

松茸渣不溶性膳食纤维提取及特性研究

胡金祥¹, 许程剑^{1,2*}, 闫妮娜^{1,2}, 刘苏琴¹, 杨腊梅¹, 罗丹¹,
王林¹, 徐春梅¹, 刘阳¹, 易宇文¹,

(1. 四川旅游学院食品学院, 成都 610100; 2. 石河子大学食品学院, 石河子 832003)

摘要: 目的 以松茸提取蛋白后的残渣为原料, 采用超声波辅助法提取其中的不溶性膳食纤维, 并对其特性进行研究。**方法** 通过研究超声时间、超声功率、超声温度和料液比对其得率的影响, 在单因素实验结果的基础上, 设计响应面实验。对提取出的松茸不溶性膳食纤维理化性质进行研究。**结果** 最佳工艺参数如下: 超声时间 43 min、超声功率 266 W、超声温度 53 °C、料液比 1:31 (g/mL), 不溶性膳食纤维的得率为 78.95%, 影响不溶性膳食纤维的主次因素为: 超声功率>超声温度>超声时间>料液比。松茸不溶性膳食纤维持水性为 2.78 g/g, 膨胀性为 3.49 mL/g, 持油性为 1.28 g/g, 结合水力为 2.24 g/g, 葡萄糖吸附能力为 37955 μmoL/g。**结论** 在优化后的条件下, 松茸渣不溶性膳食纤维提取效率高。松茸不溶性膳食纤维葡萄糖吸附能力偏高, 可作为辅助降血糖的功能性食品配料。

关键词: 松茸; 膳食纤维; 响应面分析

Study on extraction and characteristics of insoluble dietary fiber from *Tricholoma matsutake* residue

HU Jin-Xiang¹, XU Cheng-Jian^{1,2*}, YAN Ni-Na^{1,2}, LIU Su-Qin¹, YANG La-Mei¹, LUO Dan,
WANG Lin¹, XU Chun-Mei¹, LIU Yang¹, YI Yu-Wen¹

(1. College of Food Science and Technology, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China;
2. College of Food Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

ABSTRACT: Objective To extract insoluble dietary fiber by ultrasonic assisted method taking the residue after extracting protein from *Tricholoma matsutake* as raw material, and study its characteristics. **Methods** The response surface experiment was designed on the basis of single factor experimental results by studying the effects of ultrasonic time, ultrasonic power, ultrasonic temperature and solid-liquid ratio on the yield. The physical and chemical properties of insoluble dietary fiber extracted from *Tricholoma matsutake* were studied. **Results** The optimum technological parameters were as follow: Ultrasonic time 43 min, ultrasonic power 266 W, ultrasonic temperature 53 °C, solid-liquid ratio 1:31 (g/mL), and the yield of insoluble dietary fiber was 78.95%. The primary

基金项目: 国家自然科学基金项目(31101256)、四川旅游学院创新团队项目(20SCTUTY03)、烹饪科学四川省高等学校重点实验室项目(PRKX2020Z02)、川菜发展研究中心项目(CC21Z23)、国家大学生创新训练项目(202111552083、S202111552104、S202111552172、202111552014)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (31101256), the Innovation Team Project of Sichuan Tourism University (20SCTUTY03), the Key Laboratory of Culinary Science, Colleges and Universities in Sichuan Project (PRKX2020Z02), the Sichuan Cuisine Development Research Center Project (CC21Z23), and the College Student Innovation and Entrepreneurship Training Program Project (202111552083, S202111552104, S202111552172, 202111552014)

*通信作者: 许程剑, 教授, 主要研究方向为烹饪科学与食品工程。E-mail: 36111916@qq.com

*Corresponding author: XU Cheng-Jian, Professor, Sichuan Tourism University, No.459, Honglin Road, Longquanyi District, Chengdu 610100, China. E-mail: 36111916@qq.com

and secondary factors affecting insoluble dietary fiber were ultrasonic power>ultrasonic temperature>ultrasonic time>solid-liquid ratio. The water holding capacity of *Tricholoma matsutake* insoluble dietary fiber was 2.78 g/g, the swelling capacity was 3.49 mL/g, the oil holding capacity was 1.28 g/g, the combined hydraulic power was 2.24 g/g, and the glucose adsorption capacity was 37955 $\mu\text{mol/g}$. **Conclusion** Under the optimized conditions, the extraction efficiency of insoluble dietary fiber from *Tricholoma matsutake* residue is high. *Tricholoma matsutake* insoluble dietary fiber has high glucose adsorption capacity, and can be used as a functional food ingredient to assist in reducing blood glucose.

KEY WORDS: *Tricholoma matsutake*; dietary fiber; response surface analysis

0 引言

松茸(*Tricholoma matsutake*)中文学名松口蘑,是与松树共生的一种外生菌根真菌,又名松菇、老鹰嘴、鸡丝菌等,属于担子菌纲伞菌目口蘑科口蘑属,是中国国家二级濒危保护物种^[1]。松茸的产地分布非常广泛,我国主要分布于四川、黑龙江、云南等地^[2]。松茸富含蛋白质、氨基酸、膳食纤维等成分,有很高的营养价值,有促进新陈代谢、延缓组织器官衰退、增加免疫、强心补血、益胃补气、治疗糖尿病、抗癌和健脑益智等功效^[3-5]。

膳食纤维是一类不被人体消化分解的结构复杂的多糖类天然大分子物质的总称,被誉为“第七大营养素”,根据溶解性不同,可分为不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)和可溶性膳食纤维(soluble dietary fiber, SDF)^[6]。不溶性膳食纤维成分包括纤维素、半纤维素、木质素等^[7],有排毒、预防便秘和肥胖的功效,能饱腹但却不为身体提供热量,在功能性食品生产中应用广泛。松茸富含膳食纤维资源,可作为膳食纤维食品工业化生产的优质原料,而被开发与应用。

国内目前对于松茸的深加工研究,主要是对松茸多糖的提取、理化性质与功能活性的研究,如季云龙^[8]研究松茸多糖的提取及全价松茸微胶囊化;张岩等^[9]研究松茸多糖对乳酸菌发酵及酸奶品质的影响;陈炼红等^[10]研究响应面法优化松茸多糖酶法提取工艺及其体外抗氧化性分析等。国外主要是对松茸组成成分、栽培生长等的研究,如PUESCHELVA等^[11]研究了松茸炒制过程中的香气成分变化;TAKASHI等^[12]研究了松茸栽培进展;MAKI等^[13]研究比较了不同松茸菌株在不同温度土壤下的菌丝生长情况等。而对于膳食纤维方面的研究还很少,并且大多数实验后的松茸副产物未得到充分利用,造成大量膳食纤维的损失。因此,提高松茸的综合利用是提高食用菌产业效益的有效方法。

本研究对松茸不溶性膳食纤维提取条件进行了优化,并对其葡萄糖吸附能力、持水性等功能特性进行测定,以期对松茸不溶性膳食纤维工业化生产利用奠定了一定的理

论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

松茸渣由本实验室松茸(四川省雅江县)提取蛋白后的残渣;无水乙醇、氢氧化钠、酒石酸钾钠、3,5-二羟基水杨酸、苯酚、无水亚硫酸钠、葡萄糖(分析纯,成都金山化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

BGZ-140 电热恒温干燥箱(上海博迅实业有限公司);GL224I-1S 电子天平(德国塞多利斯科学仪器有限公司);FW177 粉碎机、DK-98-II电热恒温水浴锅(天津市泰斯特仪器有限公司);Scientz-500 多功能恒温超声萃取仪(宁波新芝生物科技股份有限公司);HC-3018R 高速冷冻离心机(安徽中科中佳科学仪器有限公司);SHZ-D(III)循环水式真空泵(巩义市予华仪器有限公司);UV6100S 紫外分光光度计(上海美谱达仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 松茸原料预处理

将松茸渣于 50 °C 的恒温干燥箱中烘干 24 h,再用粉碎机碾碎。称取 100 g 松茸粉末于三颈烧瓶中,再倒入 400 mL 乙醇溶液(95%, V:V),将三颈烧瓶放于 70 °C 的水浴锅中,进行热回流 4 h,再进行真空抽滤,残渣重复以上步骤 2 次,再于 50 °C 的恒温干燥箱中烘干 24 h,再用粉碎机碾碎,之后将松茸样品保存于干燥器中备用^[14]。

1.3.2 不溶性膳食纤维的超声辅助提取

称取松茸样品 2.0 g(精确至 0.0001 g),倒入烧杯,根据料液比,加入一定体积的蒸馏水,再设置不同的提取工艺参数,将烧杯放于超声波中提取,4500 r/min 离心 20 min,收集沉淀物。用 70 °C 去离子水洗涤 2 次,再用 78%乙醇溶液洗涤 1 次,再将所得残渣置于 50 °C 的热风干燥箱中干燥 24 h,即可得到松茸 IDF^[14]。IDF 得率计算如公式(1)所示。

$$\text{松茸 IDF 得率}/\% = m_{\text{提取}}/m_{\text{样}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $m_{\text{提取}}$ 为提取干燥后得到的 IDF 质量, g; $m_{\text{样}}$ 为提取前称量的松茸样品质量, g。

1.3.3 单因素实验

(1) 超声时间对松茸 IDF 得率的影响

称取松茸粉末 2.0 g(精确至 0.0001 g), 使超声功率 225 W、超声温度 50 °C、料液比 1:30 (g/mL)不变, 分别考察超声时间 15、30、45、60、75 min, 计算 IDF 得率, 研究不同超声时间对松茸 IDF 得率的影响。

(2) 超声功率对松茸 IDF 得率的影响

称取松茸粉末 2.0 g(精确至 0.0001 g), 使超声时间 45 min、超声温度 50 °C、料液比 1:30 (g/mL)不变, 分别考察超声功率 135、180、225、270、315 W, 计算 IDF 得率, 研究不同超声功率对松茸 IDF 得率的影响。

(3) 超声温度对松茸 IDF 得率的影响

称取松茸粉末 2.0 g(精确至 0.0001 g), 使超声时间 45 min、超声功率 225 W、料液比 1:30 (g/mL)不变, 分别考察超声温度 30、40、50、60、70 °C, 计算 IDF 得率, 研究不同超声温度对松茸 IDF 得率的影响。

(4) 料液比对松茸 IDF 得率的影响

称取松茸粉末 2.0 g(精确至 0.0001 g), 使超声时间 45 min、超声功率 225 W、超声温度 50 °C不变, 分别考察料液比 1:20、1:25、1:30、1:35、1:40 (g/mL), 计算 IDF 得率, 研究不同料液比对松茸 IDF 得率的影响。

1.3.4 响应面优化实验

根据单因素实验结果, 选取超声时间、超声功率、超声温度以及料液比 4 个因素, 进行四因素三水平的 Box-Behnken 中心组合实验设计, 并采用响应面法(response surface methodology, RSM)进行提取条件优化。实验设计因素水平及编码如表 1。

表 1 响应面优化松茸不溶性膳食纤维提取工艺因素编码及水平
Table 1 Response surface method to optimize the extraction process factors and levels of insoluble dietary fiber from *Tricholoma matsutake*

因素	编码	水平		
		-1	0	1
超声时间/min	A	30	45	60
超声功率/W	B	180	225	270
超声温度/°C	C	40	50	60
料液比(g:mL)	D	1:30	1:35	1:40

1.4 松茸渣的理化性质测定

1.4.1 持水性

称取 0.5 g(精确至 0.0001 g)不溶性膳食纤维粉于 100 mL 烧杯中, 加入 35 mL 蒸馏水, 静置 24 h 后, 将不溶性膳食纤维粉于滤纸上沥干, 再称其质量。持水性(water holding capacity, WHC)按照公式(2)所示计算。

$$\text{持水性(WHC)} = \frac{m_{\text{湿}} \cdot m_{\text{干}}}{m_{\text{湿}}} \quad (2)$$

式中: $m_{\text{湿}}$ 为不溶性膳食纤维粉加入蒸馏水后的质量, g; $m_{\text{干}}$ 为不溶性膳食纤维粉在滤纸上沥干的质量, g。

1.4.2 膨胀性

称取 1.5 g(精确至 0.0001 g)不溶性膳食纤维粉, 倒入量筒, 读取体积, 再加入 30 mL 蒸馏水, 不断振荡量筒, 摇匀后, 将量筒室温静置 24 h 后, 读取膨胀后不溶性膳食纤维的体积^[15]。膨胀性按照公式(3)所示计算。

$$\text{膨胀性}/\% = \frac{V_{\text{膨胀}} \cdot V_{\text{样}}}{m_{\text{样}}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $V_{\text{膨胀}}$ 为不溶性膳食纤维粉加入蒸馏水后读取的体积, mL; $V_{\text{样}}$ 为不溶性膳食纤维粉加入蒸馏水前读取的体积, mL; $m_{\text{样}}$ 为倒入量筒的不溶性膳食纤维粉质量, g。

1.4.3 结合水力

称取 0.25 g(精确至 0.0001 g)不溶性膳食纤维粉, 倒入 50 mL 的离心管, 再倒入 25 mL 蒸馏水, 于 6000 r/min 下离心 1 h, 除去上清液, 沉淀放置 1 h 后称量, 记为 m_1 , 再将沉淀于恒温箱烘干, 称重记 m_2 ^[15]。结合水力(combined hydraulic, CWC)按照公式(4)所示计算。

$$\text{结合水力(CWC)} = \frac{m_1 - m_2}{m_{\text{样}}} \quad (4)$$

式中: m_1 为离心除去上清液, 沉淀放置 1 h 后的质量, g; m_2 为将沉淀于恒温箱烘干后的质量, g; $m_{\text{样}}$ 为离心前称量的不溶性膳食纤维粉质量, g。

1.4.4 持油性

称取 0.5 g(精确至 0.0001 g)不溶性膳食纤维粉, 倒入 100 mL 烧杯, 再倒入 35 mL 花生油, 搅拌 2 h 后, 于 6000 r/min 离心 30 min 后, 称重沉淀^[11]。持油性(oil holding capacity, OHC)按照公式(5)所示计算。

$$\text{持油性(OHC)} = \frac{m_{\text{湿}} - m_{\text{样}}}{m_{\text{样}}} \quad (5)$$

式中: $m_{\text{湿}}$ 为离心后沉淀的质量, g; $m_{\text{样}}$ 为离心前称量的不溶性膳食纤维粉质量, g。

1.4.5 葡萄糖吸附能力

准确称取 0.1 g(精确至 0.0001 g)不溶性膳食纤维粉, 倒入 50 mL 离心管, 再倒入 20 mL 的 1 mg/mL 葡萄糖溶液, 将离心管在 37 °C 下反应 2 h, 吸附平衡后, 6000 r/min 离心 20 min, 采用二硝基水杨酸法测定上清液中葡萄糖的浓度。以蒸馏水代替葡萄糖溶液为对应样品的空白组^[15-16]。葡萄糖吸附能力(glucose adsorption capacity, GAC)按照公式(6)所示计算。

$$\text{葡萄糖吸附能力(GAC)} = \frac{(c_{\text{初}} - c_{\text{吸附}})V}{m_{\text{样}}} \quad (6)$$

式中: $c_{\text{初}}$ 为加入不溶性膳食纤维粉前葡萄糖溶液浓度, mg/mL; $c_{\text{吸附}}$ 为吸附平衡后葡萄糖溶液浓度, mg/mL; $m_{\text{样}}$ 为倒入离心管

的不溶性膳食纤维粉质量, mg。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 超声时间对松茸渣 IDF 得率的影响

超声时间在 15~45 min 之间时, 松茸 IDF 得率逐渐增大, 可能是超声波通过产生空穴效应, 破坏了松茸的细胞壁结构, 从而增强了细胞内水分子运动, 增加了水溶液和物料间的接触, 导致 IDF 得率增大^[17]。在超声时间为 45 min 时, 松茸 IDF 得率最大, 超过 45 min 后, IDF 得率下降。可能是超声波强机械剪切作用的时间太长, 使得纤维类物质发生降解, 所以得率降低^[18]。因此本研究选择 45 min 为超声时间的最佳水平。

2.1.2 超声功率对松茸渣 IDF 得率的影响

超声功率小于 225 W 时, 松茸 IDF 得率逐渐增大, 超过 225 W 后, IDF 得率逐渐下降, 可能是随着超声功率的增强, 松茸细胞内的其他成分被释放出来; 也可能由于超声功率过高, 破坏物料结构使其降解, 或者是将一些能降解目标物的酶释放了出来, 导致 IDF 得率下降^[19]。因此, 本研究选择超声功率为 225 W。

2.1.3 超声温度对松茸渣 IDF 得率的影响

当超声温度在 30~50 °C 之间时, 松茸 IDF 的得率逐渐增大, 当超声温度达到 50 °C 时, 可能因为温度升高使物质的扩散系数增大, 使得水溶液的渗透力增强, 导致松茸 IDF 得率变大^[20]。在超声温度超过 50 °C 后, 得率逐渐下降, 可能是温度过高, 热效应叠加超声空化效应会导致 IDF 的结构发生部分降解, 使其得率降低^[21]。因此本研究选择 50 °C 为超声温度因素的最佳水平。

2.1.4 料液比对松茸渣 IDF 得率的影响

料液比在 1:20~1:35 (g/mL) 之间时, 松茸 IDF 得率随料液比的减小而增大, 因水分子与物料的接触面积越大, 越利于松茸 IDF 得率的增大。当料液比小于 1:35 (g/mL) 后, 松茸 IDF 得率降低, 可能是物料中的 IDF 有限, 无法提取更多, 也可能是水分子过多导致其他水溶性成分被释放导致。降低幅度过小, 可能同超声波辅助提取大豆 IDF 相似, 可能是目标物与溶剂边界层浓度差的变化有关, 当料液比减小, 浓度差变大, 目标物溶解度就随之变大, 所以目标物得率升高, 直到其在溶剂中的扩散达到了平衡, 得率不再升高^[20]。因此本研究选择确定料液比为 1:35 (g/mL)。

2.2 响应面优化实验结果与分析

2.2.1 模型方程的建立及其方差分析

采用 Design-Expert v8.0 软件, 按照 Box-Behnken 实验设计, 在单因素实验基础上选取超声时间(A)、超声功率(B)、超声温度(C)、料液比(D)为自变量, 松茸渣不溶性膳食纤维的得率作为响应值(Y), 进行响应面分析实验, 实验设计方案及结果见表 2。

对表 2 的实验数据进行多元回归拟合, 其二次多项回归模拟方程为

$$Y=0.80-0.034A+0.045B+0.036C+5.283\times 10^{-3}D-6.500\times 10^{-4}AB-0.043AC-0.030AD+0.029BC-0.024BD-5.875\times 10^{-3}CD-0.069A^2+4.194\times 10^{-3}B^2-0.095C^2-0.085D^2$$

对该模型进行方差分析, 结果见表 3。从表 3 的方差分析结果可以看出, 该二次回归方程的模型 $P<0.0001$, 该模型是极显著的; 失拟项 $P>0.05$, 差异不显著, 说明该回归方程与实际情况拟合良好, 误差较小, 此模型可用作预测和分析松茸不溶性膳食纤维提取的工艺参数。从方差分析表中各因素的 F 值可以看出, 在选定的范围内, 影响松茸不溶性膳食纤维得率的主次因素为: $B>C>A>D$, 即超声功率>超声温度>超声时间>料液比。

表 2 松茸渣不溶性膳食纤维提取工艺响应面实验设计及结果
Table 2 Response surface experimental design and results of extraction process of insoluble dietary fiber from *Tricholoma matsutak* residue

序号	A 超声时间 /min	B 超声功率/W	C 超声温度/°C	D 料液比 (g/mL)	IDF 得率 /%
1	45	225	40	1:30	59.19
2	45	225	40	1:40	59.74
3	45	270	40	1:35	66.94
4	60	270	50	1:35	68.18
5	60	225	50	1:30	63.27
6	30	270	50	1:35	81.28
7	60	225	50	1:40	58.54
8	60	225	40	1:35	62.85
9	45	225	50	1:35	80.31
10	45	180	50	1:30	62.78
11	30	180	50	1:35	78.09
12	45	225	50	1:35	81.33
13	45	225	50	1:35	80.49
14	45	225	50	1:35	79.79
15	45	225	60	1:40	63.05
16	60	225	60	1:35	63.01
17	45	270	50	1:40	79.18
18	45	180	60	1:35	65.15
19	45	225	50	1:35	76.79
20	30	225	50	1:30	60.84
21	45	270	60	1:35	81.22
22	45	180	40	1:35	62.53
23	60	180	50	1:35	65.25
24	45	270	50	1:30	81.47
25	30	225	40	1:35	58.48
26	30	225	50	1:40	68.01
27	30	225	60	1:35	75.78
28	45	180	50	1:40	70.22
29	45	225	60	1:30	64.85

表 3 回归模型方差分析
Table 3 Analysis of variance of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.18	14	0.013	9.54	<0.0001
A	0.014	1	0.014	10.48	0.0060
B	0.025	1	0.025	18.00	0.0008
C	0.016	1	0.016	11.49	0.0044
D	3.4×10 ⁻⁴	1	3.4×10 ⁻⁴	0.25	0.6277
AB	1.7×10 ⁻⁶	1	1.7×10 ⁻⁶	1.2×10 ⁻³	0.9724
AC	7.3×10 ⁻³	1	7.3×10 ⁻³	5.39	0.0358
AD	3.5×10 ⁻³	1	3.5×10 ⁻³	2.60	0.1292
BC	3.4×10 ⁻³	1	3.4×10 ⁻³	2.50	0.1365
BD	2.4×10 ⁻³	1	2.4×10 ⁻³	1.74	0.2086
CD	1.4×10 ⁻⁴	1	1.4×10 ⁻⁴	0.10	0.7549
A ²	0.031	1	0.031	22.80	0.0003
B ²	1.1×10 ⁻⁴	1	1.1×10 ⁻⁴	0.084	0.7765

表 3(续)

来源	平方和	自由度	均方	F	P
C ²	0.059	1	0.059	43.14	<0.0001
D ²	0.047	1	0.047	34.20	<0.0001
残差	0.019	14	1.4×10 ⁻³		
失拟项	0.018	10	1.8×10 ⁻³	5.89	0.0510
纯误差	1.2×10 ⁻³	4	3.0×10 ⁻⁴		
总和	0.20	28			

2.2.2 响应面分析

从图 1 可知, 松茸渣 IDF 得率随各因素水平的增大, 均先增大后减小, 若各因素交互作用的等高线呈椭圆形, 说明交互作用显著。

响应面曲面的陡峭程度可以反映出 4 个因素分别对响应值影响的大小, 响应曲面越陡表示对响应值影响越大, 越缓表示影响越小, 可看出实验因素中超声功率对松茸 IDF 得率有显著影响, 超声温度次之。

2.2.3 模型验证

结合响应面分析和方差分析, 可得到超声辅助法提取最佳工艺参数为: 超声时间 42.77 min、超声功率 266.41 W、超声

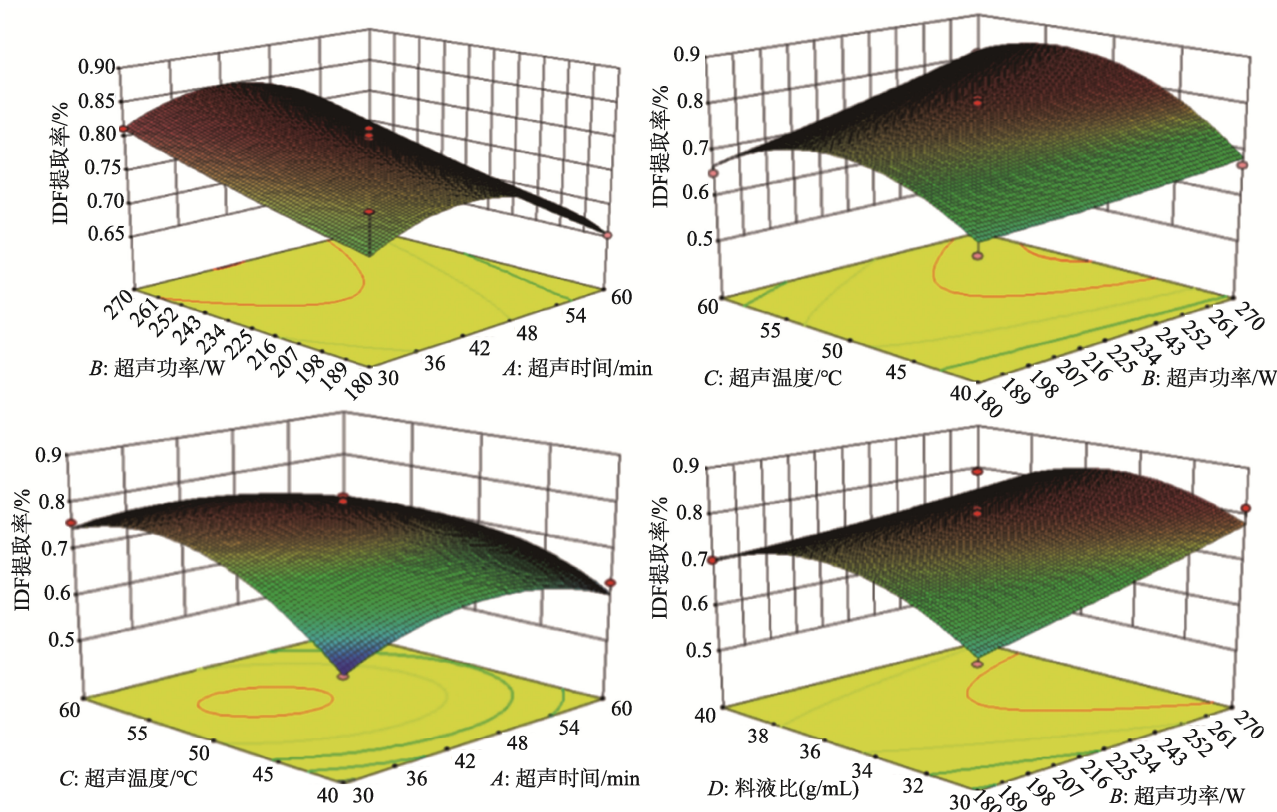


图 1 各因素交互作用对松茸 IDF 得率的响应面

Fig.1 Response surfaces of the interaction of various factors on the IDF yield of *Tricholoma matsutake*

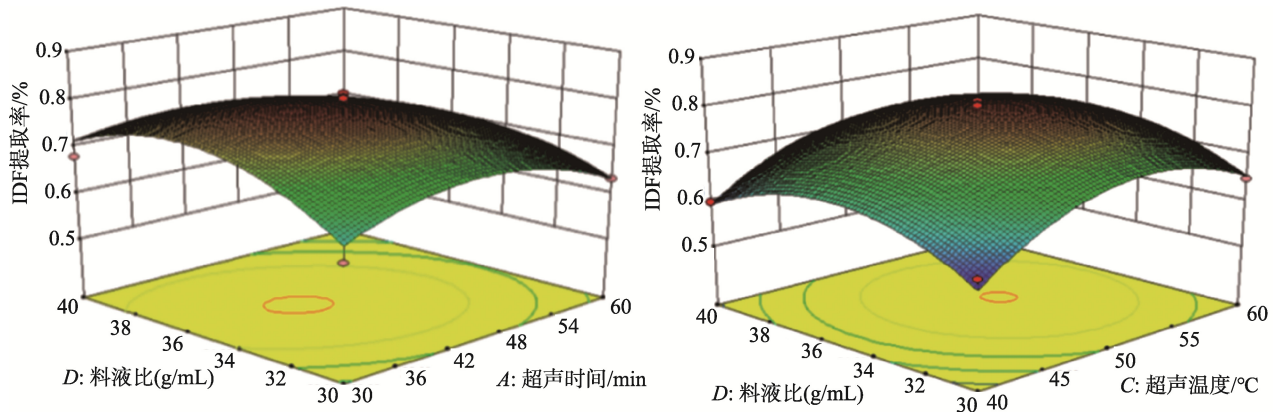


图 1(续) 各因素交互作用对松茸 IDF 得率的响应面

Fig.1 Response surfaces of the interaction of various factors on the IDF yield of *Tricholoma matsutake*

温度 52.73 °C、料液比 1:31.37 (g/mL), 松茸不溶性膳食纤维的得率为 80.80%。但为方便实际操作, 将上述参数修改为超声时间 43 min、超声功率 266 W、超声温度 53 °C、料液比 1:31 (g/mL), 根据这些参数实际测定松茸不溶性膳食纤维得率为 78.95%, 与预测值相差不大, 模型较为准确。

2.3 松茸渣不溶性膳食纤维的理化性质

实验测得松茸渣不溶性膳食纤维测得持水性为 2.78 g/g, 膨胀性为 3.49 mL/g, 持油性为 1.28 g/g, 结合水力为 2.24 g/g, 葡萄糖吸附能力为 37955 $\mu\text{mol/g}$ 。相较于其他原料^[22], 松茸 IDF 葡萄糖吸附能力更高, 可作为功能性食品配料, 具有辅助降低血糖的功效。

3 结论与讨论

本研究选用超声波辅助法提取松茸渣不溶性膳食纤维, 应用响应面法研究分析, 建立了可进行理论预测的模型, 对其不溶性膳食纤维的测定具有一定的实验参考价值。通过上述方法得到了超声辅助法提取松茸不溶性膳食纤维最佳工艺参数为超声时间 43 min、超声功率 266 W、超声温度 53 °C、料液比 1:31 (g/mL), 测得松茸不溶性膳食纤维得率为 78.95%。影响提取效果因素依次是超声功率>超声温度>超声时间>料液比。相比其他原料, 松茸不溶性膳食纤维葡萄糖吸附能力比较高, 可以作为辅助降血糖的功能性食品配料。

参考文献

- 弓明钦, 陈羽, 王凤珍, 等. 松茸[M]. 昆明: 云南科技出版社, 1999. GONG MQ, CHEN Y, WANG FZ, *et al.* *Tricholoma matsutake* [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1999.
- 袁天凤, 段彬, 邱道持, 等. 松茸的地理分布与生态研究[J]. 中国食用菌, 2006, (4): 14-17. YUAN TF, DUAN B, QIU DC, *et al.* Geographical distribution and ecological study of *Tricholoma matsutake* [J]. *Edib Fung China*, 2006, (4):

14-17.

- 陶虹伶, 王丹, 马宁, 等. 松茸粉对面团流变特性及饼干品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 51-56. TAO HL, WANG D, MA N, *et al.* Effect of *Tricholoma matsutake* powder on rheological properties of dough and quality [J]. *Food Sci*. 2019, 40(5): 51-56.
- 江均平, 单吉浩, 孙艳丽, 等. 松茸、青杠菌游离氨基酸、多糖及矿物元素含量分析[J]. 中国食物与营养, 2021, 27(3): 54-57. JIANG JP, SHAN JH, SUN YL, *et al.* Free amino acids, polysaccharides and mineral elements in *Tricholoma matsutake* and *Tricholoma bakamat sutake* [J]. *Food Nutr China*, 2021, 27(3): 54-57.
- 傅禄敏, 李玉花. 松口蘑的研究特点[J]. 食用菌学报, 2003, 10(3): 49-55. FU LM, LI YH. Research characteristics of *Tricholoma matsutake* [J]. *Acta Edul Fung*, 2003, 10(3): 49-55.
- 朱丹, 朱立斌, 牛广财, 等. 沙果渣膳食纤维超高压处理条件优化及其微观结构表征[J]. 天然产物研究与开发, 2020, 32(1): 118-126. ZHU D, ZHU LB, NIU GC, *et al.* Optimization on ultra pressure processing conditions and microstructura characteristics of the dietary fiber from *Malus asiatica* Nakai residue [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2020, 32(1): 118-126.
- 周新, 唐世英, 杨贺祺, 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, 2021, 42(3): 359-366, 372. ZHOU X, TANG SY, YANG HQ, *et al.* Research progress on extraction, characterization and modification of insoluble dietary fiber [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(3): 359-366, 372.
- 季云龙. 松茸多糖提取及全价松茸微胶囊化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016. JI YL. Extraction of polysaccharide of *Tricholoma matsutake* and study on the microencapsulation of *Tricholoma matsutake* [J]. Changchun: Jilin University, 2016.
- 张岩, 李键, 刘鲁蜀, 等. 松茸多糖对乳酸菌发酵及酸奶品质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(1): 156-160. ZHANG Y, LI J, LIU LS, *et al.* Effect of *Tricholoma matsutake* polysaccharide on the fermentation characteristics of lacticacid bacteria and the texture of yogurt [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(1): 156-160.
- 陈炼红, 杨丽珠, 索化夷, 等. 响应面法优化松茸多糖酶法提取工艺及

- 其体外抗氧化性分析[J]. 食品科学, 2014, 35(16): 23–28.
- CHEN LH, YANG LZ, SUO HY, *et al.* Response surface analysis for the optimization of extraction process for polysaccharides from *Tricholoma matsutake* and antioxidant activity of the extracted polysaccharides [J]. Food Sci, 2014, 35(16): 23–28.
- [11] PUESCHELVA, SCHIEBERLE P. Changes in the key aroma compounds of matsutake mushroom (*Tricholoma matsutake* Sing.) from Canada during pan-frying elucidated by application of the sensomics approach [J]. Eur Food Res Technol, 2020. DOI:10.1007/s00217-020-03606-9
- [12] TAKASHI Y, AKIYOSHI Y, HITOSHI F. Advances in the cultivation of the highly-prized ectomycorrhizal mushroom *Tricholoma matsutake* [J]. Mycoscience, 2020. DOI: 10.1016/j.myc.2020.01.001
- [13] MAKI N, MUNYOSHI Y, TAKASHI Y, *et al.* Comparison of mycelial growth of different *Tricholoma matsutake* strains in soil medium at varying temperatures [J]. Asian J Biotechnol Bioresour Technol, 2019. DOI: 10.9734/AJB2T/2019/v5i430066
- [14] 夏洁, 薛浩岩, 贾祥泽, 等. 响应面优化刺梨果渣水不溶性膳食纤维超声波辅助提取工艺研究[J]. 现代食品科技, 2020, 36(7):8.
- XIA J, XUE HY, JIA XZ, *et al.* Study on optimization of ultrasonic assisted extraction technology of water-insoluble dietary fiber from Roxburgh rose residue [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36(7): 8.
- [15] 李斌. 豆渣蛋白肽与膳食纤维的提取及其功能研究[D]. 桂林: 广西大学, 2019.
- LI B. Study on extraction and function of soybean dregs protein peptide and dietary fiber [D]. Guilin: Guangxi University, 2019.
- [16] 阮传英, 涂宗财, 王辉, 等. 豆渣膳食纤维的体外吸附性能[J]. 食品科学, 2014, 35(15): 109–112.
- RUAN CY, TU ZC, WANG H, *et al.* *In vitro* adsorption capacity of dietary fibers from soybean dregs [J]. Food Sci, 2014, 35(15): 109–112.
- [17] MOORTHY IG, MARAN JP, ILAKYA S, *et al.* Ultrasound assisted extraction of pectin from waste *Artocarpus heterophyllus* fruit peel [J]. Ultrason Sonochem, 2016, 34: 525–530.
- [18] 邓瑾, 李志建, 李海峰, 等. 酶化学法提取石墨小麦麸皮不溶性膳食纤维工艺研究[J]. 河南工业大学学报, 2015, 36(2): 14–16.
- DENG C, LI ZJ, LI HF, *et al.* Study on enzymatic chemical extraction of insoluble dietary fiber from graphite wheat bran [J]. J Henan Univ Technol, 2015, 36(2): 14–16.
- [19] 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, 2020. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025097
- LI Q, ZENG FK, HUA R, *et al.* Optimization of ultrasound-assisted extraction of insoluble dietary fiber from chive roots by response surface method [J]. Food Ferment Ind, 2020. DOI: 10.13995/j.cnki.11-1802/ts.025097
- [20] 潘利华, 徐学玲, 罗建平. 超声辅助提取水不溶性大豆膳食纤维及其物理特性[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 387–392.
- PAN LH, XU XL, LUO JP. Ultrasound-assisted extraction of insoluble dietary fiber from soybean and its physical properties [J]. Transact Chin Soc Agric Eng, 2011, 27(9): 387–392.
- [21] ZHANG X, YANG W, BLASIAK W. Modeling study of woody biomass: Interactions of cellulose, hemicellulose, and lignin [J]. Energy Fuels, 2011, 25(10): 4786–4795.
- [22] 施建斌, 隋勇, 蔡沙, 等. 麦麸及麦麸膳食纤维常规粉碎和超微粉碎物化特性比较[J]. 现代食品科技, 2021, 37(1): 150–156.
- SHI JB, SUI Y, CAI S, *et al.* Comparison of physicochemical properties of wheat bran and its dietary fiber subjected to conventional crushing and superfine grinding [J]. Mod Food Sci Technol, 2021, 37(1): 150–156.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



胡金祥, 主要研究方向为烹饪科学与食品工程。

E-mail: 172118972@qq.com

许程剑, 教授, 主要研究方向为烹饪科学与食品工程。

E-mail: 36111916@qq.com