

## 超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮可溶性膳食纤维及其抗氧化活性分析

颜飞翔, 朱立斌, 朱 丹, 苗欣月, 牛广财, 魏文毅

### Analysis of Ultrasonic-Microwave Synergistic Enzyme Extraction of Soluble Dietary Fiber from Millet Bran and Its Antioxidant Activity

YAN Feixiang, ZHU Libin, ZHU Dan, MIAO Xinyue, NIU Guangcai, and WEI Wenyi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080297>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 黑糯玉米芯可溶性膳食纤维的提取、结构表征及抗氧化活性研究

Study on the extraction, structure characterization and antioxidant activity of the soluble dietary fiber from black glutinous corncob  
食品工业科技. 2018, 39(11): 219-224, 231

#### 红枣可溶性膳食纤维的抗氧化活性研究

Study on the antioxidant activity of soluble dietary fiber from jujube  
食品工业科技. 2017(22): 37-41

#### 超声波-微波协同提取沙棘果皮渣中可溶性膳食纤维工艺优化

Optimization of Ultrasonic-Microwave Synergistic Extraction of Soluble Dietary Fiber from Seabuckthorn Peel Residue  
食品工业科技. 2020, 41(11): 200-206, 220

#### 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

#### 超声微波辅助酶法提取黑豆皮水溶性膳食纤维及理化特性分析

Ultrasonic-microwave Assisted Enzymatic Extraction of Water-soluble Dietary Fiber from Black Soybean Hull and Its Physicochemical Properties  
食品工业科技. 2020, 41(6): 8-14

#### 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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

颜飞翔, 朱立斌, 朱丹, 等. 超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮可溶性膳食纤维及其抗氧化活性分析 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 163–172. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080297

YAN Feixiang, ZHU Libin, ZHU Dan, et al. Analysis of Ultrasonic-Microwave Synergistic Enzyme Extraction of Soluble Dietary Fiber from Millet Bran and Its Antioxidant Activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12): 163–172. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080297

· 工艺技术 ·

# 超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮可溶性膳食纤维及其抗氧化活性分析

颜飞翔<sup>1,2</sup>, 朱立斌<sup>1,2</sup>, 朱 丹<sup>3,\*</sup>, 苗欣月<sup>1,2</sup>, 牛广财<sup>1,2,\*</sup>, 魏文毅<sup>1,2</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学食品学院, 黑龙江大庆 163319;

2. 黑龙江省农产品加工工程技术研究中心, 黑龙江大庆 163319;

3. 黑龙江八一农垦大学生命科学技术学院, 黑龙江大庆 163319)

**摘 要:** 以糜子麸皮为原料, 采用超声-微波辅助酶法研究液料比、协同时间、提取温度、复合酶添加量对糜子麸皮可溶性膳食纤维 (SDF) 得率的影响。采用响应面法进行工艺优化, 并分析糜子麸皮可溶性膳食纤维的抗氧化活性。结果表明: 响应面法优化糜子麸皮 SDF 的最佳提取工艺为: 液料比为 31:1 mL/g、协同时间 21 min、提取温度 56 ℃、复合酶添加量 1.4%, 该条件下可溶性膳食纤维得率为 6.35%, 纯度为 91.27%。抗氧化活性表明, 当样品浓度为 14 mg/mL 时, 糜子麸皮 SDF 还原力为 1.219, 其对于 DPPH 自由基清除率、ABTS<sup>+</sup> 自由基清除率和羟自由基清除率的 IC<sub>50</sub> 值分别为 2.45、26.15 和 5.98 mg/mL, 说明糜子麸皮 SDF 具有较好的抗氧化活性。

**关键词:** 糜子麸皮, 可溶性膳食纤维, 超声-微波辅助酶法提取, 工艺优化, 抗氧化活性

中图分类号: TS210.9

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2022)12-0163-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021080297

本文网刊:



## Analysis of Ultrasonic-Microwave Synergistic Enzyme Extraction of Soluble Dietary Fiber from Millet Bran and Its Antioxidant Activity

YAN Feixiang<sup>1,2</sup>, ZHU Libin<sup>1,2</sup>, ZHU Dan<sup>3,\*</sup>, MIAO Xinyue<sup>1,2</sup>, NIU Guangcai<sup>1,2,\*</sup>, WEI Wenyi<sup>1,2</sup>

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

2. Agri-Food Processing and Engineering Technology Research Center of Heilongjiang Province, Daqing 163319, China;

3. College of Life Science and Technology, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** Ultrasonic-microwave synergistic enzyme method was used to study the effects of liquid-material ratio, synergistic time, extraction temperature and compound enzyme addition on the yield of soluble dietary fiber (SDF) from millet bran. Response surface methodology was used to optimize the process, and the antioxidant activity of soluble dietary fiber from millet bran were analyzed. The results showed that the optimum extraction conditions of SDF from millet bran were as follows: The liquid-material ratio was 31:1 mL/g, the synergistic time was 21 min, the extraction temperature was 56 ℃, and the compound enzyme addition was 1.4%. Under these conditions, the yield of the soluble dietary fiber was 6.35% and its purity was 91.27%. The antioxidant activity showed that when the sample concentration was 14 mg/mL, the SDF reducing power of millet bran was 1.219, and its IC<sub>50</sub> values for DPPH radical scavenging rate, ABTS<sup>+</sup> radical

收稿日期: 2021-08-26

**基金项目:** 黑龙江省优势特色学科资助项目 (编号: 黑教联 [2018] 4 号); 黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目 (YJSCX2021-Y67); 黑龙江八一农垦大学“三横三纵”平台支持计划项目 (PTJH202103)。

**作者简介:** 颜飞翔 (1995-), 女, 硕士, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: 1532906663@qq.com。

**\* 通信作者:** 朱丹 (1972-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 植物资源开发利用, Email: 623016878@qq.com。

牛广财 (1971-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: gcnui@126.com。

scavenging rate and hydroxyl radical scavenging rate were 2.45, 26.15 and 5.98 mg/mL respectively. The results indicated that the SDF from millet bran had good antioxidant activity.

**Key words:** millet bran; soluble dietary fiber; ultrasonic-microwave synergistic enzyme extraction; process optimization; antioxidant activity

糜子(*Panicum miliaceum* L.)又叫稷、黍和糜,属禾本科黍属,耐旱且生长期短,在我国华北、东北和西北等地均有栽培<sup>[1-2]</sup>。糜子麸皮是糜子加工中的副产品,在加工制米之后,糜子麸皮基本属于废弃物,没有得到充分利用,造成了资源浪费。糜子麸皮中含有丰富的天然活性成分,如酚类化合物<sup>[3]</sup>、膳食纤维、矿物质和维生素等。但是,目前国内对于糜子在食品方面的利用,主要通过与小麦粉等复配改善其加工特性,以及作为酿酒原料和地方小吃为主,相关产物的开发应用还不够,尤其缺乏对糜子副产物的深入研究<sup>[4]</sup>。膳食纤维(Dietary fiber, DF)是食物中不被人体胃肠消化酶所分解、不可消化植物成分的总称,包括水溶性膳食纤维(Soluble dietary fiber, SDF)和不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)<sup>[5]</sup>。膳食纤维因具有预防肥胖症<sup>[6]</sup>、心脑血管疾病<sup>[7]</sup>、改善肠道微环境<sup>[8]</sup>以及调节血糖及血脂水平<sup>[9-10]</sup>等诸多生理功能,成为了近年来营养学研究的热点。而可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)含量的多少对于评价膳食纤维生理功能具有重要意义,因此,对膳食纤维中 SDF 的研究有助于进一步探索膳食纤维的品质及生理功能。

关于麸皮和果渣类可溶性膳食纤维的提取方法,有酶法、化学法、发酵法、膜分离法及物理法等方法。其中,新发展出一些辅助的方法,如微波、超声、加压、超临界等物理技术<sup>[11]</sup>,将多种方法协同使用是一种高效环保的提取方式,可以结合每种方法的优点,在提高得率的同时保证其生物活性。其中,超声-微波协同提取技术日趋成熟,该技术充分利用微波的高能作用和超声波的空化作用,实现对有效成分在常压下进行充分提取<sup>[12]</sup>,在可溶性膳食纤维的提取方面得到了很好的应用。例如,董玉玮等<sup>[13]</sup>分别采用超声法和超声结合酶法对红薯渣中 SDF 进行提取,结果表明,超声水提取红薯渣中 SDF 提取率为 5.64%;而采用超声结合酶法提取最佳工艺条件为加酶量 1.5%、料液比 1:30(g/mL)、时间 20 min、功率 100 W,此时,红薯渣中 SDF 提取率为 7.29%,其对羟基和超氧自由基清除率的  $IC_{50}$  值分别为 3.94 和 0.35 mg/mL。唐小闲等<sup>[14]</sup>采用超声-微波辅助酶法对莲藕中膳食纤维进行提取,得到最佳工艺为:料液比 1:13(g/mL)、超声功率 300 W、超声时间 15 min、纤维素酶添加量 0.6%、酶解温度 60 ℃,该条件下膳食纤维提取率为 36.83%。吴俊男等<sup>[15]</sup>采用微波-酶法对小麦麸皮中可溶性膳食纤维进行处理并测定其抗氧化活性,在微波功率 280 W,微波时间 90 s,酶添加量 1.5%,酶解时间 20 min 的条件下处理的小麦麸

皮 SDF,其 DPPH 自由基清除率约为 70%。由此可见,采用超声、微波和酶法相结合的方法对膳食纤维进行提取,是一种高效简洁的方法,且提取的样品具有较好的生物活性。

目前,尚未有采用超声-微波辅助酶法对糜子麸皮中可溶性膳食纤维进行研究。本研究以糜子麸皮为原料,采用超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮可溶性膳食纤维,并且对其抗氧化活性进行分析,以期对糜子麸皮膳食纤维的开发利用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

糜子麸皮 黑龙江省肇源县产龙黍 23 品种,砻米后的副产物,其中总膳食纤维含量 36.44%,蛋白含量 10.1%,灰分含量 15.4%;纤维素酶 Celluclast 1.5L(酶活 117.4 U/mL)、木聚糖酶 shearzyme 500L(酶活 500 FXU (S)/g)、高温  $\alpha$  淀粉酶 Termamyl SC(酶活 120 KNU/g)、碱性蛋白酶 Alcalase 2.4FG(酶活 2.4 AU/g) 诺维信(中国)生物技术有限公司;1,1-二苯基-2-苦肼基自由基(DPPH) 梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(ABTS) 上海源叶生物科技有限公司;无水乙醇、维生素 C、过硫酸钾、过氧化氢、无水碳酸钠、硫酸亚铁等 均为国产分析纯。

GY-FS-02 多功能高速粉碎机 江西赣云食品机械有限公司;EX324 电子分析天平 奥豪斯仪器(上海)有限公司;XH-300A 型电脑微波超声波合成/萃取仪 北京祥鹄科技发展有限公司;L420 台式低速离心机 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;ALPHA 冷冻干燥机 德国 Christ 公司;RE 3000 A 旋转蒸发仪 上海亚荣生化仪器厂;UV-1100 紫外可见分光光度计 上海凌析达仪器;TECAN-sunrise 酶标仪 奥地利 Tecan 公司;SX2-8-13NP 马弗炉 上海一恒科学仪器有限公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 复合酶法提取糜子麸皮 SDF

1.2.1.1 制备工艺 糜子麸皮经粉碎,正己烷脱脂,采用 1% 的耐高温  $\alpha$ -淀粉酶,调节 pH 为 6.5,在 95 ℃ 反应 30 min 脱除淀粉,采用 2% 碱性蛋白酶,调节 pH 为 8.0,在 50 ℃ 反应 30 min 脱除蛋白,100 ℃ 沸水浴 10 min 灭酶,55 ℃ 烘干后,备用。固定液料比 30:1 mL/g,复合酶(纤维素酶:木聚糖酶为 1:1)添加量 1.4%,调节酶解温度、酶解时间、酶解 pH、复合酶比例进行酶解,结束后 4000 r/min 离心 15 min 收集上清液,用旋转蒸发仪浓缩至原体积的 1/3;用



4 倍体积的无水乙醇醇沉 12 h; 收集沉淀, 冷冻干燥后, 加适量水复溶后配成 5% 的溶液, 4 ℃ 下蒸馏水透析(3500 Da)48 h, 每 8 h 换一次水, 冷冻干燥后, 得到糜子麸皮可溶性膳食纤维。

1.2.1.2 单因素实验 以液料比为 30:1 mL/g, 酶解时间 4 h, 酶解温度 55 ℃, 酶解 pH 为 5.0, 复合酶添加量为 1.4%, 纤维素酶:木聚糖酶比例为 1:1 为固定条件, 考察复合酶(纤维素酶:木聚糖酶)比例(2:1、1.5:1、1:1、1:1.5、1:2)、酶解 pH(4.0、4.5、5.0、5.5、6.0)、酶解时间(1、2、3、4、5 h)、酶解温度(45、50、55、60、65 ℃)对糜子麸皮 SDF 得率的影响。

## 1.2.2 超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮 SDF

1.2.2.1 提取工艺 调节不同液料比、提取温度、协同时间、超声功率和微波功率进行超声-微波协同提取, 在超声波和微波的共同作用结束后, 调节 pH 为 5.0, 然后调节复合酶(纤维素酶:木聚糖酶为 1:1)添加量, 于 55 ℃ 下酶解 4 h。结束后 4000 r/min 离心 15 min 收集上清液, 之后步骤同 1.2.1.1 制备工艺中的方法。

1.2.2.2 单因素实验 以液料比 30:1 mL/g, 超声功率 250 W, 微波功率 200 W, 提取温度 50 ℃, 复合酶添加量 1.2%, 协同时间 20 min 为固定条件, 考察液料比(15:1、20:1、25:1、30:1、35:1 mL/g)、协同时间(10、20、30、40、50 min)、提取温度(40、45、50、55、60 ℃)、超声功率(150、200、250、300、350 W)、微波功率(100、200、300、400、500 W)、复合酶添加量(0.8%、1.0%、1.2%、1.4%、1.6%)对糜子麸皮中 SDF 得率的影响。

1.2.3 超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮 SDF 响应面试验设计 在单因素实验的基础上, 以糜子麸皮 SDF 得率(Y)为响应值, 根据 Box-Behnken 试验设计原理, 选取 A 液料比、B 协同时间、C 提取温度、D 复合酶添加量 4 个因素, 优化超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮 SDF 的工艺参数。响应面试验设计见表 1。

表 1 响应面试验因素与水平表  
Table 1 Response surface experimental factors and levels

水平	因素			
	A液料比 (mL/g)	B协同时间 (min)	C提取温度 (℃)	D复合酶添加量 (%)
1	25:1	10	50	1.2
0	30:1	20	55	1.4
-1	35:1	30	60	1.6

1.2.4 计算方法 糜子麸皮 SDF 得率的计算, 按照公式(1)进行计算。

$$\text{得率SDF}(\%) = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

1.2.5 糜子麸皮中总膳食纤维及灰分的测定 总膳

食纤维的测定参照国标 GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维的测定》; 灰分的测定参照国标 GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定》。

1.2.6 糜子麸皮 SDF 中蛋白含量的测定 参照杨静等<sup>[16]</sup>的方法, 采用考马斯亮蓝法测定糜子麸皮 SDF 中蛋白含量, 以牛血清白蛋白为标准蛋白溶液, 绘制得标准曲线:  $y=0.0057x+0.0207$ ,  $R^2=0.9979$ 。

## 1.2.7 糜子麸皮 SDF 体外抗氧化性实验

1.2.7.1 DPPH 自由基清除率的测定 采用李治龙等<sup>[17]</sup>的方法略有改动。配制 0.5 mmol/mL 的 DPPH 溶液 100 mL。取 2 mL 稀释 10 倍后的样液, 加入 0.5 mL 的 DPPH 溶液, 混合均匀后于 37 ℃ 下避光 20 min, 用无水乙醇调零, 在 517 nm 条件下测定其吸光度  $A_i$ ; 用同体积的无水乙醇代替样品溶液, 测其吸光值为  $A_c$ , 用同体积的无水乙醇代替 DPPH 溶液, 测其吸光值为  $A_j$ 。按照(2)式计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \frac{A_c - (A_i - A_j)}{A_c} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

1.2.7.2 ABTS<sup>+</sup>自由基清除率的测定 参照宋艺君等<sup>[18]</sup>的方法, 略有修改。分别配制 50 mL 的 7 mmol/L 的 ABTS 溶液和 2.45 mmol/L 的  $K_2S_2O_8$  溶液, 之后将两种溶液 1:1 混合后于室温下暗处静置一夜, 即得储备液。然后用无水乙醇稀释到其吸光值在  $0.7 \pm 0.2$ , 得到 ABTS 工作液。取 20  $\mu$ L 不同浓度的糜子麸皮 SDF 于试管中, 加入 2 mL 的 ABTS 工作液, 混匀, 室温下静置 10 min, 用蒸馏水调零, 在 734 nm 处测其吸光度值为  $A_i$ , 用同体积的蒸馏水代替样品, 测定吸光值为  $A_0$ 。按照式(3)计算 ABTS 自由基清除率。

$$\text{ABTS}^+\text{自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_i}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式(3)}$$

1.2.7.3 羟自由基清除率的测定 按照董佳萍等<sup>[19]</sup>的方法进行测定。取 0.1 mL 样品, 加入 2 mL 6 mmol/L 的过氧化氢溶液以及  $FeSO_4$  溶液, 摇匀静置 10 min 后, 加入 2 mL 6 mmol/L 的水杨酸溶液, 摇匀, 放置 37 ℃ 恒温水浴中 1 h, 在波长 510 nm 下测定吸光度  $A_1$ 。以去离子水为参比溶液, 测定吸光度  $A_0$ , 以同体积的蒸馏水代替水杨酸溶液, 测定吸光度  $A_2$ 。按式(4)计算羟自由基清除能力。

$$\text{羟自由基清除率}(\%) = \frac{A_0 - (A_1 - A_2)}{A_0} \times 100 \quad \text{式(4)}$$

1.2.7.4 还原力的测定 按照程宏桢等<sup>[20]</sup>的方法进行测定。精确吸取不同浓度 2.0 mL 的糜子麸皮 SDF 溶液, 分别加入 0.2 mo L/L pH=6.6 的磷酸盐缓冲液 2.5 mL 和 1% 的铁氰化钾溶液 2.5 mL, 振荡混匀, 50 ℃ 水浴 30 min, 之后迅速冷却, 加入 10% 三氯乙酸溶液 2.5 mL, 然后在 4000 r/min 条件下离心

10 min, 取 2.5 mL 上清液, 加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.5 mL 的 0.1% 三氯化铁溶液, 振荡混匀, 以蒸馏水为参比, 在波长 700 nm 处测定吸光度值。

### 1.3 数据处理

所有实验都进行三次重复, 实验数据采用  $\bar{x} \pm s$  表示, 应用 Design-Expert 8.0.6、Origin 8.5 和 SPSS 25.0 软件进行作图和数据处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 复合酶法提取糜子麸皮 SDF 单因素实验结果

**2.1.1 复合酶比例对糜子麸皮 SDF 得率的影响** 由图 1 可知, 当木聚糖酶添加量逐渐大于纤维素酶添加量时, SDF 得率明显升高, 当木聚糖酶: 纤维素酶为 1:1 时, 得率最大, 而当木聚糖酶比例超过纤维素酶时, 又呈下降趋势。这可能是由于两种酶的作用机制的差异而导致的。由于纤维素酶可以把纤维素水解为半纤维素, 而木聚糖酶则作用于半纤维素。因此, 当木聚糖酶量升高时, 把更多的半纤维素转化为可溶性的, 从而使 SDF 得率升高<sup>[21]</sup>, 但当木聚糖酶含量过高时, 可溶性半纤维素降解为小分子低聚糖的速度超过了其生成速度, 从而导致 SDF 得率下降<sup>[22]</sup>, 因此选择纤维素酶: 木聚糖酶为 1:1 时最宜, 此时糜子麸皮 SDF 得率为 2.60%。

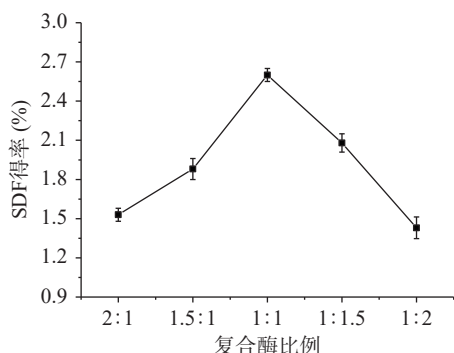


图1 复合酶比例对糜子麸皮 SDF 得率的影响  
Fig.1 Effect of compound enzyme ratio on SDF yield in millet bran

**2.1.2 酶解 pH 对糜子麸皮 SDF 得率的影响** 从图 2 中结果可知, SDF 得率随着 pH 的升高而不断增加, 在 pH 5.0 时达到最高值 2.74%, 但 pH 大于 5.0 时, SDF 得率逐渐减小。原因是酶与底物的结合受反应体系 pH 值影响, 先随着 pH 的增大, 逐渐达到酶的最适 pH<sup>[23]</sup>, 酶促反应速率也达到最大值。超过其最适 pH 后, 酶的活性降低, 从而影响酶与底物的结合, 使酶解反应速率变慢, SDF 得率随之下降, 因此 pH 5.0 是最适宜的酶解 pH, 此时糜子麸皮 SDF 得率为 2.74%。

**2.1.3 酶解时间对糜子麸皮 SDF 得率的影响** 从图 3 中结果可知, SDF 得率随着时间的延长而明显增加, 在 4 h 时达到最高值 2.58%, 但超过 4 h 时 SDF 得率逐渐降低。原因是 SDF 主要成分是果胶, 而果胶中的原果胶是不溶于水的物质, 随着延长酶解

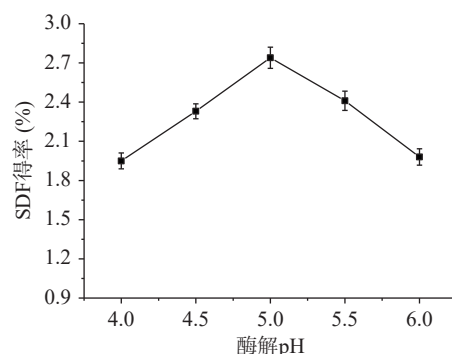


图2 酶解 pH 对糜子麸皮 SDF 得率的影响  
Fig.2 Effect of enzymatic hydrolysis pH on SDF yield in millet bran

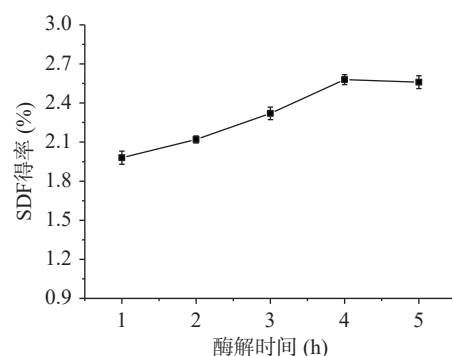


图3 酶解时间对糜子麸皮 SDF 得率的影响  
Fig.3 Effect of enzymatic hydrolysis time on SDF yield in millet bran

时间, 利于糜子麸皮中果胶质充分酶解, 但酶解时间过长, 果胶被分解成-1,4-D 聚半乳糖醛酸, 不能被乙醇沉淀出来<sup>[23-24]</sup>, 从而其得率降低。因此确定最适酶解时间是 4 h, 此时糜子麸皮 SDF 得率为 2.58%。

**2.1.4 酶解温度对糜子麸皮 SDF 得率的影响** 从图 4 中结果可知, SDF 得率先随着温度的升高而明显增加, 在温度 55 °C 时达到最大值 2.55%, 但温度继续升高, SDF 得率逐渐下降。原因是适宜的温度使纤维的结构松散, 暴露出更多的侧链基团, 增大了底物与酶的接触面积, 促进酶解反应。温度过高时, 会破坏 SDF 的主要成分果胶和  $\beta$ -葡聚糖的分子结构<sup>[25]</sup>, 从而降低 SDF 得率。也可能由于温度过高使酶

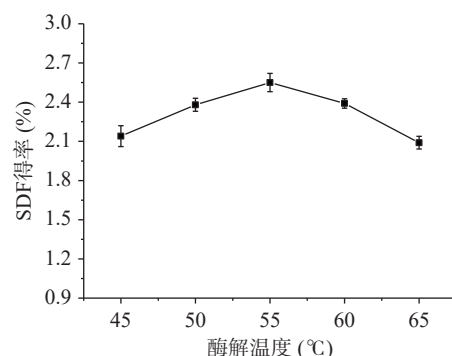


图4 酶解温度对糜子麸皮 SDF 得率的影响  
Fig.4 Effect of enzymatic hydrolysis temperature on SDF yield in millet bran

的活性降低,反应速率也会随之减慢。因此确定最适酶解温度为 55 ℃,此时糜子麸皮 SDF 得率为 2.55%。

## 2.2 超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮 SDF 单因素实验结果

**2.2.1 液料比对糜子麸皮 SDF 得率的影响** 由图 5 中液料比的变化对糜子麸皮 SDF 得率的影响可知,随着液料比的增大,糜子麸皮 SDF 的得率也随之增加,当液料比为 30:1 mL/g 时,得率达到最大(6.02%)。这是因为在一定浓度范围内,溶剂可以有效地吸收微波,使物料适度膨胀,有利于增加接触物料和溶剂之间的表面积,从而提高可溶性膳食纤维的溶出<sup>[26]</sup>。当液料比高于 30:1 mL/g 时,得率开始下降。这可能是因为,随着溶剂用量的持续增加,微波能对物料的作用力减弱,使得溶出的 SDF 开始减少<sup>[27]</sup>。Ying 等<sup>[28]</sup> 研究认为,可能是高比例的溶剂与溶质比,延长了溶质向内部组织的扩散距离,致使 SDF 含量降低。因此,选择液料比为 30:1 mL/g,此时糜子麸皮 SDF 得率为 6.02%。

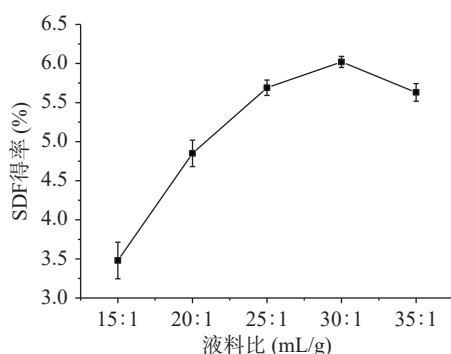


图 5 液料比对糜子麸皮 SDF 得率的影响

Fig.5 Effect of liquid-solid ratio on SDF yield in millet bran

**2.2.2 协同时间对糜子麸皮 SDF 得率的影响** 由图 6 中协同时间对糜子麸皮 SDF 得率的影响曲线可知,糜子麸皮 SDF 得率在 20 min 时候达到最大值 6.17%,之后随着提取时间的延长,则呈下降趋势。超声波增强传质的作用使 SDF 更容易释放和扩散到水中,同时在微波的作用下,糜子麸皮可以吸收微波的能量,热量的积累进一步促进 SDF 溶解到溶液中,但是时间过长可能导致 SDF 降解,导致提取率降

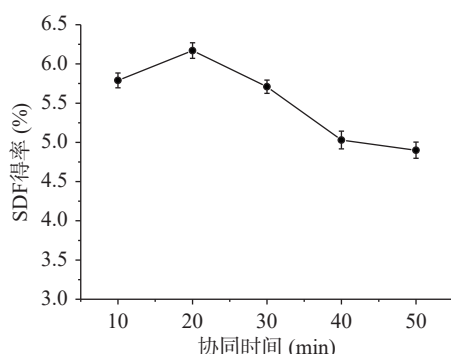


图 6 协同时间对糜子麸皮中 SDF 得率的影响

Fig.6 Effect of synergistic time on SDF yield in millet bran

低<sup>[29]</sup>。因此,选择协同时间为 20 min,此时糜子麸皮 SDF 得率为 6.17%。

**2.2.3 提取温度对糜子麸皮 SDF 得率的影响** 图 7 反映了提取温度对糜子麸皮 SDF 得率的影响,随着提取温度的升高,糜子麸皮 SDF 得率呈现先增加后降低的趋势。这可能是因为随着温度的升高,SDF 在水中的溶解度增大,从而使 SDF 得率增大。升温导致 SDF 在水中的溶解度增大,但过高的温度会使其发生降解,故当温度超过 50 ℃ 时,得率降低<sup>[30]</sup>。也有研究表明,可能是高温和超声的双重作用导致 SDF 的结构破坏,进而造成得率的下降<sup>[31]</sup>。因此,选择提取温度为 50 ℃,此时糜子麸皮 SDF 得率为 5.73%。

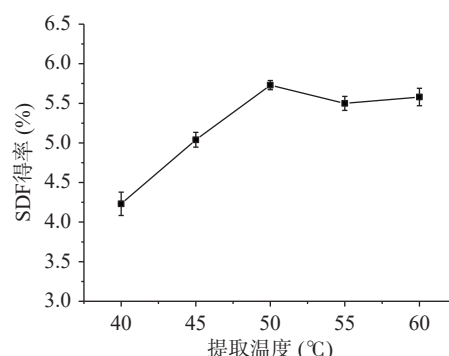


图 7 提取温度对糜子麸皮中 SDF 得率的影响

Fig.7 Effect of extraction temperature on SDF yield in millet bran

**2.2.4 超声功率对糜子麸皮 SDF 得率的影响** 由图 8 可知,随着超声功率增加,膳食纤维提取率先快速升高后又快速降低。在超声功率 250 W 时,膳食纤维提取率最大,为 5.71%。主要是超声波能在物料内部产生振动,超声功率较小时对植物细胞和分子间的作用较小,超声功率增大时,空化效应更强烈<sup>[32]</sup>,膳食纤维的提取率增大,但功率过大时致使膳食纤维结构破坏,提取率下降。由于超声功率在 250 W 时已经达到较高的得率,因此,选择 250 W 为固定的超声功率条件,进行后续响应面实验。

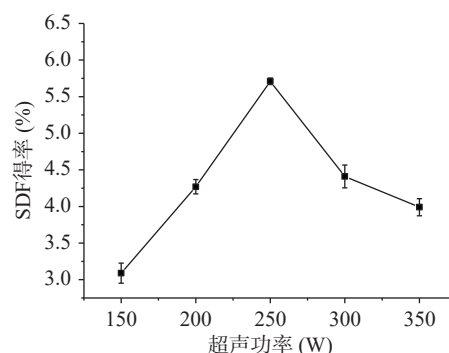


图 8 超声功率对糜子麸皮中 SDF 得率的影响

Fig.8 Effect of ultrasonic power on SDF yield in millet bran

**2.2.5 微波功率对糜子麸皮 SDF 得率的影响** 由图 9 可知,随着微波功率的增加,糜子麸皮 SDF 的得率增加,当微波功率为 200 W 时,得率为最高值 6.04%,

这可能是由于微波的热效应导致细胞破裂,有利于 SDF 进入溶剂中<sup>[26]</sup>,同时,纤维素、半纤维素等粗纤维成分被选择性加热,水解成低聚寡糖<sup>[33]</sup>,从而使糜子麸皮 SDF 增加,但是过高的微波功率会导致膳食纤维发生降解,从而导致产率降低。本实验中微波功率变化不大,因此,选择 200 W 为微波固定的功率条件。

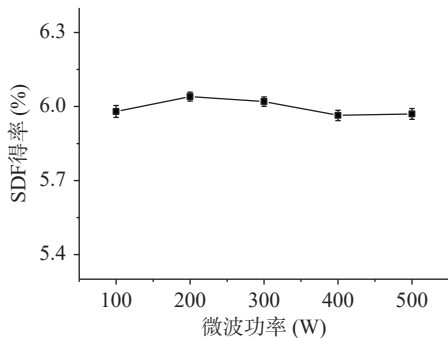


图 9 微波功率对糜子麸皮中 SDF 得率的影响

Fig.9 Effect of microwave power on SDF yield in millet bran

### 2.2.6 复合酶添加量对糜子麸皮 SDF 得率的影响

在图 10 所示的复合酶添加量对糜子麸皮 SDF 得率的曲线中,随着复合酶添加量的增加,糜子麸皮 SDF 得率呈现先增加后下降的趋势。当酶促反应中酶的浓度过低,会导致酶解不完全,从而使得可溶性膳食纤维含量较低<sup>[34]</sup>。在加酶量为 1.4% 时,可溶性膳食纤维得率最高,为 5.47%。当复合酶添加量低于 1.4% 的时候,复合酶能将不溶性膳食纤维转化成可溶性膳食纤维。但当酶的浓度过高时,会使得部分膳食纤维被水解成不能被乙醇沉淀的低聚糖,反而降低其得率<sup>[13]</sup>。因此,选择复合酶添加量为 1.4%,此时糜子麸皮 SDF 得率为 5.47%。

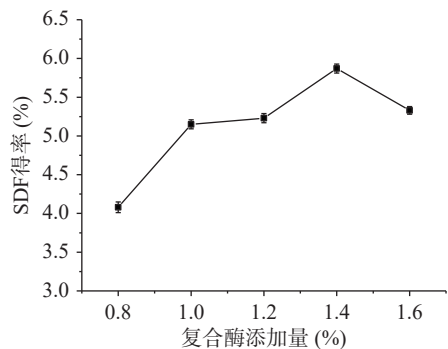


图 10 复合酶添加量对糜子麸皮中 SDF 得率的影响

Fig.10 Effect of compound enzyme addition on SDF yield in millet bran

## 2.3 超声-微波辅助酶法提取糜子麸皮 SDF 响应面优化

**2.3.1 响应面试验结果** 按照选取的 A 液料比、B 协同时间、C 提取温度、D 复合酶添加量,进行四因素三水平中心组合实验,结果见表 2。

**2.3.2 回归方程的建立及方差分析** 利用 Design-Expert 8.0.6 数据分析软件对表 3 中数据进行处理,经回归拟合后得到二次回归方程:  $Y=6.33+0.30A+0.24B+0.20C+0.096D-0.10AB-0.060AC-0.10AD-$

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Program and results of response surface experiment

实验号	A	B	C	D	得率(%)
1	-1	0	1	0	4.91
2	0	1	-1	0	5.01
3	0	-1	1	0	4.90
4	0	1	0	1	4.88
5	0	0	0	0	6.32
6	0	0	-1	1	4.50
7	0	-1	-1	0	4.32
8	0	-1	0	-1	4.20
9	0	0	1	1	4.80
10	0	1	1	0	5.20
11	0	-1	0	1	4.39
12	-1	0	0	1	4.52
13	-1	-1	0	0	4.29
14	1	-1	0	0	5.08
15	0	0	0	0	6.32
16	0	0	0	0	6.36
17	0	1	0	-1	4.68
18	1	1	0	0	5.37
19	-1	0	0	-1	4.13
20	1	0	-1	0	5.10
21	1	0	0	-1	4.93
22	0	0	-1	-1	4.21
23	-1	1	0	0	4.98
24	1	0	1	0	5.38
25	-1	0	-1	0	4.39
26	0	0	1	-1	4.70
27	0	0	0	0	6.34
28	1	0	0	1	4.91
29	0	0	0	0	6.33

$$0.097BC+2.500E-003BD-0.048CD-0.66A^2-0.75B^2-0.73C^2-1.05D^2。$$

对模型方程进行方差分析,分析结果见表 3。

由表 3 可知,模型  $P<0.0001$ ,极显著;失拟项  $P=0.9988>0.05$ ,不显著,说明本实验的二次回归方程

表 3 回归模型的方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression model

差异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	4.67	14	0.33	3389.49	<0.0001	**
A	1.05	1	1.05	10667.17	<0.0001	**
B	0.72	1	0.72	7316.23	<0.0001	**
C	0.46	1	0.46	4714.29	<0.0001	**
D	0.11	1	0.11	1119.41	<0.0001	**
AB	0.04	1	0.04	406.29	<0.0001	**
AC	0.014	1	0.014	146.26	<0.0001	**
AD	0.042	1	0.042	426.86	<0.0001	**
BC	0.038	1	0.038	386.23	<0.0001	**
BD	2.50E-05	1	2.50E-05	0.25	0.6222	
CD	9.03E-03	1	9.03E-03	91.67	<0.0001	**
A <sup>2</sup>	0.16	1	0.16	1667.37	<0.0001	**
B <sup>2</sup>	0.39	1	0.39	3965.49	<0.0001	**
C <sup>2</sup>	0.34	1	0.34	3495.40	<0.0001	**
D <sup>2</sup>	1.97	1	1.97	20044.98	<0.0001	**
残差	1.38E-03	14	9.85E-05			
失拟	2.58E-04	10	2.58E-05	0.092	0.9988	
纯误差	1.12E-03	4	2.80E-04			
总变异	4.67	28				

注: \*\*表示相关性极显著( $P<0.01$ ); \*表示显著( $P<0.05$ )。



的结果可靠,可以对响应值进行预测;决定系数  $R^2=0.9999$ , 校正系数  $R_{Adj}^2=0.9998$ , 能够解释实验 99.98% 的响应值变异,表明理论值与实际值拟合良好,可用于糜子麸皮 SDF 提取工艺的分析 and 优化。由  $F$  值可知,各因素对糜子麸皮 SDF 得率的影响大小顺序为液料比(A)>协同时间(B)>提取温度(C)>复合酶添加量(D)。

**2.3.3 响应面分析** 响应曲面反映了当液料比、协同时间、提取温度以及复合酶添加量等四个因素的任意两个变量取零点水平时,其他两个因素的交互作用对糜子麸皮 SDF 得率的影响。其相应曲面坡度越陡峭,等高线越接近于椭圆形,说明各因素之间交互作用越显著<sup>[35]</sup>。

通过响应面图 11,同时结合表 3 可知,在所有交互项中,除 BD 之间交互作用对响应值的影响不显著

之外,其它因素之间的交互作用对响应值的影响均极显著( $P<0.01$ )。其中,AD 交互作用对响应值的影响最强,表明液料比和复合酶添加量对糜子麸皮 SDF 得率的影响最为明显。随着液料比和复合酶添加量的增加,糜子麸皮 SDF 得率先增加后减少,且液料比相应曲面较陡,其影响程度大于复合酶添加量;当液料比为 30:1 mL/g,复合酶添加量为 1.4% 时,为临界最佳参数;当提取温度和协同时间同时增加时,糜子麸皮 SDF 得率先增加后减少,协同时间曲面陡于提取温度,表明协同时间比超声功率影响大。因此,在实际操作中,应充分考虑各因素的交互影响,慎重控制各因素的用量,以保证糜子麸皮 SDF 的得率。

**2.3.4 验证性实验** 由二次回归方程预测糜子麸皮 SDF 的最佳提取条件为:液料比 31:1 mL/g,协同时间 21 min,提取温度 56 °C,复合酶添加量 1.4%,此

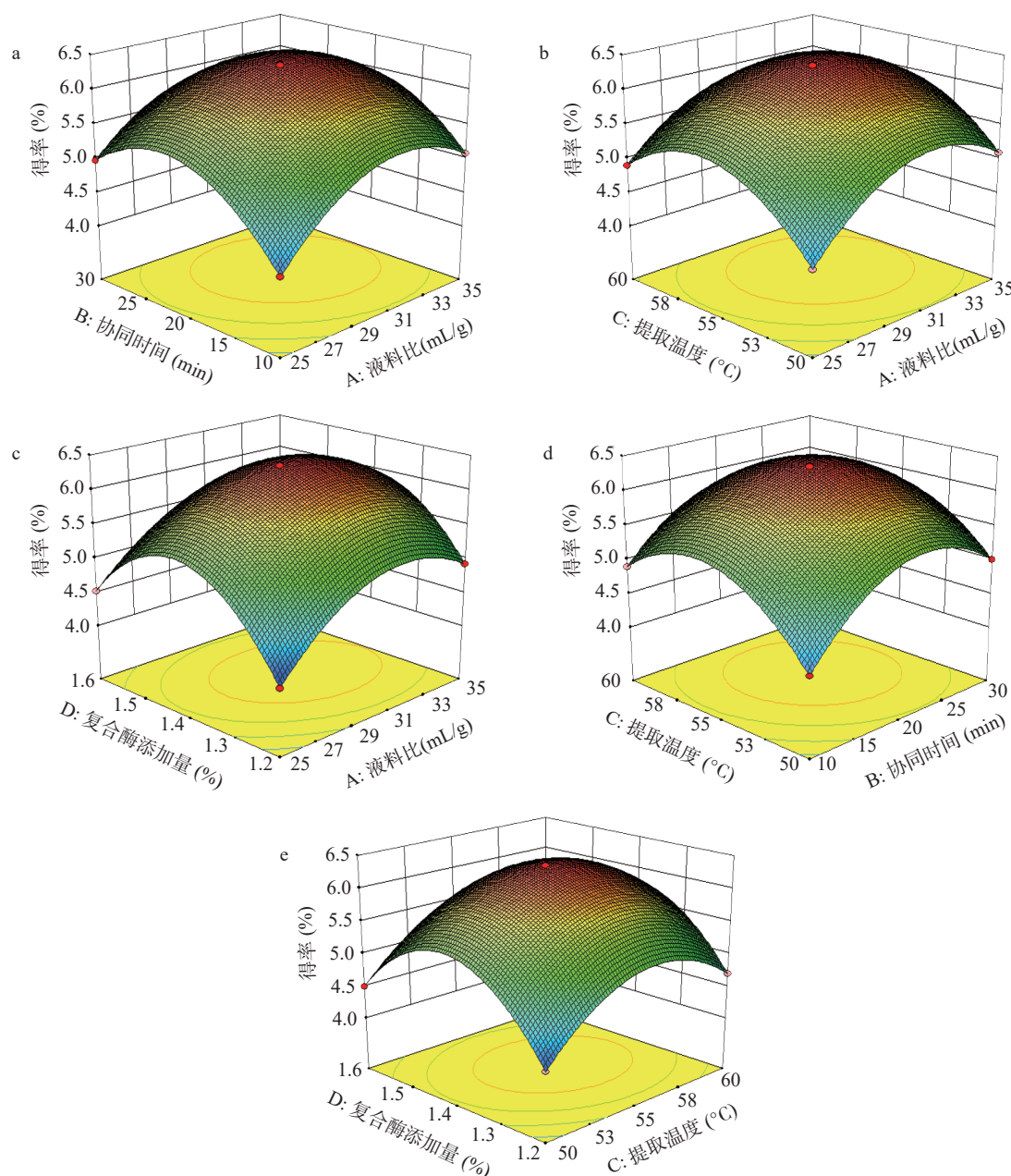


图 11 各因素对糜子麸皮 SDF 得率的交互作用

Fig.11 Interaction of various factors on SDF yield of millet bran



条件下其 SDF 得率的理论预测值为 6.39%。为验证上述结果的可靠性和稳定性,采用液料比 31:1 mL/g,协同时间 21 min,提取温度 56 ℃,复合酶(纤维素酶:木聚糖酶为 1:1)的添加量 1.4%,pH5.0,于 55 ℃下酶解 4 h。经过 3 次实验证实,在上述条件下糜子麸皮 SDF 得率为 6.35%±0.05%,与预测的理论值误差较小。说明实验结果与模型符合良好,可以用该模型对糜子麸皮中 SDF 的得率进行预测。同时,对醇沉后的样品进行透析和冷冻干燥,计算得到样品中所

含的 SDF 含量为 91.27%,纯度较高。

## 2.4 糜子麸皮 SDF 体外清除自由基的能力

由图 12 可以看出,在实验浓度范围内,糜子麸皮 SDF 抗氧化能力和浓度呈现一定的量效关系,即随着糜子麸皮 SDF 浓度的增大,其抗氧化效果也而逐步增强,特别是对于 DPPH 自由基和羟自由基有较好的清除能力。当糜子麸皮 SDF 样品质量浓度达 14 mg/mL 时,对 DPPH 自由基清除率为 83.65%,低于 1 mg/mL 的  $V_C$  清除率(95.40%),通过 SPSS25.0 分析,其  $IC_{50}$  值为 2.45 mg/mL。对于羟自由基清除能力来说,当样品质量浓度小于 6 mg/mL 时,其清除能力随样品浓度升高而明显加强;当样品质量浓度达 14 mg/mL 时,对羟自由基清除率达到最大,为 81.48%,低于 1 mg/mL 的  $V_C$  清除率(92.97%),其  $IC_{50}$  值为 5.98 mg/mL。糜子麸皮 SDF 的还原力以及对于  $ABTS^+$  自由基的清除能力较弱,当样品浓度达 14 mg/mL 时,其还原力和对于  $ABTS^+$  自由基的清除率分别为 1.219 和 31.29%,均远远低于 1 mg/mL 的  $V_C$  抗氧化能力(1.422 和 94.12%), $ABTS^+$  自由基的  $IC_{50}$  值为 26.15 mg/mL。由此可以看出,糜子麸皮 SDF 对 DPPH 自由基和羟自由基的清除能力较强。

## 3 结论

将超声-微波辅助酶法应用到糜子麸皮可溶性膳食纤维的提取中,利用响应面法优化得出其最佳提取工艺条件为:液料比为 31:1 mL/g、协同时间 21 min、提取温度 56 ℃、复合酶添加量 1.4%,该条件下糜子麸皮 SDF 得率为 6.35%。抗氧化活性表明,当样品浓度为 14 mg/mL 时,糜子麸皮 SDF 的还原力为 1.219,其对于 DPPH 自由基清除率、 $ABTS^+$  自由基清除率和羟自由基清除率的  $IC_{50}$  值分别为 2.45、26.15 和 5.98 mg/mL,说明糜子麸皮 SDF 有一定的抗氧化活性。该研究结果为糜子麸皮可溶性膳食纤维的提取提供依据,为后续应用提供了理论依据。

## 参考文献

- [1] 柴岩,万富世.中国小杂粮产业发展报告[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:3. [CHAI Y, WAN F S. Report on the development of small grain industry in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007: 3.]
- [2] 王振,褚敏哲,薛海波,等.超声辅助提取糜子皮多酚工艺条件优化[J].保鲜与加工,2016,16(5):41-44,48. [WANG Z, CHU M Z, XUE H B, et al. Optimization of ultrasonic assisted-extraction of polyphenols from prosomillet pericarp[J]. Storage and Process, 2016, 16(5): 41-44,48.]
- [3] 王振,褚敏哲,薛雅荣,等.糜子皮中多酚抗氧化活性研究[J].食品研究与开发,2016,37(19):5-8. [WANG Z, CHU M H, XUE R Y, et al. Study on antioxidant activities of polyphenol from prosomillet pericarp[J]. Food Research and Development, 2016, 37(19): 5-8.]
- [4] 申瑞玲,马玉玲,杜文娟,等.糜子的营养生理功能特性及产品开发现状[J].粮食与油脂,2017,30(1):9-12. [SHEN R L,

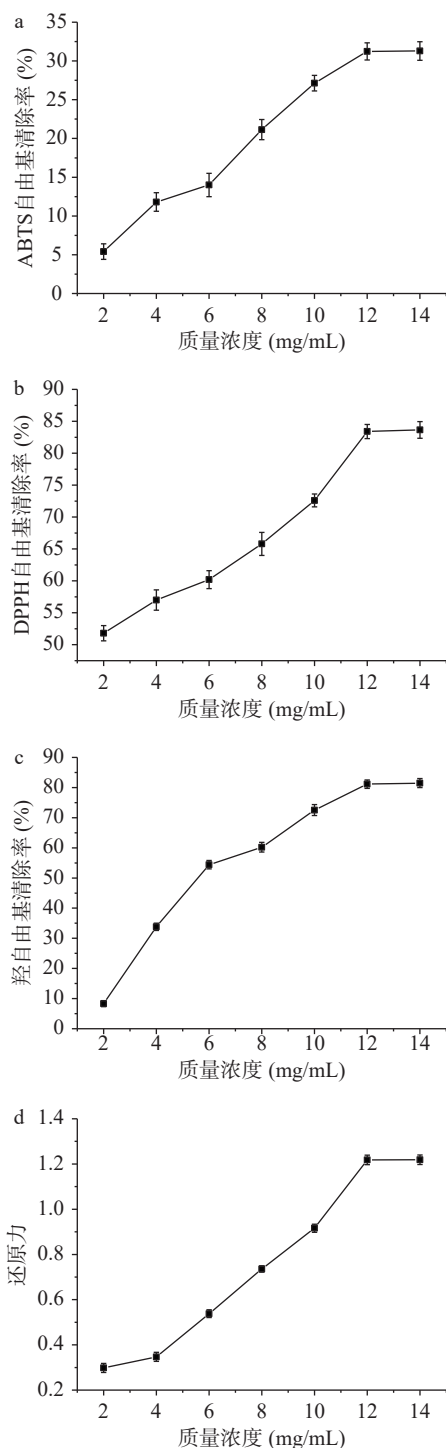


图 12 糜子麸皮 SDF 的体外抗氧化能力

Fig.12 Anti-oxidant capacity of millet bran SDF from millet *in vitro*

- MA Y L, DU W J, et al. Nutrition and physiological functional properties and food processing of proso millet[J]. *Cereals & Oils*, 2017, 30(1): 9–12. ]
- [ 5 ] CHAU C F, CHEN C H, LEE M H. Comparison of the characteristics, functional properties, and *in vitro* hypoglycemic effects of various carrot insoluble fiber-rich fractions[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2004, 37(2): 155–160. ]
- [ 6 ] 白晓州, 张猛飞. 蒸汽爆破对沙棘果渣可溶性膳食纤维性质影响[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(7): 34–39. [ BAI X Z, ZHANG Y F. Effects of steam explosion on properties of soluble dietary fiber from seabuckthorn pomace[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(7): 34–39. ]
- [ 7 ] YAN J K, WU L X, CAI W D, et al. Subcritical water extraction-based methods affect the physicochemical and functional properties of soluble dietary fibers from wheat bran[J]. *Food Chemistry*, 2019(298): 124987–124996. ]
- [ 8 ] 宁建红, 张杰, 李霞. 膳食纤维的生理功能、制备方法和改性技术的研究进展[J]. *中国食物与营养*, 2019, 25(1): 43–45. [ NING J H, ZHANG J, LI X. Research progress on functional activity, preparation process, and modification technology of dietary fiber[J]. *Food and Nutrition in China*, 2019, 25(1): 43–45. ]
- [ 9 ] 张博华, 张明, 杨立风, 等. 膳食纤维的提取及其在食品中的应用研究[J]. *中国果菜*, 2019, 39(4): 1–5. [ ZHANG B H, ZHANG M, YANG L F, et al. Research progress of dietary fiber extraction and its application in food industry[J]. *China Fruit & Vegetable*, 2019, 39(4): 1–5. ]
- [ 10 ] DI L, J A L, M E S, et al. Production of dietary fibers from sugarcane bagasse and sugarcane tops using microwave-assisted alkaline treatments[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019(135): 159–169. ]
- [ 11 ] 朱广成, 杨慧, 路风银, 等. 超声辅助酶法提取绿芦笋可溶性膳食纤维工艺条件优化[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(20): 130–136. [ ZHU G C, YANG H, LU F Y, et al. Optimization of ultrasonic assisted enzymatic extraction of soluble dietary fiber from green asparagus[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(20): 130–136. ]
- [ 12 ] 周伟, 于笛, 迟治平, 等. 超声微波协同萃取紫丁香叶总黄酮工艺及其稳定性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2018(8): 111–119. [ ZHOU W, YU D, CHI Z P, et al. Study on ultrasonic-microwave synergistic extraction process and stability of total flavonoids from syringa oblata leaves[J]. *China Food Additives*, 2018(8): 111–119. ]
- [ 13 ] 董玉玮, 苗敬芝, 陈尚龙. 超声结合酶法提取红薯渣中可溶性膳食纤维及功能性研究[J]. *食品工业*, 2014, 35(12): 82–85. [ DONG Y W, MIAO J Z, CHEN S L. Research on ultrasonic-enzymatic extraction and functionality of water-soluble dietary fiber of sweet potato waste[J]. *The Food Industry*, 2014, 35(12): 82–85. ]
- [ 14 ] 唐小闲, 邱培生, 段振华, 等. 响应面法优化超声-微波辅助提取莲藕膳食纤维工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 132–139. [ TANG X X, QIU P S, DUAN Z H, et al. Optimization of ultrasonic-microwave assisted extraction of dietary fiber from lotus root by response surface methodology[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(6): 132–139. ]
- [ 15 ] 吴俊男, 马森, 张弛, 等. 小麦麸皮膳食纤维的微波-酶法改性研究[J]. *食品科技*, 2017, 42(2): 175–180. [ WU J N, MA S, ZHANG C, et al. Microwave-enzyme modification of dietary fiber from wheat bran[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(2): 175–180. ]
- [ 16 ] 杨静, 白冰, 王宁, 等. 考马斯亮蓝法对烟草薄片涂布液中蛋白质含量的测定[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(5): 946–947, 950. [ YANG J, BAI B, WANG N, et al. Determination of protein content in reconstituted tobacco coating liquid by coomassie brilliant blue method[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(5): 946–947, 950. ]
- [ 17 ] 李治龙, 刘新华, 刘文杰, 等. 几种新疆特色干果清除自由基活性[J]. *光谱实验室*, 2012, 29(5): 2680–2684. [ LI Z L, LIU X H, LIU W J, et al. Radical scavenging activity of several characteristic dried fruit from Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2012, 29(5): 2680–2684. ]
- [ 18 ] 宋艺君, 郭涛, 刘世军, 等. 响应面法优化黄精-大枣果酒发酵工艺及其抗氧化活性[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(1): 156–161. [ SONG Y J, GUO T, LIU S J, et al. Optimization of fermentation process and antioxidant activity of polygonati rhizoma-jujubae fructus fruit wine by response surface methodology[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(1): 156–161. ]
- [ 19 ] 董佳萍, 颜飞翔, 牛广财, 等. 北五味子麦芽酵素发酵工艺优化及其生物活性初探[J]. *食品工业*, 2020, 41(5): 31–34. [ DONG J P, YAN F X, NIU G C, et al. Optimization of fermentation process of schisandra chinensis barley malt jiaosu and primary study of its bioactivity[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(5): 31–34. ]
- [ 20 ] 程宏桢, 蔡志鹏, 王静, 等. 百香果全果酒发酵工艺优化及体外抗氧化性比较分析[J]. *中国酿造*, 2020, 39(4): 91–97. [ CHENG H Z, CAI Z P, WANG J, et al. Optimization of fermentation process for whole passion fruit wine and comparative analysis of antioxidant activity *in vitro*[J]. *China Brewing*, 2020, 39(4): 91–97. ]
- [ 21 ] 张荣, 任清, 罗宇. 小米可溶性膳食纤维提取及其理化性质分析[J]. *食品科学*, 2014, 35(2): 69–74. [ ZHANG R, RENG Q, LUO Y. Extraction of soluble dietary fiber from foxtail millet and analysis of its physical and chemical properties[J]. *Food Science*, 2014, 35(2): 69–74. ]
- [ 22 ] 姜龙波, 吕静, 张喜文, 等. 小米糠膳食纤维复合酶法改性工艺优化[J]. *轻工学报*, 2017, 32(5): 16–23. [ JIANG L B, LV J, ZHANG X W, et al. Process optimization of complex enzyme modification of millet bran dietary fiber[J]. *Journal of Light Industry*, 2017, 32(5): 16–23. ]
- [ 23 ] 宋真真. 豆渣膳食纤维的制备及其降血糖功能与面条工艺优化研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014. [ SONG Z Z. Research on bean dregs dietary fiber noodles and its hypoglycemic function[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. ]
- [ 24 ] 李艳. 不同酶法改性的马铃薯渣膳食纤维工艺条件及性能研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019. [ LI Y. Study on process conditions and properties of dietary fibers from potato residue modified by different enzymatic method[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. ]

- [25] 李晶, 张连富. 玉米皮水溶性膳食纤维的酶法制备[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(10): 112-117. [LI J, ZHANG L F. The preparation of water-soluble dietary fiber from corn bran by enzymatic hydrolysis[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2014, 29(10): 112-117.]
- [26] 王娟, 康子悦, 肖金玲, 等. 超声-微波辅助酶法对小米SDF提取和物理性质的影响[J]. 包装工程, 2020, 41(7): 25-32. [WANG J, KANG Z Y, XIAO J L, et al. Influence of ultrasonic-microwave assisted enzymatic method on extraction and physical properties of water-soluble dietary fiber from millet[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(7): 25-32.]
- [27] 胡春晓, 宣丽, 齐森. 微波辅助提取香菇柄水溶性膳食纤维的工艺研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(2): 49-51. [HU C X, XUAN L, QI S. Study on microwave-assisted extraction technology of soluble dietary fiber from lentinus edodes stem[J]. Cereals & Oils, 2015, 28(2): 49-51.]
- [28] YING Z, HAN X, LI J. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from mulberry leaves[J]. Food Chemistry, 2011, 127(3): 1273-1279.
- [29] MARAN J P, SWATHI K, JEEVITHA P, et al. Microwave-assisted extraction of pectic polysaccharide from waste pango peel[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 123: 67-71.
- [30] 李怡杰, 陆海南, 覃江克, 等. 微波辅助提取油茶枯中膳食纤维的工艺优化[J]. 食品科技, 2013, 38(5): 188-192. [LI Y J, LU H N, QIN J K, et al. Optimization for microwave-assisted extraction of dietary fiber from camellia cakes[J]. Food Science and Technology, 2013, 38(5): 188-192.]
- [31] 和法涛, 刘光鹏, 朱风涛, 等. 微波超声波组合提取猴头菇多糖工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品与生物技术学报, 2019, 38(1): 74-82. [HE F T, LIU G P, ZHU F T, et al. Optimization of microwave-ultrasonic assisted extraction of polysaccharides from *Heridium erinaceus* antioxidant activity in vitro[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2019, 38(1): 74-82.]
- [32] 程海涛, 申献双. 响应面优化超声波-微波协同提取葡萄籽原花青素工艺研究[J]. 中国油脂, 2018, 43(3): 156-160. [CHENG H T, SHEN X S. Optimization of ultrasound-microwave-assisted extraction of proanthocyanidin from grape seeds by response surface methodology[J]. China Oils and Fats, 2018, 43(3): 156-160.]
- [33] 康丽君, 寇芳, 夏甜天, 等. 超声-微波协同酶法改性小米糠膳食纤维及工艺优化[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 221-226. [KANG L J, KOU F, XIA T T, et al. Study of the modification of millet bran dietary fiber with the method of ultrasonic-microwave cooperated with enzyme and the optimization of process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(23): 221-226.]
- [34] 阮之阳. 酶-超声联合处理植物废渣制备膳食纤维及其生物活性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018. [RUAN Z Y. Preparation of dietary fiber from plant wastes by combined enzyme-ultrasound treatment and their bioactivities[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.]
- [35] GARCIA M, RAJAURIA G, TIWARI B, et al. Extraction and yield optimisation of fucose, glucans and associated antioxidant activities from laminaria digitata by applying response surface methodology to high intensity ultrasound-assisted extraction[J]. Marine Drugs, 2018, 16(8): 257-272.