

# 超声辅助酶法提取玉米皮中多糖及其抗氧化性测定

## Ultrasound-assisted enzymatic extraction of polysaccharides from corn bran and determination of their antioxidant activity

马丽媛<sup>1</sup> 黄雪莹<sup>1</sup> 尚尔坤<sup>2</sup> 郭丽<sup>1</sup> 张雅娜<sup>1</sup>

MA Li-yuan<sup>1</sup> HUANG Xue-ying<sup>1</sup> SHANG Er-kun<sup>2</sup> GUO Li<sup>1</sup> ZHANG Ya-na<sup>1</sup>

(1. 绥化学院食品与制药工程学院, 黑龙江 绥化 152061; 2. 绥化市检验检测中心, 黑龙江 绥化 152000)

(1. College of Food and Pharmaceutical Engineering, Suihua University, Suihua, Heilongjiang 152061, China;

2. Suihua Inspection and Testing Center, Suihua, Heilongjiang 152000, China)

**摘要:**目的:利用超声波的超声震动作用和酶的酶解作用破坏细胞壁提高玉米皮多糖提取效率。方法:以多糖提取量为指标,在单因素试验基础上进行响应面优化超声辅助酶法提取玉米皮中多糖的工艺条件,并对玉米皮多糖的抗氧化性进行测定。结果:玉米皮多糖的最佳提取工艺为:复合酶比例( $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$ )2 : 1、酶用量 2% (以玉米皮粉质量计)、酶解时间 50 min、超声处理 15 min、料液比( $m_{\text{玉米皮粉}} : V_{\text{蒸馏水}}$ )1 : 15 (g/mL),此时提取的玉米皮多糖平均提取量为 23.36  $\mu\text{g/g}$ 。当玉米皮多糖样品质量浓度为 0.2~1.0 mg/mL 时,提取的玉米皮多糖具有一定的总还原能力、清除 DPPH 自由基和羟自由基能力,且随着样品质量浓度的增加而提高。结论:超声辅助酶法比单一酶法可提取出更多的多糖,且提取物能保持高效的抗氧化能力。

**关键词:**玉米皮;多糖;超声辅助;酶法;抗氧化性

**Abstract: Objective:** In the study, corn bran powder was used as raw material, and the cell wall was destroyed by ultrasonic vibration and enzymatic hydrolysis, so that corn bran polysaccharide could be dissolved more fully. **Methods:** The extracted amount of polysaccharide was taken as the index, response surface test optimization was carried out on the basis of single factor test. And the antioxidant activity of corn bran polysaccharide was determined. **Results:** The optimal extraction process of corn bran polysaccharide was obtained as follows:

**基金项目:**绥化学院科研创新团队玉米功能性食品研发团队项目(编号: SIT05003);绥化学院社会服务工程项目(编号: SHU2022004)

**作者简介:**马丽媛,女,绥化学院讲师,硕士。

**通信作者:**郭丽(1979—),女,绥化学院教授,博士。

E-mail: mly1190@163.com

**收稿日期:**2022-09-07 **改回日期:**2022-12-04

mass ratio of cellulase to pectinase 2 : 1, enzyme dosage was 2% of the quality of corn bran powder, enzymatic hydrolysis time 50 min, ultrasonic treatment 15 min, and solid-liquid ratio ( $m_{\text{corn bran powder}} : V_{\text{distilled water}}$ ) 1 : 15 (g/mL). At this time, the average amount of extracted corn bran polysaccharide was 23.36  $\mu\text{g/g}$ . The extracted corn bran polysaccharide had a certain total reducing capacity, scavenging DPPH free radical and hydroxyl radical ability, and it increased with the increase of mass concentration, when the mass concentration of corn bran polysaccharide sample was 0.2 ~ 1.0 mg/mL. **Conclusion:** Ultrasound-assisted enzymatic method could extract more polysaccharides than single enzymatic method, and the extract could maintain efficient antioxidant capacity.

**Keywords:** corn bran; polysaccharide; ultrasound assisted; enzymatic method; antioxidant activity

玉米皮是玉米加工的副产物。中国是玉米种植大国,但玉米皮的利用价值却很低,大部分被当成废弃物处理<sup>[1-2]</sup>。玉米皮中含有膳食纤维、多糖、黄色素、阿魏酸等有效成分<sup>[3]</sup>,其中多糖具有较强的生物活性,包括增强免疫力、抗病毒、抗氧化、抗肿瘤等活性<sup>[4-7]</sup>。玉米皮多糖还具有极高的医药价值,可以降低高血压、高血脂、高血糖等指标,减轻便秘,对于治疗结肠部位的癌变有明显效果<sup>[8-9]</sup>。

近些年来,中国对于植物多糖的提取研究较多,从最初常用的传统浸提法逐渐演变为更有效率的酶提法、超声波法、超声辅助酶法等<sup>[9-10]</sup>。超声波可以增强分子运动速度和频率,一定程度上破坏组织细胞壁,释放细胞中物质<sup>[11]</sup>。酶法可以破坏细胞壁使更多的多糖溶出且反应条件温和<sup>[9]</sup>,将超声波法与酶法结合是近些年的研究热点<sup>[7,12-13]</sup>。目前中国已有一些提取玉米皮多糖的研究,

但将超声波法和酶法结合的研究较少,且存在提取周期长、缺乏提取物抗氧化性研究或提取物抗氧化性弱等问题<sup>[5,9-10,14]</sup>。研究拟通过超声波辅助纤维素酶与果胶酶来增强玉米皮中纤维素、半纤维素和果胶物质的水解效率,促进多糖的溶出,并对提取的多糖进行抗氧化性测定,旨在为玉米皮的开发利用提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 材料

喷浆玉米皮渣:水分 $\leq 12.0\%$ ,粗蛋白质干基 $\geq 18.0\%$ ,粗纤维干基 $\leq 30.0\%$ ,黑龙江昊天玉米有限公司;

无水乙醇、葡萄糖:分析纯,无锡市晶科化工有限公司;

三氯乙酸、氯化铁、硫酸亚铁:分析纯,天津金汇太亚化学试剂有限公司;

果胶酶( $2 \times 10^4$  U/g)、纤维素酶( $5 \times 10^4$  U/g):浙江省一诺生物科技有限公司。

### 1.2 主要仪器与amp;设备

超声波清洗器:KQ-50B型,东莞爱洁乐超声波自动化设备有限公司;

台式低速离心机:80-2型,湖南凯达科学仪器有限公司;

电热恒温水浴锅:DK-98-II型,河北标普科学器材有限公司;

可见分光光度计:V-5100型,河北标普科学器材有限公司;

电热鼓风干燥箱:WGL型,河北标普科学器材有限公司;

高速万能粉碎机:FW100型,天津市泰斯特仪器有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 玉米皮多糖提取工艺流程

干玉米皮 $\rightarrow$ 去杂 $\rightarrow$ 粉碎过筛 $\rightarrow$ 混料、灭酶 $\rightarrow$ 超声处理 $\rightarrow$ 酶解 $\rightarrow$ 灭酶 $\rightarrow$ 离心 $\rightarrow$ 浓缩后醇沉 $\rightarrow$ 离心 $\rightarrow$ 干燥 $\rightarrow$ 粗多糖<sup>[8]</sup>

#### 1.3.2 操作要点

(1) 去杂:将干玉米皮渣中的沙粒等杂质挑出。

(2) 粉碎过筛:将玉米皮原料用粉碎机粉碎,称取10 g玉米皮粉,过60目筛。

(3) 混料、灭酶:将玉米皮粉末与蒸馏水按1:25(g/mL)混合,在95℃的条件下灭酶,用时10 min。

(4) 超声处理:设置超声功率为120 W,在温度为50℃条件下超声处理15 min。

(5) 酶解:加入2%的复合酶,在50℃条件下进行酶解,用时1 h。

(6) 灭酶:酶解结束后将温度升高至95℃,灭酶10 min。

(7) 离心:3 500 r/min离心20 min。

(8) 浓缩后醇沉:将上述上清液浓缩到原体积的25%,加3倍体积的无水乙醇沉淀,静置过夜。

(9) 干燥:沉淀在60℃下进行干燥,直至恒重,得到粗多糖。

1.3.3 绘制葡萄糖标准曲线 称取0.1 g葡萄糖定容于1 000 mL容量瓶中,先用蒸馏水将移液管清洗干净,润洗,分别称取0.0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 mL葡萄糖标准溶液于10 mL比色管中,补蒸馏水至2.0 mL,每个管中加入1 mL 6%苯酚溶液和5 mL浓硫酸溶液,摇匀,静置5 min,用0.0 mL葡萄糖溶液管(纯化水代替葡萄糖溶液)为参比,在波长490 nm下测量标准溶液的吸光度,以葡萄糖浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,进行标准曲线的绘制<sup>[9]</sup>。

1.3.4 玉米皮多糖的提取量测定 称取粗多糖0.01 g,加入蒸馏水使其溶解,于100 mL容量瓶内定容,摇匀。采用苯酚-硫酸法,根据葡萄糖标准曲线和式(1)计算多糖提取量<sup>[9]</sup>。

$$X = \frac{c \times v}{m}, \quad (1)$$

式中:

$X$ ——多糖提取量, $\mu\text{g/g}$ ;

$c$ ——样品溶液多糖质量浓度, $\mu\text{g/mL}$ ;

$v$ ——样品溶液体积,mL;

$m$ ——样品重量,g。

1.3.5 单因素试验 以玉米皮多糖提取量为评价指标,采用控制变量法筛选玉米皮多糖的提取条件,固定复合酶比例( $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$ )为1:1,酶解时间为50 min,酶用量为2.5%(以玉米皮粉质量计),超声处理时间为15 min,料液比( $m_{\text{玉米皮粉}} : V_{\text{蒸馏水}}$ )为1:15(g/mL),选取不同的复合酶比例( $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$ 分别为3:1,2:1,1:1,1:2,1:3)、酶解时间(40,45,50,55,60 min)、酶用量(1.0%,1.5%,2.0%,2.5%,3.0%)、超声时间(10,15,20,25,30 min)、料液比[ $m_{\text{玉米皮粉}} : V_{\text{蒸馏水}}$ 分别为1:10,1:15,1:20,1:25,1:30(g/mL)]进行单因素试验。

1.3.6 响应面试验 选取复合酶比例、酶用量、料液比3个因素进行响应面试验,优化玉米皮多糖提取工艺。

#### 1.3.7 多糖抗氧化性的测定

(1) 总还原能力:参考李雨婷等<sup>[15]</sup>的测定方法,修改如下:配制玉米皮多糖样品溶液的质量浓度分别为0.2,0.4,0.6,0.8,1.0 mg/mL。水浴加热冷却后,加入10%的三氯乙酸2 mL,混匀。4 000 r/min离心10 min,分别取2.5 mL的上清液和蒸馏水,加入1 mL 0.1%的三氯化铁溶液,静置10 min。在700 nm处测定其吸光度。用蒸馏水调零,用 $V_c$ 作阳性对照。

(2) 清除DPPH自由基能力:参考罗凯等<sup>[16]</sup>的测定方法,修改如下:配制玉米皮多糖样品溶液的质量浓度分

别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mg/mL, 其他操作相同。在 517 nm 下测吸光度, 同等条件下加入样品液测定吸光度并记录为  $A_1$ , 不加入样品液测定吸光度并记录为  $A_2$ 。用  $V_c$  作阳性对照, 按式(2)计算 DPPH 自由基清除率。

$$Y = \frac{A_2 - A_1}{A_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$Y$ ——DPPH 自由基清除率, %;

$A_1$ ——样品溶液的吸光度;

$A_2$ ——不加样品溶液的吸光值。

(3) 清除羟自由基能力: 参考许小向等<sup>[17]</sup>的测定方法, 修改如下: 配制玉米皮多糖样品溶液的质量浓度分别为 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 mg/mL, 其他操作相同。在 510 nm 处测定吸光度并记录为  $A$ , 同等条件下去掉样品液测定吸光度并记录为  $A_0$ , 去掉水杨酸溶液测定吸光度并记录为  $A_1$ 。用  $V_c$  作阳性对照, 按式(3)计算羟自由基清除率。

$$Z = \left(1 - \frac{A - A_1}{A_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:

$Y$ ——羟自由基清除率, %;

$A$ ——样品溶液的吸光值;

$A_0$ ——不加样品溶液的吸光值;

$A_1$ ——不加水杨酸溶液的吸光值。

1.3.8 数据与统计方法 所有试验重复 3 次, 数据以平均值±标准差表示。使用 Excel 2010、SPSS Statistics 25 以及方差分析 (ANOVA) 进行数据处理和显著性分析。响应面试验采用 Design-Expert 8.0.5 进行数据处理和分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 葡萄糖标准曲线

葡萄糖标准曲线见图 1。由图 1 可知, 标准曲线的线性回归方程为  $y = 0.0411x + 0.009$ ,  $R^2 = 0.9974$ , 线性相关性良好。

### 2.2 单因素试验

2.2.1 复合酶比例 ( $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$ ) 对多糖提取量的影响 由图 2 可知,  $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$  为 3:1~2:1 时, 玉米皮多糖提取量不断增大;  $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$  为 2:1 时玉米皮多糖提取量达到最高;  $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$  为 1:1~1:3 时, 玉米皮多糖提取量不断减少。出现这种趋势的原因可能与纤维素和果胶在玉米皮中的含量有关。因此, 选择复合酶比例 ( $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$ ) 为 2:1。

2.2.2 酶解时间对多糖提取量的影响 由图 3 可知, 酶解时间为 40~50 min 时, 玉米皮多糖提取量逐渐升高; 酶解时间为 50 min 时, 玉米皮多糖提取量达到最高值; 酶解时间为 50~60 min 时, 玉米皮多糖提取量逐渐降低。出现这种趋势的原因可能是酶解 40~50 min 时酶的活性高

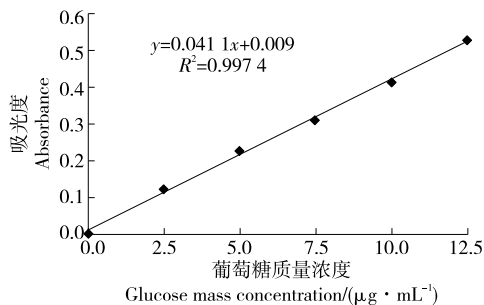


图 1 葡萄糖标准曲线

Figure 1 Standard curve of glucose concentration

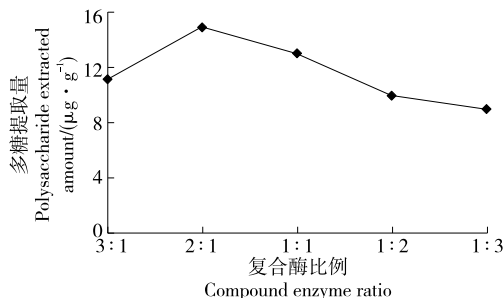


图 2 复合酶比例对多糖提取量的影响

Figure 2 Effects of compound enzyme ratio on polysaccharide extraction

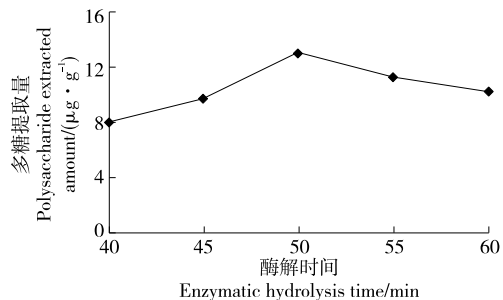


图 3 酶解时间对多糖提取量的影响

Figure 3 Effects of enzymatic hydrolysis time on polysaccharide extraction

且底物充足, 随着酶解时间的延长, 底物的消耗增加, 底物含量减少导致溶出的玉米皮多糖被酶水解而减少, 所以酶解时间过长会导致多糖提取量降低。因此, 选择的酶解时间为 50 min。

2.2.3 酶用量对多糖提取量的影响 由图 4 可知, 酶用量为 1.0%~2.0% 时, 玉米皮多糖提取量逐渐升高; 酶用量为 2.0% 时, 玉米皮多糖提取量达到最高值; 酶用量为 2.0%~3.0% 时, 玉米皮多糖提取量逐渐降低。出现这种趋势的原因可能是酶用量低于 2.0% 时, 没有足够的酶来降解玉米皮的细胞导致多糖不能完全溶出, 高于 2.0% 时, 加入的酶过多酶分子已饱和, 一部分酶分子没有机会与底物结合, 底物水解速度降低, 另外过多的纤维素酶可能将多糖水解, 进而影响多糖含量<sup>[18]</sup>。因此, 选择酶用量为 2.0%。

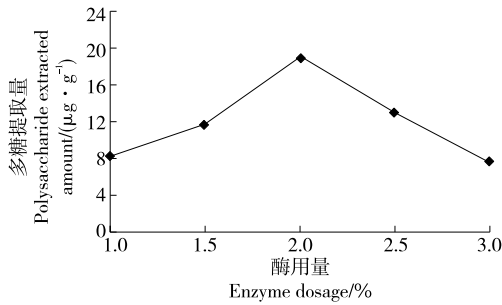


图4 酶用量对多糖提取量的影响

Figure 4 Effects of enzyme dosage on polysaccharide extraction

2.2.4 超声时间对多糖提取量的影响 由图5可知,超声时间为10~15 min时,玉米皮多糖提取量逐渐升高;超声时间为15 min时,玉米皮多糖提取量达到最高值;超声时间为15~30 min时,玉米皮多糖提取量逐渐降低。出现这种趋势的原因可能是,超声处理时间过长从而导致多糖被破坏。因此,选择超声处理时间为15 min。

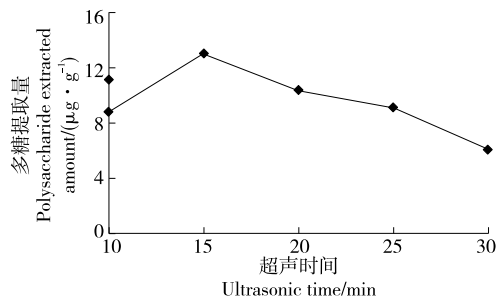


图5 超声时间对多糖提取量的影响

Figure 5 Effects of ultrasonic time on polysaccharide extraction

2.2.5 料液比对多糖提取量的影响 由图6可知,料液比为1:10~1:15 (g/mL)时,玉米皮多糖提取量不断增大,上升趋势明显;料液比为1:15 (g/mL)时玉米皮多糖提取量达到最高;料液比为1:20~1:30 (g/mL)时,玉米皮多糖提取量快速下降。出现这种趋势的原因可能是,当溶剂过量时,导致底物浓度低,浓度差变大,影响了多糖

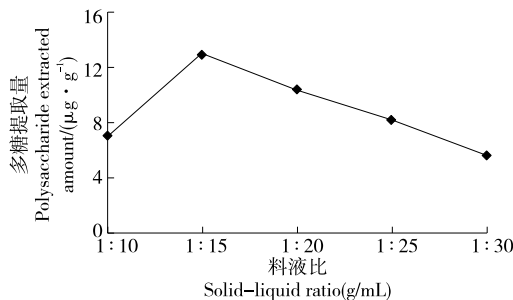


图6 料液比对多糖提取量的影响

Figure 6 Effects of solid-liquid ratio on polysaccharide extraction

的溶出。因此,选择最佳料液比为1:15 (g/mL)。

### 2.3 响应面试验结果及分析

2.3.1 响应面试验设计与结果 根据单因素试验结果确定响应面试验的因素水平取值见表1,试验设计与结果见表2。

运用 Design-Expert 8.0.5 软件,对试验数据进行回归拟合得回归方程:

$$Y = 23.51 + 0.54A + 0.77B + 0.66C - 1.01AB + 0.78AC - 1.30BC - 3.46A^2 - 2.67B^2 - 3.67C^2 \quad (4)$$

对该模型进行方差分析和模型系数进行显著性检验,结果见表3。由表3可知,回归模型  $P < 0.0001$ ,失拟项  $P = 0.8819 > 0.05$ ,说明该模型合适。二次项  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$  对多糖提取量的影响表现为极显著 ( $P < 0.0001$ ),交互项 BC 对多糖提取量的影响极显著 ( $P < 0.01$ ),交互项 AB、AC 和一次项 A、B、C 对多糖提取量的影响显著 ( $P < 0.05$ )。由 F 检验可以得到影响因素主次排序: B(酶用量) > C(料液比) > A(复合酶比例); 相关系数  $R^2 = 0.9846$ ,说明此模型能解释98.46%的响应值变化,该二

表1 响应面试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of response surface test

水平	A 复合酶比例	B 酶用量/%	C 料液比(g/mL)
-1	3:1	1.5	1:10
0	2:1	2.0	1:15
1	1:1	2.5	1:20

表2 响应面试验设计与结果

Table 2 Responsesurface test design and results

试验号	A	B	C	多糖提取量/(μg · g⁻¹)
1	-1	-1	0	18.45±0.34
2	1	-1	0	15.12±0.40
3	-1	1	0	17.62±0.47
4	1	1	0	18.32±0.52
5	-1	0	-1	18.19±0.52
6	1	0	-1	15.80±0.39
7	-1	0	1	15.39±0.40
8	1	0	1	16.12±0.43
9	0	-1	-1	18.21±0.64
10	0	1	-1	17.51±0.23
11	0	-1	1	14.22±0.58
12	0	1	1	18.71±1.15
13	0	0	0	24.31±0.43
14	0	0	0	22.65±0.82
15	0	0	0	23.27±0.88
16	0	0	0	24.32±0.20
17	0	0	0	22.98±1.00

次回归方程能够很好地拟合各因素与模糊评判值之间的关系,可利用该回归方程确定多糖提取量的最优工艺参数<sup>[17]</sup>。

2.3.2 响应面分析及优化 固定复合酶比例、酶用量和料液比其中一个因素时,其他 2 个因素及交互作用对玉米皮多糖提取量的影响响应曲面如图 7~图 9 所示。由图 7~图 9 可知,各交互作用皆显著<sup>[19]</sup>。结合表 3 的 3 个系数项估计值可分析,试验中各因素交互作用对多糖提取量的影响程度依次为:BC(酶用量和料液比)>AB(复合酶比例和酶用量)>AC(复合酶比例和料液比)。

2.3.3 验证实验 通过软件对模型进行系统分析,得到最优工艺参数为:复合酶比例( $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$ )2.07 : 1、酶用量 2.06%、料液比 ( $m_{\text{玉米皮粉}} : V_{\text{蒸馏水}}$ ) 1 : 14.5 (g/mL)。考虑到实际操作可行性,将参考调整为复合酶比例( $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$ )2 : 1、酶用量 2%、料液比 ( $m_{\text{玉米皮粉}} : V_{\text{蒸馏水}}$ )1 : 15 (g/mL)。在此工艺参数下进行 3 次平行验证实验,玉米皮多糖含量平均值为 (23.36 ± 0.27) μg/g,与模型预测值 23.59 μg/g 基本相符。

2.3.4 对比试验 在复合酶比例、酶用量和料液比提取条件相同的情况下,以不使用超声波辅助的酶法提取玉米皮多糖,结果见表 4。由表 4 可知,超声辅助酶法提取

表 3 响应面试验的方差分析结果<sup>†</sup>

Table 3 Analysis of variance results of response surface tests

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	176.67	9	19.63	49.86	<0.000 1	**
A	2.30	1	2.30	5.84	0.046 3	*
B	4.74	1	4.74	12.05	0.010 4	*
C	3.47	1	3.47	8.82	0.020 8	*
AB	4.06	1	4.06	10.31	0.014 8	*
AC	2.43	1	2.43	6.18	0.041 8	*
BC	6.73	1	6.73	17.11	0.004 4	**
A <sup>2</sup>	50.35	1	50.35	127.89	<0.000 1	**
B <sup>2</sup>	30.03	1	30.03	76.27	<0.000 1	**
C <sup>2</sup>	56.80	1	56.80	144.29	<0.000 1	**
误差	2.76	7	0.39			
失拟	0.38	3	0.13	0.21	0.881 9	不显著
纯误差	2.37	4	0.59			
合计	179.42	16				

† \*\* 表示极显著,  $P < 0.01$ ; \* 表示显著,  $P < 0.05$ ;  $R^2 = 0.984 6$ ;  $R_{\text{adj}}^2 = 0.964 9$ 。

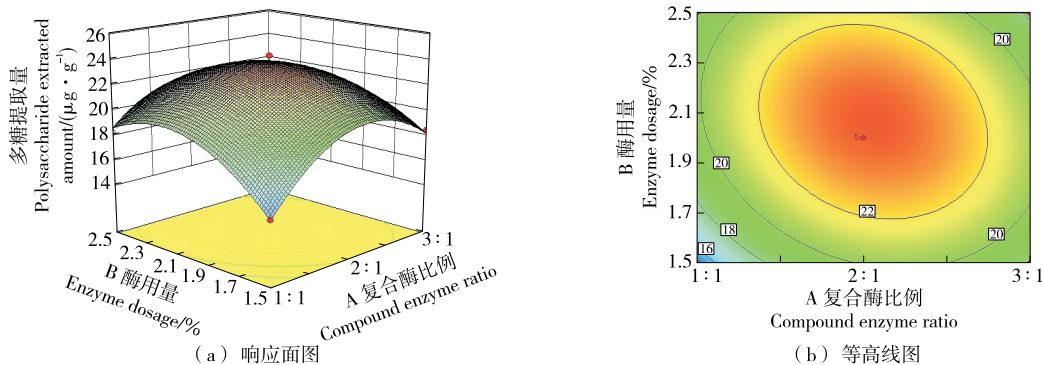


图 7 复合酶比例与酶用量对多糖提取量影响的响应面图和等高线图

Figure 7 Response surface plots and contour plots of the effect of compound enzyme ratio and enzyme dosage on the polysaccharide extraction

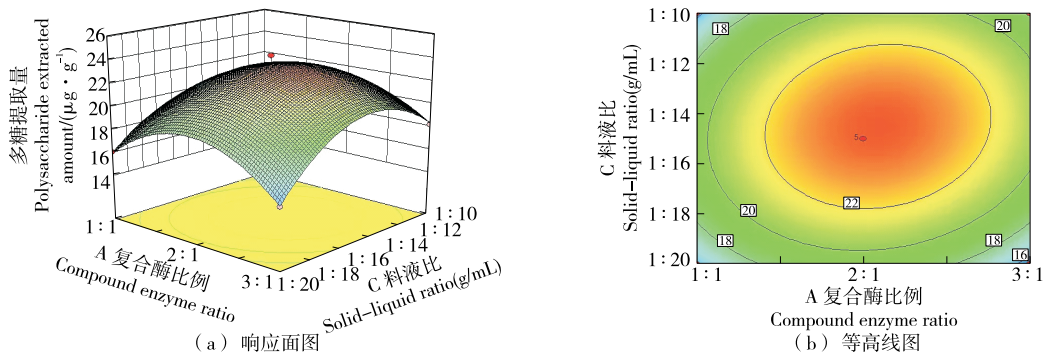


图 8 复合酶比例与料液比对多糖提取量影响的响应面图和等高线图

Figure 8 Response surface and contour plots of the effect of compound enzyme ratio and solid-liquid ratio on polysaccharide extraction

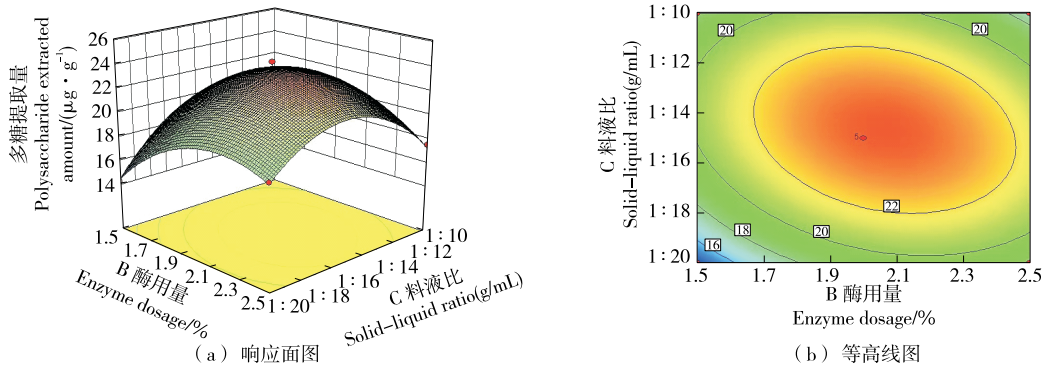


图9 酶用量与料液比对多糖提取量影响的响应面图和等高线图

Figure 9 Response surface and contour plots of the effect of enzyme dosage and solid-liquid ratio on polysaccharide extraction

表4 不同方法玉米皮多糖提取量的对比<sup>†</sup>

Table 4 Comparison of extracted amount of corn bran polysaccharide by different methods

试验方法	多糖提取量/( $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )
酶法	19.63±0.76
超声辅助酶法	23.36±0.31**

<sup>†</sup> \*\*表示与酶法结果相比差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

玉米皮多糖与酶法提取玉米皮多糖相比,超声辅助酶法极显著地提高了玉米皮多糖的提取量( $P < 0.01$ )。这可能是由于超声波的作用可以在一定程度上破坏玉米皮组织细胞壁,释放细胞中的物质,使得酶解更充分。

2.4 多糖抗氧化性

2.4.1 总还原能力 如图10所示,样品质量浓度为0.2~1.0 mg/mL时,玉米皮多糖和V<sub>C</sub>的总还原能力均处于上升趋势,样品质量浓度越高总还原能力越高,其中质量浓度为0.4~0.6 mg/mL时多糖的总还原能力上升趋势明显,而且随着样品质量浓度的升高多糖的总还原能力超过了V<sub>C</sub>的。样品质量浓度为0.4~1.0 mg/mL时的玉米皮多糖的还原能力高于关海宁等<sup>[9]</sup>提取的。

2.4.2 DPPH自由基清除率 如图11所示,样品质量浓度为0.2~1.0 mg/mL时,玉米皮多糖和V<sub>C</sub>对DPPH自

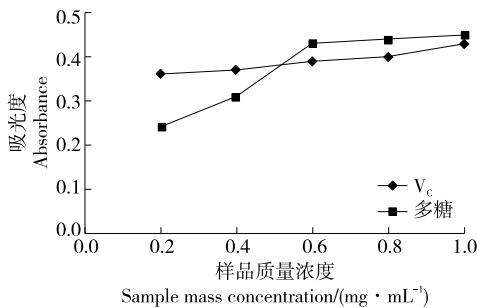


图10 玉米皮多糖和V<sub>C</sub>的总还原能力

Figure 10 Total reducing capacity of corn bran polysaccharides and V<sub>C</sub>

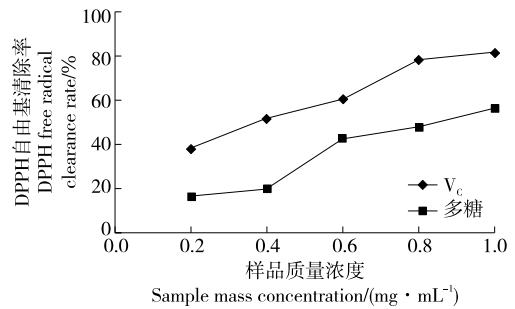


图11 玉米皮多糖和V<sub>C</sub>对DPPH自由基的清除率

Figure 11 DPPH free radical clearance rate of corn bran polysaccharides and V<sub>C</sub>

由基的清除率均处于上升趋势,当样品质量浓度为0.4~0.6 mg/mL时多糖的清除率上升趋势明显。样品质量浓度为1.0 mg/mL时的DPPH自由基清除率高于同浓度下关海宁等<sup>[9]</sup>和张贺等<sup>[14]</sup>提取的玉米皮多糖的。

2.4.3 羟自由基清除率 如图12所示,样品质量浓度为0.2~1.0 mg/mL时,玉米皮多糖对羟自由基的清除率均处于上升趋势,而V<sub>C</sub>对羟自由基的清除率的变化趋势较为平缓,只有在质量浓度为0.2~0.4 mg/mL时上升趋势明显,而且样品质量浓度较高时多糖对羟自由基的清除率会超过V<sub>C</sub>的。样品质量浓度为1.0 mg/mL时的玉米

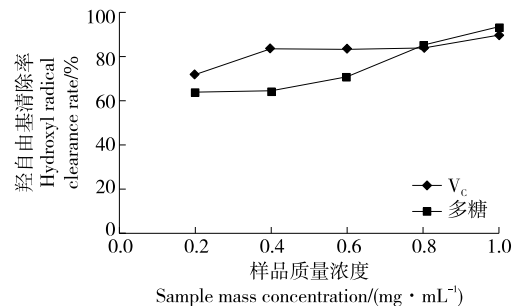


图12 玉米皮多糖和V<sub>C</sub>对羟自由基的清除率

Figure 12 Hydroxyl radical clearance rate of corn bran polysaccharides and V<sub>C</sub>

皮多糖的羟自由基清除率高于同浓度下关海宁等<sup>[9]</sup>和张贺等<sup>[14]</sup>提取的。

### 3 结论

超声辅助酶法提取玉米皮多糖的最佳提取工艺参数为:复合酶比例( $m_{\text{纤维素酶}} : m_{\text{果胶酶}}$ )2 : 1、酶用量 2%(以玉米皮粉质量计)、料液比( $m_{\text{玉米皮粉}} : V_{\text{蒸馏水}}$ )1 : 15 (g/mL),多糖提取量为 23.36  $\mu\text{g/g}$ 。由抗氧化性的测定结果得出,样品质量浓度为 1.0 mg/mL 时,玉米皮多糖的总还原能力和羟自由基清除率均高于  $V_c$  的,表明玉米皮多糖的抗氧化性较强。运用此研究提取的玉米皮多糖含量较高,工艺简单,条件温和,且具有较强的抗氧化活性,后续将对提取出来的多糖结构及其抗氧化机理进行深入研究。

#### 参考文献

- [1] 郭如意. 综合利用玉米深加工副产物固态发酵饲料的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021: 1-2.  
GUO R Y. Solid-state fermentation of bio-feed using by-products of deep processing of corn [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021: 1-2.
- [2] 杨宇, 王明华, 王桂林, 等. 玉米皮多糖提取纯化研究进展[J]. 山东化工, 2021, 50(10): 84-85.  
YANG Y, WANG M H, WANG G L, et al. Research progress on extraction and purification process of corn bran polysaccharide[J]. Shandong Chemical Industry, 2021, 50(10): 84-85.
- [3] 赵二劳, 王明华, 高子怡, 等. 玉米皮活性成分提取工艺研究进展[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 203-207.  
ZHAO E L, WANG M H, GAO Z Y, et al. Research process on extension technology of active components from corner bran [J]. Food & Machinery, 2017, 33(12): 203-207.
- [4] 赵二劳, 杨洁, 高子怡, 等. 玉米多糖提取纯化工艺研究进展[J]. 粮食与油脂, 2018, 31(5): 18-20.  
ZHAO E L, YANG J, GAO Z Y et al. Research progress on extraction and purification technology of corn polysaccharides [J]. Cereals & Oil, 2018, 31(5): 18-20.
- [5] 王文侠, 尚庆, 李馥邑, 等. 纤维素酶法提取玉米麸皮多糖的工艺条件优化[J]. 中国食品添加剂, 2016, (3): 82-91.  
WANG W X, SHANG Q, LI F Y, et al. Optimization of extraction of polysaccharides from corn fiber by cellulast [J]. China Food Additive, 2016(3): 82-91.
- [6] 肖芳, 陈涛, 伍振煌, 等. 植物多糖的提取工艺、生物学功能及其在动物生产中的研究进展[J]. 饲料研究, 2022, 45(14): 125-128.  
XIAO F, CHEN T, WU Z H, et al. Research progress on extraction technology, biological function and animal production of plant polysaccharides[J]. Feed Research, 2022, 45(14): 125-128.
- [7] 秦楠, 郭丽丽, 王小敏, 等. 响应面优化超声辅助酶法提取北芪菇多糖及其抑菌活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2018(8): 120-127.

- QIN N, GUO L L, WANG X M, et al. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction of polysaccharides from astragali mushroom by response surface analysis and its antimicrobial activity[J]. China Food Additive, 2018(8): 120-127.
- [8] 杨小倩, 鄧慧, 张辉, 等. 玉米不同部位化学成分、药理作用、利用现状研究进展[J]. 吉林中医药, 2019, 39(6): 837-840.  
YANG X Q, ZHI H, ZHANG H, et al. Research progress on chemical constituents, pharmacological activity and utilization status of different erent parts of corn [J]. Jilin Journal of Chinese Medicine, 2019, 39(6): 837-840.
- [9] 关海宁, 刁小琴, 乔秀丽. 不同提取方式对玉米皮多糖体外抗氧化活性的影响[J]. 黑龙江畜牧兽医, 2016(17): 136-139.  
GUAN H N, DIAO X Q, QIAO X L. Effects of different extraction methods on the antioxidant activity in vitro of polysaccharides from corn bran [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2016(17): 136-139.
- [10] 翟立公, 孙永康, 王蓓蓓, 等. 玉米皮多糖超声波辅助提取工艺研究[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2018, 34(5): 57-61.  
ZHAI L G, SUN Y K, WANG B B, et al. Study on ultrasonic-assisted extraction of corn husk polysaccharide [J]. Journal of Natural Science of Harbin Normal University, 2018, 34(5): 57-61.
- [11] 冯飞, 葛永杰, 代容, 等. 超声波辅助提取技术研究进展[J]. 食品工业, 2022, 43(4): 239-243.  
FENG F, GE Y J, DAI R, et al. Research progress of ultrasonic assisted extraction technology [J]. Food Industry, 2022, 43(4): 239-243.
- [12] 张荔菲, 刘莹, 王益, 等. 超声辅助酶法提取柚子皮多糖工艺的响应面优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(5): 146-150.  
ZHANG L F, LIU Y, WANG Y, et al. Optimization of ultrasonic assisted enzyme method extraction technique on shaddock peel polysaccharides by response surface methodology [J]. Science and Technology Food Industry, 2018, 39(5): 146-150.
- [13] 贺便, 成超超, 王攀. 双酶法一超声辅助提取松针多糖工艺优化[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(7): 19-22.  
HE B, CHENG C C, WANG P. Double-enzyme method-ultrasound-assisted extraction of pine needle polysaccharide process optimization [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2019, 25(7): 19-22.
- [14] 张贺, 王倩雯, 曹龙奎. 玉米皮多糖的提取及抗氧化性研究[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(6): 47-49.  
ZHANG H, WANG Q W, CAO L K. Study on extraction of corn peel polysaccharides and its antioxidation [J]. Cereals & Oil, 2015, 28(6): 47-49.
- [15] 李雨婷, 韩松博, 岳子香, 等. 蓝靛果、枸杞—菊花复合压片糖果制备工艺及抗氧化性测定[J]. 北方农业学报, 2019, 47(6): 101-107.  
LI Y T, HAN S B, YUE Z X, et al. Determination of the antioxidant activity and preparation technology of blue hazelnut, medlar and chrysanthemum composite tablets [J]. Journal of Northern Agriculture, 2019, 47(6): 101-107.

(下转第 202 页)

- [46] ZHU W Y, REN L Y, ZHANG L, et al. The potential of food protein-derived bioactive peptides against chronic intestinal inflammation[J]. *Mediators of Inflammation*, 2020, 2 020: 6817156.
- [47] YAO L J, YANG P, LUO W Q, et al. Macrophage-stimulating activity of European eel (*Anguilla anguilla*) peptides in RAW264.7 cells mediated via NF- $\kappa$ B and MAPK signaling pathways[J]. *Food & Function*, 2020, 11(12): 10 968-10 978.
- [48] CAI J Y, LI X, WANG X, et al. A human  $\beta$ -casein-derived peptide BCCY-1 modulates the innate immune response [J]. *Food Chemistry*, 2021, 348: 129111.
- [49] YANG B, ZHANG Z, YANG Z, et al. Chanling gao attenuates bone cancer pain in rats by the IKK $\beta$ /NF- $\kappa$ B signaling pathway[J]. *Frontiers in Pharmacology*, 2020, 11: 525-535.
- [50] SOEHNLEIN O, LINDBOM L. Phagocyte partnership during the onset and resolution of inflammation [J]. *Nature Reviews Immunology*, 2010, 10(6): 427-439.
- [51] SURAIYA S, AHMED M K, HAQ M. Immunity boosting roles of biofunctional compounds available in aquafoods: A review[J]. *Heliyon*, 2022, 8(5): e09547.
- [52] CHEN L, DENG H, CUI H, et al. Inflammatory responses and inflammation-associated diseases in organs[J]. *Oncotarget*: 2017, 9: 7 204-7 218.
- [53] YIMIT D, HOXUR P, AMAT N, et al. Effects of soybean peptide on immune function, brain function, and neurochemistry in healthy volunteers[J]. *Nutrition*, 2012, 28(2): 154-159.
- [54] HORIGUCHI N, HORIGUCHI H, SUZUKI Y. Effect of wheat gluten hydrolysate on the immune system in healthy human subjects[J]. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 2005, 69(12): 2 445-2 449.
- [55] 刘睿, 赵明, 段金殿. 基于“蛋白质/肽组学—修饰组学”研究动物药功效物质基础的思路与方法[J]. *药学学报*, 2020, 55(8): 1 735-1 743.
- LIU R, ZHAO M, DUAN J A. Ideas and strategies for investigating the bioactive constituents of animal derived traditional Chinese medicines based on integrated "proteomics/peptidomics-modifications" methods [J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2020, 55(8): 1 735-1 743.
- [56] 张科. 基于网络药理学方法探究天麻素抗阿尔兹海默症的作用机制[J]. *云南中医中药杂志*, 2022, 43(9): 39-46.
- ZHANG K. Exploring the mechanism of action of gastrodin against Alzheimer's disease based on network pharmacology [J]. *Yunnan Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2022, 43(9): 39-46.

(上接第 185 页)

- [13] 豆康宁, 董彬, 王银满. 大豆蛋白活性肽的生物功能与应用前景[J]. *粮食加工*, 2007(2): 52-54.
- DOU K N, DONG B, WANG Y M. Biological function and application prospect of soybean protein active peptide[J]. *Grain Processing*, 2007(2): 52-54.
- [14] 周海华, 马海乐. 云芝多糖的体外抗氧化活性研究[J]. *食品研究与开发*, 2008(3): 44-48.
- ZHOU H H, MA H L. In vitro antioxidant activity of Yunzhi polysaccharides[J]. *Food Research and Development*, 2008(3): 44-48.
- [15] 刘文颖, 冯晓文, 李国明, 等. 牡蛎低聚肽的结构表征及体外抗氧化作用[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(12): 261-269.
- LIU W Y, FENG X W, LI G M, et al. Structural characterization and in vitro antioxidant effects of oyster oligopeptides[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2021, 21(12): 261-269.
- [16] 李昌文, 张丽华, 纵伟. 核桃多肽制备技术及生理活性研究进展[J]. *食品工业*, 2020, 41(9): 257-259.
- LI C W, ZHANG L H, ZHONG W. Progress on preparation and functional activity of walnut peptides[J]. *Food Industry*, 2020, 41(9): 257-259.
- [17] 方婧杰. 大米活性肽抗氧化机理的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013: 15.
- FANG J J. The research on antioxidative mechanism of rice bioactive peptide [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013: 15.
- [18] 耿婷婷. 芝麻酚和白藜芦醇对高油酸花生油的抗氧化和抗异构化作用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2019: 4-5.
- GENG T T. Antioxidant and anti-isomerization effects of sesamol and resveratrol on high oleic acid peanut oil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2019: 4-5.

(上接第 192 页)

- [16] 罗凯, 黄秀芳, 周毅峰, 等. 响应面试验优化复合酶法提取碎米芥多糖工艺及其抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2017, 38(4): 237-242.
- LUO K, HUANG X F, ZHOU Y F, et al. Optimization of multi-enzymatic extraction of polysaccharides from cardamine hupingshanensis and their antioxidant activity [J]. *Food Science*, 2017, 38(4): 237-242.
- [17] 许小向, 尹小莉, 洪艳平, 等. 火炬松松针多糖提取工艺及其抗氧化性研究[J]. *林产化学与工业*, 2016, 36(3): 114-120.
- XU X X, YIN X L, HONG Y P, et al. Extraction process and antioxidant activity of *Pinus taeda* L. polysaccharides [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2016, 36(3): 114-120.
- [18] 关海宁. 微波辅助酶法提取玉米皮多糖工艺研究[J]. *粮食与油脂*, 2012, 25(6): 47-49.
- GUAN H N. Study on extraction polysaccharides in cornspermoderm by microwave-assisted enzymetic methods [J]. *Cereals & Oil*, 2012, 25(6): 47-49.
- [19] CUI F J, QIAN L S, SUN W J, et al. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Volvularia volvacea*: Process optimization and structural characterization[J]. *Molecules*, 2018, 23(7): 1 706.