dietary fiber from orange byproducts as a potential fat replacer [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 53(1): 9-14.
- [30] ZHAO H Z, DU M Y, ZA L Z, et al. Effect of bamboo shoot (*Chimonobambusa quadrangularis*) dietary fiber as prebiotics

- on the growth of lactic acid bacteria [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(6): 174-180.
- [31] 黄爱妮,许杨帆,刘凌子.香蕉皮中水溶性膳食纤维的提取及其抗氧化性研究[J].粮食与食品工业,2014,21(2):31-35.
- [32] CHU J X, ZHAO H Z, LU Z X, et al. Improved physicochemical and functional properties of dietary fiber from millet bran fermented by *Bacillus natto* [J]. Food Chemistry, 2019, 294(5): 79-86.
- [33] SANGNARK A, NOOMHORM A. Chemical, physical and baking properties of dietary fiber prepared from rice straw [J]. Food Research International, 2004, 37(1): 66-74.
- [34] LI X X, ZHANG X X, ZHANG R, et al. Gut modulation based anti-diabetic effects of carboxymethylated wheat bran dietary fiber in high-fat diet/streptozotocin-induced diabetic mice and their potential mechanisms [J]. Food and Chemical Toxicology, 2021, 152(3): 112-123.
- [35] PARK S, CHANG H C, LEE J J. Rice bran fermented with kimchi-derived lactic acid bacteria prevents metabolic complications in mice on a high-fat and-cholesterol diet [J]. Foods, 2021, 10(7): 1501-1522.
- [36] GE Q, LI H Q, HUANG L C, et al. Structure, physicochemical, and *in vitro* functional properties of insoluble dietary fiber from bamboo culm: a potential functional ingredient [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(4): 16426-16432.
- [37] SANG J Q, LI L, WEN J, et al. Evaluation of the structural, physicochemical and functional properties of dietary fiber extracted from newhall navel orange by-products [J]. Foods, 2021, 10(11): 2772-2779.
- [38] 顾艳阳.超高压处理对莲藕膳食纤维理化性质、降糖功效的影响及应用研究[D].扬州:扬州大学,2021.