

# 鲜品香菇柄中多糖闪式提取工艺优化 及抗氧化活性研究

## Study on flash extraction technology and antioxidant activity of polysaccharides from fresh *Lentinus edodes* stalk

时国庆<sup>1</sup> 杨林霄<sup>1</sup> 李镁娟<sup>2</sup> 孔娜<sup>2</sup> 贾欢欢<sup>2</sup> 石丽<sup>2</sup>

SHI Guoqing<sup>1</sup> YANG Linxiao<sup>1</sup> LI Meijuan<sup>2</sup> KONG Na<sup>2</sup> JIA Huanhuan<sup>2</sup> SHI Li<sup>2</sup>

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南 郑州 450000;

2. 河南国德标检测技术有限公司, 河南 郑州 451100)

(1. College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450000, China; 2. Henan Guodebiao Testing Technology Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 451100, China)

**摘要:**目的: 开发香菇柄多糖的工业化生产。方法: 以多糖得率为指标, 采用均匀设计试验优化提取工艺, 采用 4 种方法测定多糖抗氧化活性并与传统的热热水浸提法进行比较。结果: 闪式辅助热水浸提法提取香菇柄多糖最优工艺条件为闪式提取时间 120 s, 液料比( $V_{\text{去离子水}} : m_{\text{香菇柄}}$ ) 40 : 1 (mL/g), 热水浸提时间 105 min, 温度 50 °C, 提取两次, 此条件下多糖得率为 (5.03 ± 0.22)%, 与模型预测值基本一致, 是传统热水浸提法的 1.82 倍; 香菇柄多糖具有较强的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力、总抗氧化能力、羟自由基和 DPPH 自由基清除能力, 且呈量效关系; 闪式辅助热水浸提法所得多糖抗氧化活性强于传统热水浸提法。结论: 闪式辅助热水浸提有利于香菇柄多糖提取, 且能保持其抗氧化活性。

**关键词:** 香菇柄; 多糖; 闪式提取; 抗氧化活性

**Abstract: Objective:** Develop the industrial production of *Lentinus edodes* stalk polysaccharides. **Methods:** Using the yield of polysaccharides as an indicator, uniform design experiments were used to optimize the extraction process parameters. Four methods were used to determine the antioxidant activity of polysaccharides and compared with the traditional hot water extraction method. **Results:** The optimal process conditions for the flash-assisted extraction of *Lentinus edodes* stalk polysaccharides were as follows: flash extraction time 120 s, ratio of liquid to material 40 : 1 (mL/g), hot water extraction time 105min, temperature 50 °C, extraction twice. Under these

**基金项目:** 河南省科技攻关项目(编号: 222102110271)

**作者简介:** 时国庆, 男, 郑州轻工业大学副教授, 博士。

**通信作者:** 李镁娟(1983—), 女, 河南国德标检测技术有限公司高级工程师, 硕士。E-mail: 745045911@qq.com

**收稿日期:** 2023-02-26 **改回日期:** 2023-06-27

conditions, the yield of polysaccharides was (5.03 ± 0.22)%, which was basically consistent with the predicted value of the model and 1.82 times higher than that of traditional hot water extraction method. *Lentinus edodes* stalk polysaccharides had strong Fe<sup>3+</sup> reduction ability, total antioxidant capacity, ·OH and DPPH· scavenging capacity, and showed a dose-effect relationship. The antioxidant activity of polysaccharides obtained by flash-assisted hot water extraction was stronger than that of the traditional hot water extraction, but weaker than that of vitamin C. **Conclusion:** Flash-assisted hot water extraction is beneficial to the extraction of polysaccharides from *Lentinus edodes* stalks, and can maintain its antioxidant activity.

**Keywords:** *Lentinus edodes* stalk; polysaccharides; flash extraction; antioxidation activity

香菇是中国栽培面积和产量最大的食用菌<sup>[1]</sup>。香菇柄是其商品加工过程中的主要副产品, 由于纤维化程度高、口感差, 除少部分被加工成香菇酱、饲料等低附加值产品外, 大部分被丢弃<sup>[2]</sup>。据报道<sup>[3-4]</sup>, 香菇柄与香菇伞均含有丰富的多糖成分, 具有抗氧化、增强免疫力和抗癌等生理功能, 在医药和保健食品等领域应用前景广阔。

目前, 香菇柄多糖的提取大多以干燥粉碎至 40 目的香菇柄为原料, 蒸馏水为溶剂, 在 80~90 °C 下浸提<sup>[5]</sup>, 也有一些酶解<sup>[6]</sup>、微波<sup>[7]</sup>、超声<sup>[8]</sup>等辅助提取方法的报道, 但从新鲜香菇柄中直接提取多糖成分的研究较少<sup>[9-10]</sup>。闪式提取是一种新型植物活性成分提取技术, 根据组织破碎理论, 利用固定的外刃、高速旋转的内刃以及它们之间的间隙对原料进行高速粉碎, 破碎颗粒范围被控制在 40~60 目。在被破碎的同时, 原料内外化学成分在高速搅拌、振动及局部负压渗透等综合外力作用下迅速达到平

衡,整个过程可在数秒至数十秒内完成<sup>[11]</sup>。该提取具有提取速度快、提取时间短、产品活性好等特点,能直接处理干燥或潮湿的植物材料<sup>[12]</sup>,已被广泛应用于油脂、蛋白<sup>[13]</sup>、生物碱<sup>[14]</sup>、萜类、色素尤其是多糖<sup>[15]</sup>和酚类等天然产物领域。研究拟采用闪式提取法从鲜品香菇柄中直接提取多糖,分析多糖得率和抗氧化活性,并与传统热水浸提法进行比较,以期香菇柄多糖的工业化生产提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 材料与试剂

新鲜香菇:剪去菌伞,除杂,切丁(0.5 cm×0.5 cm×0.5 cm),市售;

浓硫酸、苯酚、FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O、无水乙醇、三氯化铁、苯酚、三氯甲烷、正丁醇、水杨酸、K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>、三氯乙酸、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>等:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

PBS 磷酸盐缓冲液(pH 6.6)、1,1-二苯基-2-苦肼基(DPPH)、葡萄糖标准品:上海源叶生物科技有限公司。

#### 1.1.2 仪器与设备

闪式提取器:ATS-150012AS 型,北京金鼎科技发展有限公司;

酶标仪:Thermo MultiskanGO 型,赛默飞世尔科技公司;

循环式多用真空泵:SHZ-D 型,河南金友成仪器设备有限公司;

电热鼓风干燥箱:DHG-9123A 型,上海精宏实验设备有限公司;

旋转蒸发仪:YRE-52AA 型,巩义市予华仪器有限责任公司。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 闪式辅助热水浸提法提取香菇柄多糖单因素试验

称取一定质量处理好的香菇柄碎丁,加入去离子水,设定闪式提取时间,提取后放入水浴锅中浸提一定时间,过滤,滤渣进行二次提取,合并滤液并浓缩至一定体积,加入 3 倍体积的无水乙醇,静置 24~48 h,8 000 r/min 离心 10 min,收集沉淀物,冻干,得香菇柄粗多糖<sup>[16]</sup>。

(1) 闪式提取时间:固定液料比( $V_{去离子水} : m_{香菇柄}$ ) 25 : 1 (mL/g)、浸泡时间 50 min、提取温度 40 ℃,考察闪提时间(20, 40, 60, 80, 100, 120 s)对香菇柄多糖得率的影响。

(2) 浸提时间:固定液料比( $V_{去离子水} : m_{香菇柄}$ ) 25 : 1 (mL/g)、闪式提取时间 60 s、提取温度 40 ℃,考察浸泡时间(0, 25, 50, 75, 100, 125 min)对香菇柄多糖得率的影响。

(3) 浸提温度:固定液料比( $V_{去离子水} : m_{香菇柄}$ ) 25 : 1 (mL/g)、闪式提取时间 60 s、浸提时间 50 min,考察提取温度(30, 40, 50, 60, 70, 80 ℃)对香菇柄多糖得率的

影响。

(4) 液料比:固定闪式提取时间 60 s、浸提时间 50 min、浸提温度 40 ℃,考察液料比[ $V_{去离子水} : m_{香菇柄}$  为 10 : 1, 15 : 1, 20 : 1, 25 : 1, 30 : 1, 35 : 1 (mL/g)]对香菇柄多糖得率的影响。

1.2.2 均匀设计 在单因素试验基础上,采用均匀设计法设计闪式辅助热水浸提试验方法,选取浸提温度、闪提时间、浸提时间和液料比为影响因素,以香菇柄多糖得率为评价指标,优化多糖提取工艺参数<sup>[17]</sup>。

1.2.3 传统热水浸提法提取香菇柄多糖 参照文献[5, 18]稍作改进。香菇柄碎丁于 45 ℃烘干,粉碎,过 40 目筛,准确称取适量置于圆底烧瓶中,按液料比( $V_{去离子水} : m_{香菇柄}$ ) 40 : 1 (mL/g)加入去离子水,85 ℃浸提 2 h,纱布粗滤,然后快速定量滤纸抽滤,滤渣进行二次提取,合并滤液,测量体积并计算香菇柄多糖得率。

1.2.4 水分含量测定 按 GB 5009.3—2016 执行。

1.2.5 多糖含量测定 采用苯酚—硫酸法<sup>[19]</sup>,以葡萄糖浓度为横坐标,吸光度值为纵坐标,得到标准曲线方程  $y=0.013 9x-0.001 6, R^2=0.999 2$ 。取 1 mL 稀释至一定倍数的多糖提取液,加入 1 mL 质量分数为 5% 的苯酚溶液,5 mL 浓硫酸,充分摇匀混合 10 min,30 ℃水浴 20 min,于 490 nm 处测定多糖吸光度值,根据标准曲线方程计算多糖浓度,并按式(1)计算多糖得率。

$$Y = \frac{C \times V \times N}{m(1-M) \times 1\ 000} \times 100, \quad (1)$$

式中:

Y——多糖得率, g/100 g;

C——多糖质量浓度, mg/mL;

V——提取液体积, mL;

N——稀释倍数;

M——水分含量, %;

m——原料湿重, g。

#### 1.2.6 抗氧化活性测定

(1) 羟自由基清除率:根据文献[20]。

(2) DPPH 自由基清除率:根据文献[21]。

(3) Fe<sup>3+</sup> 还原能力:根据文献[22]。

(4) 总抗氧化能力:根据文献[23—24]。

### 1.3 数据分析

使用 Origin 2021、IBM SPSS Statistics 26 和 Excel 2016 软件对所得数据进行比较分析,并绘制相关图表,所有试验均重复 3 次,结果以均值±标准差表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 闪式辅助热水浸提法单因素试验

由图 1 可知,闪式提取最适工艺参数为闪式提取时间 80 s,浸提时间 100 min,浸提温度 60 ℃,液料比( $V_{去离子水} : m_{香菇柄}$ ) 30 : 1 (mL/g)。

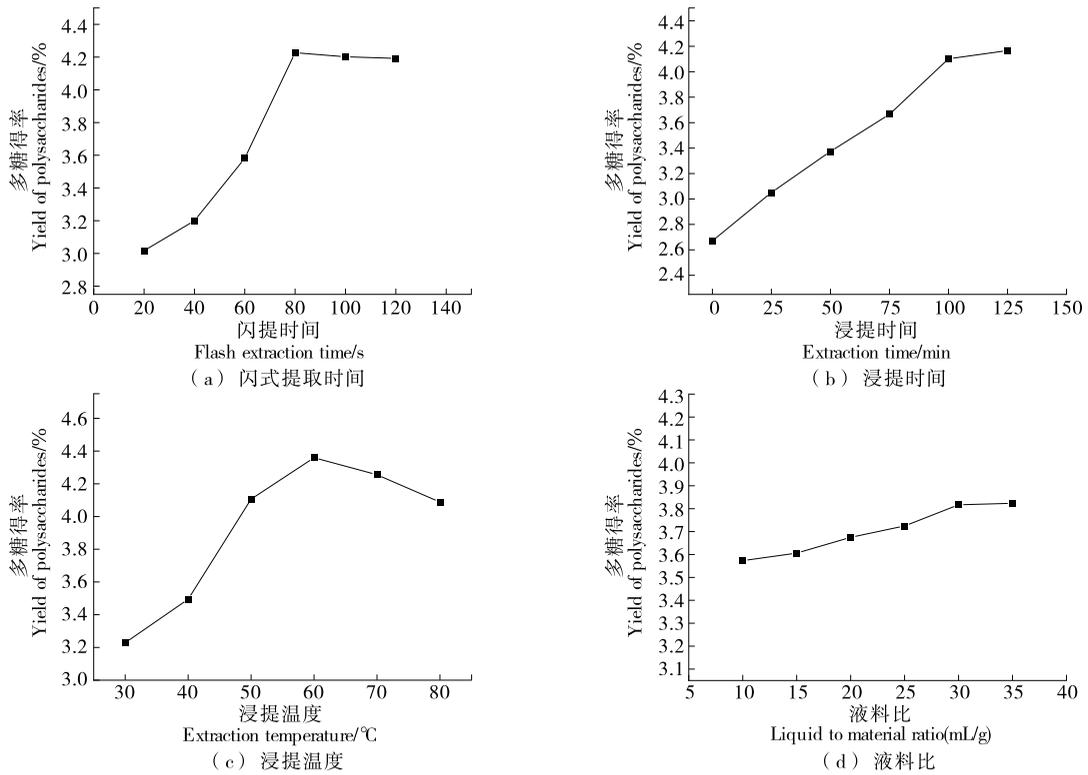


图 1 各因素对新鲜香菇柄多糖得率的影响

Figure 1 Effects of four factors on the yield of polysaccharides from fresh *Lentinus edodes* stalk

2.2 均匀设计试验

2.2.1 均匀设计试验方案及结果 在单因素试验基础上,按照  $U_7^*(7^4)$  均匀设计表进行四因素七水平的均匀试验设计,试验设计方案及结果见表 2。

2.2.2 多元线性回归模型分析 由表 2 可知,  $R=0.868$ ,

$R^2=0.754$ ; 模型  $P=0.191 > 0.05$ , 不显著, 需改变模型方案。因此, 考虑使用多元非线性回归模型进行新鲜香菇柄多糖闪式辅助热水浸提工艺优化。

2.2.3 多元多项式回归模型分析 由表 3 可知,  $R$  和  $R^2$  均为 1.0, 表明多元多项式回归模型可以较为合适地解释

表 1 香菇柄多糖均匀设计试验方案及结果

Table 1 Uniform design test scheme and results of *Lentinus edodes* stalk polysaccharides

试验号	$x_1$ 温度/°C	$x_2$ 闪提时间/s	$x_3$ 浸提时间/min	$x_4$ 液料比 (mL/g)	Y 多糖提取率/%
1	50	70	90	35 : 1	4.290 ± 0.060
2	55	90	135	30 : 1	4.230 ± 0.190
3	60	110	75	25 : 1	4.420 ± 0.266
4	65	60	120	20 : 1	3.967 ± 0.202
5	70	80	60	15 : 1	3.636 ± 0.175
6	75	100	105	10 : 1	4.042 ± 0.449
7	80	120	150	40 : 1	3.792 ± 0.249

表 2 多元线性回归方差分析<sup>†</sup>

Table 2 Multivariate linear regression analysis of variance

模型	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
回归	0.356	3	0.119	3.064	0.191
残差	0.116	3	0.039		
总计	0.472	6			

<sup>†</sup>  $R=0.868$ ;  $R^2=0.754$ ;  $R_{adj}^2=0.508$ 。

自变量与得率之间的变化关系, 其回归方程为:

$$y = 2.833\ 968 - 0.006\ 117x_1 + 0.036\ 919x_3 - 0.000\ 224x_1x_2 + 0.000\ 032x_3x_4 + 0.000\ 135x_2x_2 - 0.000\ 181x_3^2 \quad (2)$$

通过 Excel“规划求解”模块运算获得, 当试验因素  $x_1$ 、 $x_2$ 、 $x_3$ 、 $x_4$  分别为 50 °C、120 s、105 min、40 : 1 (mL/g) 时多糖得率最大, 为 5.141%。

表3 多元多项式回归模型偏相关系数表<sup>†</sup>  
Table 3 Partial correlation table of multivariate polynomial regression model

模型	未标准化系数		标准化系数
	B	标准误差	Beta
常量	2.833 968	0.00	
$x_3^2$	-0.000 181	0.00	-4.428 685
$x_2^2$	0.000 135	0.00	1.878 887
$x_3$	0.036 919	0.00	4.266 982
$x_1$	-0.006 117	0.00	-0.235 659
$x_3x_4$	0.000 032	0.00	0.194 694
$x_1x_2$	-0.000 224	0.00	-1.707 174

<sup>†</sup>  $R=0.868; R^2=0.754; R_{\text{adj}}^2=0.508$ 。

2.2.4 工艺验证 在闪式提取时间 120 s、浸提温度 50 ℃、浸提时间 105 min、液料比 40 : 1 (mL/g) 的条件下,对新鲜香菇柄多糖进行闪式辅助热水浸提,3 次提取的得率平均值为 5.03%,与模型结果数值相近,相对误差为 4.38%。

香菇柄干燥粉碎后进行热水浸提,多糖得率仅为 (2.76±0.12)%,原因可能是原料干燥粉碎过程中,香菇柄中所含的蛋白质失水变性,影响后续多糖的溶出。而新鲜香菇柄处于吸水膨胀状态,经闪式提取器破碎后提取,多糖更容易溶出,以新鲜香菇柄为原料采用闪式辅助热水浸提多糖得率是传统热水浸提的 1.82 倍。

### 2.3 抗氧化活性分析

2.3.1 羟自由基清除能力 由图 2 可知,当多糖质量浓度为 0.2~2.0 mg/mL 时,随着质量浓度的增大,其对羟自由基的清除能力也随之增强,两者之间存在一定量效关系。当质量浓度为 2.0 mg/mL 时,闪式辅助热水浸提法多糖对羟自由基的清除率达到 58.89%,传统热水浸提法的为 44.91%,闪式辅助热水浸提法多糖对羟自由基的清除能力高于传统热水浸提法的,低于维生素 C 的。

2.3.2 DPPH 自由基清除能力 由图 3 可知,当多糖质量浓度为 0.2~0.4 mg/mL 时,随着质量浓度的增加,其

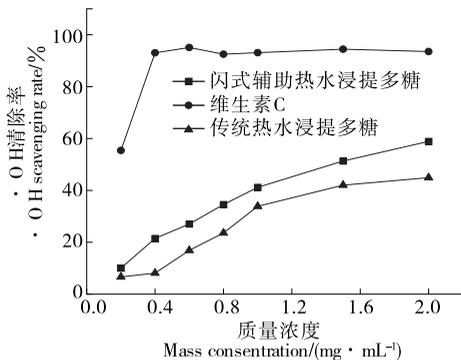


图2 香菇柄多糖羟自由基清除率

Figure 2 Hydroxyl radical scavenging rate of polysaccharides from lentinan stalk

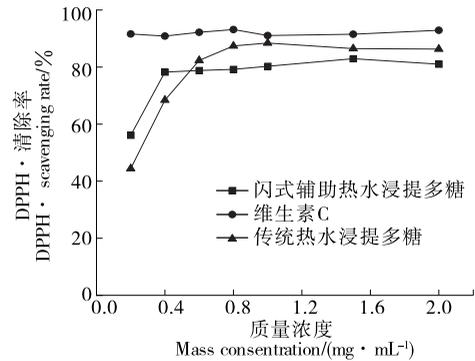


图3 香菇柄多糖的 DPPH 自由基清除率

Figure 3 DPPH radical scavenging rate of polysaccharides from lentinan stalk

DPPH 自由基清除能力迅速提高,0.4 mg/mL 的香菇柄多糖对 DPPH 自由基的清除率已明显大于 50%。在 0.4~0.8 mg/mL 质量浓度范围内,其 DPPH 自由基清除能力随质量浓度的增加,提升的趋势变缓。在一定质量浓度下,两者均有较强的 DPPH 自由基清除能力,但浓度较低时,传统热水浸提多糖的 DPPH 自由基清除能力略强于闪式辅助热水浸提的,可能与传统热水浸提香菇柄需经过干燥粉碎过程有关,此过程中,多糖部分基团受氧气和温度的影响氧化,从而表现出对 DPPH 自由基单电子较强的捕获能力,但当多糖浓度进一步升高时,未氧化多糖因更强的还原性而表现出更好的 DPPH 自由基清除能力。

2.3.3 Fe<sup>3+</sup> 还原能力 由图 4 可知,在 0.2~2.0 mg/L 质量浓度范围内,香菇柄多糖的还原能力随多糖质量浓度的增加而逐渐增强。当质量浓度为 2.0 mg/mL 时,闪式辅助热水浸提和传统热水浸提法提取多糖的还原力分别为 0.681 6, 0.621 6,整体上闪式辅助热水浸提多糖的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力略高于传统热水浸提多糖的,这与传统热水浸提的原料需经干燥粉碎,多糖部分基团被氧化有关。二者对 Fe<sup>3+</sup> 的还原能力远低于维生素 C 的。

2.3.4 总抗氧化能力 由图 5 可知,总抗氧化能力与多糖质量浓度呈量效关系,随着多糖质量浓度的增加,总抗

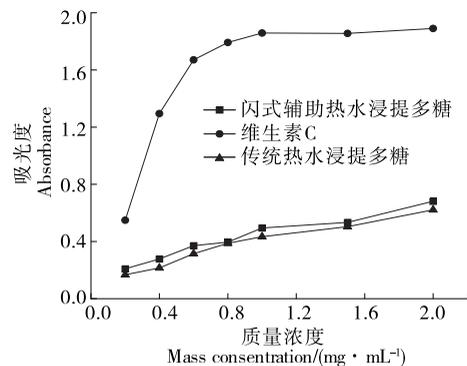


图4 香菇柄多糖的 Fe<sup>3+</sup> 还原能力

Figure 4 Fe<sup>3+</sup> reduction ability of polysaccharides from lentinan stalk

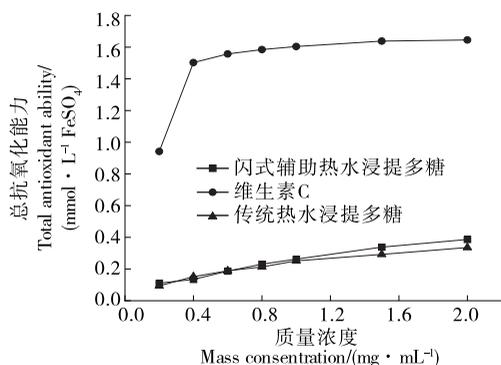


图 5 香菇柄多糖的总抗氧化能力

Figure 5 Total antioxidant ability of lentinan stalk polysaccharides

氧化能力增强。当质量浓度为 2.0 mg/mL 时, 闪式辅助热水浸提和传统热水浸提法提取多糖的总抗氧化能力分别为 0.387, 0.336 mmol/L FeSO<sub>4</sub>, 均明显低于维生素 C 的。

### 3 结论

试验表明, 闪式辅助热水浸提法提取香菇柄多糖的最优工艺条件为闪式提取时间 120 s, 液料比 ( $V_{\text{去离子水}} : m_{\text{香菇柄}}$ ) 40 : 1 (mL/g), 热水浸提时间 105 min, 温度 50 °C, 提取两次, 此条件下多糖得率为 (5.03 ± 0.22)%, 与模型预测值基本一致, 是传统热水浸提法的 1.82 倍。与传统提取方法相比, 闪式辅助热水浸提只需对原料进行简单处理(可使用机械切丁的方式), 即可实现对原料的破碎, 其多糖得率高, 产品抗氧化活性好, 工艺简单, 提取时间短, 能耗少, 是活性多糖提取的可行新工艺。后续可对多糖的细微结构和官能团差异进行研究, 以阐明其原理。

#### 参考文献

[1] 中国食用菌协会. 2020 年度全国食用菌统计调查结果分析[J]. 中国食用菌, 2022, 41(1): 85-91.  
China Edible Fungi Association. Analysis of the 2020 national statistical survey on edible fungi[J]. Edible Fungi of China, 2022, 41(1): 85-91.

[2] 孙宇晨, 部建雯, 张明, 等. 香菇柄功能成分协同降血脂活性研究[J]. 食品科技, 2022, 47(6): 112-119.  
SUN Y C, BU J W, ZHANG M, et al. Synergistic hypolipidemic activity of functional components from *Lentinula edodes* stem[J]. Food Science and Technology, 2022, 47(6): 112-119.

[3] LI S F, WANG A J, LIU L N, et al. Extraction of polysaccharides under vacuum condition from *Lentinus edodes* stipe and their antioxidant activities in vitro[J]. Food Science and Biotechnology, 2019, 28(3): 759-767.

[4] MAITY P, SEN I K, CHAKRABORTY I, et al. Biologically active polysaccharide from edible mushrooms: A review[J]. International

Journal of Biological Macromolecules, 2021, 172: 408-417.

[5] 陕西师范大学. 一种基于香菇柄中性多糖的果汁抑菌剂: CN112753927B[P]. 2022-08-30.  
Shaanxi Normal University. A fruit juice antibacterial agent based on neutral polysaccharide from *Lentinus edodes* stalk: CN112753927B[P]. 2022-08-30.

[6] 张欣, 韩增华, 孔祥辉, 等. 酶法提取香菇柄多糖[J]. 生物技术, 1999, 9(1): 21-24.  
ZHANG X, HAN Z H, KONG X H, et al. Enzymatic extraction of polysaccharides from *Lentinus edodes* stalk[J]. Biotechnology, 1999, 9(1): 21-24.

[7] 王谦, 徐彩芳, 王朝江. 微波法提取香菇柄多糖初步研究[J]. 食用菌学报, 2009, 16(4): 58-60.  
WANG Q, XU C F, WANG C J. Optimization of polysaccharide extraction from *Lentinus edodes* stipes using microwave technology [J]. Acta Edulis Fungi, 2009, 16(4): 58-60.

[8] 朱晓梅, 田光辉. 香菇柄中多糖提取工艺的优选[J]. 食品与发酵工业, 2004, 30(3): 125-127.  
ZHU X M, TIAN G H. Optimizing extraction process of polysaccharide from root of *Lentinus edodes* [J]. Food and Fermentation Industries, 2004, 30(3): 125-127.

[9] 王琼波. 香菇菌柄与菌伞多糖含量及抗氧化性比较[J]. 饮料工业, 2017, 20(2): 16-19.  
WANG Q B. Comparative studies on the content of polysaccharide and its antioxidant activity in stipes and caps of *Lentinus edodes*[J]. Beverage Industry, 2017, 20(2): 16-19.

[10] 秦楠, 缪文玉, 连文绮, 等. 响应曲面法优化微波辅助提取香菇柄多糖及其抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(2): 594-600.  
QIN N, MIAO W Y, LIAN W Q, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of polysaccharides from *Lentinus edodes* root by response surface analysis and its antioxidant activity[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2017, 8(2): 594-600.

[11] 刘延泽. 植物组织破碎提取法及闪式提取器的创制与实践[J]. 中国天然药物, 2007, 5(6): 401-407.  
LIU Y Z. Principle and practice of smashing tissue extraction and herbal blitzkrieg extractor [J]. Chinese Journal of Natural Medicines, 2007, 5(6): 401-407.

[12] QIN D Y, XI J. Flash extraction: An ultra-rapid technique for acquiring bioactive compounds from plant materials[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 581-591.

[13] 张雄, 肖志勇, 黄群, 等. 猴头菇多糖和蛋白质闪式联合提取工艺优化及结构鉴定[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 117-121, 183.  
ZHANG X, XIAO Z Y, HUANG Q, et al. Optimization of flash extraction process and structure identification of polysaccharide and protein from *Hericium erinaceus*[J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 117-121, 183.

[14] SONG Q B, XIA X, JI C M, et al. Optimized flash extraction and UPLC-MS analysis on antioxidant compositions of *Nitraria*

- sibirica fruit [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2019, 172: 379-387.
- [15] HAO Y J, ZHANG K X, JIN M Y, et al. Improving fed-batch culture efficiency of *Rhodiola sachalinensis* cells and optimizing flash extraction process of polysaccharides from the cultured cells by BBD-RSM [J]. Industrial Crops and Products, 2023, 196: 116513.
- [16] 沈晓静, 解富娟, 周绍琴, 等. 咖啡生豆多糖提取及抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 144-149, 181.
- SHEN X J, XIE F J, ZHOU S Q, et al. Extraction of polysaccharide from green coffee beans and its antioxidant activity [J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 144-149, 181.
- [17] 清源, 陈甜甜. 块菌多糖复合酶法提取工艺优化[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 174-178.
- QING Y, CHEN T T. Optimization of the extraction of truffle polysaccharide by multi-enzyme hydrolysis[J]. Food & Machinery, 2018, 34(10): 174-178.
- [18] 史德芳, 高虹, 谭洪卓, 等. 香菇柄多糖的微波辅助提取及其活性研究[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(2): 10-14.
- SHI D F, GAO H, TAN H Z, et al. Study on microwave-assisted extraction and biological activity of polysaccharide from *Lentinus edodes* stem[J]. Food Research and Development, 2010, 31(2): 10-14.
- [19] 池源, 王丽波. 苯酚—硫酸法测定南瓜籽多糖含量的条件优化[J]. 食品与机械, 2014, 30(1): 89-92.
- CHI Y, WANG L B. Study on phenol-sulfuric acid method for determination of polysaccharide content in pumpkin seeds[J]. Food & Machinery, 2014, 30(1): 89-92.
- [20] 李楠, 张香飞, 杨春杰. 板栗多糖初级结构表征及抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2022, 38(10): 24-28, 49.
- LI N, ZHANG X F, YANG C J. Primary structure characterization and antioxidant activity of polysaccharide from *Zizyphus jujuba* cv. banzao[J]. Food & Machinery, 2022, 38(10): 24-28, 49.
- [21] 姜慧, 孔立敏, 王翀, 等. 条斑紫菜多糖的降解条件优化及其生物活性[J]. 食品科学, 2021, 42(3): 38-47.
- JIANG H, KONG L M, WANG C, et al. Optimization of degradation conditions of polysaccharides from *Porphyra yezoensis* and changes in biological activities after degradation[J]. Food Science, 2021, 42(3): 38-47.
- [22] CHEN B J, SHI M J, CUI S, et al. Improved antioxidant and anti-tyrosinase activity of polysaccharide from *Sargassum fusiforme* by degradation [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 715-722.
- [23] 王苗苗, 刘宗浩, 张永, 等. 2种新疆沙棘中黄酮、多酚及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(18): 51-57.
- WANG M M, LIU Z H, ZHANG Y, et al. Analysis of the flavonoid polyphenol and its antioxidant activity of 2 kinds of sea buckthorn from Xinjiang[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(18): 51-57.
- [24] 李昌勤, 姚辰, 朱荣遥, 等. 基于 DPPH、ABTS 和 FRAP 的中药女贞子抗氧化谱效关系研究[J]. 中国中药杂志, 2016, 41(9): 1 670-1 677.
- LI C Q, YAO C, ZHU R Y, et al. Spectrum-effect relationship in antioxidant activity of *Ligustri Lucidi Fructus* based on DPPH, ABTS and FRAP assays [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2016, 41(9): 1 670-1 677.
- 
- (上接第 121 页)
- [21] FAN H, LUO Y, YIN X, et al. Biogenic amine and quality changes in lightly salt- and sugar-salted black carp (*Mylopharyngodon piceus*) fillets stored at 4 °C [J]. Food Chem, 2014, 159: 20-28.
- [22] SALLAM K I, AHMED A M, ELGAZZAR M M, et al. Chemical quality and sensory attributes of marinated pacific saury (*Cololabis saira*) during vacuum-packaged storage at 4 °C [J]. Food Chem, 2007, 102(4): 1 061-1 070.
- [23] 胡奇杰, 王东旭, 谷贵章. 复配生物涂膜保鲜液对冷藏南美白对虾的保鲜效果研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(2): 763-768.
- HU Q J, WANG D X, GU G Z. Study on the preservative effect of compound biological coating liquid on frozen South American whiteprawn [J]. J Food Saf Food Qual, 2021, 12(2): 763-768.
- [24] YANG H, LI Q, YANG L, et al. The competitive release kinetics and synergistic antibacterial characteristics of tea polyphenols/ $\epsilon$ -poly-L-lysine hydrochloride core-shell microcapsules against *Shewanella putrefaciens* [J]. Int J Food Sci Technol, 2020, 55(12): 3 542-3 552.
- [25] ZHAO X, WU J, CHEN L, et al. Effect of vacuum impregnated fish gelatin and grape seed extract on metabolite profiles of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fillets during storage [J]. Food Chem, 2019, 293: 418-428.
- [26] JOUKI M, YAZDI F T, MORTAZAVI S A, et al. Effect of quince seed mucilage edible films incorporated with oregano or thyme essential oil on shelf life extension of refrigerated rainbow trout fillets [J]. Int J Food Microbiol, 2014, 174: 88-97.
- [27] FARZAD R, KUHN D D, SMITH S A, et al. Effects of selenium-enriched prebiotic on the growth performance, innate immune response, oxidative enzyme activity and microbiome of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Aquaculture, 2021, 531: 735980.
- [28] YU D, XU Y, JIANG Q, et al. Effects of chitosan coating combined with essential oils on quality and antioxidant enzyme activities of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets stored at 4 °C [J]. Int J Food Sci Technol, 2017, 52(2): 404-412.
- [29] HERRERA J R, MACKIE I M. Cryoprotection of frozen-stored actomyosin of farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by some sugars and polyols [J]. Food Chem, 2004, 84(1): 91-97.