

## 研究报告

## 冷杉侧耳多糖提取工艺优化及体外抗氧化活性

胡惠月, 周斌, 潘美晨, 田甜, 李长田\*

吉林农业大学食药菌教育部工程研究中心, 吉林 长春 130118

胡惠月, 周斌, 潘美晨, 田甜, 李长田. 冷杉侧耳多糖提取工艺优化及体外抗氧化活性[J]. 微生物学通报, 2024, 51(2): 494-504.

HU Huiyue, ZHOU Bin, PAN Meichen, TIAN Tian, LI Changtian. Optimization of extraction process and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharide from *Pleurotus abieticola*[J]. Microbiology China, 2024, 51(2): 494-504.

**摘要:**【背景】冷杉侧耳(*Pleurotus abieticola*)是一种新型食药菌,具有潜在的经济价值。【目的】更好地开发利用冷杉侧耳中的多糖成分,挖掘潜在的功能性食品。【方法】采用响应面分析法对冷杉侧耳多糖的提取工艺进行优化,并通过设置不同浓度梯度的多糖和 Vc (阳性对照)考察该多糖的 1,1-二苯基-2-苦基肼自由基(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl free radical, DPPH)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑林-6-磺硫(2,2'-azinobis-3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate, ABTS)和羟基自由基(hydroxyl radical,  $\cdot\text{OH}$ )的清除能力及铁离子还原能力来评价冷杉侧耳多糖的体外抗氧化活性。

【结果】最佳提取工艺:提取时间 122.62 min,提取温度 60.27 °C,液料比 28.87:1 (体积质量比),在该条件下,冷杉侧耳纯多糖提取率达到极大值 2.39%。该多糖在浓度为 1 mg/mL 时,DPPH 自由基清除率为 49.42%,ABTS 自由基清除率为 88.37%,羟基自由基清除率为 19.87%,铁离子还原力为 0.273。【结论】本研究为更高效地开发与利用冷杉侧耳多糖提供了理论依据,为进一步挖掘其生物活性及多糖产品打下了基础。

**关键词:**冷杉侧耳;多糖;响应面优化;方差分析;自由基清除能力

Optimization of extraction process and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharide from *Pleurotus abieticola*

HU Huiyue, ZHOU Bin, PAN Meichen, TIAN Tian, LI Changtian\*

Engineering Research Center of Ministry of Education for Edible and Medicinal Fungi, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, Jilin, China

**Abstract:** [Background] *Pleurotus abieticola* is a new species of edible and medicinal fungus

资助项目:国家现代农业产业技术体系项目(CARS-20);科技人才与平台计划(院士专家工作站)(202005AF150077)

This work was supported by the Earmarked Fund for Modern Agroindustry Technology Research System (CARS-20) and the Science and Technology Talent and Platform Program (Academician Expert Workstation) (202005AF150077).

\*Corresponding author. E-mail: lct@jlau.edu.cn

Received: 2023-07-13; Accepted: 2023-09-18; Published online: 2023-10-31

with a potential economic value. **[Objective]** To well develop and utilize the polysaccharides in *P. abieticola* and develop potential functional foods. **[Methods]** The response surface methodology was employed to optimize the extraction process of *P. abieticola* polysaccharide. Furthermore, the *in vitro* antioxidant activities of the polysaccharide at different concentrations and Vc (positive control) were evaluated by measuring the activities in scavenging 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl free radical (DPPH), 2,2'-azinobis-3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate (ABTS), hydroxyl radicals ( $\cdot\text{OH}$ ) and reducing iron ions. **[Results]** The extraction process was optimized as extraction at a liquid-to-solid ratio of 28.87:1 (mL:g) and 60.27 °C for 122.62 min, under which the extraction rate of pure polysaccharide from *P. abieticola* reached a maximum value of 2.39%. The polysaccharide at the concentration of 1 mg/mL showed the DPPH, ABTS, and  $\cdot\text{OH}$  scavenging rates of 49.42%, 88.37%, and 19.87%, respectively, and the iron ion reducing power of 0.273. **[Conclusion]** This study provides a theoretical basis for the efficient development and utilization of *P. abieticola* polysaccharide and lays a foundation for further research on the polysaccharide bioactivity and development of polysaccharide products.

**Keywords:** *Pleurotus abieticola*; polysaccharide; response surface optimization; analysis of variance; free radical scavenging ability

冷杉侧耳(*Pleurotus abieticola*)最初发现于俄罗斯远东地区针叶林中,后在我国东北地区也有记载,是我国研究人员在西南亚高山地区新发现的一种食药菌资源<sup>[1]</sup>,分类学上隶属于担子菌门(*Basidiomycota*)蘑菇亚门(*Agaricomycotina*)蘑菇纲(*Agaricomycetes*)蘑菇亚纲(*Agaricomycetidae*)蘑菇目(*Agaricales*)侧耳科(*Pleurotaceae*)侧耳属(*Pleurotus*)<sup>[2]</sup>。目前国内外关于冷杉侧耳的文献报道十分有限,仅罗智檜等<sup>[2]</sup>对冷杉侧耳生物学特性及栽培条件进行了初步研究;Guo等<sup>[3]</sup>以线虫感染的马尾松切片为主要原料,研究了其作为冷杉侧耳栽培基质的潜质;Pan等<sup>[4]</sup>发现其水溶性多糖通过促进免疫细胞应答进而具有免疫增强活性,其机制可能与调节肠道微生物群介导的氧化应激有关。

侧耳属食用菌易获得且受众面广,具有重要的经济和生态价值<sup>[5]</sup>,研究该属食药菌的活性成分及应用对提高其商品附加值具有现实意义。目前对侧耳属多糖的研究主要集中在提取方法、制备与纯化、结构分析、生物学活性和生理作用

等方面<sup>[6-7]</sup>。例如,平菇提取物(平菇多糖和75%乙醇提取物)对结肠炎症具有一定的保护和恢复效果,有治疗阿尔茨海默病、股骨头坏死等多种疾病的效果<sup>[6]</sup>;从阿魏侧耳提取出的胞外多糖在一定的浓度范围内可提高实验小鼠的免疫能力、对枯草芽孢杆菌的生长发育有抑制效果<sup>[8]</sup>。侧耳多糖的得率、纯度和相关活性很大程度上由提取条件决定,因此选择适宜提取方法并进行工艺优化尤为重要。常见的侧耳多糖提取方法有热水浸提法、酸提取法、碱提取法、酶提法、超临界萃取法、超声波和微波辅助提取法等<sup>[9]</sup>。这些方法各有其利弊,酸碱提取法能有效提高多糖得率,缩短提取时间,但对设备的耐腐蚀性要求较高,耗能高;酶提取法提取条件温和,对多糖损伤小,但价格昂贵且易失活;超临界萃取法、超声波和微波辅助提取法虽较酶提法成本低,但均需特定设备支持<sup>[10]</sup>;热水浸提法虽有处理时间长,提取效率低,在一些稀有食用菌的提取过程中不友好的缺点,但其易于使用且价格低廉,非常适合实验室或大规模工业合成真菌多糖<sup>[11]</sup>。因此,为

后续更好地挖掘与利用冷杉侧耳多糖,选择热水浸提法来提取冷杉侧耳多糖,并优化其提取工艺。

活性氧等自由基可使人衰老并导致各种疾病,所以清除或抑制自由基的产生,即进行抗氧化活性的研究尤为重要,而体外抗氧化试验是评价抗氧化活性的重要手段。体外抗氧化试验是在自由基溶液中加入抗氧化剂,根据所产生的光学差异来反映抗氧化活性,自由基清除能力测定是常用的抗氧化活性评价方法,可以较为准确地反映出抗氧化剂的抗氧化能力<sup>[12]</sup>,并为开发抗氧化剂提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

冷杉侧耳菌种由吉林农业大学食药菌教育部工程研究中心提供,在吉林农业大学菌菜基地进行栽培,成熟后采收子实体并烘干备用。

铁氰化钾、三氯化铁和苯酚,天津市鑫铂特化工有限公司;浓硫酸,北京化工厂;葡萄糖,国药集团化学试剂有限公司;抗坏血酸,西陇科学股份有限公司;1,1-二苯基-2-苦基肼自由基(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl free radical, DPPH),梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;水杨酸和硫酸亚铁,天津永大化学试剂有限公司;过氧化氢溶液,广东恒健制药有限公司;2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑林-6-磺硫(2,2'-azinobis-3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate, ABTS),福州飞净生物科技有限公司;过(二)硫酸钾,天津市科密欧化学试剂有限公司;三氯乙酸,天津永晟精细化工有限公司。

电子天平,梅特勒-托利多仪器上海有限公司;单列三孔恒温水浴锅,常州国宇仪器制造有限公司;中草药粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;微量高速离心机,艾本德公司;多功能酶标仪,伯腾仪器有限公司;旋转蒸发器,上海亚

荣生化仪器厂。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 粗多糖提取

称取 5 g 冷杉侧耳子实体粉碎物,热水浴浸提 2 次。将浸提液合并后浓缩,冷却后以 4 °C、6 000 r/min 离心 5 min 收集上清液,加入 4 倍体积的无水乙醇进行醇沉,低温环境下静置 24 h 以上后 4 °C、6 000 r/min 离心 5 min 并弃去上清液,所得沉淀即为冷杉侧耳粗多糖。将粗多糖烘干至恒重,记录其质量。

#### 1.2.2 多糖含量及提取率测定

绘制葡萄糖标准曲线:将葡萄糖(分析纯)烘干至恒重后,配制 0、10、20、30、40、50 和 60 µg/mL 不同浓度梯度的葡萄糖溶液(空白处理为蒸馏水),再分别加苯酚、浓硫酸,静置 20 min 后于 490 nm 下测定其吸光度值。采用苯酚-硫酸法测量糖含量<sup>[13]</sup>。得到所需的葡萄糖标准曲线为:  $y=0.008\ 01x+0.136\ 21$  ( $y$ : 吸光度值;  $x$ : 质量浓度),其中  $R^2=0.995\ 32$ 。

检测粗多糖样品中的纯多糖质量浓度:将待测液按浓度稀释后,再分别加苯酚、浓硫酸。静置 20 min 后于 490 nm 下测定其吸光度值,并代入到上述标准曲线中计算所对应的质量浓度,以此计算纯多糖质量。

冷杉侧耳纯多糖提取率( $Y$ )计算公式为:

$Y(\%) = \text{提取所得纯多糖质量} / \text{冷杉侧耳样品干重} \times 100$ 。

#### 1.2.3 冷杉侧耳多糖提取的单因素试验

固定单一变量后,依次探索提取时间、温度和液料比对多糖提取率的影响<sup>[14-15]</sup>。在 80 °C、液料比为 20:1 (mL:g,下同)的条件下,分别设置 90、120、150、180 和 210 min 这 5 个不同的时间梯度处理组;在 120 min、80 °C 的条件下,分别设置 20:1、30:1、40:1、50:1 和 60:1 这 5 个不同的液料比梯度处理组;在 120 min、液料比

为 30:1 的条件下, 分别设置 50、60、70、80 和 90 °C 这 5 个不同的温度梯度处理组。

#### 1.2.4 响应面分析法优化冷杉侧耳多糖的提取工艺条件

应用 Design Expert 8.06 软件, 根据上述单因素试验的筛选结果, 采用响应面分析法进行冷杉侧耳多糖提取工艺条件的优化<sup>[13,16]</sup>。如表 1 所示, 影响因素分别用 A、B 和 C 代表, 单因素水平以 -1、0 和 1 进行编码。

#### 1.2.5 抗氧化活性的测定

应用上述响应面分析法优化后的工艺条件提取冷杉侧耳多糖进行后续试验。将多糖用蒸馏水配制成质量浓度为 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0 mg/mL 的多糖溶液, 采用同样的方法配制 Vc 溶液作为阳性对照。各组试验操作重复 3 次取平均值。DPPH、ABTS 和羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )清除率的测定分别参考王珍珍等<sup>[17]</sup>、裴育等<sup>[18]</sup>、冯倩<sup>[19]</sup>的方法并略有改动。铁离子总还原能力的测定参考何源等<sup>[20]</sup>的方法并略有改动。计算公式为:

$$\text{自由基清除率}(\%) = [1 - (A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}) / A_{\text{空白}}] \times 100$$

式中:  $A_{\text{样品}}$  为样品吸光度值;  $A_{\text{对照}}$  为对照组吸光度值;  $A_{\text{空白}}$  为空白组吸光度值; DPPH、ABTS 和  $\cdot\text{OH}$  清除率分别于 517、734 和 510 nm 处测定吸光

度值。

$$\text{铁离子总还原力} = A_{\text{样品}} - A_{\text{本底}}$$

式中:  $A_{\text{样品}}$  为样品吸光度值;  $A_{\text{本底}}$  为用蒸馏水代替氯化铁溶液的本底吸光度值, 于 700 nm 处测定吸光度值。

## 2 结果与分析

### 2.1 单因素试验结果

由图 1A 可知, 提取时间低于 120 min 时, 多糖提取率逐渐升高, 120 min 时冷杉侧耳纯多糖提取率达到最大值, 为 1.69%, 提取时间超过 120 min 时, 纯多糖提取率随着时间的推移呈下降趋势, 所以根据提取时间的单因素试验结果选取 90、120 和 150 min 进行响应面分析。提取温度在低于 60 °C 时纯多糖提取率逐渐升高, 60 °C 时冷杉侧耳纯多糖提取率达到最大值, 为 1.46%, 温度超过 60 °C 时, 多糖提取率未达到

表 1 响应面试验因素水平表

Table 1 Factors and levels of response surface design

Factors	Code	Level		
		-1	0	1
Extraction temperature (°C)	A	55	60	65
Extraction time (min)	B	90	120	150
Liquid-solid ratio (mL:g)	C	25:1	30:1	35:1

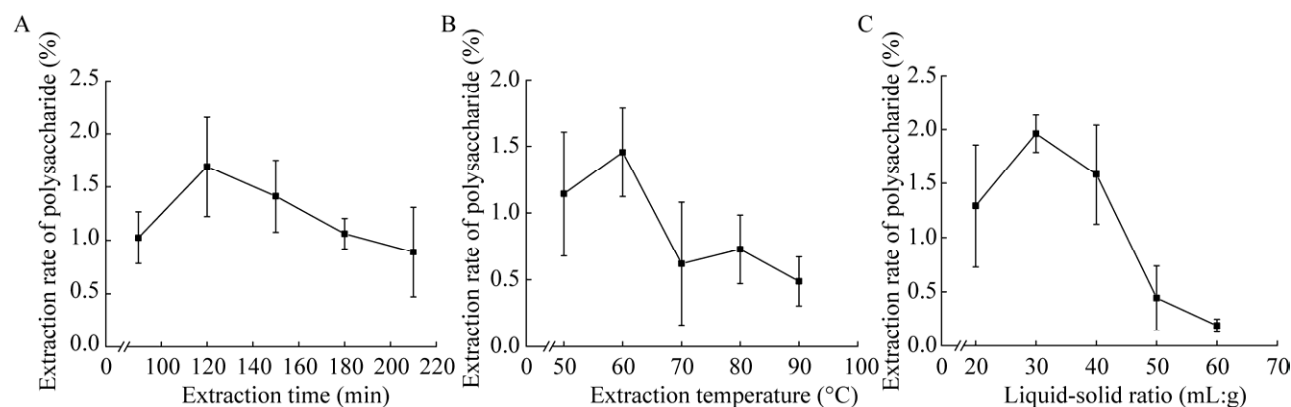


图 1 单因素对冷杉侧耳多糖提取率的影响 A: 提取时间. B: 提取温度. C: 液料比

Figure 1 Effects of single factor on extraction rate of polysaccharide from *Pleurotus abieticola*. A: Extraction time. B: Extraction temperature. C: Liquid-solid ratio.

之前大小, 所以根据温度单因素试验结果选取 55、60 和 65 °C 进行响应面分析(图 1B)。液料比低于 30:1 (mL:g) 时多糖的提取率逐渐升高, 在液料比达到 30:1 (mL:g) 时冷杉侧耳纯多糖提取率达到最大值, 为 1.96%, 之后逐渐下降, 所以根据液料比单因素试验结果选取 25:1、30:1 和

35:1 (mL:g) 进行响应面分析(图 1C)。

## 2.2 响应面分析法优化试验结果

根据单因素试验结果进行响应面优化试验, 并计算其多糖提取率, 结果见表 2。应用 Design Expert 8.06 软件对表 2 中的响应面试验结果进行回归拟合方差分析, 结果见表 3。

表 2 冷杉侧耳多糖的响应面试验设计及结果

Table 2 Response surface methodology design and results of *Pleurotus abieticola* polysaccharide

No.	A factor (Extraction temperature)	B factor (Extraction time)	C factor (Liquid-solid ratio)	Yield (%)
1	-1	-1	0	0.983 5
2	0	0	0	2.356 7
3	0	-1	1	2.210 5
4	-1	0	1	1.304 6
5	1	0	1	1.473 6
6	0	-1	-1	1.659 3
7	0	0	0	2.360 5
8	0	0	0	2.366 6
9	1	0	-1	1.497 9
10	0	1	-1	2.200 1
11	0	0	0	2.482 2
12	0	0	0	2.359 4
13	1	-1	0	1.409 6
14	-1	1	0	1.126 3
15	1	1	0	1.327 0
16	0	1	1	1.600 4
17	-1	0	-1	1.480 5

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance for quadratic regression model

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value	Significant
Model	4.100	9	0.46	77.70	<0.000 1	Significant
A	0.083	1	0.083	14.09	0.007 1	
B	$1.058 \times 10^{-5}$	1	$1.058 \times 10^{-5}$	$1.80 \times 10^{-3}$	0.967 3	
C	$7.736 \times 10^{-3}$	1	$7.736 \times 10^{-3}$	1.32	0.288 6	
AB	0.013	1	0.013	2.16	0.184 8	
AC	$5.751 \times 10^{-3}$	1	$5.751 \times 10^{-3}$	0.98	0.355 1	
BC	0.330	1	0.33	56.43	0.000 1	
A <sup>2</sup>	2.870	1	2.87	489.55	<0.000 1	
B <sup>2</sup>	0.510	1	0.51	86.68	<0.000 1	
C <sup>2</sup>	0.061	1	0.061	10.33	0.014 8	
Residual	0.041	7	$5.868 \times 10^{-3}$			
Lack of fit	0.029	3	$9.741 \times 10^{-3}$	3.29	0.140 1	Not significant
Pure error	0.012	4	$2.962 \times 10^{-3}$			
Cor total	4.140	16				

二次多项式的回归模型为： $Y=2.39+0.10A-1.15\times 10^{-3}B-0.031C-0.056AB+0.038AC-0.29BC-0.83A^2-0.35B^2-0.1C^2$

式中： $Y$ 为多糖提取率； $A$ 为提取温度； $B$ 为提取时间； $C$ 为液料比。

模型的数值  $P<0.0001$ ，模型项差异极显著；失拟项的  $P$  值为  $0.1401$ ，大于  $0.1$  不显著。对表中的数值进行比较，可得出  $A$ 、 $BC$ 、 $A^2$ 、 $B^2$  和  $C^2$  为显著模型，其中  $A$ 、 $BC$ 、 $A^2$  和  $B^2$  达到极显著水平， $P<0.01$ ； $C^2$  达到显著水平， $P<0.05$ 。回归方程线性相关系数  $R^2=0.9901$ ， $R^2_{adj}=0.9773$ ，

两者的值均大于  $0.9$  且相差不多，模型对本试验的拟合度是良好的，说明该回归方程可用于提取率的预测和分析。综上所述，三因素对冷杉侧耳多糖提取率的影响大小依次为：提取温度>液料比>提取时间。冷杉侧耳多糖的最佳提取工艺的条件为：提取温度为  $60.27^\circ\text{C}$ ，提取时间为  $122.62\text{ min}$ ，液料比为  $28.87:1\text{ (mL:g)}$ 。在该条件下，冷杉侧耳纯多糖提取率达到极大值  $2.39\%$ ，与实际验证值  $2.33\%$  相接近。

图 2-图 4 为 3 组影响因素的响应面曲面图和等高线图，通过观察三维响应面曲面图的坡度

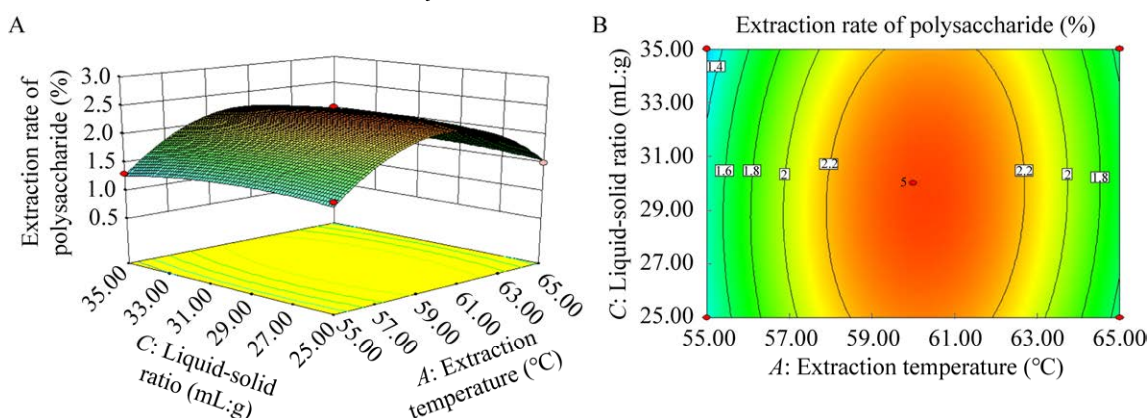


图 2 提取温度与液料比对冷杉侧耳多糖提取率影响的响应面曲面图和等高线图 A：响应面曲面图。B：等高线图

Figure 2 Response surface diagram and contour map showing the interaction of extraction temperature and liquid-solid ratio on *Pleurotus abieticola* polysaccharide extraction rate. A: Response surface diagram. B: Contour map.

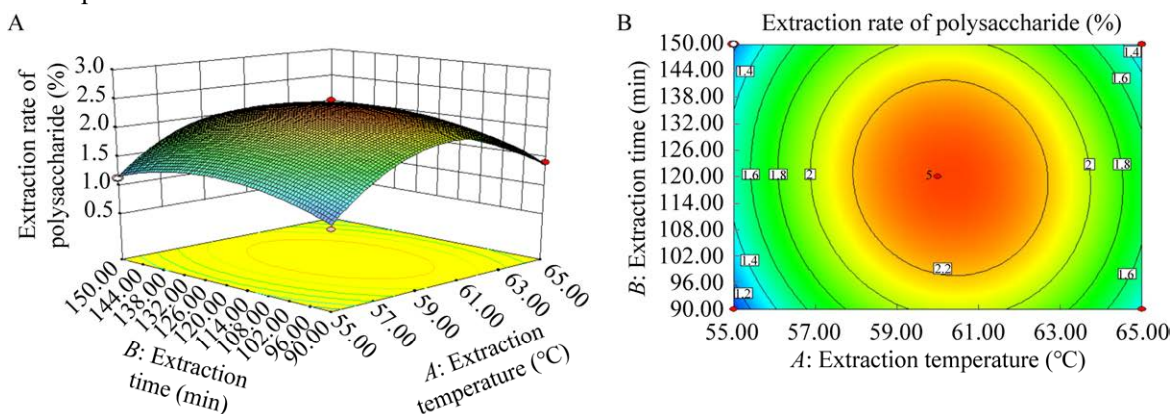


图 3 提取时间与提取温度对冷杉侧耳多糖提取率的影响的响应面曲面图和等高线图 A：响应面曲面图。B：等高线图

Figure 3 Response surface diagram and contour map showing the interaction of extraction time and temperature on *Pleurotus abieticola* polysaccharide extraction rate. A: Response surface diagram. B: Contour map.



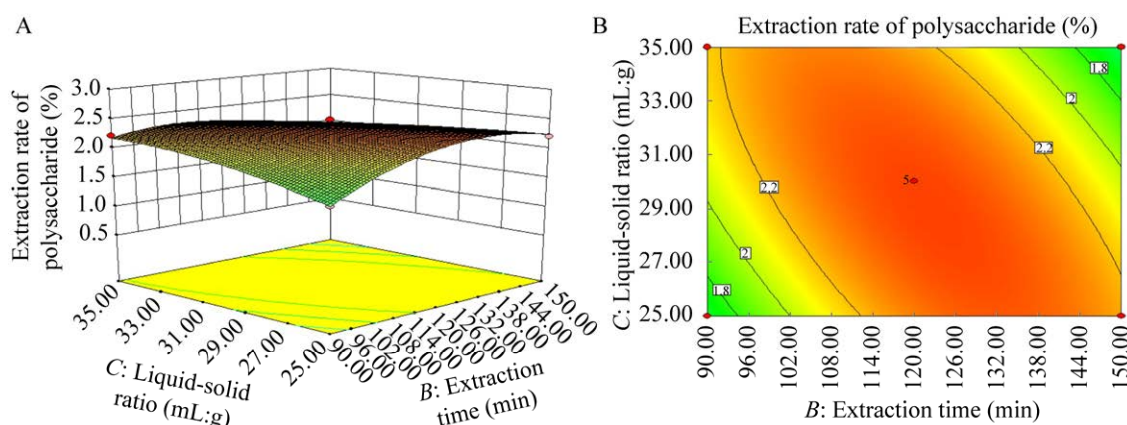


图4 提取时间与液料比对冷杉侧耳多糖提取率的影响的响应面曲面图和等高线图 A: 响应面曲面图。B: 等高线图

Figure 4 Response surface diagram and contour map showing the interaction of extraction time and liquid-solid ratio on *Pleurotus abieticola* polysaccharide extraction rate. A: Response surface diagram. B: Contour map.

和等高线图的形状,可确定提取温度与液料比、提取时间与提取温度、提取时间与液料比这3组影响因素对响应值的影响程度和交互作用强度<sup>[17]</sup>。通过比较曲面陡峭程度可知,提取时间与提取温度的交互作用对冷杉侧耳纯多糖提取率的影响最大(图3A)。三幅等高线图中图2B和图4B呈椭圆形,则所对应的这两组影响因素,即提取温度与液料比、提取时间与液料比之间的交互作用显著;而图3B的等高线图呈圆形,则提取时间与提取温度这组影响因素间的交互作用不显著。

### 2.3 抗氧化活性

采用上述最优提取条件提取冷杉侧耳多糖,对其体外抗氧化活性进行探究,分别评价了4种抗氧化活性指标。如图5所示,多糖与Vc浓度在0.1–1.0 mg/mL范围内变化时,对DPPH、ABTS和 $\cdot\text{OH}$ 清除作用及铁离子还原能力均呈上升趋势。随着浓度的增大,抗氧化能力逐渐增强,对照组Vc的抗氧化能力均高于多糖。在1 mg/mL时,对照组的自由基清除率均保持在90%以上,ABTS清除能力最高为

88.37%,Vc对照组为98.55%(图5A);DPPH清除能力达到49.42%,Vc对照组最高达96.81%,与处理组差异明显(图5B);羟基自由基清除能力为19.87%,对照组Vc最大值达到99.28%(图5C);铁离子总还原力为0.27,Vc对照组最大值达到3.23(图5D)。以上结果表明,冷杉侧耳多糖具有较强的抗氧化活性,尤其是对ABTS的清除能力最强,可能是一种潜在的抗氧化剂。

## 3 讨论与结论

为更好地获取并利用冷杉侧耳多糖这一新的资源,降低其在传统的热热水浸提过程中因温度过高或浸泡时间过长等原因所造成的损失率,本试验采用单因素试验结合响应面分析的方法<sup>[21–22]</sup>优化冷杉侧耳多糖的提取工艺。王金玺等<sup>[16]</sup>采用响应面法对平菇多糖的热热水浸提工艺进行优化,平菇多糖得率为3.25%。揣东华等<sup>[23]</sup>采用响应面法优化杏鲍菇多糖的工艺,杏鲍菇多糖得率为3.24%。钱磊等<sup>[24]</sup>采用响应面法优化平菇多糖的酶法提取工艺,多糖得率可达6.82%,比传

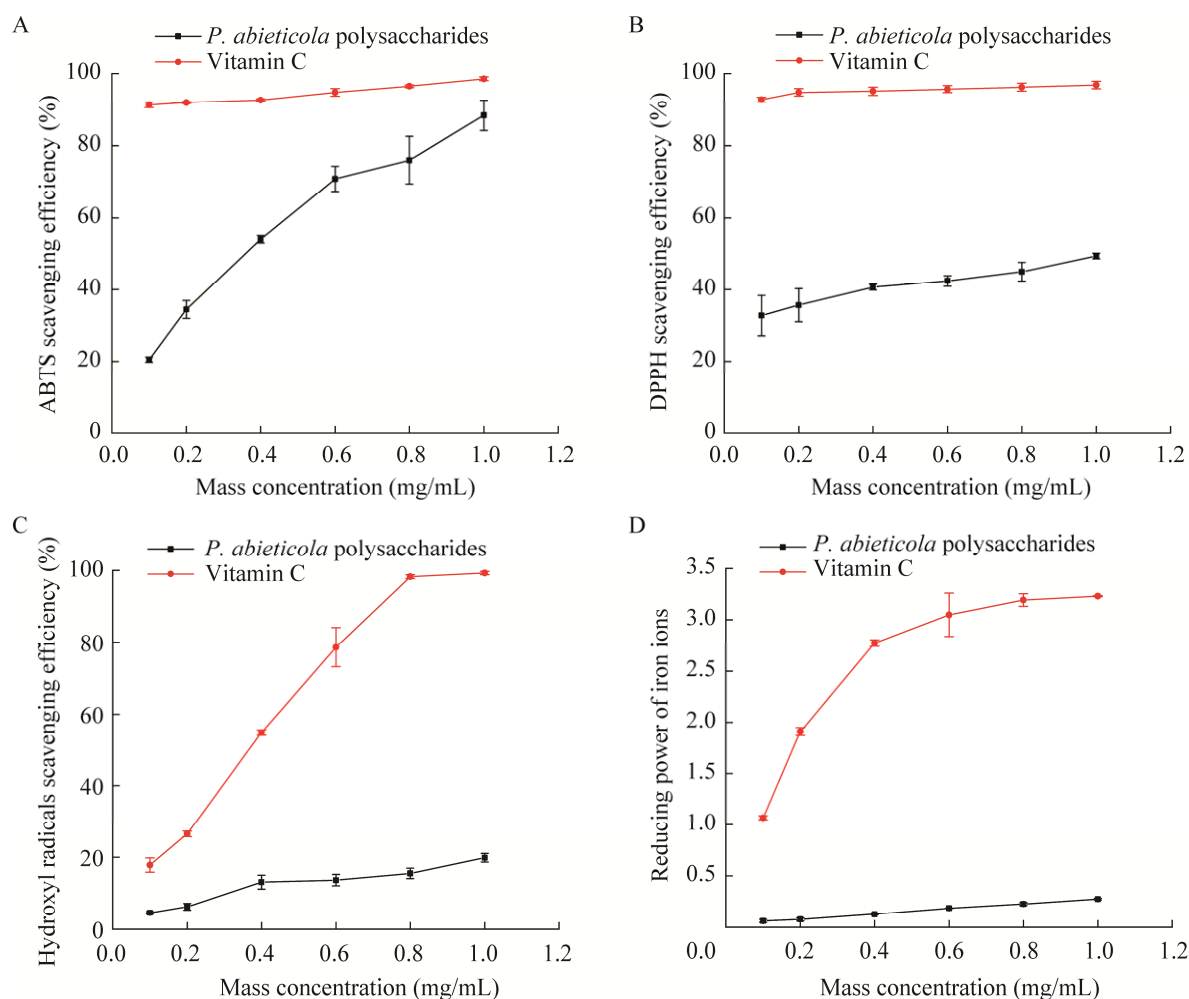


图5 冷杉侧耳多糖体外抗氧化活性 A: 冷杉侧耳多糖对 ABTS 清除作用. B: 冷杉侧耳多糖对 DPPH 清除作用. C: 冷杉侧耳多糖对羟基自由基清除作用. D: 冷杉侧耳多糖对铁离子还原能力

Figure 5 *In vitro* antioxidant activity of *Pleurotus abieticola* polysaccharides. A: Scavenging effects of *P. abieticola* polysaccharide on ABTS. B: Scavenging effects of *P. abieticola* polysaccharide on DPPH. C: Scavenging effects of *P. abieticola* polysaccharide on hydroxyl radicals. D: Reducing power of *P. abieticola* polysaccharide to iron ions.

统水提法提高 3.98%。杨勇等<sup>[25]</sup>采用复合酶法提取平菇多糖,优化后多糖提取率为 5.90%,纯度为 60.91%。因此酶解等方法可提高真菌水溶性多糖的提取,在后续对冷杉侧耳多糖的研究中可加入此方法,并与响应面分析法相结合,以获得更高的提取率。

大量研究表明,多糖是一种优良的天然抗氧化剂。食用菌的多糖可以通过清除自由基来保护

生物膜并减缓机体的衰老<sup>[26]</sup>,且许多野生和栽培食药菌的多糖具有抗氧化活性<sup>[27]</sup>。当杨树桑黄发酵液多糖浓度为 6 mg/mL 时,对 DPPH 的清除率达到 57%,表明杨树桑黄发酵液多糖具有作为抗氧化剂的潜力<sup>[28]</sup>。香菇和黑木耳多糖在 0.5–1.0 mg/mL 的浓度范围内对 DPPH 清除率分别从 55.64%上升到 62.96%、从 43.16%上升到 55.00%,且黑木耳多糖、香菇多糖对羟基自



由基都有一定的清除效果<sup>[29]</sup>。然而冷杉侧耳的抗氧化活性未知,遂根据最优提取条件提取冷杉侧耳多糖,评价其体外抗氧化活性。试验共进行4种指标的测定,发现冷杉侧耳多糖在浓度为1 mg/mL时,对于ABTS清除率高达88.37%,说明冷杉侧耳多糖是一种潜在的自由基清除剂,值得深入研究和开发利用<sup>[30-31]</sup>。除此之外,真菌多糖不仅具有提高人体的免疫力、抗病毒、抗辐射、抗炎、抗疲劳和延缓衰老等作用<sup>[32]</sup>,且在食品工业、医药界和动物养殖业等<sup>[33]</sup>具有很广阔的发展前景,对于冷杉侧耳这一新兴种质资源来说,其价值有待进一步挖掘。

## REFERENCES

- [1] 刘晓斌, 刘建伟, 杨祝良. 冷杉侧耳: 中国西南一种新的食用菌资源[J]. 菌物学报, 2015, 34(4): 581-588.  
LIU XB, LIU JW, YANG ZL. A new edible mushroom resource, *Pleurotus abieticola*, in southwestern China[J]. Mycosystema, 2015, 34(4): 581-588 (in Chinese).
- [2] 罗智榆, 牛鑫, 魏生龙, 于海萍, 张波, 李玉. 采自祁连山的冷杉侧耳生物学特性及栽培条件探索[J]. 菌物学报, 2020, 39(9): 1741-1749.  
LUO ZH, NIU X, WEI SL, YU HP, ZHANG B, LI Y. Biological characteristics and cultivation conditions of *Pleurotus abieticola* from Qilian Mountains, northwestern China[J]. Mycosystema, 2020, 39(9): 1741-1749 (in Chinese).
- [3] GUO X, SUN L, LI CT, FU YP, SONG B, LI Y. The yield and quality of *Pleurotus abieticola* grown on nematode-infected *Pinus massoniana* chips[J]. RSC Advances, 2021, 11(2): 883-890.
- [4] PAN MC, KONG FG, XING L, YAO L, LI Y, LIU Y, LI CT, LI LZ. The structural characterization and immunomodulatory activity of polysaccharides from *Pleurotus abieticola* fruiting bodies[J]. Nutrients, 2022, 14(20): 4410.
- [5] 李静, 图力古尔, 杨祝良. 侧耳属真菌的起源演化与物种识别研究进展[J]. 菌物研究, 2022, 20(4): 235-245.  
LI J, TU LGR, YANG ZL, YANG ZL. Review on the origin, evolution and species delimitation of *Pleurotus*[J]. Journal of Fungal Research, 2022, 20(4): 235-245 (in Chinese).
- [6] 崔成伟, 王翠翠, 龙瑞, 陈屏, 王琦. 平菇化学成分及药理活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(13): 304-309.  
CUI CW, WANG CC, LONG R, CHEN P, WANG Q. Research progress of chemical constituents and pharmacological activities of *Pleurotus ostreatus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(13): 304-309 (in Chinese).
- [7] LI MY, YU LL, ZHAI QX, LIU BS, ZHAO JX, ZHANG H, CHEN W, TIAN FW. *Ganoderma applanatum* polysaccharides and ethanol extracts promote the recovery of colitis through intestinal barrier protection and gut microbiota modulations[J]. Food & Function, 2022, 13(2): 688-701.
- [8] 王晶, 乔洁, 裴新云, 常世民, 刘学娟, 闫训友. 阿魏侧耳胞外多糖分离纯化及其免疫活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 127-134.  
WANG J, QIAO J, PEI XY, CHANG SM, LIU XJ, YAN XY. Purification and immunomodulation activity of exopolysaccharides from *Pleurotus ferulae* Lanzi[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18): 127-134 (in Chinese).
- [9] 贾乐, 张建军. 侧耳属食用菌多糖的研究进展[J]. 微生物学杂志, 2015, 35(4): 1-6.  
JIA L, ZHANG JJ. Research progress of edible fungi polysaccharides by *Pleurotus*[J]. Chinese Journal of Microbiology, 2015, 35(4): 1-6 (in Chinese).
- [10] 耿晓进, 李海清, 刘紫征. 食用菌多糖提取工艺研究进展[J]. 食用菌, 2019, 41(6): 1-5.  
GENG XJ, LI HQ, LIU ZZ. Research progress on extraction technology of polysaccharide from edible and medicinal fungi[J]. Edible Fungi, 2019, 41(6): 1-5 (in Chinese).
- [11] SUN YJ, HE HQ, WANG Q, YANG XY, JIANG SJ, WANG DB. A review of development and utilization for edible fungal polysaccharides: extraction, chemical characteristics, and bioactivities[J]. Polymers, 2022, 14(20): 4454.
- [12] 曾文俊, 吕彩梦, 丁建宝, 李艳萍, 马建龙, 杨锐, 杨晋. 体外抗氧化活性评价方法的反应机理研究进展[J]. 化学与生物工程, 2022, 39(12): 13-19.  
ZENG WJ, LYU CM, DING JB, LI YP, MA JL, YANG R, YANG J. Research progress in reaction mechanism of evaluation method for antioxidant activity *in vitro*[J]. Chemistry & Bioengineering, 2022, 39(12): 13-19 (in Chinese).
- [13] 赵慧, 张骥, 闫路娜. 响应面法优化杏鲍菇粗多糖提取工艺的研究[J]. 河北科技大学学报, 2017, 38(1): 80-86.

- ZHAO H, ZHANG J, YAN LN. Optimization of extraction process of crude polysaccharide from *Pleurotus eryngii* by response surface methodology[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2017, 38(1): 80-86 (in Chinese).
- [14] 胡瑞财, 汪忠华, 胡华斌, 蓝春宝. 林下栽培灵芝多糖的提取工艺优化[J]. 中国食用菌, 2021, 40(7): 47-51.
- HU RC, WANG ZH, HU HB, LAN CB. Optimization of extraction of polysaccharide from *Ganoderma lucidum* cultivated under forest[J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(7): 47-51 (in Chinese).
- [15] 王耀辉. 白灵菇多糖提取工艺优化及其抗氧化活性研究[D]. 太原: 山西大学硕士学位论文, 2017.
- WANG YH. Optimization of polysaccharide extraction process and antioxidant activity of *Pleurotus nebrodensis*[D]. Taiyuan: Master's Thesis of Shanxi University, 2017 (in Chinese).
- [16] 王金玺, 包振伟, 刘笑, 顾林. 响应曲面法优化平菇多糖提取工艺[J]. 中国酿造, 2013, 32(4): 108-112.
- WANG JX, BAO ZW, LIU X, GU L. Optimization of polysaccharides extraction process from *Pleurotus ostreatus* by response surface methodology[J]. China Brewing, 2013, 32(4): 108-112 (in Chinese).
- [17] 王珍珍, 官月, 刘洋, 刘淑艳. 六妹羊肚菌多糖的提取工艺优化及结构表征和抗氧化活性[J]. 菌物学报, 2019, 38(9): 1548-1558.
- WANG ZZ, GUAN Y, LIU Y, LIU SY. Extraction process optimization, structural characterization and antioxidant activities of polysaccharide from *Morchella sextelata*[J]. Mycosystema, 2019, 38(9): 1548-1558 (in Chinese).
- [18] 裴育, 杨胜涛, 冯瑞, 周春霞, 洪鹏志. 细毛石花菜多糖自由基清除能力和理化性质的研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 235-242.
- PEI Y, YANG ST, FENG R, ZHOU CX, HONG PZ. Research on the free radical scavenging ability and physicochemical properties of the polysaccharides in *Gelidium crinale*[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(4): 235-242 (in Chinese).
- [19] 冯倩. 阿克苏野生牛肝菌营养成分分析及多糖抗氧化活性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学硕士学位论文, 2022.
- FENG Q. Analysis of nutritional components of wild *Boletus* in Aksu and study on antioxidant activity of polysaccharides[D]. Urumqi: Master's Thesis of Xinjiang Agricultural University, 2022 (in Chinese).
- [20] 何源, 王露露, 张晶. 3种鹿源鹿茸多糖含量、红外谱图、抗氧化活性比较[J]. 中成药, 2022, 44(3): 1028-1031.
- HE Y, WANG LL, ZHANG J. Comparison of polysaccharide content, infrared spectrum and antioxidant activity of three deer antler species[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2022, 44(3): 1028-1031 (in Chinese).
- [21] 隋玉, 舒昉, 崔帅, 杨淑蕊, 刘洋, 王琦. 元蘑多糖提取工艺优化、结构特征和抗氧化活性[J]. 食用菌学报, 2021, 28(4): 48-56.
- SUI Y, SHU F, CUI S, YANG SR, LIU Y, WANG Q. Extraction process optimization, structural characteristics and antioxidant activities of polysaccharides from *Sarcomyxa edulis*[J]. Acta Edulis Fungi, 2021, 28(4): 48-56 (in Chinese).
- [22] 郝金斌, 傅明通, 王玲玲, 吴小平. 奶油栓孔菌菌丝体多糖的提取工艺优化、结构表征及抗氧化活性[J]. 菌物学报, 2021, 40(9): 2461-2479.
- HAO JB, FU MT, WANG LL, WU XP. Optimization of extraction technology, structure characterization and antioxidant activities of polysaccharides from mycelium of *Trametes lactinea*[J]. Mycosystema, 2021, 40(9): 2461-2479 (in Chinese).
- [23] 揣东华, 王洪杰, 张胜抗, 张平平. 响应面法优化杏鲍菇多糖提取工艺[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(7): 47-51.
- CHUAI DH, WANG HJ, ZHANG SK, ZHANG PP. Optimization of *Pleurotus eryngii* polysaccharide extraction process by response surface method[J]. Food Research and Development, 2018, 39(7): 47-51 (in Chinese).
- [24] 钱磊, 张春椿, 蒋剑平, 熊耀康. 响应面优化酶法提取平菇多糖工艺研究[J]. 中华中医药学刊, 2011, 29(3): 650-653.
- QIAN L, ZHANG CC, JIANG JP, XIONG YK. Optimization of enzymatic extraction of polysaccharides from *Pleurotus ostreatus* by response surface methodology[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2011, 29(3): 650-653 (in Chinese).
- [25] 杨勇, 首坤秀, 李立郎, 杨艳, 杨小生, 杨娟. 复合酶法提取平菇多糖工艺优化[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(1): 29-34, 67.
- YANG Y, SHOU KX, LI LL, YANG Y, YANG XS, YANG J. Optimization of extraction process of *Pleurotus ostreatus* polysaccharides by multi-enzyme method[J]. Journal of Mountain Agriculture and Biology, 2019, 38(1): 29-34, 67 (in Chinese).
- [26] 刘宇, 贾滋坤, 王天赐, 苏玲, 王琦. 破壁法提取平菇多糖的结构分析及其抗氧化活性[J]. 菌物研究, 2022,

- 20(2): 122-127.
- LIU Y, JIA ZK, WANG TC, SU L, WANG Q. Structural characterization and antioxidant activity of *Pleurotus ostreatus* polysaccharide extracted by wall-broken method[J]. Journal of Fungal Research, 2022, 20(2): 122-127 (in Chinese).
- [27] KOZARSKI M, KLAUS A, JAKOVLJEVIC D, TODOROVIC N, VUNDUK J, PETROVIĆ P, NIKSIC M, VRVIC MM, van GRIENSVEN L. Antioxidants of edible mushrooms[J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2015, 20(10): 19489-19525.
- [28] 陈嘉鹤. 桑黄在中国的潜在分布、液体发酵培养与多糖抗氧化研究[D]. 沈阳: 辽宁大学硕士学位论文, 2023.
- CHEN JH. Study on the potential distribution, liquid fermentation and antioxidant activity of polysaccharides of *Phellinus igniarius* in China[D]. Shenyang: Master's Thesis of Liaoning University, 2023 (in Chinese).
- [29] 杨岚, 邱树毅, 卢卫红. 真菌多糖的抗氧化活性研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(4): 95-99, 119.
- YANG L, QIU SY, LU WH. Study on the antioxidant activity of fungal polysaccharides[J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2017, 35(4): 95-99, 119 (in Chinese).
- [30] LIU Y, GUO QW, ZHANG SM, BAO YL, CHEN ML, GAO L, ZHANG Y, ZHOU HL. Polysaccharides from discarded stems of *Trollius chinensis* Bunge elicit promising potential in cosmetic industry: characterization, moisture retention and antioxidant activity[J]. Molecules, 2023, 28(7): 3114.
- [31] 郑紫云, 柴书彤, 陈婕, 杨虹, 白红娟, 杨官娥. 北桑寄生生产黄酮内生菌的分离鉴定及其抗氧化和抑菌活性评价[J]. 微生物学通报, 2022, 49(9): 3798-3812.
- ZHENG ZY, CHAI ST, CHEN J, YANG H, BAI HJ, YANG GE. Isolation and identification of flavonoid-producing endophytes with antioxidant and antibacterial activities from *Loranthus tanakae*[J]. Microbiology China, 2022, 49(9): 3798-3812 (in Chinese).
- [32] HU JX, GAO JY, ZHAO ZJ, YANG X, CHEN L. Extraction optimization of *Galla Turcica* polysaccharides and determination of its antioxidant activities *in vitro*[J]. Natural Product Communications, 2020, 15(3): 1934578X20911764.
- [33] 陈世通, 白建波, 李梦杰, 蒲敏, 张玉金, 李荣春. 食药菌多糖的药理作用及开发利用研究[J]. 北方园艺, 2012(17): 195-198.
- CHEN ST, BAI JB, LI MJ, PU M, ZHANG YJ, LI RC. Study on exploitation and pharmacological effect on edible and pharmaceutical fungus polysaccharides[J]. Northern Horticulture, 2012(17): 195-198 (in Chinese).