

獐子菌不可溶膳食纤维提取工艺优化及特性研究

朱中燕¹ 陈丽¹ 许程剑^{1*} 刘阳¹ 周宇¹ 易宇文² 林丹¹

1. 四川旅游学院 食品学院, 中国·四川 成都 610100

2. 四川旅游学院 烹饪重点实验室, 中国·四川 成都 610100

摘要:以獐子菌为原料,采用超声-微波联合酶法提取不溶性膳食纤维(IDF),研究提取时间、料液比、微波功率、加酶量、超声功率对獐子菌 IDF 得率的影响,通过单因素和正交试验优化提取工艺,并分析 IDF 的理化特性。结果表明, IDF 的最佳提取工艺为提取时间 50min, 超声功率 200W, 加酶量 1%、微波功率 200W、料液比 1:10 (g/mL), 在此工艺条件下獐子菌 IDF 提取率为 26.83%, 持水力为 2.38g/g, 结合水力为 1.21g/g, 膨胀性为 3.29mL/g, 持油力为 2.43g/g。
关键词:獐子菌; 不溶性膳食纤维; 超声-微波联合酶法; 理化特性

Optimization of the Extraction Process and Characteristics of Insoluble Dietary Fiber from *Saarcodon Imbricatum* Karst

Zhongyan Zhu¹ Li Chen¹ Chengjian Xu^{1*} Yang Liu¹ Yu Zhou¹ Yuwen Yi² Dan Lin¹

1. College Food Science and Technology, Sichuan Tourism University, Chengdu, Sichuan, 610100, China

2. Culinary Science Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan Tourism University, Chengdu, Sichuan, 610100, China

Abstract: The insoluble dietary fiber of *Saarcodon imbricatus* Karst was prepared by ultrasonic-microwave combined enzymatic method. The effects of extraction time, solid-liquid ratio, microwave power, enzyme dosage, and ultrasonic power on IDF yield were studied. The extraction process was optimized by single factor and orthogonal test, and the physicochemical properties of IDF were analyzed. The results showed that the optimal extraction process of IDF was as follows: extraction time 50 min, ultrasonic power 200 W, enzyme content 1%, microwave power 200 W, solid-liquid ratio 1:10 (g/mL). Under these conditions, the extraction rate of IDF was 26.83%, the holding water power was 2.38 g/g, and the binding water power was 1.21 g/g. The swelling capacity was 3.29 mL/g and the oil holding capacity was 2.43 g/g.

Keywords: *Saarcodon imbricatus* Karst; insoluble dietary fiber; ultrasonic-microwave combined enzymatic method; physicochemical properties

1 引言

獐子菌 (*Saarcodon imbricatus* Karst), 学名为翘鳞肉齿菌, 在中国主要分布于四川、云南、西藏、吉林等高寒且凉爽的云杉林中, 在国外分布于日本、德国^[1]。獐子菌含有丰富的蛋白质、氨基酸、维生素和膳食纤维等营养活性成分, 具有舒筋活血、降胆固醇、降血压、增强机体免疫能力、抗癌、抗氧化和排毒的等功能^[2-4]。中国有长期采食獐子菌的历史, 民间还有利用其来防止食品腐败以及入药的记录^[5], 其独特的滋味源自子实体中的游离氨基酸和核苷酸^[6,7]。食用菌被作为一种潜在的功效率膳食纤维起源, 在微细浆化后, 被添加到不同的食品中, 既可以做成鲜美饮品, 也可以被作为一些其他的特殊膳食食品^[8-10]。研究表明, 膳食纤维具有降血糖、提高机体免疫力、改善消化系统功能和瘦身减肥等功能^[11]。

中国目前对獐子菌的精深加工能力较弱, 主要集中在多糖的提取、纯化与生物活性的研究^[12,13], 而对膳食纤维的提取加工和纤维特性等研究较少。膳食纤维的提取方法有化学法、酶法、发酵法、超声辅助提取法和微波辅助提取法等^[14-16]。本研究以獐子菌为原料, 采用超声波微波萃取仪协

同酶法提取獐子菌中不溶性膳食纤维, 探讨不同因素条件对獐子菌 IDF 得率的影响, 通过正交试验优化提取工艺条件, 以提高獐子菌 IDF 的提取率, 并且对其理化性质进行研究, 从而为獐子菌膳食纤维的综合开发利用提供参考。

2 材料与方 法

2.1 材料与试剂

獐子菌: 四川省甘孜州白玉县; 纤维素酶、一水合柠檬酸, 成都金山化学试剂有限公司; 无水乙醇, 天津市津东天正精细化学试剂厂。

2.2 仪器与设备

FW177 中草药粉碎机, 天津市泰斯特仪器有限公司; XH-300B 微波-超声波组合萃取仪, 北京祥鹤科技发展有限公司; HC-3018R 高速冷冻离心机, 安徽中科中佳科学仪器有限公司; RE-2000B 旋转蒸发器, 上海亚荣生化仪器厂。

2.3 实验方法

2.3.1 獐子菌原料预处理

獐子菌经 50℃ 的电热恒温干燥箱烘干, 粉碎后过 40 目

筛, 再将过筛之后的獐子菌粉装入密封袋保存于干燥器中备用。

2.3.2 不溶性膳食纤维的提取

称取獐子菌粉按照一定料液比加入蒸馏水, 用柠檬酸-柠檬酸钠缓冲液调节 pH 至 4.8, 再加入酸性纤维素酶, 微波-超声波组合萃取仪提取, 提取后离心, 上清液加入 4 倍体积的 95% 乙醇溶液醇沉 12h, 离心, 收集滤渣于 55℃ 烘箱中干燥至恒重, 称量即得 IDF^[17]。

IDF 得率计算:

$$\text{獐子菌 IDF 得率}(\%) = \frac{m_1}{m} \times 100\%$$

式中: m_1 表示提取后 IDF 干重, g; m 样表示提取前的样品干重, g。

2.3.3 单因素实验设计

以獐子菌 IDF 得率为指标, 以提取时间 40min、超声功率 200W、微波功率 300W、酶添加量 2.0% 和料液比 1 : 10 为基准条件, 固定其他因素及相应水平, 考察提取时间 (20min、30min、40min、50min、60min)、超声功率 (100W、150W、200W、250W、300W)、微波功率 (100W、200W、300W、400W、500W)、酶添加量 (1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%) 和料液比 (1 : 10g/mL、1 : 15g/mL、1 : 20g/mL、1 : 25g/mL、1 : 30g/mL) 对獐子菌 IDF 得率的影响。

2.3.4 超声-微波协同酶法正交实验

基于单因素实验结果, 选择对结果具有影响的 5 个因素提取时间, 超声功率, 加酶量、微波功率、料液比为自变量, 以獐子菌 IDF 得率为评判指标, 确认最佳配比的设计工艺, 正交试验因素水平设计见表 1。

表 1 正交试验因素水平设计表

因素	水平			
	1	2	3	4
A- 提取时间 /min	30	40	50	60
B- 超声功率 /W	100	150	200	250
C- 酶添加量 /%	1.0	1.5	2.0	2.5
D- 微波功率 /W	100	200	300	400
E- 料液比 /(g/mL)	1 : 10	1 : 15	1 : 20	1 : 25

2.3.5 獐子菌膳食纤维的理化性质测定

①持水力测定。

称量 0.2g 不溶性膳食纤维粉置于已知质量的 50mL 离心管中, 加入 20mL 蒸馏水, 室温下漩涡震荡 1h 混匀, 4000r/min 离心 15min, 去除上清液, 再进行称量并计算出湿样的质量。

$$\text{持水力} = \frac{m_1 - m_2}{m}$$

式中: m_1 表示吸水后样品与离心管的质量, g; m_2 表示的是离心管的质量, g; m 表示的是样品质量, g。

②膨胀性的测定。

参考 Gouw 等^[18]的方法, 称量 0.2g 不溶性膳食纤维粉, 置于 10mL 的量筒中, 读取体积后再加入 5mL 蒸馏水。适

当振荡摇匀后, 在室温下放置 24h, 其充分溶胀后, 再次对膨胀后獐子菌 IDF 的体积进行读取。

$$\text{膨胀性} = \frac{V_2 - V_1}{m}$$

式中: V_1 表示样品干样体积, mL; V_2 表示的样品膨胀后的体积, mL; m 表示的是样品质量, g。

③结合水力的测定。

参考李斌^[19]的方法, 称量 0.2g 獐子菌 IDF 粉, 放入 50mL 离心管内, 加入蒸馏水 20mL, 在 5000r/min 下离心 30min, 去除上清液, 沉淀于室温下放置 0.5h 后称重, 记为 m_1 , 最后将所称沉淀放置于电热恒温干燥箱中烘干后, 对其再次称重记为 m_2 。

$$\text{结合水力} = \frac{m_3 - m_4}{m}$$

式中: m_3 表示样品离心后质量, g; m_4 表示样品烘干后的质量, g; m 表示的是样品质量, g。

④持油性的测定。

参考 Kurek 等^[20]的研究方法稍作修改, 称取 0.2g 獐子菌 IDF 粉于 50mL 的烧杯中, 倒入花生油 20mL, 在室温下搅拌 1h 后, 将混合物 4000r/min 离心 30min。去除上清液, 对沉淀质量进行称量。通过下列公式进行计算:

$$\text{持油性} = \frac{m_5 - m_2}{m}$$

式中: m_1 表示样品吸油后和离心管质量, g; m_2 表示离心管质量, g; m 表示的是样品质量, g。

3 结果与分析

3.1 单因素实验结果与分析

3.1.1 提取时间对獐子菌 IDF 得率的影响

由图 1 可知, 当提取时间在 40min 时, IDF 得率达到最大值 14.35%, 随着提取时间延长, IDF 提取率反而显著降低 ($P < 0.05$)。出现此原因是超声波能在物料的内部产生强烈的振动, 对植物细胞和分子间产生强大的作用是加速度和空化效应^[21], 进而可以将不溶性膳食纤维的提取率快速提高; 但提取时间太长, 会破坏膳食纤维结构, 从而使提取率降低^[22]。因而提取时间为 40min 是最佳提取时间。

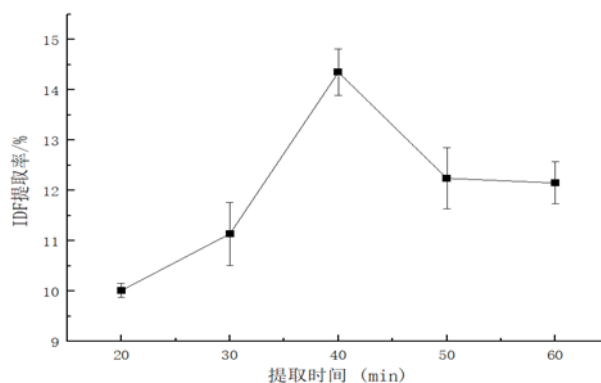


图 1 提取时间对 IDF 得率的影响

3.1.2 超声功率对獐子菌 IDF 得率的影响

由图2所示,随着超声功率增加獐子菌IDF得率增加,200W时獐子菌IDF得率最高为16.38%,这可能是超声波形成的热效应和空化作用使得细胞破裂,将分子扩散速率增加,由此将不溶性膳食纤维得率快速提升^[23]。之后出现下降,可能是功率过高会导致不溶性膳食纤维的结构被破坏,从而降低IDF得率。因此,超声波功率最适为200W。

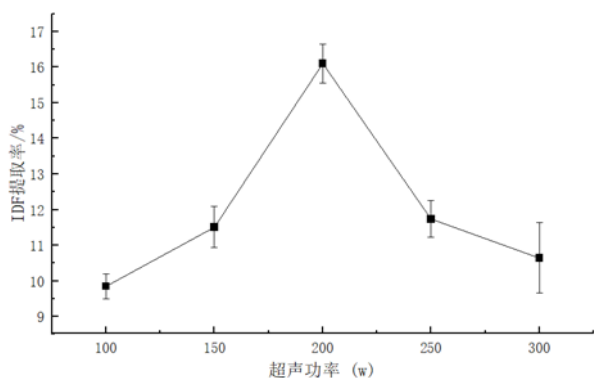


图2 超声波功率对 IDF 得率的影响

3.1.3 酶添加量对獐子菌 IDF 得率的影响

由图3可知,随着纤维素酶添加量增加,獐子菌IDF的得率先增加后降低的趋势,当纤维素酶添加量为2.5%时,得率最高为16.25%。当酶添加量过低,纤维素酶对獐子菌中的膳食纤维不能充分酶解,适当增加酶添加量可促进IDF的酶解,从而提高得率。当酶添加量过多时,高浓度的酶会与底物形成复合物,阻碍底物的进一步反应,同时也会分解IDF,由此充分证明了酶与底物之间有着一个适当的比值,因此酶添加量在2.5%时为最佳选择。

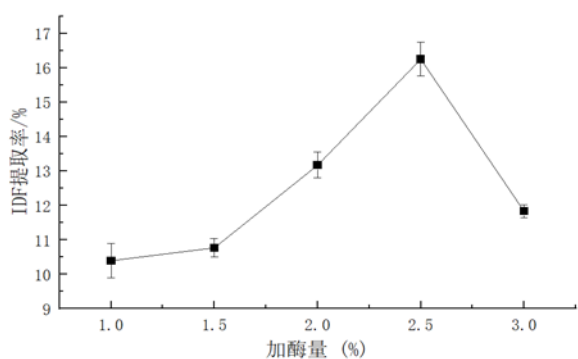


图3 酶添加量对 IDF 得率的影响

3.1.4 微波功率对獐子菌 IDF 得率的影响

由图4可知,在微波功率为100~500W时,IDF提取率随着微波功率的增加呈现出先上升后下降的趋势。当微波功率为400W时,獐子菌IDF的提取率达到了15.47%,出现此现象是因为随微波功率的增加,细胞吸收微波能后其结构被破坏,使溶剂更易透过细胞壁,从而加速了IDF的溶出;当微波功率超过400W时,IDF受到微波辐照水解,提取率

从而下降。因此确定微波功率400W时为最佳水平。

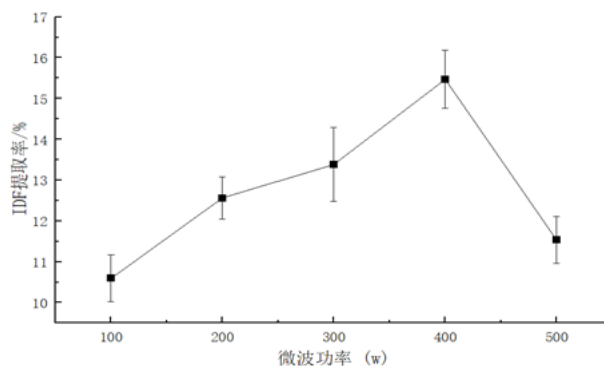


图4 微波功率对 IDF 得率的影响

3.1.5 料液比对獐子菌 IDF 得率的影响

由图5可知,IDF的得率随着料液比的增加呈先增加后减少的趋势,当料液比为1:15g/mL时,獐子菌IDF的得率最高为19.41%。溶剂用量过低,原料不能充分在水中混合,溶剂增加更有利于溶液中分子的扩散,从而提高了IDF的提取率^[24]。反之,当料液比大于1:15g/mL时,单位体积内的纤维素酶量减少,降低了底物与酶的接触概率,从而导致不溶性膳食纤维提取率降低^[25]。因此,选取料液比为1:15时为最佳。

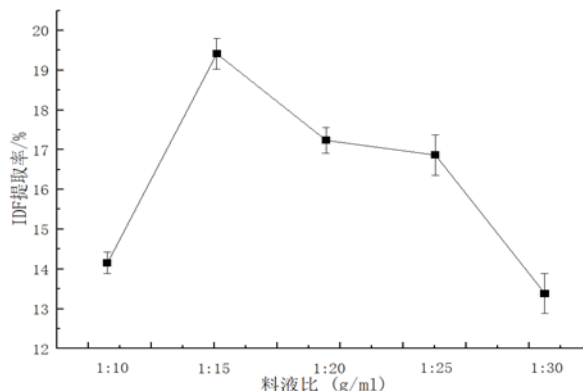


图5 料液比对 IDF 得率的影响

3.2 獐子菌 IDF 提取工艺正交试验结果与分析

按照L₁₆(4⁵)正交实验设计表进行试验,结果如表2所示。正交试验分析中,K_i为对应因素中第i个水平试验指标值之和,K_i表示对应因素中第i个水平试验指标值的均值,R值表示在固定的因素中K_i最大值和最小值两者的差值,当R值越大时,说明对评价指标的影响越大的是该因素所设置的不同水平,进而表明了该因素对评价指标的影响也越大;反之,说明该因素对实验结果的影响较小。通过对不溶性膳食纤维得率进行正交分析,由表2中极差(r值)分析可知,五个因素对得率的影响程度依次为A>D>C>B>E,即提取时间>微波功率>加酶量>超声功率>料液比,以IDF得率最大值为优化目标,从k₁、k₂、k₃、k₄的大小分析得出,IDF得率的最优条件为A₃B₃C₁D₂E₁。

表 2 獐子菌不溶性膳食纤维提取工艺正交试验方案及结果

试验号	A- 提取时间	B- 超声功率	C- 加酶量	D- 微波功率	E- 料液比	IDF 得率 (%)
1	1	1	1	1	1	16.31 ± 0.44
2	1	2	2	2	2	13.12 ± 0.24
3	1	3	3	3	3	10.28 ± 0.27
4	1	4	4	4	4	8.06 ± 0.2
5	2	1	2	3	4	10.1 ± 0.33
6	2	2	1	4	3	7.13 ± 0.27
7	2	3	4	1	2	8.88 ± 0.28
8	2	4	3	2	1	9.19 ± 0.25
9	3	1	3	4	2	8.9 ± 0.16
10	3	2	4	3	1	21.08 ± 0.42
11	3	3	1	2	4	26.16 ± 0.25
12	3	4	2	1	3	8.21 ± 0.34
13	4	1	4	2	3	16.11 ± 0.12
14	4	2	3	1	4	12.1 ± 0.26
15	4	3	2	4	1	12.6 ± 0.39
16	4	4	1	3	2	12.08 ± 0.2
K ₁	143.300	154.260	185.050	136.500	177.54	
K ₂	105.920	160.280	132.120	193.760	128.95	
K ₃	193.060	173.800	121.400	160.650	125.22	
K ₄	158.690	112.630	162.400	110.060	169.26	
k ₁	11.942	12.855	15.421	11.375	14.80	
k ₂	8.827	13.357	11.010	16.147	10.75	
k ₃	16.088	14.483	10.117	13.388	10.44	
k ₄	13.224	9.386	13.533	9.172	14.11	
r	7.262	5.098	5.304	6.975	4.36	

影响次序: A > D > C > B > E 最优水平: A₃B₃C₁D₂E₁

可以用方差分析法来检验各因素对结果影响的实际情况, 通过计算每个因素以及误差的离差平方和, 然后求出自由度、均方、F 值, 并进行 F 检验。具体计算过程如下: $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i$,

$$T = \sum_{i=1}^n y_i, Q = \sum_{i=1}^n y_i^2, P = \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2 = \frac{T^2}{n}, SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n y_i)^2 = Q - P.$$

SS_T 是指总离差平方和, 用来反映试验过程中的数据总差异变化, 离差平方和的大小反映了各因素对实验结果影响程度的大小, 离差平方和越大, 表明选取的因素对试验结果的影响越大。各因素的离差平方和, 反映了各个因素对试验结果的影响程度, 因素的离差平方和越大, 说明该因素取的不同水平时, 试验结果之间的差异越大, 该因素对试验结果的影响越大。各个因素的离差平方和计算如下:

$$SS_A = \frac{r}{n} \sum_{i=1}^r (k_i - \bar{y})^2 = \frac{n}{r} (\sum_{i=1}^r K_i^2) - \frac{T^2}{n} = \frac{n}{r} (\sum_{i=1}^r K_i^2) - P,$$

同理计算得到 SSB、SSC、SSD、SSE。

对獐子菌 IDF 得率进行方差分析, 方差分析结果如表 3 所示, 超声功率、微波功率、料液比、提取时间、加酶量对獐子菌 IDF 得率均具有极显著影响 (P < 0.01), 综合考虑五个因素对獐子菌 IDF 得率的影响, 得到最优组合为

A₃B₃C₁D₂E₁, 即当提取时间为 50min, 超声功率为 200W, 加酶量为 1%、微波功率为 200W、料液比为 1 : 10 时獐子菌 IDF 得率最大。

表 3 各因素对 IDF 得率的方差分析结果

变异来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
A	326.448	3	108.81614	868.705	< 0.01	**
B	173.879	3	57.95966	462.706	< 0.01	**
C	209.973	3	69.99116	558.756	< 0.01	**
D	317.132	3	105.71051	843.912	< 0.01	**
E	182.193	3	60.73097	484.830	< 0.01	**
误差 e	4.008	32	0.12526			

注: ** 表示具有极显著 (P < 0.01) 影响, * 表示具有显著 (P < 0.05) 影响。

为验证 L₁₆ (4⁵) 正交试验结果的可靠性, 在提取时间为 50min, 超声功率为 200W, 加酶量为 1%、微波功率为 200W、料液比为 1 : 10 条件下进行平行三次试验, 验证结果见表 4, 得到 IDF 得率为 26.83 ± 0.45, 表明通过 L₁₆ (4⁵) 正交试验筛选获得了 IDF 得率的最优条件 (A₃B₃C₁D₂E₁) 稳定合理。

表 4 IDF 得率验证正交试验结果

工艺条件	编号	IDF 得率
A ₃ B ₃ C ₁ D ₂ E ₁	1	26.40
	2	27.30
	3	26.80
	均值	26.83
	标准误差	0.45
	RSD/%	1.68

3.3 獐子菌 IDF 的理化特性分析结果

持水力、持油力和膨胀力三者的大小是评判膳食纤维品质的重要标准，与膳食纤维的含量、粒径、比表面积、电荷密度及疏水性能等有关^[26]。人体摄入持水力、持油力和膨胀力较强的膳食纤维，不仅可以增强饱腹感、延迟胃排空，减少脂肪在胃肠道的堆积，还可使肠道粪便体积变大，质地变软，缩短排便时间，从而达到预防便秘和结肠癌的作用。表 5 为獐子菌 IDF 的基本理化指标，本实验测定了在最佳工艺提取条件下（A₃B₃C₁D₂E₁）所得獐子菌 IDF 的持水力、膨胀性、结合水力和持油性分别为 2.38g/g、3.29mL/g、1.21g/g 和 2.43g/g。谢建华等^[27]研究发现柚皮 IDF 的持水力为 13.91g/g、持油力为 3.43g/g、膨胀力分别为 10.94mL/g；赵淼等^[28]研究发现运用碱性蛋白酶提取豆渣中的 IDF 的持水力、持油力以及溶胀性分别为 8.79g/g、7.96g/g 和 14.99g/g，跟两者相比本试验所制备的獐子菌 IDF 的持水性、持油力和膨胀性要比柚子皮和豆渣中 IDF 要偏低。主要是由于品种的不同，不同膳食纤维有着各不相同的比表面积、密度以及多孔性等，甚至还有着不同的电荷密度、厚度及表面性质和颗粒疏水性。

表 5 獐子菌 IDF 的理化性质分析结果

试验号	持水性 (g/g)	持油性 (g/g)	结合水力 (g/g)	膨胀性 (mL/g)
1	2.4	2.5	1.23	3.18
2	2.39	2.55	1.19	3.42
3	2.34	2.25	1.22	3.26
平均值	2.38	2.43	1.21	3.29

4 结论

本实验通过单因素实验和正交实验优化得到獐子菌 IDF 的最佳提取工艺，确定了影响獐子菌 IDF 提取得率各因素大小顺序：提取时间 > 微波功率 > 加酶量 > 超声功率 > 料液比，得出最佳提取工艺为：提取时间 50min，超声功率 200W，加酶量 1%、微波功率 200W、料液比 1 : 10 (g/mL)，獐子菌 IDF 的实际得率为 26.83%。通过进一步研究獐子菌不溶性膳食纤维的理化性质，在最佳提取工艺条件下测得獐子菌 IDF 持水力为 2.52g/g，结合水力为 2.66g/g，膨胀性为 3.29mL/g，持油力为 1.51g/g。本实验选取酶法进行探究提取獐子菌中的 IDF，此方法工艺简单易行，污染小，

不需要的特殊设备，并且提取出来的膳食纤维纯度高，是食品生产中理想的原料和辅料。本研究为獐子菌 IDF 的开发以及在其他功能性食品行业中的广泛应用提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 刘影,丁祥,侯怡铃.獐子菌多糖SIK-1的结构鉴定及其生物活性研究[J].生物技术,2020,30(5):465-472.
- [2] 徐盼菊,杨东生,滕利荣,等.黑虎掌菌化学成分及药理作用研究进展[J].山东医药,2015,55(2):99-101.
- [3] 冯颖,赵丽芳,陈晓鸣,等.翘鳞肉齿菌粗多糖提取和抗肿瘤试验研究[J].西南林学院学报,2000,20(2):117-120.
- [4] 陈健,张灵芝,韦丁,等.黑虎掌菌多糖的组成和抗肿瘤活性[J].华南理工大学学报(自然科学版),2011,39(12):110-114.
- [5] 冯颖,陈晓鸣,周德群,等.翘鳞肉齿菌主要生物学特征研究[J].林业科学研究,1996(4):66-7.
- [6] 李月梅.食用菌的功能成分与保健功效[J].食品科学,2005(8):517-521.
- [7] 吴智艳,闫训友.灰树花生理活性物质的研究进展[J].食用菌,2006(6):1-2.
- [8] Wong K H, Cheung P C K, Wu J-Z. Biochemical and Microstructural Characteristics of Insoluble and Soluble Dietary Fiber Prepared from Mushroom Sclerotia of Pleurotus tuber regium,Polyporus rhinoceros,and Wolfiporia cocos[J]. JAgric. Food Chem,2003,51(24):7197-7202.
- [9] 张艳荣,刘婷婷,李玉.姬松茸膳食纤维在面包生产中应用的研究[J].食品科学,2007,28(5):166-169.
- [10] Wong K H, Cheung P C K. Enzymatic preparation of mushroom dietary fibre: A comparison between analytical and industrial enzymes[J]. Food Chemistry,2009,115(3):795-800.
- [11] 李聪,王稳航.食用菌膳食纤维研究的新进展[J].中国食品添加剂,2015,140(10):159-164.
- [12] 徐盼菊.黑虎掌菌子实体粗多糖制备及其生物活性研究[D].长春:吉林大学,2017.
- [13] 冉靓,周婵媛,张桂玲,等.黑虎掌菌多糖脱色工艺及其抗氧化活性[J].食品工业,2020,41(5):170-174.
- [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.
- [15] A Lai G, Lu Y Wang. Ultrasonic-assisted enzymatic extraction technology of dietary fiber from sweetpotato residue[J]. Journal of Chinese Cereals and Oils Association,2015,30(8):99-104.
- [16] 黄生权,李进伟,宁正祥.微波-超声协同辅助提取灵芝多糖工艺[J].食品科学,2010,31(16):52-55.
- [17] 苗敬芝,董玉玮,秦杰.超声协同酶法提取杏鲍菇中可溶性膳食纤维及抗氧化活性研究[J].食品工业科技,2015,36(10):168-172.
- [18] Gouw V P, Jung J, Zhao Y. Functional properties, bioactive compounds, and in vitro gastrointestinal digestion study of dried fruit pomace powders as functional food ingredients[J]. LWT-Food

- Science and Technology, 2017(80):136-144
- [19] 李斌.豆渣蛋白肽与膳食纤维的提取及其功能研究[D].南宁:广西大学,2019.
- [20] Kurek M A, Karp S. Physicochemical properties of dietary fibers extracted from gluten-free sources: quinoa (*Chenopodium quinoa*), amaranth (*Amaranthus caudatus*) and millet (*Panicum miliaceum*) [J]. *Food Hydrocolloids*,2018(85):321-330.
- [21] 潘虹,宋春钱,刘和平,等.超声波辅助酶法提取莲藕渣可溶性膳食纤维的研究[J].*浙江农业科学*,2017,58(3):469-472.
- [22] 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.
- [23] 郑文新,刘占英,石雅丽,等.粮食加工副产品中可溶性膳食纤维制备的研究进展[J].*粮食与饲料工业*,2017(12):31-35.
- [24] Filgueiras Ana Virginia, Capelo Jose Luis, Lavilla Isela, et al. Comparison of ultrasound-assisted extraction and microwave-assisted digestion for determination of magnesium, manganese and zinc in plant samples by flame atomic absorption spectrometry[J]. *Talanta*,2000,53(2):433-441.
- [25] 吴非,李钊,周琪,等.超声波辅助水酶法提取米胚油及其成分分析[J].*食品科学*,2020,41(24):233-241.
- [26] 阮征,李赛,李旭涵,等.青稞粉粒径及其高添加量对戚风蛋糕面糊特性和品质的影响[J].*现代食品科技*,38(7):205-216.
- [27] 谢建华,张桂云,李足环,等.柚皮不溶性膳食纤维提取工艺优化及其理化性质分析[J].*食品工业科技*,2023,44(20):206-212.
- [28] 赵淼,郎佳雪,张宇,等.碱性蛋白酶提取豆渣中不溶性膳食纤维的研究[J].*粮食与油脂*,2023,36(4):32-35.

作者简介: 朱中燕(1993-),女,中国重庆人,硕士,助理实验师,从事食品活性成分及风味物质研究。

通讯作者: 许程剑(1978-),男,中国安徽庐江人,博士,教授,从事食品质量与安全研究。

基金项目: 不同加工烹饪方式对松茸营养成分变化规律与风味物质形成机理的研究(项目编号: 2023PY02); 四川特色食用菌在餐饮中应用与创新团队(项目编号: 20SCTUTY03)。