

# 不同提取方法对姬菇多糖抗氧化活性的影响

王美菊, 陆文娟, 喻晨, 陶明煊

(南京师范大学金陵女子学院, 江苏 南京 210097)

[摘要] 本研究采用传统水提法、超声波提取法、超声波辅助水提法、酸提法、碱提法、超声波辅助酸提法和超声波辅助碱提法 7 种方法提取姬菇多糖, 测定还原力、羟自由基( $\cdot\text{OH}$ )清除率、超氧阴离子自由基( $\text{O}_2\cdot$ )清除能力、DPPH 自由基清除力作为体外抗氧化作用的评价指标, 并与 Vc 对照。结果表明酸法提取多糖得率最高, 可达 6.58%。总体来看, 超声波辅助水提法所得姬菇多糖的抗氧化活性最好, 多糖浓度为  $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  时其还原力达到 2.18,  $\cdot\text{OH}$  清除率为 95.56%; 多糖浓度为  $1\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  时,  $\text{O}_2\cdot$  的清除率达到 62.35%; 多糖浓度为  $2\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$  时, 对 DPPH 自由基的清除率达到 80.32%。超声波辅助碱提法所得多糖的抗氧化活性也较好, 而超声波辅助酸提法所得多糖的抗氧化活性最差。由此可见, 采用超声波辅助水提法所得多糖有利于姬菇多糖生物活性方面的研究。

[关键词] 姬菇多糖, 提取率, 抗氧化活性, 自由基

[中图分类号] TS201.4 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2016)04-0065-06

## The Effect of Antioxidant Activity on the Polysaccharides from *Pleurotus cornucopiae* with Different Extraction Ways

Wang Meiju, Lu Wenjuan, Yu Chen, Tao Mingxuan

(College of Ginling, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** Seven different extraction methods of the polysaccharides from *pleurotus cornucopiae*, including traditional hot water extraction, ultrasonic extraction, ultrasonic wave complex hot water extraction, acid extraction, alkali extraction, ultrasonic wave complex acid extraction and ultrasonic wave complex alkali extraction. And antioxidant activity of the polysaccharides *in vitro* was investigated by using reducing power, hydroxyl radical scavenge activity, superoxide radical assay and DPPH $\cdot$  scavenge activity, using Vc as positive control. The results showed that the polysaccharides prepared by acid extraction had the highest extraction yield that reached 6.58%. In general, the polysaccharides by ultrasonic wave complex hot water extraction reached the highest reducing power ( $2.18$  at  $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ), hydroxyl radical scavenging ability was ( $95.56\%$  at  $10\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ), Superoxide anion radical scavenging activity was ( $62.35\%$  at  $1\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ), DPPH $\cdot$  scavenging ability was ( $80.32\%$  at  $2\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ ). The antioxidant activity of the polysaccharides prepared by ultrasonic wave complex alkali extraction was also strong, but the polysaccharides prepared by ultrasonic wave complex acid extraction was the worst. It is concluded that ultrasonic-assisted hot water extraction is an effective method for extracting polysaccharides from *pleurotus cornucopiae*, and it's more conducive to study the biological activity of polysaccharides.

**Key words:** polysaccharides from *Pleurotus cornucopiae*, extraction yield, antioxidant activity, free radicals

姬菇 (*Pleurotus cornucopiae*) 别名小平菇、黄白侧耳, 为侧耳属食用菌。姬菇口感嫩滑、细腻, 有类似牡蛎香味, 是民间常见的一种食用菌<sup>[1]</sup>。姬菇的抗逆性和适应能力都很强, 在我国山西、河北和四川等地均有生产。姬菇中富含多种营养成分, 具有高蛋白质、低脂肪的优点, 其中亦富含总酚、黄酮、多糖等生物活性物质<sup>[2-3]</sup>。目前已有大量研究证明, 姬菇水提物具有抗氧化、抗肿瘤、降血压、改善新陈代谢及免疫增强等作用<sup>[4]</sup>。姬菇多糖是从姬菇子实体中分离出的由 10 个以上单糖通过糖苷键连接而成的高分子聚合物, 其抗氧化活性高, 能有效清除自由基, 增强抗氧化酶的活力<sup>[5]</sup>, 是一种极具开发价值的生物活性物质。

食用菌子实体中的非水溶性多糖主要包括纤维素、半纤维素和木质素, 3 种成分可形成木素结合层, 纤维素也可形成束状结晶区域, 从而构成了子实体较为紧密的结构。食用菌多糖的提取往往采用热水浸

收稿日期: 2016-05-27.

基金项目: 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目 (KYLX16-1296).

通讯联系人: 陶明煊, 副教授, 研究方向: 生物活性物质与保健功能因子. E-mail: 45017@njnu.edu.cn

提法,由于没有细胞破壁过程,糖的提取率很低<sup>[6]</sup>. 目前有报道称可采用超声波结合酶法提取真菌多糖,该法条件温和、提取率高且易于除杂,但其成本较高,对反应条件的要求也较为苛刻<sup>[7]</sup>,而超声波处理及酸碱浸提可促进食用菌细胞基质及细胞壁吸水胀破,有利于胞内及胞间多糖的溶出,并克服了酶法作用条件苛刻、成本高的缺点. 本研究采用传统水提法、超声波提取法、超声波辅助水提法、碱提法、酸提法、超声波辅助酸提法和超声波辅助碱提法 7 种方法提取姬菇多糖,并比较了不同方法对多糖得率及抗氧化活性的影响,为姬菇多糖的活性研究和开发应用提供了理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

姬菇子实体干品购自四川省绵阳市平武山野百味土特产贸易有限责任公司;DPPH(2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl)购于 Sigma 公司;乙醇、磷酸、铁氰化钾、三氯乙酸、抗坏血酸(VC)、蒽酮、硫酸、葡萄糖、氯化硝基四氮唑蓝(NBT)、核黄素(RFV)、甲硫氨酸、水杨酸(DNS)等为国产分析纯或生化试剂.

### 1.2 仪器与设备

HH-σ 数显恒温水浴锅,金坛市富华仪器有限公司;中药粉碎机,天津市泰斯特仪器有限公司;RE-52A 旋转蒸发器,上海亚荣生化仪器厂;SHB-Ⅲ水循环真空泵,武汉常仪实业有限公司;GL-22M 高速冷冻离心机,湖南赛特湘仪离心机;Spectrumlab 54 紫外可见分光光度计,上海菱光仪器厂.

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 姬菇原料预处理

将姬菇子实体干品粉碎,过 60 目筛得姬菇子实体细粉,装于密封袋中,置于干燥器中备用.

#### 1.3.2 姬菇多糖的提取

##### 1.3.2.1 传统水提法

称取姬菇粉末,按 1:10( $m/V$ )比例加入蒸馏水,80 ℃水浴浸提 2 h,5 000 r/min 离心 10 min,收集上清液,滤渣进行二次提取. 两次提取所得上清液抽滤后合并,旋转蒸发使其体积浓缩至原体积的 1/4,加入 4 倍体积 95%乙醇沉淀多糖,4 ℃静置 12 h,5 000 r/min 离心 10 min,所得沉淀挥干乙醇,以水复溶,配制成姬菇多糖溶液 A.

##### 1.3.2.2 超声波法

称取姬菇粉末,按 1:10( $m/V$ )比例加入蒸馏水,250 W 超声波提取 20 min,5 000 r/min 离心 10 min,收集上清液,滤渣进行二次提取. 其余步骤同 1.3.2.1,所得样品以水复溶为姬菇多糖溶液 B.

##### 1.3.2.3 超声波辅助水提法

称取姬菇粉末,按 1:10( $m/V$ )比例加入蒸馏水,250 W 超声波提取 20 min,80 ℃水浴浸提 2 h,5 000 r/min 离心 10 min,收集上清液,滤渣进行二次提取. 其余步骤同 1.3.2.1,所得样品以水复溶为姬菇多糖溶液 C.

##### 1.3.2.4 碱提法

称取姬菇粉末,按 1:10( $m/V$ )比例加入 pH=10.0 的氢氧化钠溶液,80 ℃水浴浸提 2 h,5 000 r/min 离心 10 min,收集上清液,所得滤液用 1 mol/L 的 HCl 调 pH 至中性,滤渣进行二次提取,同条件离心取上清,调节 pH 至中性,抽滤后合并滤液. 其余步骤同 1.3.2.1,所得样品以水复溶为姬菇多糖溶液 D.

##### 1.3.2.5 酸提法

称取姬菇粉末,按 1:10( $m/V$ )比例加入 pH=2.0 的柠檬酸溶液,80 ℃水浴浸提 2 h,5 000 r/min 离心 10 min,收集上清液,所得滤液用 1 mol/L 的 NaOH 调 pH 至中性,滤渣进行二次提取,同条件离心取上清,调节 pH 至中性,抽滤后合并滤液. 其余步骤同 1.3.2.1,所得样品以水复溶为姬菇多糖溶液 E.

##### 1.3.2.6 超声波辅助碱提法

称取姬菇粉末,按 1:10( $m/V$ )比例加入 pH=10.0 的氢氧化钠溶液,250 W 超声波提取 20 min,80 ℃水浴浸提 2 h,其余步骤同 1.3.2.4,所得样品以水复溶为姬菇多糖溶液 F.

##### 1.3.2.7 超声波辅助酸提法

称取姬菇粉末,按 1:10( $m/V$ )比例加入 pH=2.0 的氢氧化钠溶液,250 W 超声波提取 20 min,80 ℃水

浴浸提 2 h,其余步骤同 1.3.2.5,所得样品以水复溶为姬菇多糖溶液 G.

### 1.3.3 姬菇多糖含量测定

采用蒽酮-硫酸法<sup>[8]</sup>测定姬菇多糖含量,以葡萄糖为标准品绘制标准曲线.

### 1.3.4 姬菇多糖得率的计算

多糖得率(%) = 粗多糖质量/姬菇粉末质量×100%.

### 1.3.5 姬菇多糖抗氧化活性的测定

#### 1.3.5.1 还原力的测定

采用铁氰化钾还原法<sup>[9]</sup>,并作适当修改.对姬菇多糖样品和 Vc 梯度稀释,取 2 mL 姬菇多糖样品稀释液,加入 2 mL 磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L, pH 6.6)和 2 mL 1%的铁氰化钾溶液,混合震荡,50 ℃ 恒温水浴 20 min 后加入 2 mL 10% TCA 溶液,3 000 r/min 离心分离 10 min,取 2 mL 上清液,加入 2 mL 蒸馏水和 0.4 mL 0.1% FeCl<sub>3</sub> 溶液,混合均匀后静置反应 10 min,测定其 700 nm 波长处的吸光值,同样方法测定 Vc 还原力,以样品和 Vc 浓度为横坐标,OD 值为纵坐标绘制曲线.

#### 1.3.5.2 羟自由基(·OH)清除率的测定

参照 Smirnoff 水杨酸法<sup>[10]</sup>,略有改动.取 1 mL 不同浓度多糖溶液,加入 1 mL 9 mmol/L FeSO<sub>4</sub> 和 1 mL 9 mmol/L 水杨酸-乙酸,最后加入 1 mL 8.8 mmol/L 的 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 启动反应,混合均匀后置于 37 ℃ 反应 30 min,8 000 r/min 离心 6 min,测定其 510 nm 处的吸光值,记为 A<sub>x</sub>,做 3 组平行,以去离子水作参比.用 1 mL 去离子水代替多糖样品,重复以上步骤,测得吸光度为 A<sub>o</sub>.以去离子水代替 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液,其余步骤同上,测定吸光度为 A<sub>so</sub>.

·OH 清除率计算公式:·OH 清除率(%) =  $[A_o - (A_x - A_{so})] / A_o \times 100\%$ .

#### 1.3.5.3 超氧阴离子自由基(O<sub>2</sub><sup>-</sup>·)清除率的测定

按照改进的 NBT 法<sup>[11]</sup>进行测定.取 0.05 mL 不同浓度多糖溶液,加入 0.2 mL 2.5×10<sup>-3</sup> mol/L NBT 溶液、0.1 mL 1.5×10<sup>-5</sup> mol/L 核黄素溶液、0.1 mL 5×10<sup>-2</sup> mol/L 甲硫氨酸溶液和 4.5 mL 磷酸盐缓冲液(50 mmol/L, pH 7.8),各组反应液等距离放置于日光灯下光照,20 min 后测定其 560 nm 处的吸光值.以磷酸盐缓冲液(50 mmol/L, pH 7.8)代替多糖样品作为空白管.以磷酸盐缓冲液代替多糖的避光试验组作校正.

O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率计算公式:O<sub>2</sub><sup>-</sup>·清除率(%) = (A 空白 - A 样品) / A 空白 × 100%.

#### 1.3.5.4 DPPH 自由基清除能力的测定

按照 Kargozler 等<sup>[12]</sup>的方法进行测定,略有改动.取 2 mL 不同浓度多糖溶液,加入 2 mL 的 DPPH 溶液,混合均匀后在 30 ℃ 避光水浴 30 min,测定其 517 nm 处的吸光值,记为 A 样品.以 2 mL 无水乙醇代替多糖溶液,测定吸光度为 A 对照.以 2 mL 无水乙醇代替 DPPH 溶液,测得吸光度为 A 空白.

DPPH 自由基清除率计算公式:DPPH 清除率(%) = 1 - (A 样品 - A 空白) / A 对照.

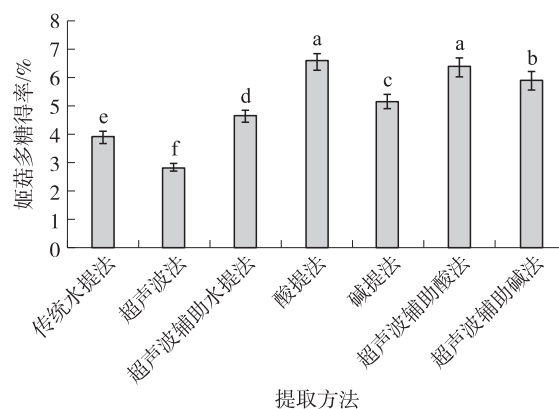
## 2 结果

### 2.1 不同方法提取姬菇多糖得率

由图 1 可知,酸提法及超声波辅助酸提法的多糖得率可分别达到 6.58% 和 6.37%,显著高于其他 5 种方法( $P < 0.05$ ),而超声波辅助碱提法、碱提法及超声波辅助水提法的多糖得率分别达到 5.91%、5.17% 和 4.67%,均较传统水提法、超声波法有显著性提高( $P < 0.05$ ).传统水提法的多糖得率只有 3.90%,超声波法则仅达到 2.84%.由以上结果可知,7 种方法中酸提法多糖得率最高,超声波法得率最低.

### 2.2 姬菇多糖还原力

由图 2 可得,7 种样品的还原力均随多糖浓度的升高而逐渐提高,呈现一定的剂量-效应关系.Vc 的还



(a~f) 代表差异显著性( $P < 0.05$ )

图 1 不同提取方法所得姬菇多糖的得率

Fig. 1 The extraction yield of polysaccharides from *Pleurotus cornucopiae* by different extraction methods

原力显著高于同等浓度的姬菇多糖样品,1 mg·mL<sup>-1</sup>时 OD 值就达到了 2.20. 7 种方法中超声波辅助水提法所得多糖的还原力最高,当多糖浓度为 10 mg·mL<sup>-1</sup>时,其还原力达到 2.18. 此外,传统水提法、超声波法及超声波辅助碱提法所得多糖的还原力亦处于较高水平,而酸提法、碱提法所得多糖的还原力水平有所降低,超声波辅助酸提法所得多糖的还原力在 7 种方法中最低.

2.3 姬菇多糖羟自由基(·OH)清除率

由图 3 可知,7 种多糖样品的·OH 清除率均随着多糖浓度的升高而提高,呈现剂量依赖性. 当多糖浓度达到 10 mg·mL<sup>-1</sup>时,超声波辅助水提法和碱提法所得多糖的·OH 清除能力分别为 95.56%和 96.41%,显著高于传统水提法,这与 Wu 等<sup>[13]</sup>的研究结论一致,其用碱法提取菌核侧耳多糖的·OH 清除率为水提多糖的 1.2 倍. 超声波法、超声波辅助碱提法所得多糖的·OH 清除率则在其中方法中处于中间水平. 酸提法及超声波辅助酸法所得多糖的·OH 清除能力较差,样品浓度为 10 mg·mL<sup>-1</sup>时的清除率分别为 89.26%和 85.32%.

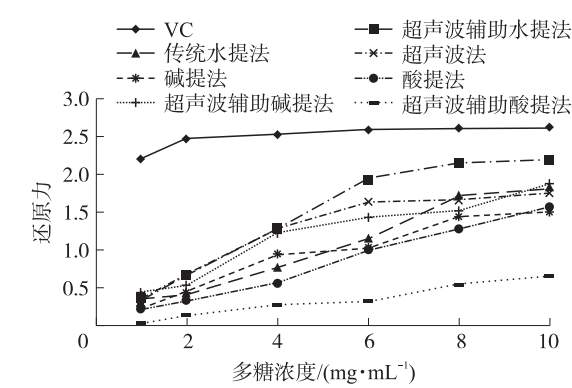


图 2 不同提取方法所得姬菇多糖的还原力  
Fig. 2 The reducing power of polysaccharides from *Pleurotus cornucopiae* by different methods

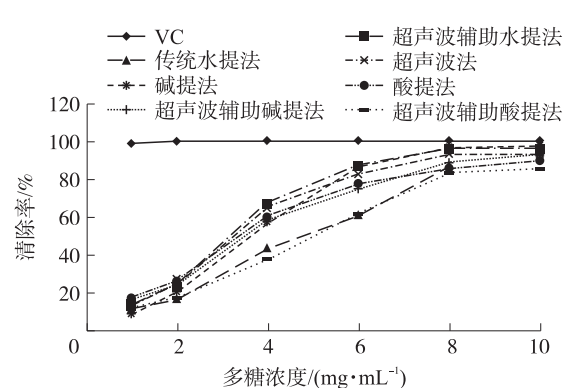


图 3 不同提取方法所得姬菇多糖的·OH 清除能力  
Fig. 3 Hydroxyl radical scavenging activity of polysaccharides from *Pleurotus cornucopiae* by different methods

2.4 姬菇多糖超氧阴离子自由基(O<sub>2</sub><sup>-·</sup>)清除率

由图 4 可知,7 种多糖对 O<sub>2</sub><sup>-·</sup> 的清除率均随着多糖浓度的升高而提高,存在一定的剂量-效应关系. 多糖浓度为 10 mg·mL<sup>-1</sup>时,超声波辅助水提多糖的 O<sub>2</sub><sup>-·</sup> 能力最佳,达到 62.35%,其次为超声波辅助碱提法,为 54.32%. 传统水提法与超声波法所得多糖的 O<sub>2</sub><sup>-·</sup> 清除能力相近,处于较低水平. 超声波法酸提法及超声波辅助酸提法所得多糖样品的 O<sub>2</sub><sup>-·</sup> 清除能力均较差,且超声波辅助酸提多糖的 O<sub>2</sub><sup>-·</sup> 清除能力明显低于酸提多糖.

2.5 姬菇多糖 DPPH 自由基清除能力

由图 5 可知,7 种多糖样品对 DPPH 自由基的清除能力均随着多糖浓度的增加而提高,呈现一定的剂量-效应关系. 当姬菇多糖浓度为 2 mg·mL<sup>-1</sup>时,超声波辅助水提多糖对 DPPH 自由基的清除率最高,达到 80.32%,超声波辅助碱提多糖次之,为 72.37%. 酸提法、超声波辅助酸提法所得多糖对 DPPH 自由基的清除能力明显低于超声波辅助水提法.

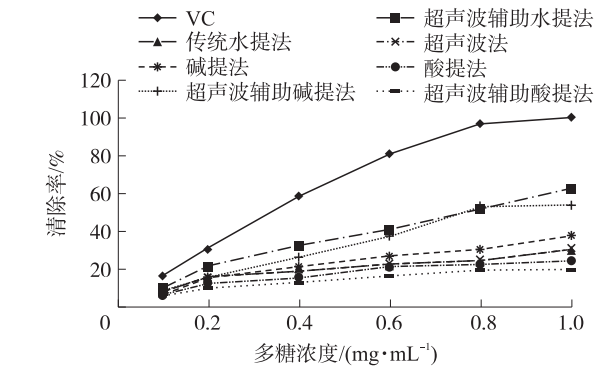


图 4 不同提取方法所得姬菇多糖的 O<sub>2</sub><sup>-·</sup> 清除能力  
Fig. 4 Superoxide anion radical scavenging activity of polysaccharides from *Pleurotus cornucopiae* by different methods

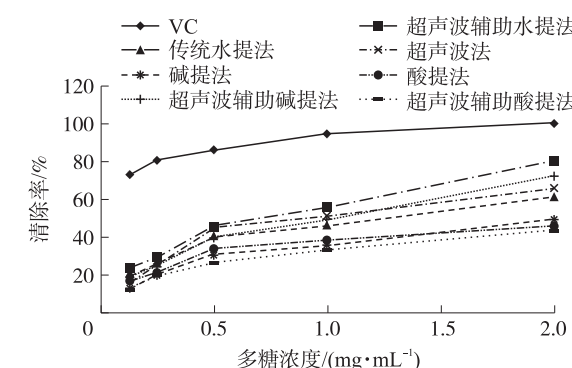


图 5 不同提取方法所得姬菇多糖的 DPPH 自由基清除能力  
Fig. 5 DPPH radical scavenging activity of polysaccharides from *Pleurotus cornucopiae* by different methods

### 3 讨论

自由基是指化合物分子在光、热等条件下,共价键发生不均匀裂解而形成的含有孤对电子的原子或基团。研究表明,自由基的产生与机体衰老有着十分密切的关系,因此常将自由基清除率作为生物活性物质体外抗氧化能力的评价指标。 $\cdot\text{OH}$  是对生物体毒性最强、危害最大的一种活性氧自由基,能轻易穿透细胞膜,使组织中的核酸、蛋白质、脂质等生物分子遭受氧化损伤,进一步可导致细胞坏死或突变<sup>[14]</sup>;  $\text{O}_2\cdot$  是生命体有氧代谢过程中产生的一种自由基,能直接或间接地破坏生物大分子,是许多疾病和生物体衰老的重要原因,其在体内最早形成,其他自由基都是由其转化而来,因此阻止  $\text{O}_2\cdot$  的产生,能有效控制其他活性氧的生成<sup>[15-16]</sup>;  $\text{DPPH}\cdot$  是一种很稳定的自由基,在 517 nm 附近有吸收峰,抗氧化剂可与其上的孤对电子配对,导致光吸收减弱或消失,可通过光吸收减弱程度来判断抗氧化剂的抗氧化能力<sup>[17]</sup>,常作为体外抗氧化能力的评价指标;此外,还原力也是反映生物活性物质总抗氧化能力的重要指标,抗氧化剂能通过自身的还原作用,给出电子而将自由基清除,其还原力越强,抗氧化活性越高。

本研究采用传统水提法、超声波法、超声波辅助水提法、碱提法、酸提法、超声波辅助酸提法和超声波辅助碱提法 7 种方法提取姬菇多糖,并对不同方法提取多糖的得率、还原力、羟自由基( $\cdot\text{OH}$ )、超氧阴离子自由基( $\text{O}_2\cdot$ )及  $\text{DPPH}\cdot$  清除率进行测定。结果表明,不同方法提取多糖的得率及抗氧化能力存在显著差异。酸提法利用柠檬酸提取多糖,能显著提高多糖得率,但所得多糖的还原力较低,且对  $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2\cdot$ 、 $\text{DPPH}\cdot$  的清除效果明显低于超声波辅助水提法和超声波辅助碱提法。究其原因可能是弱酸性条件处理姬菇子实体粉末有利于植物细胞壁的溶胀和破裂,从而提高了胞间和胞内多糖的溶出率,最终提高了多糖得率。但是酸处理亦可造成多糖中糖苷键的水解,对多糖结构造成破坏,降低了多糖的分子量,而多糖的抗氧化活性与其主链结构、硫酸基含量及分子量关系密切,最终导致酸提多糖表现出较差的抗氧化活性<sup>[18-19]</sup>。超声波辅助酸提法的各项抗氧化指标在 7 种提取方法中均为最差,可能是超声波与酸共同作用,很大程度地破坏了多糖结构,这种破坏作用较单纯的酸处理高,而不利于多糖抗氧化作用的发挥。7 种方法中,超声波辅助水提法所得多糖的还原力、 $\text{O}_2\cdot$  及  $\text{DPPH}\cdot$  清除率均最高,其  $\cdot\text{OH}$  清除率虽略低于超声波辅助碱提法,但仍处于较高水平,说明超声波辅助热水浸提有利于多糖抗氧化活性的发挥,这可能与其恰到好处地破坏了糖苷键有关。超声波辅助碱提法对  $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{O}_2\cdot$ 、 $\text{DPPH}\cdot$  的清除率略低于超声波辅助水提法,这可能是碱处理轻微地破坏了多糖的结构,这与碱的浓度、提取时间等条件关系密切。综上所述,超声波辅助水提法提取姬菇多糖更有助于多糖生物活性的研究,对其开发利用具有重要意义。

### [参考文献]

- [1] 郭勇,周洁,谭伟,等. 我国姬菇研究现状[J]. 中国食用菌,2009,28(6):12-13,44.
- [2] BELUHAN S,RANOJAJEC A. Composition and non-volatile components of croatian wild edible mushrooms[J]. Food chemistry,2011,124(3):1 076-1 082.
- [3] 杨凤琴. 姬菇富铬液体培养条件优化及部分理化性质研究[D]. 泰安:山东农业大学,2008.
- [4] TONG H B,XIA F G,FENG K,et al. Stuctural characterization and in vitro antitumor activity of a novel polysaccharide isolated from the fruiting bodies of *Pleurotus ostreatus*[J]. Bioresource technology,2009,100:1 682-1 686.
- [5] 周斌. 姬菇多糖纯化及其对小鼠急性肝损伤保护作用研究[D]. 南京:南京师范大学,2014.
- [6] 叶忠春,梁智. 食用菌多糖综述[J]. 轻工科技,2012(10):16-18.
- [7] 孙靖轩,王延锋,王金贺,等. 食用菌多糖提取技术研究概况[J]. 中国食用菌,2012,31(3):6-9.
- [8] 郭晓蕾,朱思潮,翟旭峰,等. 硫酸蒽酮法与硫酸苯酚法测定灵芝多糖含量比较[J]. 中华中医药学刊,2010,28(9):2 000-2 002.
- [9] 黄俊丽,张慙. 松茸、黑牛肝菌、双胞白蘑菇提取物体外抗氧化试验的研究[J]. 食品与生物技术学报,2011,30(3):342-347.
- [10] SMIRONFF N,CUMBES Q J. Hydroxyl radical scavenging activity of compatible solutes[J]. Phytochemistry,1989,28(4):1 057-1 060.
- [11] 徐静娟,邬敏辰,许钢. 茶树菇提取物抗氧化性的研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(30):9 683-9 684.

- [12] KARAGÖZLER A A, ERDAGB, EMEK Y C, et al. Antioxidant activity and proline content of leaf extracts from *dorystoechas hastata* [J]. Food chemistry, 2008, 111(2): 400–407.
- [13] WU G H, HU T, LI Z V, et al. *In vitro* antioxidant activities of the polysaccharides from *Pleurotus tuber-regium* (Fr.) sing [J]. Food chemistry, 2014, 148(4): 351–356.
- [14] WANG J G, WANG Y T, LIU X B, et al. Free radical scavenging and immunomodulatory activities of *Ganoderma lucidum* polysaccharides derivatives [J]. Carbohydrate polymers, 2013, 91(1): 33–38.
- [15] BARAHONA T, EMCINAS M V, MANSILA A, et al. A sulfated galactan with antioxidant capacity from the green variant of tetrasporic *Gigartina skottsbergii* (gigartinales, rhodophyta) [J]. Carbohydrate research, 2012, 347(1): 114–120.
- [16] 张静丽, 王宏勋, 张雯, 等. 灵芝、枸杞多糖复合抗氧化作用 [J]. 食品与机械, 2004, 20(6): 11–12.
- [17] 刘杨, 王诗卉, 刘云. 3 种方法提取的雨声红藻多糖的理化性质及抗氧化活性比较 [J]. 食品科学, 2015, 36(6): 161–168.
- [18] YOU R X, WANG K P, LIU J Y, et al. A comparison study between different molecular weight polysaccharides derived from *Lentinus edodes* and their antioxidant activities *in vivo* [J]. Pharmaceutical biology, 2011, 49(12): 1 298–1 305.
- [19] VISHCHUK O S, ERMAKOVA S P, ZVYAGINTSEVA T N. Sulfated polysaccharides from brown seaweeds *Saccharina japonica* and *Undaria pinnatifida*: isolation, structural characteristics, and antitumor activity [J]. Carbohydrate research, 2011, 346(17): 2 769–2 776.

[责任编辑:黄 敏]