

猴头菌发酵改性玉米皮膳食纤维工艺优化

刘倩男^{1,2}, 孙小焯^{1,2}, 纪晚唐¹, 许丁¹, 赵宇楠^{1,2}, 蔡丹^{1,2*}

(1. 吉林农业大学 食品科学与工程学院, 吉林 长春 132300; 2. 小麦和玉米深加工国家工程研究中心, 吉林 长春 132300)

摘要: 以玉米皮为原料, 采用猴头菌固态发酵的方式生物改性玉米皮可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF), 研究猴头菌接种量、培养温度和培养时间对玉米皮可溶性膳食纤维含量的影响, 通过单因素试验和响应面试验优化得到的最优工艺条件为接种量 8%、培养温度 25 ℃、培养时间 7 d, 该条件下实测玉米皮可溶性膳食纤维含量为 (8.39 ± 0.14) g/100 g。通过研究发酵前后玉米皮可溶性膳食纤维的吸附特性发现, 发酵后玉米皮可溶性膳食纤维的亚硝酸盐吸附能力、胆固醇吸附能力和胆酸盐吸附能力均有所提高。

关键词: 玉米皮; 可溶性膳食纤维; 猴头菌; 固态发酵; 工艺优化

Process Optimization of *Hericium erinaceus* Fermentation for Modifying Dietary Fiber in Corn Husk

LIU Qian-nan^{1,2}, SUN Xiao-zhuo^{1,2}, JI Wan-tang¹, XU Ding¹, ZHAO Yu-nan^{1,2}, CAI Dan^{1,2*}

(1. College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 132300, Jilin, China;
2. National Engineering Research Center for Wheat and Corn Further Processing, Changchun 132300, Jilin, China)

Abstract: The soluble dietary fiber (SDF) in corn husk was biologically modified by solid-state fermentation with *Hericium erinaceus*. The effects of *H. erinaceus* inoculation amount, fermentation temperature, and fermentation time on the content of SDF in corn husk were investigated. The conditions were optimized by single-factor tests and response surface methodology as fermentation at the inoculation amount of 8% and 25 ℃ for 7 days. Under the optimum conditions, the measured SDF content was (8.39 ± 0.14) g/100 g. The adsorption capacity of the SDF after fermentation for nitrite, cholesterol, and cholate significantly increased compared with that before fermentation.

Key words: corn husk; soluble dietary fiber; *Hericium erinaceus*; solid-state fermentation; process optimization

引文格式:

刘倩男, 孙小焯, 纪晚唐, 等. 猴头菌发酵改性玉米皮膳食纤维工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(21): 83-90.

LIU Qiannan, SUN Xiaozhuo, JI Wantang, et al. Process Optimization of *Hericium erinaceus* Fermentation for Modifying Dietary Fiber in Corn Husk[J]. Food Research and Development, 2022, 43(21): 83-90.

玉米皮占玉米质量的 14%~20%^[1], 富含膳食纤维, 除蛋白质、淀粉、脂肪等成分外, 还含有玉米纤维油、阿拉伯木聚糖、甾醇、维生素和阿魏酸等生物活性物质^[2-3], 具有减肥^[4]、降血糖^[5]、降胆固醇^[6]、提高免疫力、

预防高血压、预防癌症、抗菌消炎和抗氧化^[7]等功能。在玉米深加工过程中, 玉米皮是湿法生产淀粉产生的副产物, 多被用作饲料生产原料或被丢弃, 造成资源的浪费和环境的污染。膳食纤维(dietary fiber, DF)是指

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD2101003)

作者简介: 刘倩男(1997—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 粮食加工副产物综合利用。

* 通信作者: 蔡丹(1980—), 女(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 真菌发酵及粮食副产物综合利用。

不被人体消化吸收,且由10个或更多单元组成的碳水化合物化合物的聚合物,按溶解性可以分为不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)和可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)^[8]。玉米皮膳食纤维具有很高的营养价值,它的摄入量与降低多种疾病的风险息息相关,有研究表明,膳食纤维有降血脂、降血糖、减肥、清除有毒有害物质、改善肠道菌群和预防癌症、心血管疾病、抑郁症等生理功能^[9-13]。Haraa等^[14]通过研究大鼠摄入不同膳食纤维对锌的吸收影响,发现玉米皮纤维在低水平摄入时对锌的吸收有促进作用,但在高水平摄入时对锌的吸收有抑制作用。李晓月等^[15]研究表明,玉米皮膳食纤维可以降低小鼠高密度脂蛋白胆固醇含量,可有效改善小鼠血脂指标。

膳食纤维的改性是利用一定技术手段对原料进行处理,将部分IDF转化为SDF,并达到改善膳食纤维结构、强化其理化性质的目的^[16]。目前,膳食纤维改性的方法有物理法、化学法和生物法^[17],研究中应用较多的是物理法和生物法。其中,微生物发酵改性的方法选用的是安全无毒的微生物,具有安全、高效、无污染、低成本等优点,可实现工业化生产,并且得到的膳食纤维纯度较高。安莹等^[18]利用超声波法提取黑玉米皮SDF,最优工艺条件为提取时间32 min、料液比1:11(g/mL),提取温度60℃、超声波功率700 W,此条件下SDF提取率达53.8%。陈闯等^[19]采用双酶法对玉米皮渣进行改性处理,使SDF的含量得到明显提高,优化后SDF最终得率为2.996%。李华丽等^[20]利用黑根霉的二级发酵对玉米皮膳食纤维进行改性处理,使IDF转化为SDF,并在最优发酵条件下生产SDF乳饮料,得到的最优发酵条件为接种量4.40%、二级发酵温度50.95℃、二级发酵时间46.50 min,最终饮料中SDF含量达到了4.45%。

本研究以玉米皮为主要研究对象,利用猴头菌固态发酵的方法对玉米皮SDF改性,通过单因素和响应面试验确定发酵的最优条件,并对比分析发酵前后玉米皮SDF对亚硝酸盐、胆固醇和胆酸盐的吸附能力。旨在提取高品质的玉米皮SDF提供新方法,为膳食纤维的应用提供参考,在增加资源利用、提高经济效益、促进人体健康等社会、环境方面有重要实践价值。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

玉米皮:黄龙食品工业有限公司;猴头菌 He-02-06(*Hericium erinaceus*):小麦和玉米深加工国家工程中心;无水乙醇、磷酸二氢钾、七水硫酸镁(均为分析纯):天津市富宇精细化工有限公司;无水葡萄糖(分析

纯):天津市大茂化学试剂厂;亚硝酸钠(分析纯):上海阿拉丁生化科技股份有限公司;胆固醇、牛黄胆酸钠(均为生化试剂):上海源叶生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

电热鼓风恒温干燥箱(101A-1ET型):上海实验仪器厂有限公司;高速万能粉碎机(AISITE型)、电热恒温水浴锅(DK-98-II型):天津市泰斯特仪器有限公司;振荡培养箱(Stab S2型):上海润度生物科技有限公司;数显电热培养箱(HPX-9162 MBE型):上海博迅实业有限公司医疗设备厂;高速离心机(Allegra X-30R型):美国 Beckman 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 发酵菌种培养

菌种固体斜面培养:将保藏的猴头菌菌种接种到麦芽琼脂培养基上,在27℃恒温培养箱中恒温培养7 d,备用。

菌种液体活化:将培养好的固体斜面菌种接种于液体活化培养基中,在27℃、160 r/min条件下恒温振荡培养6 d,即得液体发酵菌种。

1.3.2 固态发酵

固态发酵的培养基成分:玉米皮与蒸馏水的料液比为1:2(g/mL),无水葡萄糖3.0%、磷酸二氢钾0.10%、七水硫酸镁0.04%,配制好培养基并灭菌后将猴头菌发酵菌种接种于培养基中,在一定条件下对玉米皮固态发酵改性,发酵结束后将发酵物烘干、粉碎备用。

1.3.3 单因素试验

本试验根据GB 5009.88—2014《食品安全国家标准 食品中膳食纤维的测定》对SDF含量进行检测,以玉米皮SDF含量为指标,考察接种量(6%、8%、10%、12%、14%)、培养温度(23、25、27、29、31℃)和培养时间(3、5、7、9、11 d)对猴头菌固态发酵改性后玉米皮中SDF含量的影响。

1.3.4 响应面优化试验

在单因素试验的基础上,以玉米皮SDF含量为指标,对接种量(A)、培养温度(B)和培养时间(C)3个因素进行响应面试验设计,试验因素水平设计见表1。利用Design-Expert 12对固态发酵的培养条件进行响应

表1 响应面分析因素水平

Table 1 Factors and levels of the response surface methodology

水平	因素		
	A 接种量/%	B 培养温度/℃	C 培养时间/d
-1	6	23	5
0	8	25	7
1	10	27	9

面优化,确定发酵条件的最优工艺参数并对最优条件进行试验验证。

1.3.5 玉米皮 SDF 的制备

将发酵前的玉米皮用去离子水清洗至 pH 值为中性,在 50 ℃条件下烘干后粉碎备用。准确称取发酵前后的样品,过 60 目筛,以 1:20 (g/mL)的料液比加入蒸馏水,在 80 ℃水浴条件下浸提 2 h,期间使用漩涡混匀器搅拌,冷却后在 4 000 r/min 条件下离心 20 min,向上清液中加入 4 倍体积的 95%乙醇,4 ℃静置 12 h 后得到的沉淀物即为 SDF,冷冻干燥 48 h 后即得 SDF 粉末。

1.3.6 固态发酵对玉米皮 SDF 吸附亚硝酸盐能力的测定

参考 Hua 等^[21]的方法测定 SDF 亚硝酸盐吸附能力,将 0.1 mg/mL NaNO_2 标准溶液的 pH 值调为 2(模拟胃内环境)和 7(模拟肠道内环境)备用,准确称取 2 份 0.20 g 发酵前后的玉米皮 SDF (精确到 0.000 1 g)分别加入 50 mL 两种 pH 值的 NaNO_2 标准溶液中,搅拌均匀后于 37 ℃条件下恒温振荡 2 h,4 000 r/min 条件下离心 15 min,吸取 1 mL 上清液于 10 mL 离心管中,加入 2 mL 4 g/L 对氨基苯磺酸溶液,静置 5 min,加 1 mL 2 g/L 盐酸萘乙二胺溶液,加蒸馏水定容、摇匀,静置 15 min,以蒸馏水为空白,测定 538 nm 处 OD 值,测定上清液中剩余 NO_2^- 的含量,根据以下公式计算 SDF 的亚硝酸盐吸附能力。

$$\text{亚硝酸盐吸附能力}/(\mu\text{g/g})=(\text{吸附前 NO}_2^- \text{含量}-\text{吸附后 NO}_2^- \text{含量})/\text{SDF 质量}$$

1.3.7 固态发酵对玉米皮 SDF 吸附胆固醇能力的测定

参考杨雪^[22]的方法,将 0.05 mg/mL 胆固醇标准溶液的 pH 值调为 2(模拟胃内环境)和 7(模拟肠道内环境)备用。准确称取 2 份 0.50 g 发酵前后的玉米皮 SDF (精确到 0.000 1 g)分别加入 50.00 mL 两种 pH 值的胆固醇标准溶液中,搅拌均匀后于 37 ℃条件下恒温振荡 2 h,4 000 r/min 条件下离心 20 min,取 4 mL 上清液于 10 mL 离心管内,采用铁矾显色法计算出上清液中剩余胆固醇的含量,根据以下公式计算 SDF 的胆固醇吸附能力。

$$\text{胆固醇吸附能力}/(\text{mg/g})=(\text{吸附前胆固醇含量}-\text{吸附后胆固醇含量})/\text{SDF 质量}$$

1.3.8 固态发酵对玉米皮 SDF 吸附胆酸盐能力的测定

参考 Chu 等^[23]的方法,将胆酸盐标准溶液 pH 值调为 7(模拟肠道内环境)备用,称取 0.50 g 样品(精确到 0.000 1 g)加入 50 mL 浓度为 1 mg/mL 胆酸钠标准溶液,搅拌均匀后于 37 ℃恒温振荡 2 h,4 000 r/min 条件下离心 20 min,取 1 mL 上清液采用糠醛显色法测定剩余胆酸钠含量,根据以下公式计算 SDF 的胆酸盐吸附

能力。

$$\text{胆酸盐吸附能力}/(\text{mg/g})=(\text{吸附前胆酸钠含量}-\text{吸附后胆酸钠含量})/\text{SDF 质量}$$

1.4 数据统计分析

使用 IBM SPSS Statistics 23 软件进行数据分析,使用 Graph Pad Prism 8 软件绘图,采用 Design-Expert 12 软件进行响应面试验设计和作图,所有试验重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

2.1.1 接种量对玉米皮 SDF 含量的影响

接种量对 SDF 含量的影响如图 1 所示。

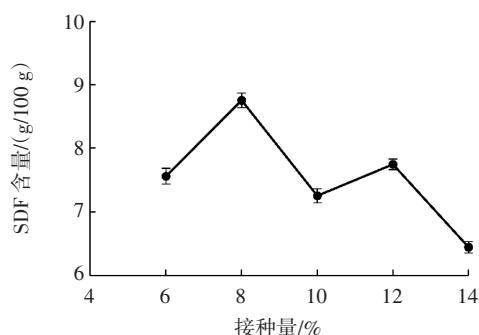


图 1 接种量对 SDF 含量的影响

Fig.1 Effect of inoculum amount on the content of soluble dietary fiber

由图 1 可知,当接种量为 8%时,SDF 含量最高为 8.76 g/100 g。接种量低于 8%时,SDF 含量低。可能因为菌种量少、产酶量少以及菌体活性过低,导致发酵对玉米皮 SDF 改性能力较弱;当接种量超过 8%时,SDF 含量减少的原因可能为接种量过高,培养基营养物质不足以供给菌体生长,影响真菌的发酵能力。因此,选择接种量 8%为最佳接种量。

2.1.2 培养温度对玉米皮 SDF 含量的影响

培养温度对 SDF 含量的影响如图 2 所示。

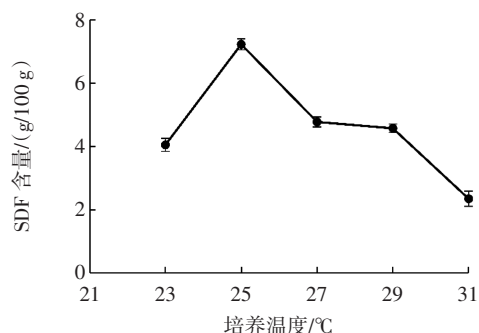


图 2 培养温度对 SDF 含量的影响

Fig.2 Effect of fermentation temperature on the content of soluble dietary fiber

由图2可知,培养温度对SDF含量的影响整体呈先上升后下降的趋势,且在25℃条件下SDF含量最高,为7.24 g/100 g。培养温度低于25℃时,菌体生长过慢,胞外酶活力较低,导致SDF含量较低;温度过高时培养环境逐渐不利于菌体生长,且由于水分大量流失不利于菌丝体的积累和相关酶的合成,导致SDF含量降低^[24]。因此,选择培养温度25℃为最佳培养温度。

2.1.3 培养时间对玉米皮SDF含量的影响

培养时间对SDF含量的影响如图3所示。

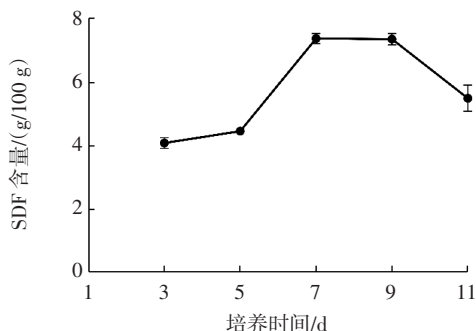


图3 培养时间对SDF含量的影响

Fig.3 Effect of fermentation time on the content of soluble dietary fiber

由图3可知,培养时间对SDF含量的影响呈先上升后下降的趋势,培养第7天时,SDF含量最高,为7.40 g/100 g;第9天时,SDF含量次之,为7.38 g/100 g。SDF含量随着培养时间的延长逐渐增加,但在9 d后SDF含量有所下降,可能是因为培养基中营养成分被利用到不足以供菌体生长,菌体生长开始消耗SDF,而且随着培养时间的延长,培养基中水分含量减少、可溶性成分下降,菌体活力和胞外酶活力均下降,代谢能力减弱导致SDF含量降低^[25]。因此,选择培养时间7 d为最佳培养时间。

2.2 响应面试验结果分析

2.2.1 响应面优化试验设计与结果

根据单因素试验结果进行Box-Behnken试验设计,以得到固态发酵改性玉米皮SDF的最佳条件,其试验设计方案及结果如表2所示。

表2 Box-Behnken试验设计及结果

Table 2 Box-Behnken design and results

试验号	A 接种量/%	B 培养温度/℃	C 培养时间/d	SDF 含量/(g/100 g)
1	8	23	5	3.32
2	8	25	7	7.97
3	6	25	9	3.48
4	10	23	7	5.47

续表2 Box-Behnken试验设计及结果

Continue table 2 Box-Behnken design and results

试验号	A 接种量/%	B 培养温度/℃	C 培养时间/d	SDF 含量/(g/100 g)
5	10	25	5	5.26
6	8	25	7	8.13
7	8	25	7	8.30
8	8	25	7	7.97
9	8	27	9	6.83
10	10	27	7	4.38
11	10	25	9	3.69
12	8	23	9	4.25
13	6	27	7	4.52
14	8	27	5	4.81
15	8	25	7	8.30
16	6	23	7	2.11
17	6	25	5	2.97

利用Design-Expert 12软件对表2中数据进行多元回归拟合分析,得到接种量(A)、培养温度(B)和培养时间(C)3个因素与SDF含量之间的回归方程为 $SDF \text{ 含量}/(g/100 g)=8.13+0.715 0A+0.673 7B+0.236 3C-0.875 0AB-0.520 0AC+0.272 5BC-2.48A^2-1.53B^2-1.80C^2$ 。

方差分析结果如表3所示。

表3 回归模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance of the regression model

来源	平方和	自由度	均值	F值	P值	显著性
模型	67.57	9	7.51	16.80	0.000 6	**
A 接种量	4.09	1	4.09	9.15	0.019 3	*
B 培养温度	3.63	1	3.63	8.12	0.024 7	*
C 培养时间	0.446 5	1	0.446 5	0.998 9	0.350 9	
AB	3.06	1	3.06	6.85	0.034 5	*
AC	1.08	1	1.08	2.42	0.163 8	
BC	0.297 0	1	0.297 0	0.664 5	0.441 8	
A ²	25.96	1	25.96	58.08	0.000 1	**
B ²	9.87	1	9.87	22.07	0.002 2	**
C ²	13.65	1	13.65	30.54	0.000 9	**
残差	3.13	7	0.447 0			
失拟误差	3.02	3	1.01	36.97	0.002 2	**
随机误差	0.108 9	4	0.027 2			
总和	70.70	16				

注:*表示影响显著($P<0.05$);**表示影响极显著($P<0.01$)。

由表3可知,该模型显著($P<0.05$),决定系数 $R^2=0.955 7$,说明预测值与实际情况拟合度较好。在本试验中,接种量、培养温度和培养时间3个因素对SDF含量的影响程度大小顺序为接种量>培养温度>培养时间。

2.2.2 响应面分析

响应面分析 3 个因素之间的交互作用对 SDF 含

量的影响如图 4、图 5、图 6 所示。

由图 4、图 5、图 6 可知, SDF 含量随着各因素水平

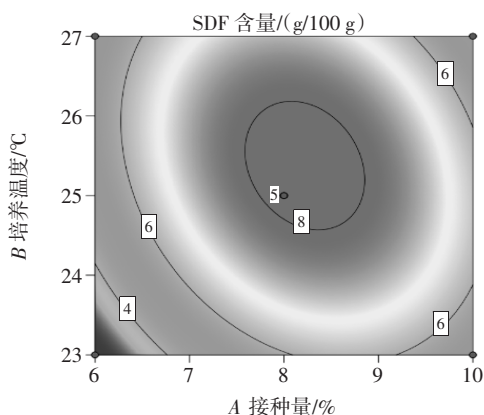


图 4 接种量和培养温度交互作用对 SDF 含量的影响

Fig.4 Effect of the interaction between inoculum amount and fermentation temperature on the content of soluble dietary fiber

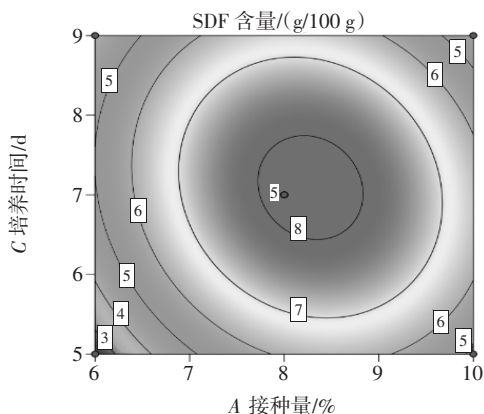


图 5 接种量和培养时间交互作用对 SDF 含量的影响

Fig.5 Effect of the interaction between inoculum amount and fermentation time on the content of soluble dietary fiber

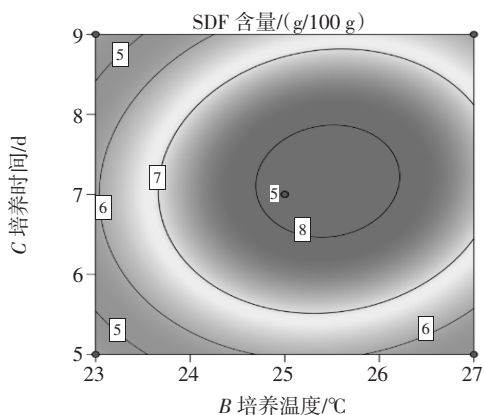


图 6 培养温度和培养时间交互作用对 SDF 含量的影响

Fig.6 Effect of interaction between fermentation temperature and fermentation time on the content of soluble dietary fiber

的增大呈先增加后减小的趋势,各因素间交互作用明显,且在图 4 和图 5 可以看出因素 A (接种量)的 3D 图坡度最陡,说明接种量对 SDF 含量的影响最大,图 4 中等高线图的椭圆明显,说明发酵过程中接种量和培

养温度两个因素的交互作用显著。

经 Design-Expert 12 软件分析,响应面优化模型预测的最佳培养发酵条件为接种量 8.205%、培养温度 25.395 °C、培养时间 7.132 d,计算 SDF 理论最大含量

为 $8.245 \text{ g}/100 \text{ g}$, 为方便进行试验, 调整发酵条件为接种量 8% 、培养温度 25°C 、培养时间 7 d , 在此条件下, 进行 3 次平行试验验证, 实测玉米皮 SDF 含量为 $(8.39 \pm 0.14) \text{ g}/100 \text{ g}$, 与预测值误差较小, 说明该模型对玉米皮 SDF 含量的优化拟合效果良好。发酵前玉米皮中 SDF 含量为 $(0.33 \pm 0.03) \text{ g}/100 \text{ g}$, 优化后玉米皮 SDF 含量提高了 24.42 倍。

2.3 亚硝酸盐吸附能力分析

发酵前后玉米皮 SDF 对亚硝酸盐的吸附能力如图 7 所示。

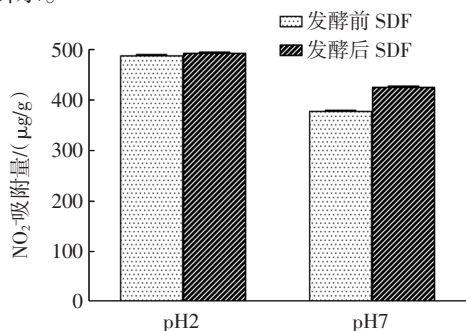


图 7 发酵前后 SDF 亚硝酸盐吸附能力

Fig.7 Adsorption capacity of soluble dietary fiber before and after fermentation for nitrite

由图 7 可知, pH2 条件下发酵前 SDF 亚硝酸钠的吸附量为 $488.73 \mu\text{g/g}$, 发酵后 SDF 亚硝酸钠的吸附量为 $493.99 \mu\text{g/g}$, pH7 条件下发酵前 SDF 亚硝酸钠的吸附量为 $378.73 \mu\text{g/g}$, 发酵后 SDF 亚硝酸钠的吸附量为 $426.58 \mu\text{g/g}$, 发酵前后两种条件下 SDF 亚硝酸钠吸附能力均有明显变化, 且 pH2 即胃内环境中 SDF 亚硝酸盐吸附能力要高于 pH7 即小肠环境。发酵后玉米皮 SDF 亚硝酸盐的吸附能力有所增强, 可能由于发酵有助于更多的羧基和羟基暴露, 增强了玉米皮 SDF 对亚硝酸盐的吸附能力。

2.4 胆固醇吸附能力分析

发酵前后玉米皮 SDF 对胆固醇的吸附能力如图 8 所示。

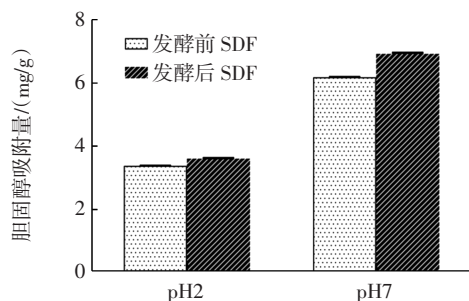


图 8 发酵前后 SDF 胆固醇吸附能力

Fig.8 Adsorption capacity of soluble dietary fiber before and after fermentation for cholesterol

由图 8 可知, 发酵前后两种条件下 SDF 胆固醇吸附能力均有明显变化, pH2 和 pH7 条件下发酵后玉米皮 SDF 胆固醇的吸附量分别为 3.61 mg/g 和 6.92 mg/g , 均高于发酵前的玉米皮 SDF 胆固醇吸附能力, 且 pH7 条件下胆固醇的吸附能力高于 pH2, 说明 SDF 对胆固醇的吸附能力在小肠中效果更好。小肠是胆固醇主要的消化吸收场所, 这一结果与人体的实际消化环境相符^[26]。发酵改性可以提高玉米皮 SDF 的胆固醇吸附能力, 改性后的玉米皮 SDF 可以用作食品加工中降低胆固醇的功能性成分。

2.5 胆酸盐吸附能力分析

胆酸盐是胆汁酸的次级代谢产物, 与一些胃肠道疾病和癌症有关, 也是肠道吸收胆固醇所必需的乳化剂和载体。膳食纤维可与胆酸盐结合, 促进胆汁酸盐的排泄, 减少人体对胆酸盐的接触和吸收, 进一步抑制胆固醇的吸收^[27]。发酵前后玉米皮 SDF 对胆酸盐吸附能力如图 9 所示。

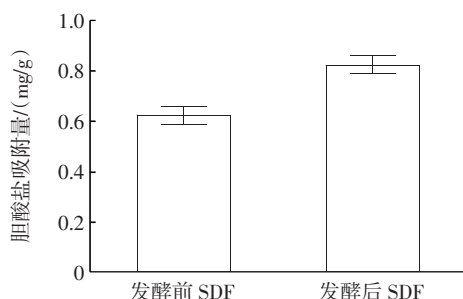


图 9 发酵前后 SDF 胆酸盐吸附能力

Fig.9 Adsorption capacity of soluble dietary fiber before and after fermentation for cholate

由图 9 可知, 发酵前后 SDF 胆酸盐吸附能力有明显的差异变化, 且发酵后玉米皮 SDF 胆酸盐的吸附量达 0.83 mg/g , 是发酵前玉米皮 SDF 的 1.34 倍。发酵增加了 SDF 与胆酸盐的亲合力, 使其具有更好的降血脂潜力。

3 结论

本研究采用单因素、响应面试验的方法, 对猴头菌固态发酵改性玉米皮 SDF 的发酵条件进行优化, 优化调整后的发酵条件为接种量 8% 、培养温度 25°C 、培养时间 7 d , 该条件下实测玉米皮 SDF 含量为 $(8.39 \pm 0.14) \text{ g}/100 \text{ g}$ 。发酵后玉米皮 SDF 的亚硝酸盐吸附能力、胆固醇吸附能力和胆酸盐吸附能力均有所提高, 说明发酵改性可以提高玉米皮 SDF 的含量, 并可以增强其功能性质, 使其可以更好地应用于食品、医药等行业。

参考文献:

- [1] 周中凯, 李莹, 王俊轩. 玉米皮膳食纤维对益生菌在冷冻干燥过程中存活率影响的研究[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(3): 46-49.
ZHOU Zhongkai, LI Ying, WANG Junxuan. Effects of corn bran fibers on the protection of *Lactobacillus* during freezing-drying process[J]. Cereals & Oils, 2016, 29(3): 46-49.
- [2] 刘玉春, 孙庆杰. 工业玉米副产品玉米皮精深加工技术进展[J]. 农产品加工, 2017(3): 72-75.
LIU Yuchun, SUN Qingjie. Progress in processing technology of corn husk-the byproduct of corn starch[J]. Farm Products Processing 2017(3): 72-75.
- [3] 姚胜文. 玉米皮低聚糖阿魏酸酯对美拉德反应风味和中间产物的影响[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
YAO Shengwen. Effect of feruloylated oligosaccharides from maize bran on volatiles and intermediates during the Maillard reaction[D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.
- [4] HU Y B, FU X J, ZHANG F X, et al. Hypolipidemic study of xy-lanase-modified corn bran fibre in rats[J]. Food Chemistry, 2010, 123(3): 563-567.
- [5] 靳福娅, 李雄亮, 马梦垚. 浅谈膳食纤维的生理功能及其在食品中的应用[J]. 广东化工, 2021, 48(24): 50-51.
JIN Fuya, LI Xiongliang, MA Mengyao. The introduction of the physiological function of dietary fiber and its application in food[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(24): 50-51.
- [6] 王金枝, 董森, 胡文辉, 等. 溶剂法浸提玉米纤维油的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(6): 31-34.
WANG Jinzhi, DONG Sen, HU Wenhui, et al. Technology research of corn fiber oil by solvent extraction[J]. Food Research and Development, 2015, 36(6): 31-34.
- [7] 郭丽, 王鹏, 周凤超, 等. 超声波辅助酶法提取玉米皮阿魏酸的工艺优化及抗氧化研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(11): 41-45.
GUO Li, WANG Peng, ZHOU Fengchao, et al. Optimization of ultrasonic-assisted enzyme extraction and antioxidant properties on ferulic acid of corn bran[J]. Cereals & Oils, 2015, 28(11): 41-45.
- [8] HE Y, WANG B X, WEN L K, et al. Effects of dietary fiber on human health[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(1): 1-10.
- [9] 王浩, 崔敬悦, 李红丽, 等. 膳食纤维的来源及应用进展研究[J]. 农业科技与装备, 2021(6): 92-93.
WANG Hao, CUI Jingyue, LI Hongli, et al. Study on the source and application of dietary fiber[J]. Agricultural technology & equipment, 2021(6): 92-93.
- [10] REZENDE E S V, LIMA G C, NAVES M M V. Dietary fibers as beneficial microbiota modulators: A proposed classification by prebiotic categories[J]. Nutrition, 2021, 89: 111217.
- [11] LIU H F, ZENG X Y, HUANG J Y, et al. Dietary fiber extracted from pomelo fruitlets promotes intestinal functions, both *in vitro* and *in vivo*[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 252: 117186.
- [12] SOLIMAN G A. Dietary fiber, atherosclerosis, and cardiovascular disease[J]. Nutrients, 2019, 11(5): 1155.
- [13] SWANN O G, KILPATRICK M, BRESLIN M, et al. Dietary fiber and its associations with depression and inflammation[J]. Nutrition Reviews, 2020, 78(5): 394-411.
- [14] HARAA H, HAYASHI K, AOYAMA Y. Intestinal absorption of zinc is promoted by low-level intake but inhibited by high-level intake of corn husk fiber in rats[J]. Nutrition Research, 2001, 21(4): 627-637.
- [15] 李晓月, 张晶晶, 张红建, 等. 玉米皮膳食纤维对反式脂肪酸致高脂血症小鼠脂代谢的影响[J]. 中国酿造, 2013, 32(11): 32-35.
LI Xiaoyue, ZHANG Jingjing, ZHANG Hongjian, et al. Effects of dietary fiber from corn husk on hyperlipidemia prevention in trans fatty acids fed mice[J]. China Brewing, 2013, 32(11): 32-35.
- [16] 刘学成. 金针菇膳食纤维提取、改性及应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
LIU Xuecheng. Study on extraction, modification and application of dietary fiber from *Flammulina velutipes*[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2020.
- [17] 郑佳欣. 刺梨渣膳食纤维蒸汽爆破改性及结构、功能性质研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
ZHENG Jiaxin. Structural and functional properties of dietary fiber from chestnut rose residue modified by steam explosion[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [18] 安莹, 周颖, 刘春芬, 等. 响应面法研究黑玉米皮中膳食纤维提取工艺[J]. 农产品加工(学刊), 2011(7): 66-68, 84.
AN Ying, ZHOU Ying, LIU Chunfen, et al. The response surface methodology on the technology of extracting dietary fiber from black corn skin[J]. Agricultural Product Processing (Journal), 2011(7): 66-68, 84.
- [19] 陈闯, 张放, 杜兰威, 等. 生物酶法改性玉米皮渣膳食纤维工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(11): 121-124.
CHEN Chuang, ZHANG Fang, DU Lanwei, et al. Bio-enzymatic modification for dietary fiber of corn bran[J]. Food Research and Development, 2021, 42(11): 121-124.
- [20] 李华丽, 魏仲珊, 罗玉, 等. 发酵法生产可溶性膳食纤维乳饮料的工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(15): 139-145.
LI Huali, WEI Zhongshan, LUO Yu, et al. Study on production process of milk beverage with SDF by fermentation[J]. Food Research and Development, 2016, 37(15): 139-145.
- [21] HUA M, LU J X, QU D, et al. Structure, physicochemical properties and adsorption function of insoluble dietary fiber from ginseng residue: A potential functional ingredient[J]. Food Chemistry, 2019, 286: 522-529.
- [22] 杨雪. 发酵法提高柑橘皮渣可溶性膳食纤维含量及产物性能的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
YANG Xue. Research on soluble dietary fiber content improvement of *Citrus* dregs prepared through fermentation method and product properties study[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [23] 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: 79-86.
- [24] 秦培鹏, 傅力. 猴头菌深层发酵工艺摇瓶培养条件优化的研究[J].

- 农业开发与装备, 2013(10): 67-68.
- QIN Peipeng, FU Li. Study on the optimization of shake flask culture conditions for the deep fermentation process of *A. baumannii*[J]. Agricultural Development & Equipments, 2013(10): 67-68.
- [25] 赵哲. 液态发酵豆渣制取膳食纤维技术研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- ZHAO Zhe. Research on the production of dietary fibre from liquid fermented soybean residues[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016.
- [26] 刘杰. 发酵法制备小麦麸皮膳食纤维及理化性质研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015.
- LIU Jie. Research on fermentation preparation and physicochemical properties of dietary fiber from wheat bran[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2015.
- [27] SINGH J, METRANI R, SHIVANAGODRA S R, et al. Review on bile acids: Effects of the gut microbiome, interactions with dietary fiber, and alterations in the bioaccessibility of bioactive compounds[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(33): 9124-9138.

加工编辑: 刘艳美
收稿日期: 2022-05-09