

# 超声辅助复合酶法提取马蹄渣不溶性膳食纤维 工艺优化及品质对比

卜智斌<sup>1</sup>, 曾劲<sup>2</sup>, 禹淞文<sup>3</sup>, 徐玉娟<sup>1\*</sup>, 周晓愉<sup>2</sup>, 余元善<sup>1</sup>, 彭建<sup>1</sup>, 黄建恒<sup>2</sup>

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)(2. 广州市洲星食品有限公司, 广东广州 510450)(3. 常德市农林科学研究院, 湖南常德 415000)

**摘要:**以淀粉型马蹄加工副产物果渣为原料, 采用超声辅助复合酶法提取制备马蹄不溶性膳食纤维(Water Chestnut Insoluble Dietary Fiber, WIDF), 通过单因素试验考察复合酶添加量、料液比、超声功率对WIDF提取率的影响, 设计响应面实验对提取工艺进行优化, 分析影响各指标的主次因素及因素间的交互作用并建立二次回归模型, 优化得到最佳工艺参数加以验证, 并对传统复合酶法提取WIDF的品质功能特性。结果表明: 建立WIDF提取率的回归方程模型极显著( $P < 0.01$ ), 可用于对超声辅助复合酶法提取WIDF的提取率指标进行分析和预测, 优化得到最佳工艺参数: 酶质量分数9%, 料液比1:15, 超声功率320 W, 在此条件下进行验证试验, 得到WIDF提取率高达67.60%, 对比传统复合酶法, 提取率提高107.36%、WIDF的持水力提升34.33%、胆固醇吸收性能提升35.77%, 该研究可为马蹄渣的高值化综合利用提供一定理论参考依据。

**关键词:** 超声辅助酶解; 马蹄渣; 不溶性膳食纤维; 理化性质

文章编号: 1673-9078(2023)07-177-183

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.7.0987

## Process Optimization for Ultrasound-assisted Composite Enzymatic Extraction of Insoluble Dietary Fiber from Water Chestnut Dregs and Quality Comparison

BU Zhibin<sup>1</sup>, ZENG Jing<sup>2</sup>, YU Songwen<sup>3</sup>, XU Yujuan<sup>1\*</sup>, ZHOU Xiaoyu<sup>2</sup>, YU Yuanshan<sup>1</sup>, PENG Jian<sup>1</sup>,  
HUANG Jianheng<sup>2</sup>

(1. Sericultural and Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China) (2. Guangzhou Zhouxing Food Co. Ltd., Guangzhou 510450, China) (3. Changde Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Changde 415000, China)

**Abstract:** Water chestnut insoluble dietary fiber (WIDF) was prepared by Ultrasound-assisted enzymatic extraction from the by-product of starch-type water chestnut, dregs, as the raw material. The effects of composite enzyme dosage, solid-liquid ratio and ultrasonic power on the extraction rate of WIDF were investigated by single factor experiments. Response surface experiments were designed and performed to optimize the extraction process, the main factors affecting the indices and the interactions among various factors were analyzed, and quadratic regression models were established. The obtained optimal process parameters were optimized and verified, and comparisons on the quality and functional characteristics between the WIDF samples extracted by the traditional composite enzyme method and the optimized method were made.

引文格式:

卜智斌, 曾劲, 禹淞文, 等. 超声辅助复合酶法提取马蹄渣不溶性膳食纤维工艺优化及品质对比[J]. 现代食品科技, 2023, 39(7): 177-183.

BU Zhibin, ZENG Jing, YU Songwen, et al. Process optimization for ultrasound-assisted composite enzymatic extraction of insoluble dietary fiber from water chestnut dregs and quality comparison [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(7): 177-183.

收稿日期: 2022-08-06

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2022B0202050001); 广东省农业科学院学科团队建设项目(202109TD)

作者简介: 卜智斌(1989-), 男, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: bzb81@126.com

通讯作者: 徐玉娟(1974-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: guoshuxuyujuan@163.com

The results showed that the established regression model of WIDF extraction rate was extremely significant ( $P < 0.01$ ), thus, the model could be used to analyze and predict the extraction rate for the WIDF obtained by the ultrasound-assisted enzymatic extraction method. The optimal parameters obtained after process optimization were as follows: enzyme addition amount 9%, solid-liquid ratio 1:15, and ultrasonic power 320 W. Verification tests were carried out under such conditions, and the extraction rate of WIDF was as high as 67.60%. Compared with the traditional composite enzyme method, the extraction rate of WIDF under optimized conditions increased by 107.36%, with WIDF's water-holding capacity of WIDF increasing by 34.33% and cholesterol absorption performance increasing by 35.77%. This research provides a theoretical basis for the high-value comprehensive utilization of water chestnut dregs.

**Key words:** ultrasound-assisted enzymatic; water chestnut dregs; insoluble dietary fiber; physical and chemical properties

马蹄, 又名荸荠, 是莎草科、荸荠属植物, 广东、广西地区广泛种植, 种植面积超过 3 万  $\text{hm}^2$ , 占全国种植面积的 50% 以上, 其中淀粉型马蹄种植面积达到 20 万亩, 主要用于马蹄粉加工, 但马蹄粉加工过程中会产生大量果渣, 占鲜马蹄 50% 左右, 实际生产中, 绝大部分果渣被用作饲料、肥料或直接丢弃, 资源浪费严重, 附加值开发严重不足, 但目前关于马蹄渣及其膳食纤维的研究和开发鲜见报道。

马蹄渣中富含膳食纤维, 党子健<sup>[1]</sup>采用碱提醇沉的提取方法, 测定了荸荠皮渣总膳食纤维达到 62.5%。膳食纤维按照溶解性分为可溶性膳食纤维 (Soluble Dietary Fiber, SDF) 和 IDF (Insoluble Dietary Fiber, IDF), 有大量研究表明不溶性膳食纤维能增加饱腹感<sup>[2]</sup>、促排便<sup>[3]</sup>、改善肠道菌群<sup>[4]</sup>, 起到控制体重降低胆固醇<sup>[5]</sup>、改善胰岛素抵抗<sup>[6]</sup>、降血脂<sup>[7]</sup>等功效。目前膳食纤维提取方法主要有化学法、酶法、酶法-化学法、发酵法等<sup>[8]</sup>, 酶法提取反应条件温和, 可针对性的去处淀粉, 蛋白质等, 制备纯度较高的膳食纤维。由于不溶性膳食纤维功能作用相对较弱, 超声波作为高效、环保、安全的物理加工技术, 机械振动能加速分子的振动和扩散, 有助提高酶解效率, 提升 IDF 得率的同时改变其组织结构, 增强其功能特性<sup>[9]</sup>。李琦等<sup>[10]</sup>研究了响应面法优化超声辅助碱法提取韭菜根不溶性膳食纤维, 发现超声辅助处理会改变 IDF 的微观结构以及持水性、持油力和膨胀特性等功能特性。黄六容等<sup>[11]</sup>发现超声波辅助处理可使大蒜秸秆不溶性膳食纤维微观结构, 变为疏松、蜂巢形的多孔网状结构, 赋予大蒜秸秆 IDF 更强的功能品质和物理化学特性。Wang 等<sup>[12]</sup>研究复合酶法 ( $\alpha$ -淀粉酶、蛋白酶、纤维素酶) 用于提取姜残渣中不溶性膳食纤维, 发现复合酶法提取的 IDF 具有更高的阳离子交换容量。

因此, 本研究以马蹄加工副产物马蹄渣为原材料, 采用超声辅助复合酶法提取工艺, 通过设计单因素试验和响应面实验优化试验得到最佳工艺参数, 并对比传统复合酶法提取 WIDF 的品质和功能特性, 以期对马蹄加工副产物的高值化利用提供一定的理论参考

依据, 为食品工业提供新的不溶性膳食纤维来源。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

马蹄渣, 由广州市洲星食品有限公司提供;  $\alpha$ -淀粉酶, 上海昀冠机电设备有限公司; 中性蛋白酶, 上海源叶生物科技有限公司; 玉米油 (属于食用级别)、胆固醇, 上海源叶生物科技有限公司; 邻苯二甲醛 (Ortho-Phthalaldehyde, OPA), 上海源叶生物科技有限公司; 冰乙酸, 西陇科学股份有限公司; 硫酸, 广东化学试剂厂; 无水乙醇, 天津市富余精细化工有限公司; 无水甲醇, 天津市大茂化学试剂厂; 亚硝酸钠, 天津化学试剂有限公司; 盐酸萘乙二胺, 天津市百世化工有限公司; 对氨基苯磺酸, 天津化学试剂有限公司; 盐酸, 广东化学试剂厂。

### 1.2 仪器与设备

DL-800B 超声清洗器, 上海之信仪器有限公司; ME204 电子天平, 上海翼控机电有限公司; HWS-24 型-恒温水浴锅, 北京海天友诚科技有限公司; JW-1043 低速离心机, 安徽嘉文仪器装备有限公司; 科恒-电热鼓风干燥箱, 上海科恒实业发展有限公司; UV-1800 型紫外分光光度计, 日本岛津公司; PS-10 sartorius 酸度计, 桂林实验器材有限公司; SHA-BA 水浴恒温振荡器, 常州澳华仪器有限公司; 苏泊尔磨粉机, 颍上县瑞隆仪器有限公司; 立式压力蒸汽灭菌器, 上海博讯实业有限公司设备厂; SW-CJ-1F 洁净工作台, 苏净集团苏州安泰空气技术有限公司; MPC-5V656 医用冷藏保存箱, 安徽中科都菱家用电器股份有限公司; Milli-Q Integral 5 超纯水系统, Merk Millipore/德国。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 马蹄渣预处理

将湿马蹄渣平铺满烤盘中置入烘箱中 85  $^{\circ}\text{C}$  干燥 2 d, 得到干燥的马蹄渣, 置于粉碎机中额粉碎处理,

过 40 目筛分离弃去粗粉, 得到马蹄渣粉备用。

### 1.3.2 WIDF 提取工艺

#### (1) 超声辅助复合酶法提取

马蹄渣粉→加水混匀→高温水浴处理 3 min 后加复合酶 ( $\alpha$ -淀粉酶与中性蛋白酶质量比为 1:1)→超声辅助酶解→灭酶→离心→弃去上清液→滤渣干燥→WIDF

#### (2) 传统复合酶法提取

马蹄渣粉→加水混匀→高温水浴处理 3 min 后加复合酶 ( $\alpha$ -淀粉酶与中性蛋白酶质量比为 1:1)→酶解→灭酶→离心→弃去上清液→滤渣干燥→WIDF

### 1.3.3 单因素试验

#### (1) 复合酶添加量对 WIDF 提取率的影响

各称取 1 g 马蹄渣粉, 按照 1.3.2 的提取步骤, 料液比为 1:15 ( $m/m$ ) 加水混匀、分别加入质量分数为 1%、3%、5%、7%和 9% (以料液总量计) 的复合酶, 超声功率 240 W, 温度 40 °C, 酶解 40 min, 灭酶处理后 4 000 r/min 离心 8 min, 弃去滤液, 将滤渣转移至锡纸杯中 50 °C 烘箱干燥 12 h 后取出, 得到 WIDF。

#### (2) 料液比对 WIDF 提取率的影响

各称取 1 g 马蹄渣粉, 按照 1.3.2 的提取步骤, 分别按料液比 1:15、1:20、1:25、1:30、1:40 ( $m/m$ ) 加水混匀、加入质量分数为 3% (以料液总量计) 的复合酶, 超声功率 240 W, 设置温度 40 °C, 酶解 40 min, 灭酶处理后 4 000 r/min 离心 8 min, 弃去滤液, 将滤渣转移至锡纸杯中 50 °C 烘箱干燥 12 h 后取出, 得到 WIDF。

#### (3) 超声功率对 WIDF 提取率的影响

各称取 1 g 马蹄渣粉, 按照 1.3.2 的提取步骤, 按料液比 1:15 ( $m/m$ ) 加水混匀、加入质量分数为 3% (以料液总量计) 的复合酶, 超声功率分别为 160、240、320、400、480 W, 设置温度 40 °C, 酶解 40 min, 灭酶处理后 4 000 r/min 离心 8 min, 弃去滤液, 将滤渣转移至锡纸杯中 50 °C 烘箱干燥 12 h 后取出, 得到 WIDF。

### 1.3.4 响应面实验

在单因素实验的基础上, 以提取率为考察指标, 选取酶添加量、料液比和超声功率三因素, 设计响应面实验优化 WIDF 提取工艺, 实验设计见表 1。

表 1 实验设计参数

Table 1 Parameters of experiment designed

水平	因素		
	A 复合酶添加量/%	B 料液比/min	C 超声功率/W
-1	5	1:15	160
0	7	1:20	240
1	9	1:25	320

### 1.3.5 指标测定方法

#### (1) 持水力

参考易甜等<sup>[13]</sup>的方法略作修改, 准确称取 0.4 g 样品与离心管中, 加蒸馏水 40 mL, 振荡 24 h 后于 4 000 r/min 离心 30 min, 弃去上清液, 使离心管壁干燥称质量, 按下列公式计算 WIDF 的持水力。

$$W = \frac{M - m_0}{m} \quad (1)$$

式中:

$W$ ——持水力, g/g;

$m_0$ ——离心前离心管与样品的质量, g;

$M$ ——离心后离心管与沉淀物的质量, g;

$m$ ——样品质量, g。

#### (2) 溶胀力

参考易甜等<sup>[13]</sup>的方法, 准确称取 1.0 g 样品于有刻的试管中, 读取体积, 加 10 mL 蒸馏水, 摇匀后静置 24 h, 读取膨胀的体积, 按下列公式计算 WIDF 的溶胀力。

$$F = \frac{V_1 - V_2}{m_2} \quad (2)$$

式中:

$F$ ——溶胀力, mL/g;

$m_2$ ——样品质量, g;

$V_2$ ——样品体积, mL;

$V_1$ ——膨胀后体积, mL。

#### (3) 持油力

测定参考 Othman 等<sup>[14]</sup>的方法, 略作修改, 准确称取 0.5 g 样品于离心管中, 加 30 mL 植物油, 振荡混合 10 min, 4 000 r/min 离心 30 min, 弃去上清液, 擦干管壁附着的油, 按下列公式计算 WIDF 的持油力。

$$O = \frac{m_4 - m_3}{m_5} \quad (3)$$

式中:

$O$ ——持油力, g/g;

$m_3$ ——离心前离心管与样品质量, g;

$m_4$ ——离心后离心管与沉淀物质量, g;

$m_5$ ——样品质量, g。

#### (4) NO<sup>2</sup>-吸附能力

参考陈致印等<sup>[15]</sup>的方法稍作修改, 在锥形瓶中加入 20 mL 亚硝酸钠标准稀释溶液 (浓度为 20  $\mu\text{g/mL}$ ), 分别加入 0.15 g 超声与非超声处理的 WIDF 样品, 静置处理 15 min。取 0.6 mL 的上清液, 加入 4 g/L 的对氨基苯磺酸溶液 4 mL, 充分混合反应 3 min 后再加入 2 g/L 盐酸萘乙二胺溶液 2 mL 如表 2 所示, 静置 15 min 后在 538 nm 波长下测定吸光度。按下列公式计算 WIDF 的 NO<sup>2</sup>-吸附能力:

$$A_{\text{NO}_2^-} = \frac{m_6 - m_7}{n} \quad (4)$$

式中:

$A_{\text{NO}_2^-}$ — $\text{NO}_2^-$ 吸附能力,  $\mu\text{g/g}$ ;

$m_6$ —吸附前  $\text{NO}_2^-$ 含量,  $\mu\text{g}$ ;

$m_7$ —吸附后  $\text{NO}_2^-$ 含量,  $\mu\text{g}$ ;

$n$ —样品质量,  $\text{g}$ 。

### (5) 胆固醇吸附能力

测定参考 Yan 等<sup>[16]</sup>采用邻苯二甲醛 (OPA) 法。

取 15 mL 胆固醇标准溶液 (1 mg/mL) 于干燥锥形瓶中, 分别加入 0.15 g 的超声和非超声处理的马蹄 WIDF 样品, 充分反应 10 min 后吸取上清液 60  $\mu\text{L}$ , 再分别加入 3 mL 的 OPA (0.1 mg/mL) 和 2 mL 的浓硫酸, 充分混匀后室温静置 10 min, 550 nm 下测定吸光值。按下列公式计算 WIDF 的胆固醇吸附能力:

$$C = \frac{m_8 - m_9}{n_1} \quad (5)$$

式中:

$C$ —胆固醇吸附能力,  $\mu\text{g/g}$ ;

$m_8$ —吸附前胆固醇量,  $\mu\text{g}$ ;

$m_9$ —吸附后胆固醇量,  $\mu\text{g}$ ;

$n_1$ —样品质量,  $\text{g}$ 。

### 1.3.6 数据分析

试验重复 3 次, 测定平均值。试验数据采用 Excel 整理, 试验结果以均数 $\pm$ 标准差 ( $\bar{x}\pm s$ ) 表示; Design-Expert 10 进行响应面优化分析; SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析, 比较组间差异, 显著性水平为  $P<0.05$ ; 用 Origin 2019 软件制图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验结果

#### 2.1.1 复合酶添加量对马蹄渣 WIDF 提取率的影响

由图 1 可以看出, 随着复合酶添加量的增加, WIDF 提取率呈现先下降后上升再下降的趋势, 当  $\alpha$ -淀粉酶与中性蛋白酶的添加量为 7% ( $m/m$ ) 时, WIDF 提取率最高。当复合添加量在 3% 至 9% 的区间时, WIDF 提取率随着复合酶添加量的增加先升高后降低, 由于酶浓度较低时, 淀粉酶分子中的活性基团较少, 反应体系中酶的有效浓度不足, 淀粉水解程度不完全, 因此随着复合酶添加量的增加, WIDF 提取率增加; 但当复合酶添加量过高, 酶促反应达到饱和作用, 过度酶解反应将使得膳食纤维结构如  $\alpha$ -糖苷键造成破坏, 使纤维素、半纤维素水解生成单糖或多糖,

使得生理活性物质溶出, 导致提取率下降。因此, 选择提取 WIDF 的复合酶添加量为 7%。

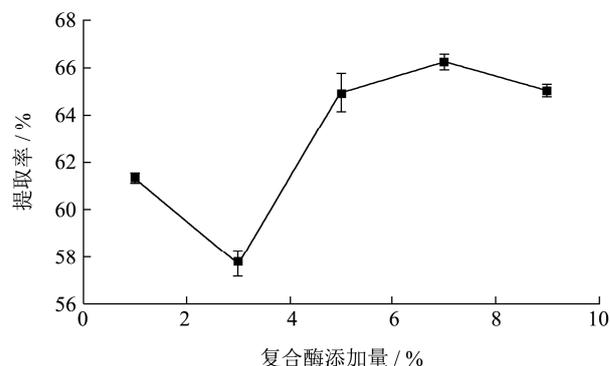


图 1 复合酶添加量对 WIDF 提取率的影响

Fig.1 Effect of enzyme dosage on the extraction rate of WIDF

#### 2.1.2 料液比对马蹄渣 WIDF 提取率的影响

从图 2 中可以看出, WIDF 提取率随着料液比的增加而减少, 其原因可能是在料液比较小的情况下, 由于分子间的间距较小, 增加物料与酶活性基团的接触, 提升酶解效率, 加快膳食纤维分子的溶出速度与数量<sup>[17]</sup>, 使得 WIDF 的提取率升高; 随着料液比增加, 反应体系中大分子之间的间距不断加大, 降低了酶解反应的效率, 是提取率较低。因此, 选择提取 WIDF 的料液比为 1:10。

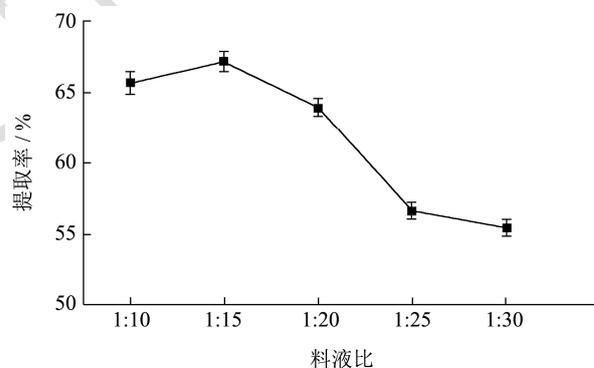


图 2 料液比对 WIDF 提取率的影响

Fig.2 Effect of material-to-liquid ratio on the extraction rate of WIDF

#### 2.1.3 超声功率对马蹄渣 WIDF 提取率的影响

从图 3 中可以看出, 随着超声功率的增大, WIDF 提取率先上升后下降, 与夏洁等<sup>[18]</sup>提取刺梨果渣水不溶性膳食纤维的结果一致。可能由于超声的机械作用和空化效应, 使得细胞发生破裂, 加速分子运动, 使酶易于与淀粉接触, 使淀粉水解更加完全<sup>[19]</sup>, 从而释放膳食纤维。在超声功率大于 240 W 时, WIDF 提取率达到最大值, 但当功率超过 240 W 时, 可能是由于过高的超声功率会使得  $\alpha$ -淀粉酶失活<sup>[20]</sup>, 影响酶解反应的进行, 同时高功率超声波的机械作用导致 IDF 发生降解, 聚合度降低<sup>[21]</sup>, 使得 IDF 得率下降。因此,

选择提取 WIDF 的超声功率为 240 W。

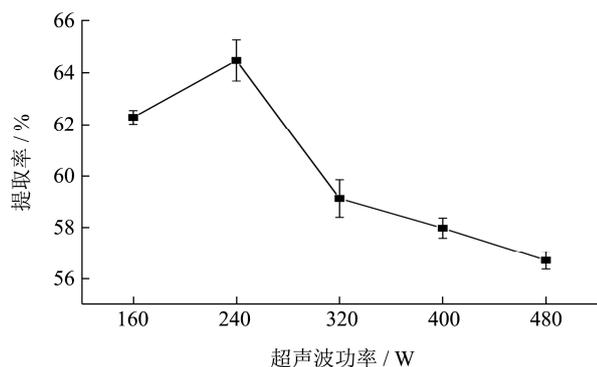


图3 超声功率对 WIDF 提取率的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic power on the extraction rate of WIDF

## 2.2 响应面试验结果

根据 Box-Behnke 实验设计方法,以复合酶添加量、料液比、超声功率自变量的三因素三水平共 17 个试验点的试验,以 WIDF 提取率为响应值,试验响应面优化设计方案和结果如表 2 所示。

## 2.3 响应面模型方程的建立与分析

通过对试验数据进行多项拟合回归处理,以 WIDF 提取率为因变量,酶浓度 (A)、料液比 (B)、超声功率 (C) 为自变量,建立的二次回归模型,方程为:  $Y=56.70+1.03A-6.60B+0.52C+1.29AB+0.63AC-0.57BC+1.52A^2+1.52B^2-0.22C^2$  ( $R^2_{Adj}=0.8949$ )。

对回归模型进行方差分析,结果如表 3 所示,提取率指标的回归方程模型极显著 ( $P<0.01$ ),失拟项

不显著 ( $P>0.05$ ),说明数据可靠、模型稳定,该模型可用于预测不同工艺条件对 WIDF 提取率的影响。由 F 值的大小可知,影响 WIDF 提取率的主要因素主次顺序为  $B>A>C$ ,即料液比>复合酶添加量>超声功率,其中料液比 B 提取率的影响极显著。

表 2 Box-Behnken 响应面设计及响应值

Table 2 Box-Behnken response surface design and response values

试验号	A 复合酶添加量/%	B 料液比/(g/g)	C 超声功率/W	Y 提取率/%
1	5	1:10	240	66.76
2	7	1:20	160	50.61
3	7	1:15	240	56.56
4	5	1:20	240	51.24
5	9	1:10	240	65.66
6	9	1:15	320	59.78
7	7	1:15	240	54.15
8	7	1:10	160	62.94
9	7	1:10	320	66.55
10	5	1:15	160	57.50
11	7	1:15	240	58.28
12	7	1:15	240	55.80
13	7	1:15	240	58.73
14	7	1:20	320	51.92
15	9	1:20	240	55.31
16	5	1:15	320	55.87
17	9	1:15	160	58.89

表 3 回归模型方差分析表

Table 3 Analysis of variance of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	提取率	
					P 值	显著性
模型	389.73	9	43.30	16.14	0.000 7	**
A-复合酶添加量	8.55	1	8.55	3.19	0.117 4	
B-料液比	348.88	1	348.88	130.03	<0.000 1	**
C-超声功率	2.18	1	2.18	0.81	0.396 9	
AB	6.68	1	6.68	2.49	0.158 5	
AC	1.59	1	1.59	0.59	0.466 9	
BC	1.32	1	1.32	0.49	0.505 3	
A <sup>2</sup>	9.75	1	9.75	3.63	0.098 3	
B <sup>2</sup>	9.69	1	9.69	3.61	0.099 2	
C <sup>2</sup>	0.20	1	0.20	0.07	0.794 7	
残差	18.78	7	2.68			
失拟项	4.83	3	1.61	0.46	0.724 1	不显著
净误差	13.95	4	3.49			
总离差	408.51	16				

注:  $R^2_{Adj}=0.8949$ ,  $P<0.05$  时影响显著;  $P<0.01$  时影响极显著。

## 2.4 影响因子间的交互作用分析

如图 4 各图为由提取率指标与各因素构成的曲面图,指复合酶添加量、料液比、超声功率中任意一个变量取零水平时,剩余两个因素对提取率指标的影响。响应曲面的坡度缓陡说明相应条件的改变对响应值影响的高低,若坡度越陡峻,则说明响应值对于操作条件的改变越灵敏。

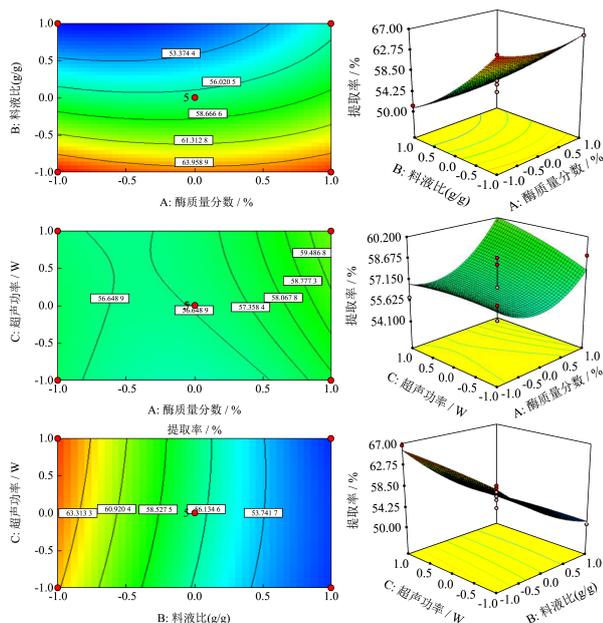


图 4 各因素交互作用对 WIDF 提取率的影响

Fig.4 The influence of the interaction of various factors on the WIDF extraction rate

结合二次多项式回归模型和响应面分析结果得

表 4 传统和超声辅助复合酶法提取对马蹄渣 WIDF 提取率和品质特性影响

Table 4 Effects of ultrasonic and non-ultrasonic treatment on physical and chemical properties

提取方法	提取率/%	持水性/(g/g)	溶胀性/(mL/g)	持油性/(g/g)	NO <sub>2</sub> 吸收性能/(μg/g)	胆固醇吸收性能/(μg/g)
传统复合酶法	32.59±0.89 <sup>b</sup>	6.35±0.12 <sup>b</sup>	6.14±0.13 <sup>a</sup>	3.16±0.10 <sup>a</sup>	19.70±0.44 <sup>a</sup>	155.96±5.36 <sup>b</sup>
超声辅助复合酶法	67.60±1.23 <sup>a</sup>	8.53±0.14 <sup>a</sup>	6.30±0.15 <sup>a</sup>	3.08±0.11 <sup>a</sup>	20.47±0.52 <sup>a</sup>	211.74±5.51 <sup>a</sup>

注: 同列右上角标写小写字母不同表示差异显著 (P<0.05)。

亚硝酸盐可与胃中的仲胺、叔胺类物质作用转化为具有致癌作用的 N-亚硝胺,导致癌症的发生<sup>[24]</sup>。传统复合酶法和超声辅助复合酶解提取的马蹄渣 WIDF 对 NO<sub>2</sub>的吸附效果分别为 20.47 和 19.70 μg/g,表明超声辅助提取的 WIDF 吸附性能略微提高,但不存在显著性差异。

人体内胆固醇的含量与许多疾病有直接关系,人体内胆固醇包括外源性摄入和内源性合成,不溶性膳食纤维能吸附人体中过度供给的胆固醇等物质,可保持人体正常的胆固醇水平,减少和预防心脑血管疾病发生的危险<sup>[25]</sup>。针对胆固醇的吸附作用,相比非超声辅助提取,超声辅助提取的马蹄渣 WIDF 的吸附性提

出,该组回归模型存在稳定点(即响应值综合最高点),根据 Design-Expert 10.0.1 软件分析出马蹄渣超声辅助提取 WIDF 的最佳条件:复合酶添加量为 9%,料液比为 1:15,超声功率为 320 W。

## 2.5 验证试验

对优化得到的最佳条件:复合酶添加量为 9%,料液比为 1:15,超声功率 320 W,进行验证试验,在此条件下,WIDF 提取率达到 67.60%,与理论预测值接近,可为后续研究及工业化生产提供一定的参考依据。并在此最佳条件下进行非超声辅助酶法提取操作,对比超声辅助和非超声辅助酶法提取 WIDF 的理化特性和功能特性。

## 2.6 不同提取方法对 WIDF 提取率和品质特性的影响

传统复合酶和超声辅助复合酶法提取对 WIDF 提取率和品质特性的影响如表 4 所示,从表中可看出,发现超声辅助使 WIDF 的持水性、溶胀性分别提高了 2.18 g/g 和 0.16 mL/g。与黄六容等超声波改善大蒜秸秆不溶性膳食纤维持水性<sup>[11]</sup>、牛希等超声改性提升燕麦膳食纤维持水性等的结果一致<sup>[22]</sup>。原因可能是超声波的空化作用形成瞬时高压后不断撞击物料,使得膳食纤维的结构更疏松延展,暴露出更多的亲水基团,从而提高膳食纤维的持水性和溶胀性<sup>[23]</sup>,但超声辅助处理对 WIDF 的持油性影响不明显。

高 35.77%,达到 211.74 μg/g,陈致印等同样发现通过超声波辅助提取改性后的甘薯渣不溶性膳食纤维的胆固醇吸附性能显著高于常规酶法提取<sup>[15]</sup>。可能是由于超声处理使得 WIDF 表面的吸附结合位点更多的暴露出来,使得 WIDF 的胆固醇吸附能力显著升高。

## 3 结论

采用响应面优化的超声辅助复合酶解法进行提取 WIDF,得到最佳提取方法为超声功率 320 W、复合酶添加量为 9%、料液比分别为 1:15,在 40 °C 下酶解时间 40 min, WIDF 提取率高为 67.60%。通过对比分析超声和非超声辅助提取 WIDF 的理化特性和功能特

性, 超声辅助提取 WIDF 的持水力、溶胀力、胆固醇吸附效果均显著高于非超声辅助提取。超声辅助提取在一定程度上能够改变膳食纤维的微观结构, 显著提高 WIDF 的持水性和胆固醇吸附性能。本研究通过采用超声辅助酶解法提取 WIDF, 通过优化最佳提取工艺, 可为马蹄加工副产物综合利用提供一定的理论参考。

### 参考文献

- [1] 党子健. 荸荠皮渣改性为染料色素及重金属离子吸附剂的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [2] Jia Ping Chen, Guo Chong Chen, Xiao Ping Wang, et al. Dietary fiber and metabolic syndrome: a meta-analysis and review of related mechanisms [J]. *Nutrients*, 2017, 10(1): 24-34.
- [3] Bosaeusi. Fibre effects on intestinal functions (diarrhoea, constipation and irritable bowel syndrome) [J]. *Clinical Nutrition Supplements*, 2004, 1(2): 33-38.
- [4] Gong J, Yang C B. Advances in the methods for studying gut microbiota and their relevance to the research of dietary fiber functions [J]. *Food Research International*, 2012, 48(2): 916-929.
- [5] 董吉林, 朱莹莹, 李林, 等. 燕麦膳食纤维对食源性肥胖小鼠降脂减肥作用研究[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(9): 24-29.
- [6] Weickert M O, Roden M, Isken F, et al. Effects of supplemented isoenergetic diets differing in cereal fiber and protein content on insulin sensitivity in overweight humans [J]. *American Journal of Clinical Nutrition*, 2011, 94(2): 459-471.
- [7] Yang B, Wu Q, Song X, et al. Japanese grape (*Hovenia dulcis*) polysaccharides new insight into extraction, characterization, rheological properties, and bioactivities [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 134: 631-644.
- [8] 周新, 唐世英, 杨贺棋, 等. 不溶性膳食纤维的提取、表征及改性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 42(3): 359-366.
- [9] 赖爱萍, 陆国权, 王颖. 超声波辅助酶法制备甘薯渣膳食纤维工艺研究[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(8): 99-104.
- [10] 李琦, 曾凡坤, 华蓉, 等. 响应面法优化超声辅助提取韭菜根不溶性膳食纤维[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(3): 128-134.
- [11] 黄六容, 陈甜, 赵匀淑, 等. 超声波改善大蒜秸秆不溶性膳食纤维结构及吸附性[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(12): 294-299.
- [12] Wang C, Song R, Wei S, et al. Modification of insoluble dietary fiber from ginger residue through enzymatic treatments to improve its bioactive properties [J]. *LWT*, 2020, 125: 109220.
- [13] 易甜, 崔文文, 王明锐, 等. 锦橙皮渣膳食纤维微粉化及其功能特性分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(10): 8-14.
- [14] Othman R A, Mogh Ad Asian M H, Jh J P. Cholesterol-lowering effects of oat  $\beta$ -glucan [J]. *Nutrition Reviews*, 2011, 6: 299-309.
- [15] 陈致印, 刘伟鹏, 王盈希, 等. 三种不同改性方法对甘薯渣不溶性膳食纤维改性效果的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(2): 57-62, 69.
- [16] Yan L, Li T, Lilt C, et al. Effects of high hydrostatic pressure and superfine grinding treatment on physicochemical/functional properties of pear pomace and chemical composition of its soluble dietary fiber [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2019, 107: 171-177.
- [17] 王昊宇, 黄艳, 李坤, 等. 益生菌发酵山楂浆工艺优化及品质分析[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(3): 409-415.
- [18] 夏洁, 薛浩岩, 贾祥泽, 等. 刺梨果渣水不溶性膳食纤维提取工艺优化[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(7): 227-234.
- [19] 马子晔, 何孟欣, 孙剑锋, 等. 超声波辅助提取马铃薯全粉加工副产物中膳食纤维[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(22): 79-85.
- [20] 陈小丽, 黄卓烈, 巫光宏, 等. 超声波对淀粉酶催化活性的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2005, 26(1): 76-79.
- [21] 王禄, 张宇, 孟庆伟. 响应面优化超声波辅助提取红参渣中不溶性膳食纤维工艺[J]. *食品工业*, 2020, 41(8): 22-25.
- [22] 牛希, 史乾坤, 赵城彬, 等. 超声改性对燕麦膳食纤维理化性质及结构的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(23): 130-136.
- [23] 张艳, 何翠, 刘玉凌, 等. 超声波改性对方竹笋膳食纤维性能和结构的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2017, 43(1): 150-155.
- [24] 刘静娜, 庄远红. 盐酸改性西瓜皮不溶性膳食纤维对亚硝酸盐的吸附作用[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(4): 72-78.
- [25] Agnihotri M A, Khan A. Effect of water-soluble gummy fiber, water -insoluble neutral detergent fiber isolated from *Syzygiumcumini* seeds on biliary and fecal bile acids and sterols in rats fed a high cholesterol diet [J]. *International Journal of Medical Science & Public Health*, 2015, 4(1): 23-26.