

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

秦楠^{1*}, 缪文玉², 连文绮³, 孙亚莉³

(1. 山西中医学院制药与食品工程学院, 太原 030619; 2. 太原城市职业技术学院, 太原 030027;
3. 山西农业大学信息学院, 太谷 030800)

摘要: **目的** 优化香菇柄多糖的微波辅助提取工艺, 并研究其抗氧化活性。 **方法** 通过单因素试验, 选择时间、功率以及料液比为自变量, 多糖提取率为响应值, 采用响应曲面法设计分析研究各自变量及其交互作用对多糖提取率的影响。经分析模拟得到二次多项式回归方程的预测模型, 从而获得最适的提取工艺条件; 并采用 DPPH 法、Fenton 反应等方法测定香菇柄多糖的抗氧化活性。 **结果** 在提取时间 8 min、微波作用功率 400 W、料液比 1:7(*m:V*)的条件下获得多糖提取率为 4.91%; 香菇柄多糖具有清除 DPPH 自由基与羟自由基的能力。 **结论** 本研究可为香菇柄的再利用与开发提供参考。

关键词: 香菇柄多糖; 微波辅助提取; 响应面分析; 抗氧化活性

Optimization of microwave-assisted extraction of polysaccharides from *Lentinus edodes* root by response surface analysis and its antioxidant activity

QIN Nan^{1*}, MIAO Wen-Yu², LIAN Wen-Qi³, SUN Ya-Li³

(1. College of Pharmaceutical and Food Engineering, Shanxi University of Traditional Chinese Medicine, Taiyuan 030619, China; 2. Department of Management Engineering, Taiyuan City Vocational College, Taiyuan 030027, China; 3. College of Information, Shanxi Agricultural University, Taigu 030800, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the microwave-assisted extraction (MAE) process of polysaccharide from *Lentinus edodes* root (LRP), and study its antioxidant activity. **Methods** Single factor experiments involving three technological parameters including extraction time, microwave power and material/solvent ratio were selected for following investigations on the interactive effects of the parameters on LRP yield using central composite design combined with response surface methodology. A quadratic polynomial regression model was developed for LRP yield as a response to the above parameters and then the optimal extraction process conditions were obtained. The methods of DPPH and Fenton reaction were applied for determination of antioxidant activity. **Results** The optimal conditions of MAE were as follows: extraction time was 8 min, microwave power was 400 W and material/solvent ratio was 1:7 (*m:V*), and the yield of LRP was up to 4.91%. The antioxidant assays showed that the DPPH and the hydroxyl radical scavenging activities of extracts were strong. **Conclusion** The present study can provide a

基金项目: 山西省卫计委科研项目(201601115)

Fund: Supported by the Health and Family planning Commission Foundation Project of Shanxi (201601115)

*通讯作者: 秦楠, 讲师, 博士, 主要研究方向为食品微生物及功能食品加工。E-mail: bszy6688@163.com

*Corresponding author: Qin Nan, Lecturer, Ph.D, College of Pharmaceutical and Food Engineering, Shanxi University of Traditional Chinese Medicine, Taiyuan 030619, China. E-mail: bszy6688@163.com

reference for reuse and development of LRP.

KEY WORDS: polysaccharide from *Lentinus edodes* root; microwave-assisted extraction; response surface analysis; antioxidant activity

1 引言

香菇(*Lentinus edodes* (Berk) Sing), 属于真菌门, 担子菌纲, 伞菌目, 口蘑科, 香菇属, 在我国香菇的栽培具有非常悠久的历史^[1]。香菇肉质肥嫩, 味美气香, 作为一种食药同源的食物, 不仅具有高营养, 而且还具有药用和保健价值^[2,3]。香菇中菇柄量约占子实体的 25%, 其中富含生物活性物质。据报道, 香菇柄中所包含的 7 种多糖成分中 5 种具有 $\beta(1-3)$ 糖苷键结构的葡聚糖, 而且针对抗突变有良好的生物活性^[4,5]。但由于其粗纤维含量较多, 组织较硬, 食用品质不佳, 因而多弃之不用, 全国每年废弃香菇柄有数万吨^[6,7]。据报道, 菇柄的营养成分与菇盖相似, 蛋白质含量明显高于蔬菜和粮食^[8]。香菇多糖作为一种宿主免疫增强剂, 在增强机体免疫、抗病毒与抗肿瘤等方面有保健作用, 但是其抗氧化活性的研究相对较少^[9-11]。

有关植物与真菌多糖 DPPH 自由基清除能力的研究较多, 如姜宁等^[12]报道了厚朴多糖具有较强的 DPPH 自由基清除能力, 郑义等^[13]研究表明高良姜多糖对 DPPH 自由基的清除能力与多糖浓度呈正相关。钟耀广等^[14]报道了两种香菇多糖 Len 和 LenI 均具有还原能力, 对超氧阴离子自由基、羟基自由基有清除作用。 $\cdot\text{OH}$ 是人体内最为活泼的活性氧, 其参与的化学反应属于游离基反应, 且反应速度极快^[15,16], 因此当多糖浓度达到一定浓度时, 才可以显著地表现出清除能力。王玢等^[17]研究发现香菇多糖在质量分数 0.1% 时清除能力一般, 随着质量分数的提高清除能力不断增强。黄磊^[18]报道了香菇多糖分级沉淀不同组分都具有清除 $\cdot\text{OH}$ 的能力。有关香菇柄多糖的抗氧化活性的报道相对较少。

微波辅助萃取技术(microwave-assisted extraction technique)已成为一种具有发展潜力的绿色萃取分离技术, 被广泛应用于各种天然活性成分的提取^[19-21]。微波破壁的原理是生物样品吸收微波导致发热而产生破壁, 可加速被萃取组分的分子由固体内部向固液界面扩散的速率^[22]。因此, 该技术具有高选择性、高效性、操作简便、节能、省时及产品提取率高等特点。本研究应用微波辅助提取技术提取香菇柄中多糖(polysaccharide from *Lentinus* root, LRP), 采用响应曲面法优化提取, 旨在摸索微波辅助提取香菇柄中多糖的最适参数, 并进行香菇柄多糖的抗氧化研究, 以期为进一步的研究与利用提供科学依据。

2 材料与方 法

2.1 材料与试剂

鲜香菇(市售)。

1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(diphenyl-picryl hydrazyl, DPPH, 美国 Sigma 公司); 3,5-二硝基水杨酸、无水乙醇、苯酚、浓硫酸、葡萄糖、浓盐酸、氢氧化钠(分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司)。

2.2 仪器与设备

HH-420 电热恒温水浴箱(南京泰斯特试验设备公司); DS-1 高速组织捣碎机(南京皓海仪器仪表公司); pHHS-25 型数显酸度仪(武汉博文电子有限公司); 752 型紫外分光光度计(上海光谱仪器有限公司); BL-410F 电子天平(上海精密仪器仪表有限公司); 80-5 离心机(连云港市化工机械厂); HJ-3 磁力搅拌器(北京金紫光仪器仪表公司); RE-522AA 式旋转蒸发仪(上海亚荣生化仪器厂); FD-1A-50 冷冻干燥机(上海欧蒙实业有限公司)。

2.3 香菇柄多糖的分析测定方法

2.3.1 提取工艺^[9]

新鲜香菇柄→破碎→加水浸提→微波提取→离心→上清液→浓缩→醇沉→干燥→粗多糖

2.3.2 测定方法

(1)多糖测定: 参照苯酚硫酸法^[23]。

(2)多糖提取率测定: 参照公式(1)计算。

$$\text{多糖提取率} \% = \frac{\text{粗多糖质量}}{\text{原料质量}} \times 100 \quad (1)$$

2.4 实验方法

2.4.1 单因素试验

以蒸馏水为提取溶剂, 考察提取时间(min)、微波作用功率(W)、料液比(g/mL)3 个主要因素对香菇柄多糖提取率的影响。按照提取工艺提取香菇柄中多糖, 并计算提取率。

2.4.2 响应曲面法试验设计

在单因素试验结果基础上, 采用中心组合试验 Box-Behnken 设计方案, 以提取时间(min)、微波作用功率(W)以及料液比(g/mL)为设计因素, 分别用 X_1 、 X_2 、 X_3 来表示, 并以 +1、0、-1 分别代表变量的水平, 按方程 $x_i = (X_i - X_0) / \Delta X$ 对自变量进行编码, 其中, x_i 为变量的编码值, X_i 为变量的真实值, X_0 为试验中心点变量的真实值, ΔX 为变量的变化步长, 多糖提取率 Y 为响应值(如表 1)。

表 1 Box-Behnken 设计因素和水平编码值

Table 1 Factors and coded levels for Box-Behnken experiments

因素	编码水平(xi)		
	-1	0	1
提取时间(min) X_1	6	8	10
微波作用功率(W) X_2	300	400	500
料液比(g/mL) X_3	5	7	10

2.4.3 抗氧化实验

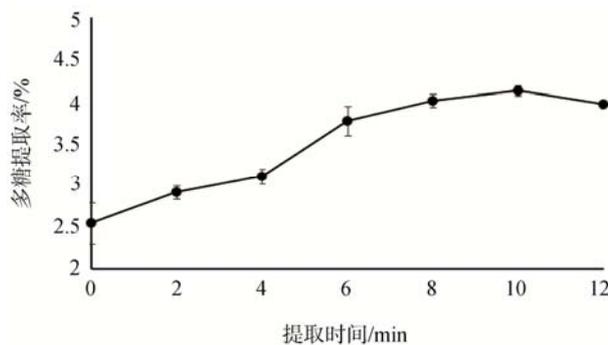
DPPH 存在于有机溶剂中是一种稳定的自由基, 当其溶于乙醇时呈深紫色, 最大吸收峰为 517 nm^[24], 当自由基清除剂加入到 DPPH 溶液里时, 弧对电子被配对从而导致吸收消失或减弱。其原理是通过分子中 1 个稳定的 DPPH 与抗氧化剂提供的 1 个电子配对结合, 使紫色消失^[25,26]。清除 OH 实质是抗氧化物成功地抑制了经 Fenton 反应后 OH 的产生^[27]。本研究将香菇柄多糖提取物浓缩干燥后进行不同质量浓度梯度的稀释, 采用 DPPH 法^[28-30]、Fenton 反应^[11]等方法测定香菇柄多糖的抗氧化活性。

3 结果与分析

3.1 单因素试验及其分析

3.1.1 微波处理时间对多糖提取率的影响

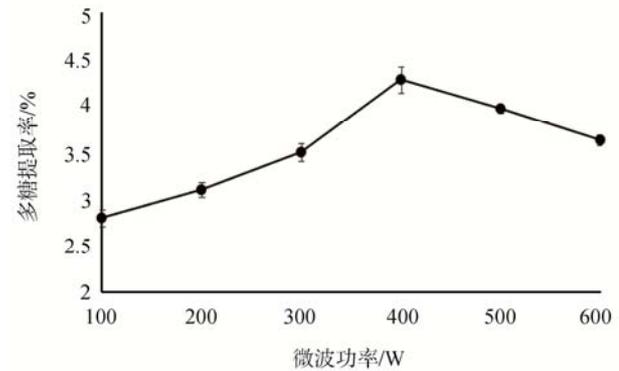
固定液料比为 1:7(g/mL)、微波作用功率 350 W、提取 2 次, 考察不同微波处理时间 0、2、4、6、8、10、12 min 对香菇柄多糖提取率的影响, 结果如图 1 所示。

图 1 提取时间对香菇柄多糖提取率的影响($n=3$)Fig. 1 Effect of extraction time on LRP yield ($n=3$)

微波辐射的高效性对细胞壁破碎具有很好的效果, 增加了多糖溶出率^[22]。由图 1 可知, 随提取时间的延长, 提取率增大。但浸提时间大于 8 min 后, 提取率有所下降, 故选 8 min 作为最佳提取时间。

3.1.2 微波作用功率对多糖提取率的影响

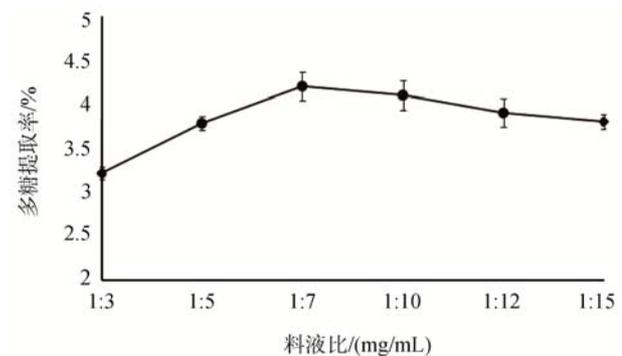
固定液料比 1:7(g/mL)、微波处理时间 8 min、提取 2 次, 考察不同微波处理功率 100、200、300、400、500、600 W 对香菇柄多糖提取率的影响, 结果如图 2 所示。

图 2 微波功率对香菇柄多糖提取率的影响($n=3$)Fig. 2 Effect of microwave power on LRP yield ($n=3$)

料液温度随着微波功率增加不断升高, 导致固液传质速率大幅增加同时多糖提取率增加。由图 2 可知, 当微波作用功率 400 W 时多糖提取率达到最高, 之后呈现下降趋势, 故选择 400 W 作为最佳作用功率。

3.1.3 液料比对多糖提取率的影响

固定提取时间 8 min, 微波处理功率 400 W, 考察不同料液比(1:3、1:5、1:7、1:10、1:12、1:15)对多糖提取率的影响, 结果如图 3 所示。

图 3 料液比对香菇柄多糖提取率的影响($n=3$)Fig. 3 Effect of material/solvent ratio on LRP yield ($n=3$)

由图 3 可知, 多糖提取率随着料液比的增大而逐步提高, 当料液比为 1:7 时提取率达到最大, 随着料液比的继续增加, 多糖提取率呈逐渐下降趋势。这可能由于料液比增大, 多糖提取液浓度降低, 而且醇沉时浪费乙醇用量, 因此选定料液比 1:7。

3.2 响应面试验结果与分析

3.2.1 试验结果

Box-Behnken 设计方案及香菇柄中多糖提取率如表 2 所示, 共 17 个试验点, 其中 12 个为析因点, 5 个为零点, 析因点为自变量取值在 X_1 、 X_2 、 X_3 所构成的三维顶点, 零点为区域的中心点, 其中零点试验重复 5 次, 用以估算试验误差。

表 2 Box-Behnken 设计方案及香菇柄中多糖提取率(n=5)
Table 2 Box-Behnken design scheme and LRP yield (n=5)

试验编码	编码水平			多糖提取率%
	X_1	X_2	X_3	
1	-1	1	0	4.17
2	-1	-1	0	4.03
3	-1	0	1	4.56
4	-1	0	-1	4.53
5	1	0	-1	4.54
6	1	-1	0	4.1
7	1	0	1	4.65
8	1	1	0	4.11
9	0	1	1	4.38
10	0	1	-1	4.33
11	0	-1	-1	4.25
12	0	-1	1	4.36
13	0	0	0	4.9
14	0	0	0	4.92
15	0	0	0	4.88
16	0	0	0	4.86
17	0	0	0	4.93

3.2.2 模型的建立及其显著性检验

利用 Design-Expert(version7.1.6, Stat-Ease Inc.,

USA)软件对表 2 试验数据进行多元回归拟合, 得到香菇柄中多糖提取率(Y)对提取时间(X_1)、微波作用功率(X_2)和料液比(X_3)的二次多项回归模型为: $Y=4.9+0.014 X_1+0.031 X_2+0.037 X_3-0.032 X_1 X_2-0.020 X_1 X_3-0.015 X_2 X_3-0.28 X_1^2-0.52 X_2^2-0.050 X_3^2$ 。响应面试验结果方差分析表见表 3。

由方差分析表 3 可以看出, 该模型方程极显著, 不同处理间的差异高度显著, 说明此种实验方法准确可靠。决定系数 $R^2=0.9971$, R^2 越接近 1, 说明此模型越能预测其响应值, 本实验 R^2 为 0.9971, 说明响应值的变化有 99.71% 来源于所选变量, 该方程拟合情况合理可靠。从表中得出方程中 X_1^2 、 X_2^2 、对提取率 Y 值的影响极显著, X_2 、 X_3 、 X_3^2 对 Y 值的影响显著, 该方程拟合情况合理可靠。

3.2.3 香菇柄中多糖提取工艺的响应面分析与优化

根据模型方程绘制响应曲面图, 结果见图 4~6。从响应面图可以直观地看出最佳参数及各参数之间的相互作用。

图 4 显示在料液比水平为 0, 即 1:7 时, 微波作用功率与提取时间对香菇柄中多糖提取率的交互影响效应。微波作用功率有助于香菇柄中多糖提取率的提取, 表现为曲线较陡, 且随着微波功率升高香菇柄中多糖提取率不断增加, 当达到一定功率时香菇柄中多糖提取率反而呈下降趋势, 这说明功率过高或者过低均不适合香菇柄中多糖的提取。另一方面提取时间曲线表现较陡, 当提取时间达到一定值时提取率最高, 时间过长或过短对香菇柄中多糖提取率都不利。

表 3 响应面试验结果方差分析表
Table 3 Variance analysis of the response surface regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	Prob>F	显著性
模型	1.59	9	0.18	265.09	<0.00001	**
X_1	0.001513	1	1.59	2.27	0.1753	
X_2	0.007813	1	0.007813	11.75	0.0110	*
X_3	0.011	1	0.007813	16.92	0.0045	*
X_1X_2	0.004225	1	0.011	6.35	0.0398	
X_1X_3	0.0016	1	0.004225	2.41	0.1648	
X_2X_3	0.00090	1	0.0016	1.35	0.2828	
X_1^2	0.32	1	0.32	488.45	<0.00001	**
X_2^2	1.13	1	1.13	1697.29	<0.00001	**
X_3^2	0.011	1	0.011	15.99	0.0052	*
残差	0.004655	7	0.000665			
失拟项	0.001375	3	0.000458	0.56	0.6698	
纯误差	0.003280	4	0.00082			
总和	1.59	16				

注: $R^2=0.9971$, $R^2_{Adj}=0.9933$, **差异极显著($P<0.01$); *差异显著($P<0.05$)。

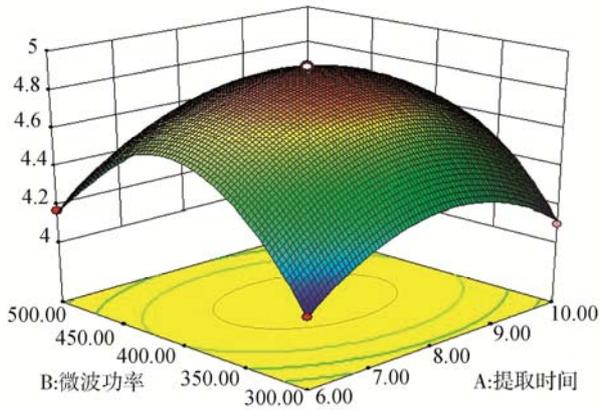


图 4 微波功率与提取时间对香菇柄中多糖提取率的响应面图
Fig. 4 Three-dimensional response surface graph of microwave power and extraction time on LRP yield

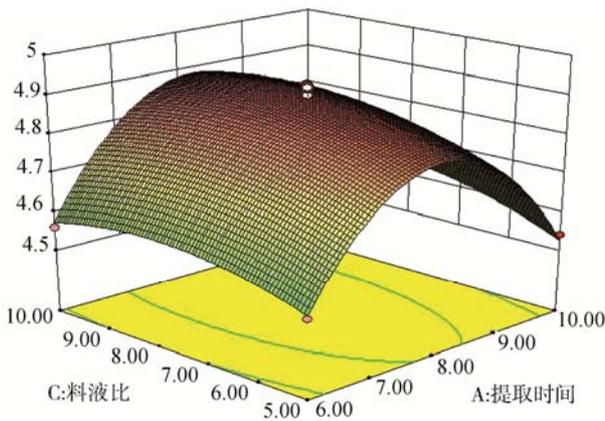


图 5 料液比与提取时间对香菇柄中多糖提取率的响应面图
Fig. 5 Three-dimensional response surface graph of material/solvent ratio and extraction time on LRP yield

图 5 显示在微波功率水平为 0, 即 400 W 时, 料液比与提取时间对香菇柄中多糖提取率的交互影响效应。料液比曲线表现较为平缓, 在 1:5~1:10 的范围内变化不太明显。提取时间曲线表现为较陡, 随着时间的增加有利于香菇柄中多糖的提取, 但随着料液比的不断增大时多糖提取率有下降的趋势。

图 6 显示在提取时间水平为 0, 即 8 min 时, 料液比与微波功率对香菇柄中多糖提取率的交互影响效应。料液比曲线表现较为平缓, 在 1:5~1:10 的范围内变化不太明显。微波功率在 300~400 W 之间, 香菇柄中多糖提取率随着功率的提高而增加, 但随着料液比的增大香菇柄中多糖提取率有所下降。

经分析, 香菇柄中多糖提取的最佳工艺条件为: 提取时间 7.6 min, 微波功率 417.69 W, 料液比 1:7.03, 在此条

件下香菇柄中多糖提取率为 4.93%。考虑实际操作的方便性, 将最适提取参数修正为提取时间 8 min, 微波功率 400 W, 料液比 1:7, 3 次平行实验得到的实际平均提取率为 4.91%。

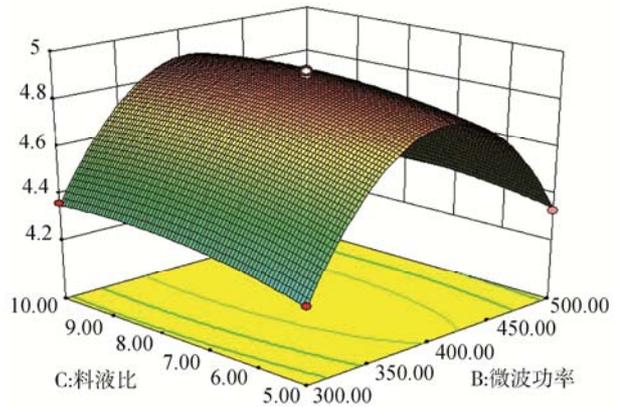


图 6 料液比与微波功率对香菇柄中多糖提取率的响应面图
Fig. 6 Three-dimensional response surface graph of material/solvent ratio and microwave power on LRP yield

3.3 抗氧化活性的测定

3.3.1 DPPH 自由基清除率的测定

不同浓度香菇柄多糖对 DPPH 自由基的清除作用如图 7 所示, 由香菇柄中提取出的香菇多糖对 DPPH 自由基有很好的清除能力, 而且与香菇多糖浓度成正比。当浓度达到 2.5 mg/mL 时, 清除率达到 48.67%, 且还有继续上升之趋势, 说明香菇柄中多糖具有很好的抗氧化活性。

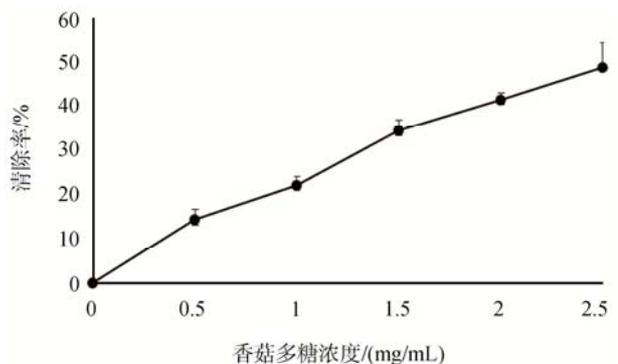


图 7 不同浓度香菇柄多糖对 DPPH 自由基的清除作用($n=3$)
Fig. 7 Effect of different concentrations of LRP on DPPH free radical scavenging capacity ($n=3$)

3.3.2 ·OH 清除率

不同浓度香菇柄多糖对·OH 的清除作用如图 8 所示,

由香菇柄中提取出的香菇多糖对·OH 亦有很好的清除能力, 总体趋势是随多糖浓度增加清除率增大。在浓度 0~1.5 mg/mL 之间, 清除能力缓慢增强, 当浓度超过 1.5 mg/mL 时, 清除·OH 的能力显著增强。

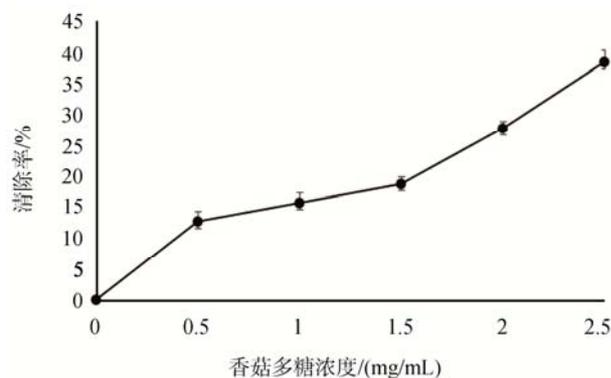


图 8 不同浓度香菇柄多糖对·OH 的清除作用($n=3$)

Fig. 8 Effect of different concentrations of LRP on hydroxyl radical scavenging capacity ($n=3$)

4 讨论与结论

本研究对微波辅助提取香菇柄中多糖工艺进行了优化, 并对菇柄中多糖的抗氧化活性进行了研究。郭德军等^[7]通过水提法提取香菇柄中多糖, 得率为 3.64%, 本试验经微波辅助提取获得的香菇柄多糖提取率为 4.91%, 相比水提法多糖得率提高了 25%。马长青等^[31]报道了采用纤维素酶法水解香菇柄多糖, 结果表明香菇柄加酶的提取液中多糖的含量比不加酶的增加 54%。在本实验中发现, 香菇柄多糖具有很好的抗氧化活性, 主要表现在能够清除 DPPH 自由基和·OH。随香菇柄多糖质量浓度增加 DPPH 自由基的清除能力显著增加, 与钟耀广等^[14]研究的香菇多糖抗氧化活性的结果有相似之处; 香菇柄多糖在浓度低于 1.5 mg/mL 时清除率较缓, 当浓度超过 1.5 mg/mL 时, 清除·OH 的能力显著增高, 这与王玢等^[17]与黄磊等研究结果一致。这说明香菇柄多糖与香菇多糖有一样的抗氧化活性, 为香菇柄的再度开发与利用奠定了一定的理论基础。

本研究在单因素试验基础上, 应用响应面设计法优化了微波辅助提取香菇柄中多糖的最佳工艺条件: 提取时间 8 min, 微波功率 400 W, 料液比 1:7, 按此工艺香菇柄中多糖的提取率可达 4.91%, 通过验证实验证明优化效果较好。香菇柄多糖具有较强的抗氧化活性, 对 DPPH 与·OH 自由基的清除力随多糖质量浓度的增加而提高。本研究为香菇柄资源的再加工与开发利用提供了理论依据, 同时香菇柄多糖具有很好的抗氧化方面或食品的开发前景。

参考文献

- [1] 陈前江. 我国香菇产业链的经济学分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
Chen QJ. Economic analysis on *Lentinus edodes* industry chain of China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010.
- [2] 梁巧玲. 香菇食用与药用价值[J]. 保鲜与加工, 2006, 6(5): 52-53.
Liang QL. Edible and medicinal value of *Lentinus edodes* [J]. Stor Process, 2006, 6(5): 52-53.
- [3] Zhang LN, Li XL, Xu XJ, et al. Correlation between antitumor activity, molecular weight, and conformation of lentinan [J]. Carbohydr Res, 2005, 340(8): 1515-1521.
- [4] 刘存芳, 田光辉, 赖普辉. 香菇柄中营养成分的开发与利用综述[J]. 科技信息, 2008, 1: 14-15.
Liu CF, Tian GH, Lai PH. Development and utilization of nutritional components in *Lentinus edodes* handle [J]. Sci Technol Inf, 2008, 1: 14-15.
- [5] Zhang YY, Li S, Wang XH, et al. Advances in lentinan: Isolation, structure, chain conformation and bioactivities [J]. Food Hydrocolloid, 2011, 25(2): 196-206.
- [6] 王进涛, 杜爱玲. 香菇柄系列方便食品加工工艺[J]. 中国食用菌, 2000, 19(4): 35-36.
Wang JT, Du AL. Processing technology of *Lentinus edodes* series of convenient food [J]. China Edible Fungi, 2000, 19(4): 35-36.
- [7] 吴关威, 李敏, 刘吟. 纤维素酶法提取香菇柄中呈味核苷酸工艺研究[J]. 中国调味品, 2010, 32(15): 41-43.
Wu GW, Li M, Liu Y. Studies on extraction of flavor nucleotide from the foot body of *Lentinus edodes* with cellulose enzyme [J]. China Condiment, 2010, 32(15): 41-43.
- [8] 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): 10-13.
Shi DF, Gao H, Tan HZ, et al. Study on microwave-assisted extraction and biological activity of polysaccharide from *Lentinus edodes* stem [J]. Food Res Dev, 2010, 31(2): 10-13.
- [9] 刘小丽, 黄晋杰. 微波辅助法提取香菇多糖的工艺[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(3): 14-18.
Liu XL, Huang JJ. Study on Microwave-assisted extraction of lentinan from mushroom [J]. Food Res Dev, 2010, 31(3): 14-18.
- [10] Yu ZH, Li HY, Qian Y, et al. Effect of *Lentinus edodes* poly-saccharide on oxidative stress, immunity activity and oral ulceration of rats stimulated by phenol [J]. Carbohydr Polym, 2009, 75(1): 115-118.
- [11] 林桂兰, 许学书, 连文思. 食用菇多糖提取物体外抗氧化性能研究[J]. 华东理工大学学报, 2006, 32(3): 278-281.
Lin GL, Xu XS, Lian WS. Antioxidant activity of edible mushroom polysaccharide extracts *in vitro* [J]. J East China Univ Sci Technol (Nat Sci Ed), 2006, 32(3): 278-281.
- [12] 姜宁, 刘晓鹏, 陈芳, 等. 厚朴多糖提取工艺及其体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(13): 12-17.
Jiang N, Liu XP, Chen F, et al. Extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Magnolia officinalis* Rehd. et Wils. Barks [J]. Food Sci, 2015, 36(13): 12-17.
- [13] 郑义, 王卫东, 李勇, 等. 高良姜多糖提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2014, 35(2): 126-131.

- Zheng Y, Wang WD, Li Yong, *et al.* Optimization of extraction process and antioxidant activities of polysaccharides from *Alpinia officinarum* Hance [J]. Food Sci, 2014, 35(2): 126–131.
- [14] 钟耀广, 林楠, 王淑琴. 香菇多糖的抗氧化性能与抑菌作用研究[J]. 食品科技, 2007, 7: 141–144.
Zhong YG, Lin N, Wang SQ, *et al.* Study on antioxidative and antimicrobial activities of lentinan [J]. Food Sci Technol, 2007, 7: 141–144.
- [15] 王多宁, 张小莉, 杨颖, 等. 百合多糖对羟自由基的清除作用[J]. 陕西中医学院学报, 2006, 29(4): 53–55.
Wang DN, Zhang XL, Yang Y, *et al.* Clearing hydroxy free base with lily polysaccharide[J]. J Shanxi Coll Tradit Chin Med, 2006, 29(4): 53–55.
- [16] 余双菊. 羟基自由基的特性及检测方法比较[J]. 广东化工, 2010, 9: 141–144.
Yu SJ. The specify of hydroxyl free radical and the methods to detect it [J]. Guangdong Chem, 2010, 9: 141–144.
- [17] 王玢, 任清, 李奇, 等. 香菇多糖的提取及其抗氧化性和保湿性评价[J]. 食用菌, 2008, (5): 58–60.
Wang B, Ren Q, Li Q, *et al.* Extraction of polysaccharides from *Lentinous edodes* and evaluation of its antioxidant activity and moisture retention [J]. Edible Fungi, 2008, (5): 58–60.
- [18] 黄磊. 香菇多糖抗氧化及其抗真菌机制初步研究[J]. 广东农业科学, 2013, 20: 114–116.
Huang L. Study on antioxidation and inhibition mechanism of *Lentinula edodes* polysaccharide [J]. Guangdong Agric Sci, 2013, 20: 114–116.
- [19] 李扬, 赵树法, 李婷, 等. 微波辅助萃取技术在食品工业中的研究进展[J]. 中国酿造, 2006, 162(9): 5–7.
Li Y, Zhao SF, Li T, *et al.* The application of microwave-assisted extraction technique in food industry [J]. China Brewing, 2006, 162(9): 5–7.
- [20] Rui H, Zhang LY, Li ZW, *et al.* Extraction and characteristics of seed kernel oil from white pitaya [J]. J Food Eng, 2009, 93(4): 482–486.
- [21] Spigno G, Faveri DM. Microwave-assisted extraction of tea phenols: a phenomenological study [J]. J Food Eng, 2009, 93(2): 210–217.
- [22] 侯振健, 王丽君, 李明浩, 等. 微波辅助酵母破壁工艺的研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(1): 183–185.
Hou ZJ, Wang LJ, Li MH, *et al.* Study on microwave-assisted breaking of yeast cell wall [J]. Food Mach, 2012, 28(1): 183–185.
- [23] 黄生权, 熬宏, 郭爱玲. 真菌保健食品中多糖含量测定方法的比较[J]. 现代食品科技, 2010, 26(7): 767–770.
Huang SQ, Ao H, Guo AL. Comparison of methods for determination of polysaccharides content in epiphyte health foods [J]. Mod Food Sci Technol, 2010, 26(7): 767–770.
- [24] 彭长连, 陈少薇. 用清除有机自由基 DPPH 法评价植物抗氧化能力[J]. 生物化学与生物物理进展, 2000, 27(6): 658–661.
Peng CL, Chen SW. Detection of antioxidative capacity in plants by scavenging organic free radical DPPH [J]. Prog Biochem Biophys, 2000, 27(6): 658–661.
- [25] Hidyuki L, Kahara T, Okubo K, *et al.* Superoxide and 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl radical scavenging activities of soyasaponin related to gallic acid [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2001, 65(10): 2162–2165.
- [26] Parejo I, Codina, Petrakis C, *et al.* Evaluation of scavenging activity assessed by Co(II)/EDTA-induced luminal chemiluminescence and DPPH (2,2-diphenyl-2-picrylhydrazyl) free radical assay [J]. J Pharm Toxicol Methods, 2000, 44(3): 507–512.
- [27] Roginsky V, Lissi EA. Review of methods to determine chain breaking antioxidant activity in food [J]. Food Chem, 92: 235–254.
- [28] 段宙位, 李维国, 窦志浩, 等. 沉香叶黄酮类化合物的提取及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(6): 45–50.
Duan ZW, Li WG, Dou ZH, *et al.* Extraction and antioxidant activity of flavonoids from *Aquilaria sinensis*(Lour.) Gilg leaves [J]. Food Sci, 2015, 36(6): 45–50.
- [29] Yvonne VY, Dawn EB, Meshell FC. Antioxidant activity of dulce(*Palmaria palmata*) extract evaluated *in vitro* [J]. Food Chem, 2005, 91(3): 485–494.
- [30] Li XA, Zhou AG, Han Y. Anti-oxidation and anti-microorganism activities of purification polymers [J]. Carbohydr Polymers, 2006, 66(1): 34–42
- [31] 马长青, 夏蓉, 彭彦, 等. 香菇柄中多糖及氨基酸的研究[J]. 医药导报, 2003, 22(6): 372–374.
Ma CQ, Xia R, Peng Y, *et al.* A study of methods for extraction of lentinan and amino acids from the foot body of *Lentinus edodes* [J]. Herald Med, 2003, 22(6): 372–374.

(责任编辑: 姚 菲)

作者简介

秦楠, 博士, 讲师, 主要研究方向为微生物及功能食品加工。
E-mail: bszy6688@163.com