

复合酶改性玉米皮可溶性膳食纤维的工艺优化及理化特性分析

魏旭瑶, 姜彩霞, 曾祥瑞, 王萌, 郑喜群, 刘晓兰

Process Optimization and Physicochemical Characteristics Analysis of Soluble Dietary Fiber from Corn Bran Modified by Composite Enzymes

WEI Xuyao, JIANG Caixia, ZENG Xiangrui, WANG Meng, ZHENG Xiqun, and LIU Xiaolan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070095>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合酶法提取黄秋葵可溶性膳食纤维的工艺优化及其理化特性、结构表征

Optimization Techniques for the Extraction of Soluble Dietary Fiber from Okra with Complex Enzymes and Its Physicochemical Properties and Structure Characterization

食品工业科技. 2020, 41(17): 199-205,218 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.033>

复合酶法同步提取葡萄籽粕蛋白质和可溶性膳食纤维的响应面优化

Response Surface Optimization of Simultaneous Extraction of Protein and Soluble Dietary Fiber from Grape Seed Meal by Complex Enzymatic Method

食品工业科技. 2019, 40(3): 134-140 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.03.022>

好食脉孢霉发酵麦麸制备可溶性膳食纤维及其理化性质

Preparation and Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber(SDF)from Wheat Bran Fermented by *Neurospora sitophila*

食品工业科技. 2021, 42(2): 170-176,191 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030170>

超声辅助酶法提取西番莲果皮可溶性膳食纤维及理化性质

Extraction of Soluble Dietary Fiber from *Passiflora edulis* Peel by Ultrasonic Assisted Enzymatic Method and Its Physicochemical Properties

食品工业科技. 2020, 41(7): 161-165,172 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.027>

茶梗可溶性膳食纤维的制备工艺优化及单糖组成和理化特性研究

Optimization of Preparing Process of Soluble Dietary Fiber from Tea Stalks and Its Monosaccharide Composition and Physicochemical Properties

食品工业科技. 2021, 42(18): 190-196 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010070>

茶树菇膳食纤维改性及理化性质研究

Modification and Physicochemical Properties of *Agrocybe aegerita* Dietary Fiber

食品工业科技. 2021, 42(4): 142-148 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019110161>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

魏旭瑶, 姜彩霞, 曾祥瑞, 等. 复合酶改性玉米皮可溶性膳食纤维的工艺优化及理化特性分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 202-209. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070095

WEI Xuyao, JIANG Caixia, ZENG Xiangrui, et al. Process Optimization and Physicochemical Characteristics Analysis of Soluble Dietary Fiber from Corn Bran Modified by Composite Enzymes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(6): 202-209. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070095

· 工艺技术 ·

复合酶改性玉米皮可溶性膳食纤维的工艺优化及理化特性分析

魏旭瑶¹, 姜彩霞^{1,2}, 曾祥瑞¹, 王 萌¹, 郑喜群^{1,2,3,*}, 刘晓兰^{4,*}

(1.黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;

2.黑龙江八一农垦大学国家杂粮工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319;

3.粮食副产物加工与利用教育部工程研究中心, 黑龙江大庆 163319;

4.齐齐哈尔大学食品与生物工程学院, 黑龙江省玉米深加工理论与技术重点实验室, 黑龙江齐齐哈尔 161006)

摘要: 为探究玉米皮可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 最佳提取工艺及功能特性。本研究以玉米加工副产物玉米皮为原料, 采用复合酶法改性提取玉米皮可溶性膳食纤维, 通过单因素实验和响应面优化确定最佳工艺参数并对其理化性质进行了研究。结果表明, 当纤维素酶添加量为 1.5%、木聚糖酶添加量为 1%、酶解温度为 55 °C、酶解时间为 150 min 时, 玉米皮 SDF 得率达到的最高值为 16.64%±0.21%, 其溶解度为 87.63%±0.43%, 持水力为 2.87±0.16 g/g, 持油力为 2.30±0.12 g/g, 葡萄糖吸附力为 5.32±0.12 mmol/g, 体外模拟胃环境 (pH2.0)、肠环境 (pH7.0) 下胆固醇吸附性分别为 11.74±0.15、42.93±0.08 mg/g, 胆酸钠吸附性分别为 15.43±0.17、50.67±0.10 mg/g。研究结果可为玉米皮可溶性膳食纤维的开发利用提供理论参考。

关键词: 玉米皮, 可溶性膳食纤维, 复合酶改性, 响应面优化, 理化性质

中图分类号: TS210.9

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)06-0202-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023070095



本文网刊:

Process Optimization and Physicochemical Characteristics Analysis of Soluble Dietary Fiber from Corn Bran Modified by Composite Enzymes

WEI Xuyao¹, JIANG Caixia^{1,2}, ZENG Xiangrui¹, WANG Meng¹, ZHENG Xiqun^{1,2,3,*}, LIU Xiaolan^{4,*}

(1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

2.National Coarse Cereals Engineering Research Center, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China;

3.Engineering Research Center of Processing and Utilization of Grain By-products and Utilization of Ministry of Education, Daqing 163319, China;

4.College of Food and Biological Engineering, Heilongjiang Key Laboratory of Corn Deep Processing Theory and Technology, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: To investigate the optimal extraction process and functional characteristics of soluble dietary fiber (SDF) from corn bran. This study used corn bran, a by-product of corn processing, as raw material to extract soluble dietary fiber from

收稿日期: 2023-07-13

基金项目: 黑龙江省百千万工程科技重大专项子课题 (2021ZX12B09-4); 国家十四五重点研发计划子课题 (2021YFD2100904)。

作者简介: 魏旭瑶 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1037218022@qq.com。

* 通信作者: 郑喜群 (1963-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: zhengxiqun@126.com。

刘晓兰 (1962-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: liuxiaolan001@126.com。

corn bran through composite enzyme modification. The optimal process parameters were determined through single factor experiments and response surface methodology optimization, and their physicochemical properties were studied. The results showed that the extraction yield of SDF reached the highest value of 16.64%±0.21% when the content of cellulase was 1.5%, the content of xylanase was 1%, the enzymolysis temperature was 55 °C and enzymolysis time was 150 min. Its solubility was 87.63%±0.43%, the holding water capacity was 2.87±0.16 g/g, the oil holding capacity was 2.30±0.12 g/g, the glucose adsorption capacity was 5.32±0.12 mmol/g. Under simulated stomach (pH2.0) and intestinal environment (pH7.0), cholesterol adsorption capacity was 11.74±0.15 and 42.93±0.08 mg/g and sodium cholacte adsorption capacity was 15.43±0.17 and 50.67±0.10 mg/g, respectively. The research results can provide theoretical reference for the development and utilization of soluble dietary fiber from corn bran.

Key words: corn bran; soluble dietary fiber; complex enzyme modification; response surface optimization; physicochemical properties

膳食纤维(Dietary Fibre, DF)是一种植物衍生的寡糖或多糖,不能被人类消化系统完全消化。主要由纤维素、木质素、半纤维素、果胶、低聚糖组成^[1]。含有多种抗人类消化酶消化的化学结构^[2]。膳食纤维也被认为是植物的重要组成部分^[3],根据溶解度可以分为可溶性膳食纤维(Soluble Dietary Fibre, SDF)和不可溶性膳食纤维(Insoluble Dietary Fiber, IDF),对人体健康和维持身体功能平衡至关重要^[4]。SDF可降低血液中的胆固醇含量和葡萄糖水平,有助于预防或改善心血管疾病和糖尿病等慢性疾病^[5]。SDF也可用于食品加工,改善食品的质地结构和口感,满足人体对膳食营养素的需求^[6-7]。研究发现玉米皮膳食纤维是谷物中最重要的膳食纤维来源之一,可以吸收亚硝酸盐,显著降低患癌症的风险^[8]。

玉米是世界上三大粮食作物之一。在粮食作物中玉米的世界总产量最高^[9]。根据中国玉米产量数据,玉米皮年产量为 3000 万吨。而人们往往忽略其潜在的价值,部分仅应用在饲料生产中。玉米皮富含优质的碳水化合物,如半纤维素、纤维素和淀粉^[10]。酶解法已被证明通过改变麸皮结构或重新分配内部组成来改善膳食纤维的功能特性^[11]。张向辉等^[12]采用高温蒸煮复合酶法提取绿豆皮中的 SDF,其理化性质及体外降血糖能力均优于高温蒸煮法提取的绿豆皮 SDF。杨开等^[13]采用复合酶法提取雷笋中的 SDF,将雷笋中的 IDF 部分水解变为较小分子量的 SDF,使原本有序的纤维素晶型被打乱,得率可达到 5.78%,且理化特性均有较大改善。Ma 等^[14]研究发现复合酶法改性能显著提高膳食纤维得率。且与未改性的原料相比,复合酶法改性后的膳食纤维具有更高的可溶性单糖含量、更强的热稳定性和更高的多孔率。纤维素酶和木聚糖酶可以水解 DF 原料中的纤维素和半纤维素成分,使纤维素多糖分子量降低,聚合度下降,大幅度提升了 SDF 含量。目前关于复合酶法改性提取玉米皮中可溶性膳食纤维的报道较少,因此探寻优质的提取工艺将玉米皮中 IDF 转化为 SDF 有着重要的意义。

本文采用复合酶法改性玉米皮可溶性膳食纤维,通过单因素实验、响应面优化玉米皮可溶性膳食

纤维制备的工艺参数。并对提取产物进行了相关的体外试验,进一步明确改性前后玉米皮可溶性膳食纤维功能特性的差异,研究结果可能为开发玉米皮高附加值功能产品以及对玉米加工副产物的精深利用提供有利参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

玉米皮 京粮龙江生物工程有限公司;淀粉酶(2×10⁵ U/g) 北京奥博星生物技术有限责任公司;碱性蛋白酶(2×10⁵ U/g) 南宁庞博生物有限公司;淀粉糖苷酶(1.5×10⁵ U/g)、纤维素酶(1.1×10⁴ U/mL)、木聚糖酶(2.8×10⁵ U/g) 沧州夏盛酶生物技术有限公司;其他试剂均为分析纯。

TGL-16M 离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;UV-2501PC 紫外-可见分光光度计 日本岛津公司;DF-101 智能磁力搅拌器 巩义市予华仪器有限责任公司;RE52-99 旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂。

1.2 实验方法

1.2.1 复合酶改性玉米皮 SDF 的制备 根据 Li 等^[15]的方法略有修改。玉米皮粉碎后,过 60 目筛得玉米皮粗粉,进行石油醚脱脂,经低温干燥后按料液比 1:10(g/mL)加入去离子水,混合液调至温度 60 °C、pH5.0 后加入纤维素酶(40 U/mg)、木聚糖酶(13 U/mg)进行酶解,酶解后 100 °C 沸水浴灭酶 15 min。按照 AOAC 方法,经 α-淀粉酶、蛋白酶和淀粉糖苷酶顺序酶解,以去除膳食纤维中的淀粉和蛋白质等组分。具体参数为:当复合酶改性玉米皮混合液温度降至 60 °C, pH 调至 6.5,加入 1% 淀粉酶,酶解 1 h,沸水浴灭酶;当温度降至 55 °C 时调整 pH 至 9.0,加入 2% 蛋白酶,酶解 3 h,沸水浴灭酶;当温度降至 50 °C 时调整 pH 至 4.2,加入 1% 淀粉糖苷酶,酶解 2 h,沸水浴灭酶。待料液冷却至室温,4000 r/min 离心 15 min,收集上清液,经真空减压浓缩至总体积的 1/3,加入 4 倍体积 95% 的乙醇溶液,4 °C 醇沉 10 h,沉淀物离心后干燥,即为复合酶改性玉米皮 SDF,简称 C-SDF。

$$\text{SDF得率}(\%) = \frac{\text{SDF干重}}{\text{玉米皮干重}} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.2 单因素实验 利用复合酶法改性玉米皮 SDF, 考察纤维素酶添加量、木聚糖酶添加量、酶解温度和酶解时间对玉米皮 SDF 得率的影响。4 个因子试验范围如下: 以玉米皮可溶性膳食纤维得率为衡量指标, 分别在木聚糖酶添加量 1.2%、酶解时间 120 min、酶解温度 60 °C 的条件下考察纤维素酶 (0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%) 对玉米皮 SDF 的影响; 在纤维素酶添加量 1.5%、酶解时间 120 min、酶解温度 60 °C 的条件下考察木聚糖酶 (0.8%、1%、1.2%、1.4%、1.6%) 对玉米皮 SDF 得率的影响; 在纤维素酶添加量 1.5%、木聚糖酶添加量 1.2%、酶解温度 60 °C 的条件下考察酶解时间 (60、90、120、150、180 min) 对玉米皮 SDF 得率的影响; 在纤维素酶添加量 1.5%、木聚糖酶添加量 1.2%、酶解时间 120 min 的条件下考察酶解温度 (40、50、60、70、80 °C) 对玉米皮 SDF 得率的影响。

1.2.3 响应面优化试验 在上述单因素实验的基础上, 运用 Design expert-13 软件, 根据中心组合试验设计原理, 采用四因素三水平的响应面分析法, 以纤维素酶添加量(A)、木聚糖酶添加量(B)、酶解时间(C)、酶解温度(D)为自变量, 以 C-SDF 得率为响应值, 通过响应曲面分析对提取条件进行优化, 以确定制备的最优条件, 因素与水平设计见表 1。

表 1 Box-Behnken 试验因素及水平
Table 1 Factors and levels of Box Behnken test

水平	因素			
	A纤维素酶添加量 (%)	B木聚糖酶添加量 (%)	C酶解时间 (min)	D酶解温度 (°C)
-1	1.0	0.8	120	50
0	1.5	1.0	150	55
1	2.0	1.2	180	60

1.2.4 C-SDF 理化特性的测定

1.2.4.1 溶解性(Water solubility, WS) 根据 Li 等^[16]的方法略有修改。精确称量 0.3 g 样品于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 蒸馏水, 75 °C 水浴 1 h, 4000 r/min 离心 15 min, 除去上清液并将沉淀烘干至恒重, 按下式计算:

$$\text{溶解性}(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: M_0 样品干重(g); M_1 上清液干燥后的固形物质量(g)。

1.2.4.2 持水力(Water holding capacity, WHC) 根据 Yin 等^[17]的方法确定, 但略有修改。精确称量 0.3 g 样品于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 蒸馏水, 25 °C 混匀振荡 2 h, 静置 12 h, 4000 r/min 离心 15 min, 除去上清液后用滤纸将残留在离心管内的剩余水分吸干并称量沉淀质量。

$$\text{持水力}(\text{g/g}) = \frac{M_2 - M_0}{M_0} \quad \text{式(3)}$$

式中: M_2 为样品湿重(g); M_0 为样品干重(g)。

1.2.4.3 持油力(Oil holding capacity, OHC) 根据 Ji 等^[18]的方法确定, 但略有修改。精确称量 0.3 g 样品于 50 mL 离心管中, 加入 30 mL 大豆油, 25 °C 振荡 2 h, 静置 12 h, 4000 r/min 离心 15 min, 除去上清液后用滤纸将残留在离心管内的剩余大豆油吸干并称量沉淀质量。

$$\text{持油力}(\text{g/g}) = \frac{M_3 - M_0}{M_0} \quad \text{式(4)}$$

式中: M_3 为样品湿重(g); M_0 为样品干重(g)。

1.2.4.4 葡萄糖吸附能力(Glucose adsorption capacity, GAC)的测定 根据 Zheng 等^[19]的方法确定, 但略有修改。准确称量 0.3 g 样品加入 200 mmol/L 的葡萄糖溶液中。在 37 °C 下 180 r/min 水浴振荡 6 h, 4000 r/min 离心 15 min, 取上清液用 3,5-二硝基水杨酸法(DNS 法)测定其葡萄糖含量。GAC 的计算方法如下:

$$\text{葡萄糖吸附能力}(\text{mmol/g}) = \frac{(C_0 - C_1)}{M_m} \times V_0 \quad \text{式(5)}$$

式中: C_0 为吸附前溶液中葡萄糖浓度(mmol/L); C_1 为吸附后溶液中上清液葡萄糖浓度(mmol/L); V_0 为离心后上清液体积(mL); M_m 为样品质量(g)。

1.2.4.5 胆固醇吸附能力(Cholesterol adsorption capacity, CAC)的测定 根据 Benitez 等^[20]的方法确定, 但略有修改。新鲜的鸡蛋黄中加入 9 倍体积的蒸馏水充分搅拌混合, 准确称量 0.3 g 待测样品加入到 30 mL 蛋黄稀释液中, 分别用 NaOH 和 HCl 将体系调节到 pH 至 7.0±0.1(模拟肠道环境)和 pH 至 2.0±0.1(模拟胃环境)。将混合液 37 °C 水浴振荡 4 h, 4000 r/min 离心 15 min, 取上清液采用邻苯二甲醛的方法测定上清液中胆固醇含量。

$$\text{胆固醇吸附能力}(\text{mg/g}) = \frac{M_1 - M_2}{M_0} \quad \text{式(6)}$$

式中: M_1 为吸附前胆固醇含量(mg); M_2 为吸附后胆固醇含量(mg); M_0 为样品干重(g)。

1.2.4.6 胆酸钠吸附能力(Sodium cholate adsorption capacity, SCAC)的测定 根据 Cheng 等^[21]的方法确定, 但略有修改。取 0.3 g 样品与 30 mL 0.75 mg/mL 胆酸钠溶液充分混合。分别用 NaOH 和 HCl 将体系调节到 pH 至 7.0±0.1(模拟肠道环境)和 pH 至 2.0±0.1(模拟胃环境)。37 °C 下水浴 3 h, 4000 r/min 离心 15 min, 采用糠醛比色法测定上清液中胆酸钠含量。

$$\text{胆酸钠吸附能力}(\text{mg/g}) = \frac{M_a - M_b}{M_0} \quad \text{式(7)}$$

式中: M_a 为吸附前胆酸钠含量(mg); M_b 为吸附后胆酸钠含量(mg); M_0 为样品干重(g)。

1.3 数据处理

试验均进行了三次平行, 数据均以“平均值±标准差”表示, 显著性分析采用 SPSS 26 统计软件, 经单因素方差分析, 比较方法采用 Tukey 分析, $P < 0.05$ 表示差异性显著; 采用 Origin 2022 进行图形绘制; 响应面优化试验借助 Design Expert 13 进行。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果与分析

2.1.1 纤维素酶添加量对 C-SDF 得率的影响 纤维素酶添加量对玉米皮 SDF 得率的影响由图 1 所示, 由图 1 可知, 随着纤维素酶添加量的增加 C-SDF 得率呈现的趋势为先增加后减少, 且在纤维素酶添加量为 1.5% 时 C-SDF 得率达到最大值。当底物一定时, 随着酶添加量的增加, 酶解速率也随之相应增加, 但是当酶添加量大于 1.5% 时, C-SDF 的得率呈现缓慢下降的趋势, 可能是因为酶添加量过多, 将 C-SDF 水解生成分子质量更低且易溶于乙醇的糖类物质, 使得 C-SDF 的得率降低^[22-23]。因此, 纤维素酶的最佳添加量以 1.5% 进行响应面优化试验分析较适宜。

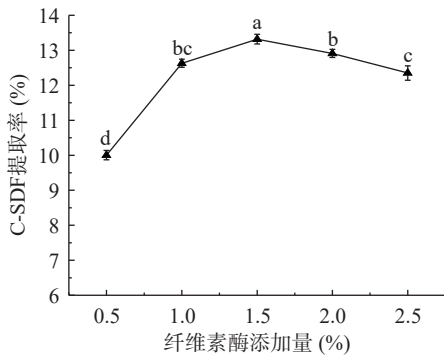


图 1 纤维素酶添加量对玉米皮 SDF 得率的影响

Fig.1 Effect of cellulase supplemental level on the extraction rate of SDF from corn bran

注: 不同小写字母表示各处理间数据差异显著($P < 0.05$); 图 2~图 4 同。

2.1.2 木聚糖酶添加量对 C-SDF 得率的影响 木聚糖酶添加量对玉米皮 SDF 得率的影响由图 2 可知, C-SDF 的得率在木聚糖酶添加量为 1% 时达到最

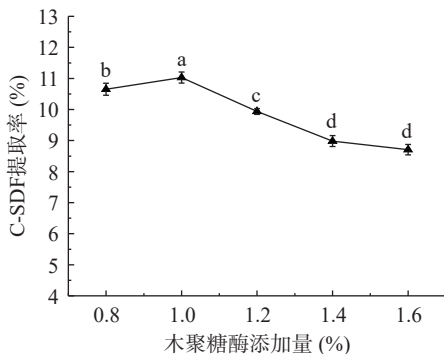


图 2 木聚糖酶添加量对玉米皮 SDF 得率的影响

Fig.2 Effect of xylanase addition on SDF extraction rate of corn bran

高, 随后呈现酶解速率下降的趋势。底物中非淀粉多糖被木聚糖酶充分酶解后形成了聚合度较小的糖组分, 使 C-SDF 含量增加^[24]。当木聚糖酶添加量超过 1% 时, 木聚糖酶则水解 SDF 中低聚木糖等组分, 使 C-SDF 得率降低。故选木聚糖酶 1% 添加量时提取 C-SDF 进行响应面优化试验为宜。

2.1.3 酶解时间对 C-SDF 得率的影响 酶解时间对玉米皮 SDF 得率的影响由图 3 所示, 随着酶解时间的不断上升, 酶的作用时间对 C-SDF 得率的影响呈现 150 min 之前稳步增加随之减小的变化趋势, 在酶解时间为 150 min 时, C-SDF 的得率达到最高值。随着时间的延长, 底物与酶结合的作用位点越来越多, 随之呈现饱和状态, 再继续延长酶解时间, 底物会被过度消耗, 酶分子的有效含量也将有所降低, 酶的速率也随之降低。时间过长时 C-SDF 也会被进一步降解, 导致 C-SDF 得率变小^[25]。因此最适酶解时间为 150 min 进行响应面优化试验。

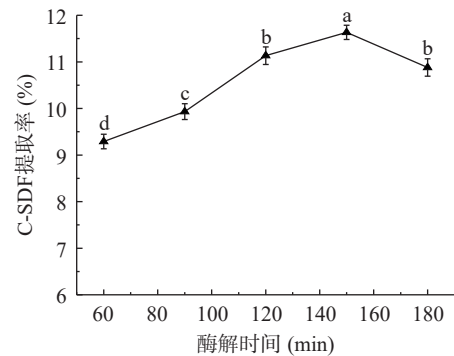


图 3 酶解时间对玉米皮 SDF 得率的影响

Fig.3 Effect of enzymatic hydrolysis time on the extraction rate of corn bran SDF

2.1.4 酶解温度对 C-SDF 得率的影响 酶解温度对玉米皮 SDF 得率的影响如图 4 可知, 随着酶解温度的上升, 酶解温度对 C-SDF 得率的影响呈先增加后降低的变化趋势, 且在 60 °C 时 C-SDF 得率达到最高值。高温环境下, 酶的内部结构遭到破坏, 导致无论其活性、稳定性都有所下降, 而低温条件不能提高相对反应体系的活化能, 与底物酶解不充分也会导致

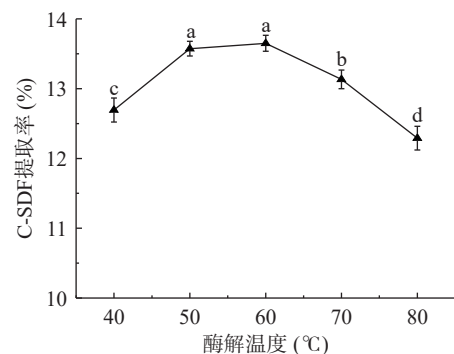


图 4 酶解温度对玉米皮 SDF 得率的影响

Fig.4 Effect of enzymatic hydrolysis temperature on the extraction rate of corn bran SDF

酶解效果的降低^[26]。因此,故选酶解温度控制在50℃进行响应面优化试验为宜。

2.2 响应面优化试验结果

响应面优化试验结果见表2。结果表明 C-SDF 得率及自变量纤维素酶添加量(A)、木聚糖酶添加量(B)、酶解时间(C)、酶解温度(D)的回归方程为: $Y=16.58+1.78A+1.64B+1.63C+1.27D+0.15AB+0.28AC-0.6025AD+0.5075BC-0.1525BD+0.0625CD-2.26A^2-2.96B^2-2.48C^2-2.65D^2$ 。

表2 响应面分析设计及结果

Table 2 Design and results of response surface analysis

实验号	A纤维素酶添加量	B木聚糖酶添加量	C酶解时间	D酶解温度	C-SDF得率 (%)
1	0	0	0	0	16.1
2	0	1	-1	0	10.78
3	1	0	0	-1	12.43
4	-1	0	1	0	11.71
5	0	0	0	0	16.91
6	0	-1	-1	0	8.47
7	1	0	1	0	16.37
8	0	0	1	1	14.19
9	0	1	1	0	14.61
10	-1	1	0	0	10.99
11	0	1	0	-1	11.7
12	-1	0	-1	0	8.23
13	0	0	0	0	16.49
14	0	1	0	1	13.89
15	0	-1	1	0	10.27
16	1	0	-1	0	11.77
17	0	0	-1	1	11.15
18	-1	0	0	1	11.89
19	0	0	1	-1	11.5
20	-1	-1	0	0	8.08
21	0	-1	0	1	10.91
22	0	-1	0	-1	8.11
23	0	0	-1	-1	8.71
24	-1	0	0	-1	8.13
25	1	1	0	0	14.8
26	1	-1	0	0	11.29
27	0	0	0	0	16.89
28	0	0	0	0	16.52
29	1	0	0	1	13.78

由表3所示,此回归方程模型 $P<0.0001$ 呈极显著趋势;模型失拟项 $P>0.05$ 呈不显著趋势,表明所建立模型的回归方程有较好的拟合性,可以作为预测 C-SDF 优化提取工艺参数的模型。此模型的相关回归系数 $R^2=0.9905$,绝对校正系数 $R^2_{Adj}=0.9809$,以上数据表明该模型的可靠性高。其中 A、B、C、D、 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 的 P 值均 <0.001 ,说明相关数值对 C-SDF 得率影响呈极显著。AD 的 $P<0.01$ 对 C-SDF 得率为高度显著影响。BC 的 $P<0.05$ 呈现显著趋势。各因素对 C-SDF 得率影响的顺序依次为: A(纤维素酶添加量) $>$ B(木聚糖酶添加量) $>$ C(酶解时间) $>$ D(酶解温度)。

由图5所示,两因素交互响应面 3D 图的趋势越陡,说明因素之间的交互作用越明显;响应面趋势越

表3 回归模型的方差分析

Table 3 Variance analysis of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	237.39	14	16.96	103.80	<0.0001	***
A-纤维素酶	38.20	1	38.20	233.84	<0.0001	***
B-木聚糖酶	32.14	1	32.14	196.78	<0.0001	***
C-酶解时间	31.82	1	31.82	194.78	<0.0001	***
D-酶解温度	19.33	1	19.33	118.33	<0.0001	***
AB	0.0900	1	0.0900	0.5510	0.4702	
AC	0.3136	1	0.3136	1.92	0.1876	
AD	1.45	1	1.45	8.89	0.0099	**
BC	1.03	1	1.03	6.31	0.0249	*
BD	0.0930	1	0.0930	0.5695	0.4630	
CD	0.0156	1	0.0156	0.0957	0.7617	
A^2	33.25	1	33.25	203.52	<0.0001	***
B^2	56.84	1	56.84	347.95	<0.0001	***
C^2	39.82	1	39.82	243.76	<0.0001	***
D^2	45.51	1	45.51	278.62	<0.0001	***
残差	2.29	14	0.1634			
失拟项	1.84	10	0.1840	1.65	0.3336	
净误差	0.4471	4	0.1118			
总离差	239.68	28				

注: *显著性差异($P<0.05$); **高度显著性差异($P<0.01$); ***极显著性差异($P<0.001$)。

平缓,影响程度越不明显。根据 3D 响应图中各因素交互的趋势也可以推断响应值作用的大小。结果表明,AD、BC 的交互作用对响应值的影响显著,这与方差分析的结果相同。

2.3 工艺优化可靠性验证结果

通过 Design-Expert 软件优化分析,得到 C-SDF 最优改性工艺条件参数:纤维素酶添加量 1.76%、木聚糖酶添加量 1.08%、酶解温度 56.08℃、酶解时间 152 min。

结合实际工艺设置的可行性,对优化的 C-SDF 提取条件进行修正:纤维素酶添加量 1.5%、木聚糖酶添加量 1%、酶解温度 55℃、酶解时间 150 min;以此工艺参数进行三次验证试验得到 C-SDF 得率平均值为 $16.64\% \pm 0.21\%$ 。结果与模型预测的理论值相差较小,从而得出该模型优化后的玉米皮可溶性膳食纤维的工艺参数可靠性较高。

2.4 理化性质结果与分析

通过复合酶改性的 C-SDF 理化特性如表4所示。通过复合酶改性后的 C-SDF 与对照组 U-SDF 相比 WHC 和 OHC 都显著增强($P<0.05$)。结果表明复合酶改性后能够有效改善 C-SDF 的理化特性,这可能是由于复合酶法改性导致 C-SDF 的微观结构变得更加松散,且暴露出的亲水基团增多,导致了持水力的增强。OHC 在食品加工过程中是决定保留脂肪和脂溶性风味的重要指标^[27]。C-SDF 对葡萄糖溶液也有着良好的吸附性,可能是因为玉米皮进行改性后含有较高的有机木质素,可以吸附部分有机化合物^[28]。pH 对胆固醇的吸附有一定的影响。C-SDF 在 pH7.0 条件下的吸附能力明显优于 pH2.0 条件下

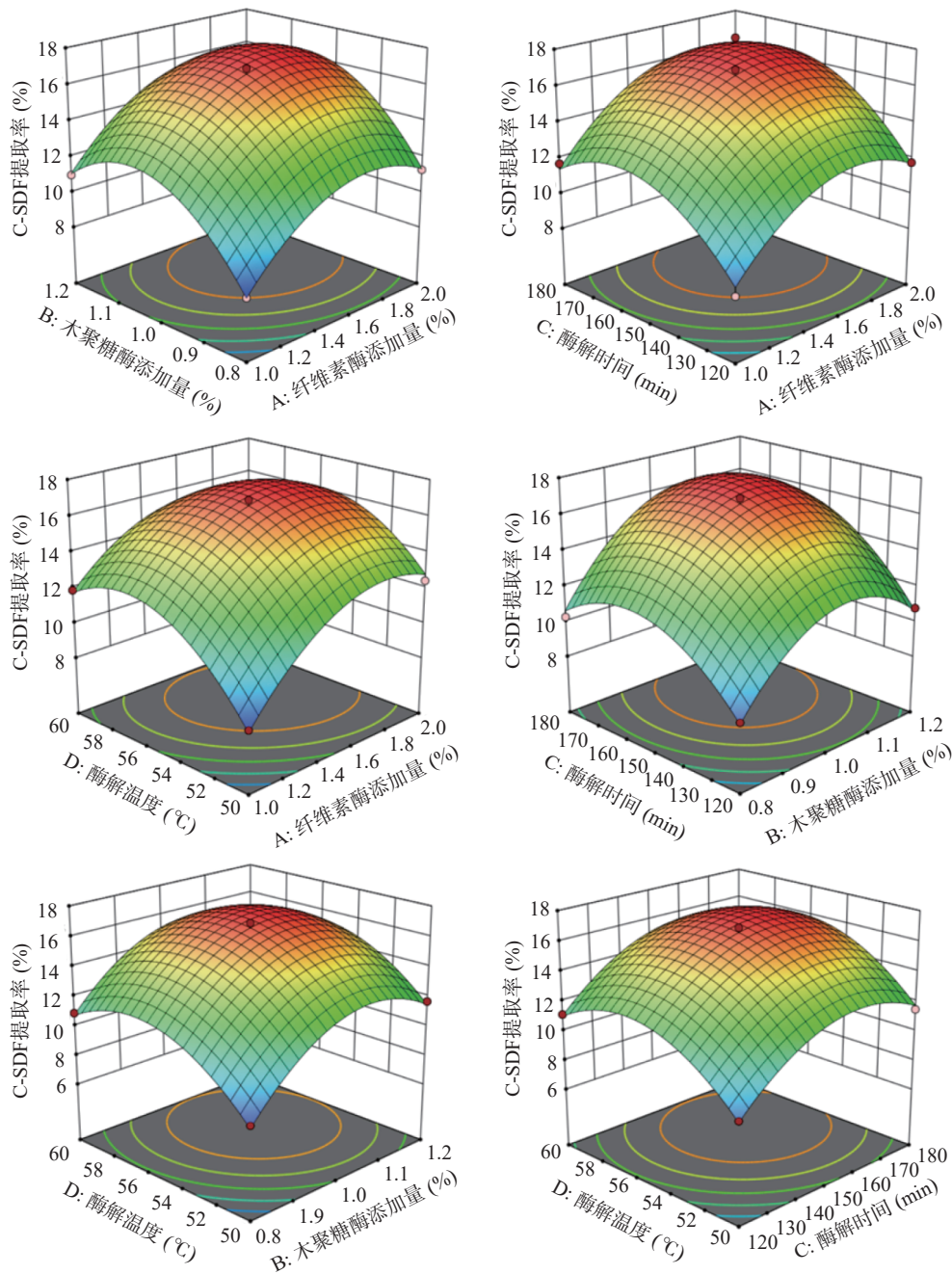


图 5 各因素交互作用对玉米皮 SDF 得率影响的响应面图

Fig.5 Response surface graph of the interaction of various factors on the extraction rate of corn bran SDF

表 4 C-SDF 的理化特性

Table 4 Physical and chemical properties of C-SDF

样品	WS(%)	WHC(g/g)	OHC(g/g)	GAC(mmol/g)	CAC(mg/g)		SCAC(mg/g)	
					pH2.0	pH7.0	pH2.0	pH7.0
U-SDF	81.59±0.30 ^b	1.49±0.21 ^b	1.72±0.11 ^b	3.57±0.08 ^b	8.94±0.10 ^b	29.99±0.13 ^b	9.62±0.23 ^b	32.87±0.08 ^b
C-SDF	87.63±0.43 ^a	2.87±0.16 ^a	2.30±0.12 ^a	5.32±0.12 ^a	11.74±0.15 ^a	42.93±0.08 ^a	15.43±0.17 ^a	50.67±0.10 ^a

注: U-SDF为改性前玉米皮可溶性膳食纤维, C-SDF为改性后玉米皮可溶性膳食纤维, 同列不同字母表示差异性显著 $P<0.05$ 。

的吸附力, 可以推断, C-SDF 在小肠中作用位点的胆固醇吸收能力更强。而在酸性反应的环境条件下存在大量氢离子, 使得 C-SDF 与胆固醇均携带了部分正电荷, 两者之间相互排斥的作用力使其结合力减弱, 最终导致 C-SDF 对胆固醇的吸附能力有所下降。另外, C-SDF 对胆酸钠的结合能力在 pH7.0 条

件下优于 pH2.0 条件下, 这可能是因为改性后 C-SDF 结构更加疏松多孔, 比表面积增大, 从而增加了 C-SDF 与胆酸钠的结合位点, 增强了胆酸钠吸附性能^[29]。也可能因为 C-SDF 在 pH7.0 条件下溶液中呈现出一种凝胶状结构, 能够吸附和结合胆汁酸, 使其胆汁酸及其盐可在小肠中更好的结合, 部分胆汁酸

及其盐类在小肠内与膳食纤维相结合后随粪便排出体外,这样就需要有额外的胆固醇被转化成胆酸以补偿被排出的部分。因此加速了体内胆固醇的分解,从而达到降低血脂的作用^[30]。

3 结论

本研究以玉米加工副产物玉米皮为原料,以纤维素酶和木聚糖酶为复合酶改性膳食纤维,通过设计单因素实验和响应面优化工艺,确定最佳改性提取工艺为:纤维素酶添加量 1.5%、木聚糖酶添加量 1%、酶解温度 55 ℃、酶解时间 150 min,改性后的玉米皮可溶性膳食纤维得率为 16.64%±0.21%,且具有良好的溶解性、持水力、持油力、葡萄糖吸附力、胆固醇吸附性和胆酸钠吸附性。本研究对提高玉米皮综合利用,实现粮食加工副产物的提质增效具有重要的意义。

参考文献

- [1] BEGUM Y A, DEKA S C. Effect of processing on structural, thermal, and physicochemical properties of dietary fiber of culinary banana bracts[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(12): e14256.
- [2] XU Y J, ZHANG C C, LIAO Z H, et al. Optimization of soluble dietary fiber extraction from hulless barley grass[J]. *Cereal Chemistry*, 2022, 99(3): 482–492.
- [3] SIDDIUI H, SULTAN Z, YOUSUF O, et al. A review of the health benefits, functional properties, and ultrasound-assisted dietary fiber extraction[J]. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 2023: 100356.
- [4] YEGIN S, KOPEK A, KITTS D D, et al. Dietary fiber: A functional food ingredient with physiological benefits[M]//Dietary sugar, salt and fat in human health. Academic Press, 2020: 531–555.
- [5] MUDGIL D. The interaction between insoluble and soluble fiber[M]//Dietary fiber for the prevention of cardiovascular disease. Academic Press, 2017: 35–59.
- [6] GABDUKAEVA L Z, GUMEROV T Y, NURGALIEVA A R, et al. Current trends in the development of functional meat products to improve the nutritional status of the population[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 624(1): 012196.
- [7] KLEVENHUSEN F, ZEBELI Q. A review on the potentials of using feeds rich in water-soluble carbohydrates to enhance rumen health and sustainability of dairy cattle production[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(14): 5737–5746.
- [8] WANG Y, ZHOU Y L, CHENG Y K, et al. Enzyme-chemical preparation, physico-chemical characterization and hypolipidemic activity of granular corn bran dietary fibre[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52: 1718–1723.
- [9] XUE J, SHENG X, ZHANG B J, et al. The Sirtuin-1 related antioxidant and antiaging activity of 5,5'-diferulic acid glucoside esters derived from corn bran by enzymatic method[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2020, 44(12): e13519.
- [10] DU X J, 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*, 2021, 143: 111031.
- [11] LEBESI D M, TZIA C. Use of endoxylanase treated cereal brans for development of dietary fiber enriched cakes[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 13: 207–214.
- [12] 张向辉, 罗磊, 段雪莹, 等. 高温蒸煮-复合酶法制备绿豆皮可溶性膳食纤维及体外降血糖作用研究[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(12): 59–66. [ZHANG X H, LUO L, DUAN X Y, et al. Preparation of soluble dietary fiber from mung bean skin by high-temperature steaming composite enzyme method and its *in vitro* hypoglycemic effect[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2022, 37(12): 59–66.]
- [13] 杨开, 杨振寰, 吴伟杰, 等. 雷笋膳食纤维酶法改性及其理化性能和结构变化[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(4): 36–41. [YANG K, YANG Z H, WU W J, et al. Enzymatic modification of dietary fiber from Lei bamboo shoots and its physicochemical properties and structural changes[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45(4): 36–41.]
- [14] MA Q Y, MA Z Y, WANG W X, et al. The effects of enzymatic modification on the functional ingredient-dietary fiber extracted from potato residue[J]. *LWT*, 2022, 153: 112511.
- [15] LI S, HU N N, ZHU J Y, et al. Influence of modification methods on physicochemical and structural properties of soluble dietary fiber from corn bran[J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 14: 100298.
- [16] LI Q, YANG S H, LI Y Q, et al. Antioxidant activity of free and hydrolyzed phenolic compounds in soluble and insoluble dietary fibres derived from hulless barley[J]. *LWT*, 2019, 111: 534–540.
- [17] YIN Z X, WANG Z J, HE Z Y, et al. Effect of particle size and microstructure on the physical properties of soybean insoluble dietary fiber in aqueous solution[J]. *Food Bioscience*, 2021, 41: 100898.
- [18] JI Y H, MAO K M, GAO J, et al. Pear pomace soluble dietary fiber ameliorates the negative effects of high-fat diet in mice by regulating the gut microbiota and associated metabolites[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 1025511.
- [19] ZHENG Y J, XU B F, SHI P Q, et al. The influences of acetylation, hydroxypropylation, enzymatic hydrolysis and crosslinking on improved adsorption capacities and *in vitro* hypoglycemic properties of millet bran dietary fibre[J]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130883.
- [20] BENITEZ V, REBOLLO-HERNANZ M, HERNANZ S, et al. Coffee parchment as a new dietary fiber ingredient: Functional and physiological characterization[J]. *Food Research International*, 2019, 122: 105–113.
- [21] CHENG L, ZHANG X M, HONG Y, et al. Characterisation of physicochemical and functional properties of soluble dietary fibre from potato pulp obtained by enzyme-assisted extraction[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 101: 1004–1011.
- [22] LÓPEZ-VARGAS J H, FERNÁNDEZ-LÓPEZ J, PÉREZ-ÁLVAREZ J A, et al. Chemical, physico-chemical, technological, antibacterial and antioxidant properties of dietary fiber powder obtained from yellow passion fruit (*Passiflora edulis* var. *flavicarpa*) co-products[J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 756–763.
- [23] 杨翠凤, 滕峥, 吴观英, 等. 超声波辅助酶法提取百香果籽可溶性膳食纤维[J]. *湖南农业科学*, 2019(11): 90–93. [YANG C F, TENG Z, WU G Y, et al. Ultrasound assisted enzymatic extraction of soluble dietary fiber from passion fruit seeds[J]. *Hunan Agricultural Science*, 2019(11): 90–93.]
- [24] WANG K L, LI M, HAN Q Y, et al. Inhibition of α -amylase activity by insoluble and soluble dietary fibers from kiwifruit (*Actinidia deliciosa*) [J]. *Food Bioscience*, 2021, 42: 101057.
- [25] WEN Y, NIU M, ZHANG B J, et al. Structural characteris-

tics and functional properties of rice bran dietary fiber modified by enzymatic and enzyme-micronization treatments[J]. *LWT*, 2017, 75: 344–351.

[26] 周淑仪, 李敏. 百香果皮可溶性膳食纤维酶法提取及性质研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(7): 283–290. [ZHOU S Y, LI M. Enzymatic extraction and properties of soluble dietary fiber from passion fruit peel[J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(7): 283–290.]

[27] NIU Y G, FANG H C, HUO T Y, et al. A novel fat replacer composed by gelatin and soluble dietary fibers from black bean coats with its application in meatballs[J]. *LWT*, 2020, 122: 109000.

[28] SUPANCHAIYAMAT N, JETSRISUPARB K, KNIJNEN-

BURG J T N, et al. Lignin materials for adsorption: Current trend, perspectives and opportunities[J]. *Bioresource Technology*, 2019, 272: 570–581.

[29] LUO X L, WANG Q, ZHENG B D, 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.

[30] LIU C, LIN X L, WAN Z, et al. The physicochemical properties, *in vitro* binding capacities and *in vivo* hypocholesterolemic activity of soluble dietary fiber extracted from soy hulls[J]. *Food & Function*, 2016, 7(12): 4830–4840.