DOI:10.12441/spyswjs.20221214002 [文章编号] 1673-1689(2024)12-0101-09

柴达木大肥菇多糖的体内外抗氧化活性研究

余 梅[1] 焦迎春[2*]

(1. 青海普兰特药业有限公司，青海 西宁 810007；2. 青海大学农牧学院，青海 西宁 810016)

摘要：【目的】探讨柴达木大肥菇(*Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc.)的子实体多糖(polysaccharides from sporocarp，PS)、胞内多糖(intercellular polysaccharides，IPS)及胞外多糖(exopolysaccharides，EPS)的体内外抗氧化活性。**【方法】**分别采用体外抗氧化体系、体内抗氧化(小鼠缺氧氧化损伤)模型，测定5种体外抗氧化指标及4种体内抗氧化指标。**【结果】**IPS、EPS及PS对DPPH、ABTS、羟基自由基以及超氧阴离子自由基均具有清除能力且差异显著(P<0.05)，其中IPS的效果最好；IPS、EPS、PS均能降低缺氧氧化损伤小鼠血液中丙二醛(monochrome display adapter，MDA)浓度，提高过氧化氢酶(catalase，CAT)、超氧化物歧化酶(superoxide dismutase，SOD)及谷胱甘肽过氧化物酶(glutathione peroxidase，GSH-Px)的活性且差异显著(P<0.05)；与空白组比较，IPS使MDA浓度降低了73.00%、CAT活性提高了28.93%，而PS使SOD和GSH-Px活性分别提高了25.08%、72.14%。**【结论】**3种柴达木大肥菇多糖均具有较强的体内、外抗氧化活性，其中IPS抗氧化活性最高，作为天然抗氧化剂具有较高的研究价值。

关键词：柴达木大肥菇；多糖；抗氧化活性

Study on *in Vivo* and *in Vitro* Antioxidant Activity of Polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc.

YU Mei[1] *JIAO Yingchun*[2*]

(1. Qinghai Plateau Pharmaceutial Co., Ltd., Xining 810007, China; 2. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to investigate the *in vivo* and *in vitro* antioxidant activities of *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc. polysaccharides, including polysaccharides from sporocarp (PS), intracellular polysaccharides (IPS), and exopolysaccharides (EPS). [**Method**] Five *in vitro* antioxidant indexes and four *in vivo* antioxidant indexes were determined using an *in vitro* antioxidant system and an *in vivo* antioxidant (mice injured by hypoxia oxidation) model. [**Result**] The results showed that IPS, EPS, and PS all had scavenging abilities against DPPH radical, ABTS radical, hydroxyl radical, and superoxide anion radical but at significantly different levels (P<0.05), and the effect of IPS was the best. IPS, EPS, and PS could decrease the concentration of malondialdehyde (MDA) and increase the activities of catalase (CAT), superoxide dismutase (SOD), and glutathione peroxidase (GSH-Px) in the blood of mice injured by hypoxia oxidation, and the levels changed by the three kinds of polysaccharides were significantly different (P<0.05). Compared with the blank group, IPS could decrease the concentration of MDA by 73.00% and increase the activity of CAT by 28.93%. The activities of SOD and GSH-Px were increased by 25.08% and 72.14%, respectively by PS. [**Conclusion**] All the three kinds of polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc. have strong antioxidant activity *in vivo* and *in vitro*, with IPS having the highest antioxidant activity, which has high research value as a natural antioxidant.

基金项目：国家自然基金地区项目(31960471)。

通信作者：焦迎春(1973—)，女，硕士，教授，硕士研究生导师，主要从事食药真菌工程研究。E-mail:280717062@qq.com

收稿日期：2022-12-14 **修回日期：**2023-02-13

Keywords: *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc.; polysaccharides; antioxidant activity

柴达木大肥菇学名双层环伞菌，主要分布在青海柴达木盆地的戈壁草滩土层下 50~70 cm[1]，富含多糖、酚酸等多种活性物质[2]。柴达木大肥菇的多糖按照来源分为子实体多糖、菌丝体多糖、发酵液多糖。研究表明，真菌多糖是菌体次级代谢产物中的主要活性成分之一，具有延缓细胞衰老，控制细胞分裂、分化和抗氧化等作用，广泛存在于各种真菌中[3]。李盼等[4]发现生长于地下的块菌多糖具有较优的抗氧化活性，因而推测柴达木大肥菇多糖也应具有类似的抗氧化活性。目前，针对柴达木大肥菇多糖的研究主要集中在提取工艺优化、抗缺氧活性[5]及抗疲劳作用[6]等方面，而有关柴达木大肥菇中不同来源多糖的抗氧化活性却鲜有报道。

根据自由基理论，多糖的功能活性与维持机体损伤阈值平衡态的抗氧化作用密切相关[7]。如双孢蘑菇多糖[8]、巴西蘑菇多糖[9]、灵芝多糖[10]和灰树花多糖[11]具有的较强免疫调节功效，都与其高抗氧化活性相关。由于合成的抗氧化剂可能对人体有一定的毒害作用[12]，因此开发无副作用的天然抗氧化剂是一项亟待解决的问题。作者通过构建体外抗氧化体系（自由基清除能力及还原力）、体内抗氧化体系（MDA 浓度和 CAT、SOD、GSH-Px 活性），综合分析了柴达木大肥菇中 EPS、IPS 及 PS 的抗氧化活性，为柴达木大肥菇作为天然抗氧化剂和防腐剂应用到功能食品中提供依据，也为青藏高原特色资源的开发提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

SPF 级昆明种小鼠 50 只（体质量 18~22 g，8 周龄）：中国农业科学院兰州兽医研究所，批准号为 SCXK（甘）2015-0001；柴达木大肥菇菌种：青海大学食品科学与工程试验室保藏；柴达木大肥菇子实体：青海都兰县宗加镇；无水乙醇、苯酚、硫酸、无水葡萄糖标准品、没食子酸、VC：湖北永阔科技有限公司；红景天苷（质量分数>99%）：中国食品药品检定研究院生物制品检定所。

1.2 仪器与设备

分析天平：DSH-50-5 型，上海越平科学仪器有限公司；超声波清洗机：SB-3200TDT 型，宁波新芝生物科技股份有限公司；旋转蒸发仪：RE-52AA 型，上海亚荣生化仪器厂；循环水真空泵：SHZ-III 型，上海亚荣生化仪器厂。

1.3 试验方法

1.3.1 多糖的提取

参考文献[13]中的超声辅助水提法提取 IPS 及 PS。以柴达木大肥菇子实体为原料，将柴达木大肥菇菌丝体用蒸馏水冲洗 3 次，烘干，研碎，称质量备用。将上述原料与蒸馏水按料液比 1 g∶20 mL 混合，在超声功率 126 W、温度 70 ℃条件下超声提取 60 min，抽滤，滤液采用活性炭脱色。采用 DEAE-52 纤维素离子树脂层析法对多糖进行纯化，上样质量浓度 15 mg/mL，上样体积 5 mL，洗脱流量 3 mL/min，纯化后的粗多糖可分离得到 3 个单组分，收集得率最高的中间组分，−80 ℃真空冷冻干燥后冷藏备用。

采用醇沉法提取 EPS[5]。将液体培养柴达木大肥菇得到的发酵液混合体系进行过滤，滤液即为发酵液，将发酵液浓缩 20 倍后与无水乙醇按体积比 1∶4 混合，4 ℃下静置 24 h，收集沉淀，脱色，采用上述相同条件进行纯化，收集组分，−80 ℃真空冷冻干燥后冷藏备用。

1.3.2 多糖得率测定

采用苯酚−硫酸法[14]绘制葡萄糖标准曲线，得到回归方程 y=31.918x+0.056 9（R^2=0.998 2）。

准确称取纯化后样品 0.01 g，定容至 100 mL，吸取 2.0 mL，代入公式（1）计算多糖纯度。

$$E_r=\frac{\rho\times V\times N}{m}\times 100\% \quad (1)$$

式中：

E_r——多糖纯度，%；

ρ——粗多糖质量浓度，mg/mL；

V——提取体积，mL；

N——样品稀释倍数；

m——样品质量，mg。

1.3.3 多糖相对分子质量测定

采用高效凝胶渗透色谱法（HPGPC）测定多糖相对分子质量[6]。以标准品相对分子质量的对数值为纵坐标，以相应色谱峰的保留时间为横坐标进行线性回归分析，得到回归方程 y=−0.173 2x+7.653 4（R^2=0.995 1），分别将柴达木大肥菇子实体、

发酵液、菌丝体多糖用流动相配成质量浓度为2 mg/mL的样液，根据其保留时间和标准曲线，计算多糖的相对分子质量。

1.3.4　核磁共振（NMR）分析

取3种多糖各50 mg溶于0.5 mL D_2O中，在核磁共振仪上进行^{1}H NMR（600 MHz）、^{13}C NMR（151 MHz）分析。

1.3.5　体外抗氧化活性测定

1）DPPH自由基清除能力测定：参考刘志庆等[14]的方法计算DPPH自由基清除率，见公式（2）。

$$I=(1-\frac{A_1-A_2}{A_0})\times 100\% \quad (2)$$

式中：

I——DPPH自由基清除率，%；

A_1——加入待测样品和DPPH-乙醇溶液后的吸光度；

A_2——加入待测样品和蒸馏水后的吸光度；

A_0——加入蒸馏水和DPPH-乙醇溶液后的吸光度。

2）ABTS自由基清除能力测定：参考Zhang等[15]的方法计算ABTS自由基清除率，见公式（3）。

$$C=(1-\frac{A_4-A_5}{A_3})\times 100\% \quad (3)$$

式中：

C——ABTS自由基清除率，%；

A_4——加入样品溶液和ABTS溶液后的吸光度；

A_5——加入样品溶液和无水乙醇后的吸光度；

A_3——加入蒸馏水和ABTS溶液后的吸光度。

3）羟基自由基清除能力测定：参考蒋德旗等[16]的方法测定羟基自由基清除率，见公式（4）。

$$Q=(1-\frac{A_7-A_8}{A_6})\times 100\% \quad (4)$$

式中：

Q——羟基自由基清除率，%；

A_7——加入待测样品与水杨酸-乙醇溶液和过氧化氢溶液后的吸光度；

A_8——加入待测样品和蒸馏水后的吸光度；

A_6——加入蒸馏水与水杨酸-乙醇溶液和过氧化氢溶液后的吸光度。

4）超氧阴离子自由基清除能力测定：参考蒋德旗等[16]的方法测定超氧阴离子自由基清除率，见公式（5）。

$$H=(1-\frac{A_{10}-A_{11}}{A_9})\times 100\% \quad (5)$$

式中：

H——超氧阴离子自由基清除率，%；

A_9——加入邻苯三酚的吸光度；

A_{10}——加入样品溶液和邻苯三酚后的吸光度；

A_{11}——加入样品溶液后的吸光度。

5）还原力测定：参考郑林龙等[17]的方法测定，将样品的还原力与（A_{13}-A_{12}）比较，（A_{13}-A_{12}）的值越大，表示样品的还原力越强，A_{13}为样品反应体系的吸光度，A_{12}为对照体系的吸光度。

1.3.6　动物试验

1）动物分组与给药设计：小鼠在环境适宜，通风，安静，温度18~25 ℃，相对湿度35%~50%的条件下饲养。经过7 d适应期后，将50只小鼠随机分为空白组、阳性对照（红景天苷）组、IPS组、EPS组和PS组，每组10只，雌雄各半。试验期间，小鼠自由进食饲料（包括粗纤维、蛋白质、矿物质、维生素等营养成分）。根据多糖纯度换算后得到纯多糖质量浓度，依据人体可摄入红景天苷最低剂量的10%，确定试验组每天分别灌胃0.2 mL 150 mg/kg的IPS、PS、EPS，阳性对照组灌胃0.2 mL 150 mg/kg的红景天苷[6]，空白组用生理盐水代替，饲养21 d。

2）动物缺氧氧化损伤试验：氧化损伤处理使用常压密闭缺氧的方法，将饲养21 d后的各组小鼠分别放入含有质量分数0.9%氢氧化钠的广口瓶中，在瓶底放一张滤纸，将瓶口用凡士林密封，使各组小鼠停止呼吸。所有动物试验均符合动物伦理学标准，批准号：SCXK（甘）2015-0001。

3）体内抗氧化指标测定：待小鼠缺氧死亡后进行眼眶采血，血样于3 000 r/min离心10 min，分离血清，于-20 ℃保存备用。按照相关试剂盒说明，检测各组小鼠氧化损伤后体内MDA浓度和CAT、SOD、GSH-Px活性。

1.4　数据处理

数据采用Excel整理，以平均值±标准差表示。通过SPSS 25软件进行方差分析，采用Duncan新复极差法检验各处理组间的显著性，显著水平设定为P=0.05，不同字母表示具有显著性差异。采用Origin 2018软件制图。

2 结果与讨论

2.1 多糖质量评价

采用苯酚-硫酸法，测得胞内多糖、子实体多糖及胞外多糖的纯度平均值分别为 97.52%、97.41% 及 96.82%。由表 1 可知，从柴达木大肥菇子实体、发酵液和菌丝体中均分离得到 3 种多糖，在 3 种多糖中，PS 相对分子质量均较大，其次是 IPS，而 EPS 相对分子质量最小。其中组分I质量分数较大，其次为组分II、组分III。

表 1 PS、EPS、IPS 相对分子质量的测定

Table 1 Determination of the molecular weights of PS, EPS, and IPS

多糖	组分	保留时间/min	相对分子质量	质量分数/%
PS	PS-I	18.23	38 340	63.43
	PS-II	20.63	15 467	24.46
	PS-III	22.12	6 896	12.11
EPS	EPS-I	23.46	5 995	62.73
	EPS-II	26.57	1 432	19.46
	EPS-III	30.39	893	17.81
IPS	IPS-I	19.84	30 380	46.12
	IPS-II	21.12	9 732	35.51
	IPS-III	24.09	3 138	18.37

由表 2 可知，柴达木大肥菇的 PS 中出现了葡萄糖、甘露糖、阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸及葡萄糖醛酯。葡萄糖在多糖中的质量分数最高，超过 86%；甘露糖和阿拉伯糖质量分数也较高；半乳糖醛酸、葡萄糖醛酯质量分数较少。EPS 中出现了葡萄糖、甘露糖、木糖、阿拉伯糖、半乳糖、半乳糖醛酸及鼠李糖。葡萄糖在多糖中的质量分数最高，超过 87%；甘露糖、阿拉伯糖在多糖中的质量分数较高；半乳糖、半乳糖醛酸在多糖中质量分数较少，而木糖和鼠李糖较难合成，质量分数均小于 1%。柴达木大肥菇 IPS 多糖组分中出现了葡萄糖、甘露糖、木糖、阿拉伯糖、半乳糖及半乳糖醛酸。葡萄糖质量分数最高，超过 85%；甘露糖、半乳糖和阿拉伯糖在多糖中质量分数较高；而木糖和半乳糖醛酸质量分数较低。

表 2 PS、EPS、IPS 的单糖组成

Table 2 Monosaccharide composition of PS, EPS, and IPS

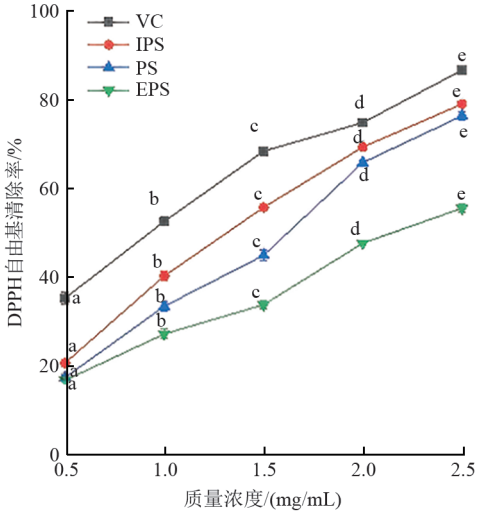
多糖	单糖质量分数/%							
	葡萄糖	甘露糖	木糖	阿拉伯糖	半乳糖	半乳糖醛酸	鼠李糖	葡萄糖醛酯
PS	86.73	5.74	—	4.18	1.76	0.89	—	0.70
EPS	87.61	4.85	0.07	4.73	1.92	0.29	0.53	—
IPS	85.62	6.78	0.39	4.93	2.09	0.19	—	—

注：“—”表示未检测到。

2.2 柴达木大肥菇多糖的体外抗氧化活性

2.2.1 多糖对 DPPH 自由基的清除能力

抗氧化剂与 DPPH 相遇时会将自身质子提供给 DPPH 后被清除，所以吸光度会降低，而清除率越高，抗氧化能力越强[18]，由图 1 可知，随着多糖质量浓度的升高，IPS、PS 及 EPS 对 DPPH 自由基的清除能力增强，强弱顺序依次为 IPS>PS>EPS。与 VC 对照组相比，当多糖质量浓度为 2.5 mg/mL 时，IPS 清除率为 78.80%，接近 VC 的清除能力，PS 的清除率是 VC 清除率的 87.98%，EPS 的清除率是 VC 清除率的 64.21%。VC、IPS、PS、EPS 的 IC_{50} 值分别为 0.97、1.41、1.59、2.22 mg/mL。3 种多糖对 DPPH 自由基均具有较强的清除能力，与孙思燕等[19]研究的荷叶离褶伞多糖对 DPPH 自由基清除能力的结果相似。



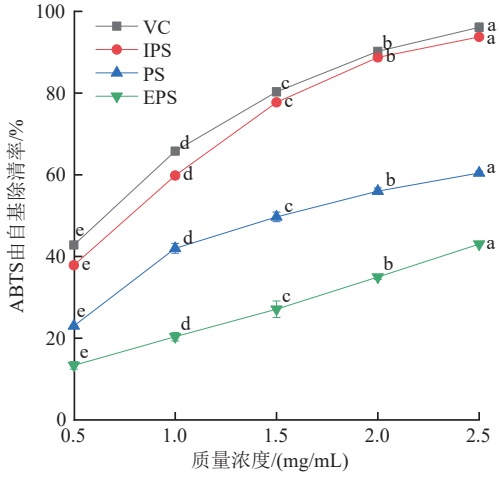
不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 1 柴达木大肥菇多糖对 DPPH 自由基的清除能力

Fig. 1 Scavenging ability of polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc. against DPPH radical

2.2.2　多糖对ABTS自由基的清除能力

抗氧化物质与ABTS自由基结合可以使反应体系褪色，从而显示抗氧化能力[18]。由图2可知，EPS、PS及IPS对ABTS自由基的清除能力逐渐增强，且差异显著（$P<0.05$）。IPS、EPS、PS、VC的IC_{50}值分别为0.15、0.60、0.31、0.11 mg/mL，3种多糖的IC_{50}值由小到大依次为IPS<PS<EPS，IPS的IC_{50}值是VC的1.36倍，EPS的IC_{50}值是VC的5.45倍，即IPS清除ABTS自由基的能力最强。综上，3种多糖都具有良好的清除ABTS自由基的能力，这与真姬菇多糖[20]和香菇多糖[21]清除能力相似。



不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图2　柴达木大肥菇多糖对ABTS自由基的清除能力

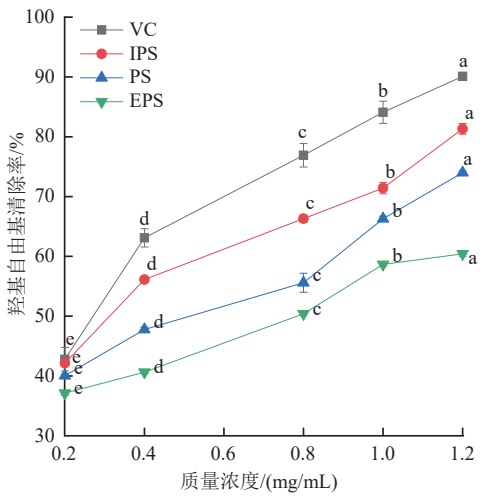
Fig. 2　Scavenging ability of polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc. against ABTS radical

2.2.3　多糖对羟基自由基的清除能力

羟基自由基是体内最活跃的自由基，也是评估抗氧化活性的指标之一[18]。由图3可知，EPS、PS及IPS对羟基自由基的清除能力逐渐增强，且差异显著（$P<0.05$）。IPS、EPS、PS、VC的IC_{50}值分别为0.31、0.62、0.44、0.23 mg/mL，3种多糖的IC_{50}值由小到大依次为IPS<PS<EPS，IPS的IC_{50}值是VC的1.35倍，EPS的IC_{50}值是VC的2.70倍，即IPS对羟基自由基的清除率最高。此结果与董赵微等[22]研究的香菇多糖对羟基自由基的清除能力类似。可能是多糖分子上的氢原子与羟基自由基结合生成水，从而达到了清除自由基的目的[18]。

2.2.4　多糖对超氧阴离子自由基的清除能力

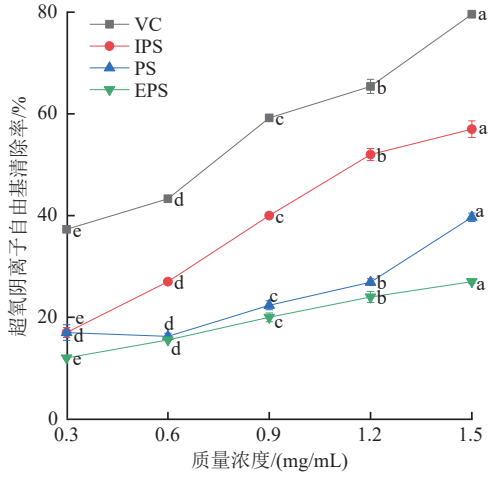
超氧阴离子自由基作为多种活性氧的前体物质会对生物体产生损伤[18]。由图4可知，EPS、PS及IPS对超氧阴离子自由基的清除能力依次增强，且差异显著（$P<0.05$）。IPS、EPS、PS、VC的IC_{50}值分别为1.17、2.51、2.16、0.70 mg/mL，3种多糖的IC_{50}值由小到大依次为IPS<PS<EPS。即IPS对超氧阴离子自由基的清除能力最高，这与许女等[23]研究的鸡腿菇子实体多糖结果相似。综上，柴达木大肥菇多糖具有一定的超氧阴离子自由基清除能力，可减少细胞损伤，原因可能是多糖分子中比较活泼的氢基键与超氧阴离子自由基结合生成水，从而达到清除自由基的目的。



不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图3　柴达木大肥菇多糖对羟基自由基的清除能力

Fig. 3　Scavenging ability of polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc. against hydroxyl radical



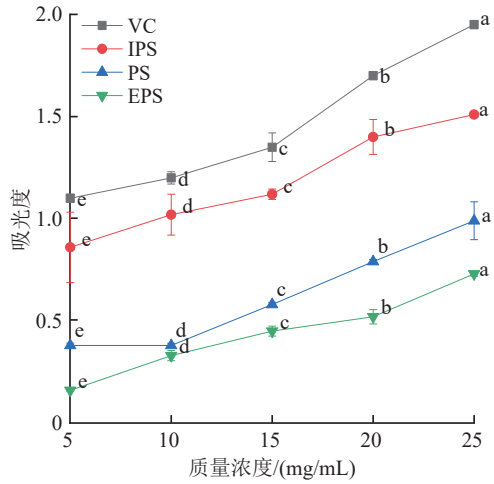
不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图4　柴达木大肥菇多糖对超氧阴离子自由基的清除能力

Fig. 4　Scavenging ability of polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc. against superoxide anion radical

2.2.5 多糖的还原力

还原力作为抗氧化活性指标，实质上是检验组分是否具有良好的电子供应能力的过程[18]。如图 5 所示，随着多糖质量浓度的升高，EPS、PS 和 IPS 的还原力依次增强，且差异显著（$P<0.05$）。与 VC 对照组相比，当多糖质量浓度为 25 mg/mL 时，IPS 的吸光度为 1.52，是 VC 吸光度的 77%，而 VC 比 PS 和 EPS 的吸光度分别高 0.64 和 0.75。结果表明，IPS 的还原力较强，而 PS 和 EPS 的还原力较弱。综上，柴达木大肥菇多糖具有良好的还原力和抗氧化活性，这与松乳菇多糖[24]类似。



不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

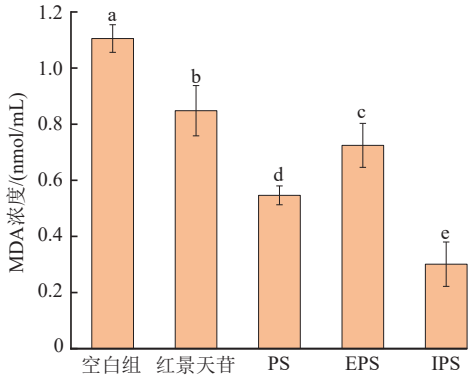
图 5 柴达木大肥菇多糖的还原力

Fig. 5 Reducing capacity of polysaccharides from *Agaricus bitorquis* (Quél.) Sacc.

2.3 柴达木大肥菇多糖的体内抗氧化活性

2.3.1 多糖对小鼠血液中 MDA 浓度的影响

MDA 是氧化应激反应的重要标志，能引起蛋白质等一些生物大分子的聚合而使其失活，其含量高低可用来衡量脂质过氧化过程中的自由基水平，反映出细胞受损程度[25]。由图 6 可知，连续灌胃 IPS、PS、EPS 均能显著降低小鼠血液中 MDA 浓度（$P<0.05$），多糖按照 MDA 浓度由低到高依次是 IPS<PS<EPS。与空白组相比，灌胃 IPS 后小鼠血液中的 MDA 浓度降低了 73.00%，EPS 组降低了 35.14%；与阳性对照（红景天苷）组比较，灌胃 IPS 后 MDA 浓度降低了 66.29%，其次是 PS 组，降低了 40.45%，EPS 组降低了 19.10%，即 IPS 可以明显降低脂质过氧化产物——MDA 的浓度，与李平等[26]研究的黄芩多糖能够降低小鼠血液中 MDA 浓度的结果相似。因此，IPS 能够降低小鼠血液中的 MDA 浓度，有效抑制细胞氧化损伤，从而减少由于 MDA 积累对膜和细胞造成的伤害。



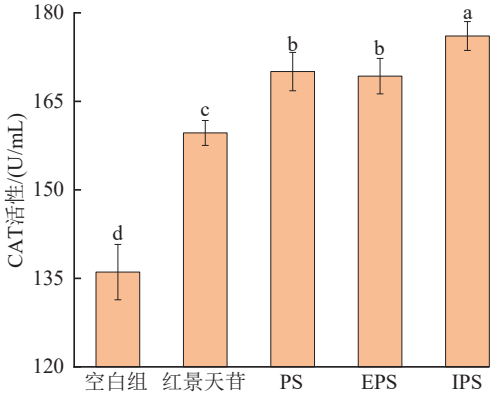
不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图 6 多糖对小鼠血液中 MDA 浓度的影响

Fig. 6 Effects of polysaccharides on MDA concentration in blood of mice

2.3.2 多糖对小鼠血液中 CAT 活性的影响

CAT 是参与机体内活性氧代谢的重要物质之一，可将过氧化氢分解成水分子，避免过氧化氢在体内过度积累，达到阻断自由基链式反应的效果[18]。由图 7 可知，连续灌胃 IPS、PS、EPS 能显著提高小鼠血液中 CAT 活性（$P<0.05$），多糖按照 CAT 活性由高到低依次为 IPS>PS>EPS。与空白组相比，灌胃 IPS 后小鼠血液中 CAT 活性提高了 28.93%，EPS 组提高了 22.12%；与阳性对照（红景天苷）组比较，灌胃 IPS 后 CAT 活性提高了 9.25%，



不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

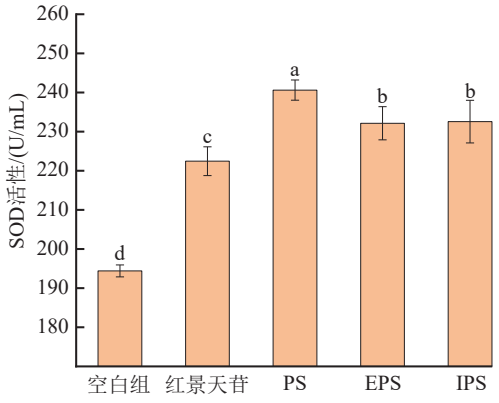
图 7 多糖对小鼠血液中 CAT 活性的影响

Fig. 7 Effects of polysaccharides on CAT activity in blood of mice

其次是PS组，提高了6.11%，EPS组提高了3.48%。这与刘功成等[27]采用CAT活性指标揭示重楼叶多糖具有抗氧化性的结果相似。IPS可以明显提高柴达木大肥菇的CAT活性，增强自身清除ROS的能力，改善胞内抗氧化环境。

2.3.3　多糖对小鼠血液中SOD活性的影响

SOD能加快超氧阴离子自由基反应，减轻O^{2-}·对机体的伤害以及修复受损的细胞[18]。由图8可知，灌胃IPS、PS、EPS能显著提高小鼠血液中SOD的活性（$P<0.05$），多糖按照SOD活性由高到低依次为PS>EPS>IPS。与空白组相比，灌胃PS后小鼠血液中SOD的活性提高了25.08%，IPS组提高了17.41%；与阳性对照（红景天苷）组相比，灌胃PS后小鼠血液中SOD的活性提高了8.37%，其次是EPS，提高了4.64%，IPS提高了1.72%，此结果与田敏等[28]研究的珊瑚状猴头菌类似，猴头菌多糖可有效降低SOD活性。柴达木大肥菇多糖对SOD活性具有显著增强作用，可能是由于多糖使体内抗氧化酶类的基因发生转录、翻译后形成了活性蛋白质，进而维持机体氧化还原的平衡[29]。综上，3种多糖均可保护细胞免受氧化损伤，其中PS抗氧化作用最强。



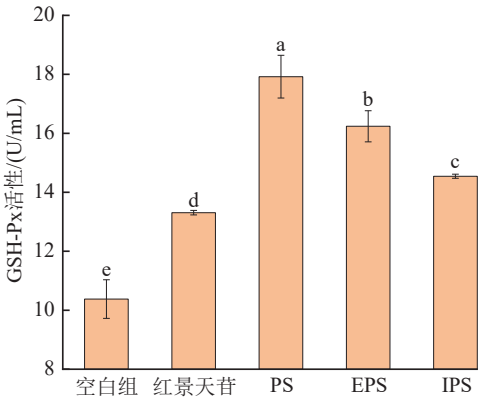
不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图8　多糖对小鼠血液中SOD活性的影响

Fig. 8　Effects of polysaccharides on SOD activity in blood of mice

2.3.4　多糖对小鼠血液中GSH-Px活性的影响

GSH-Px可作为还原剂消除过氧化氢和脂质过氧化物，阻止活性氧对机体的损伤[18]。由图9可知，灌胃IPS、PS、EPS能显著提高小鼠血液中的GSH-Px活性（$P<0.05$），多糖按照GSH-Px活性由高到低依次为PS>EPS>IPS。与空白组相比，灌胃PS后小鼠血液中GSH-Px活性提高了72.64%，IPS提高了40.08%；与阳性对照（红景天苷）组相比，灌胃PS后小鼠血液中GSH-Px活性提高了34.64%，其次是EPS，提高了22.01%，IPS提高了9.24%。这与黄岑多糖[26]、珊瑚状猴头菌多糖[28]能够增强GSH-Px活性相似。综上，柴达木大肥菇多糖具有显著提高GSH-Px活性的作用，可能是柴达木大肥菇多糖促进了谷胱甘肽酶的合成，增加了谷胱甘肽的含量，从而提高GSH-Px活性[30]。



不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

图9　多糖对小鼠血液中GSH-Px活性的影响

Fig. 9　Effects of polysaccharides on GSH-Px activity in blood of mice

3　结论

以柴达木大肥菇的3种多糖IPS、EPS和PS为研究对象，测定其体内、外的抗氧化活性。研究表明，在体外抗氧化试验中，IPS、PS及EPS都具有一定的抗氧化活性，对4种自由基都具有较强的体外清除能力。与VC对照组相比，IPS还原力最高，对DPPH、ABTS、羟基和超氧阴离子自由基的清除率分别为78.80%、93.74%、81.33%、59.63%。IPS对DPPH、ABTS、羟基自由基和超氧阴离子自由基的IC_{50}值分别为1.41、0.15、0.31、1.17 mg/mL。体内抗氧化试验结果表明，IPS能降低MDA浓度，且其提高CAT活性的效果最好；PS对提高SOD和GSH-Px活性的效果最好。柴达木大肥菇多糖能降低小鼠血液中MDA浓度，提高CAT、SOD、GSH-Px活性。结果表明，柴达木大肥菇多糖具有良好的清除体内自由基的作用，从而降低氧化损伤，达到抗氧化功能。

综上，不论是还原力还是对自由基的清除能力，柴达木大肥菇的IPS均高于PS和EPS，因此

IPS最适合作为天然抗氧化剂进行深入研究。另外，柴达木大肥菇多糖对体内、外的抗氧化活性均有显著影响，由此可见，柴达木大肥菇多糖具有很大的开发潜质和广阔的应用前景。

参考文献

[1] JIAO Y C，KUANG H，HU J J，et al. Structural characterization and anti-hypoxia activities of polysaccharides from the sporocarp，fermentation broth and cultured *Mycelium* of *Agaricus bitorquis*（Quél.）Sacc. Chaidam in mice[J]. Journal of Functional Foods，2018，51：75-85.

[2] 曹丽萍，马建，周玉花，等. 柴达木大肥菇生长土壤理化性质与其营养成分的相关性研究[J]. 食品工业，2023，44(12)：99-103.
CAO L P，MA J，ZHOU Y H，et al. Study on the correlation between physical and chemical properties of growing soil and its nutrient composition of large fat mushroom in Qaidam[J]. The Food Industry，2023，44(12)：99-103.(in Chinese)

[3] 颜梦秋，刘艳芳，唐传红，等. 食药用菌液体发酵产品在食品领域应用进展[J]. 食品与机械，2023，39(8)：227-233，240.
YAN M Q，LIU Y F，TANG C H，et al. Application progress of liquid fermentation products of edible and medicinal fungi in food industry[J]. Food & Machinery，2023，39(8)：227-233，240.(in Chinese)

[4] 李盼，曾祥权，李倩倩，等. 块菌多糖的提取、结构、功能及应用研究进展[J]. 食品与机械，2024，40(2)：213-220.
LI P，ZENG X Q，LI Q Q，et al. Research progress on extraction，structural，functional properties and applications of *Tuber* polysaccharides[J]. Food & Machinery，2024，40(2)：213-220.(in Chinese)

[5] 焦迎春，余梅，张燕，等. 超声波辅助提取柴达木大肥菇多糖工艺优化及其抗缺氧活性研究[J]. 现代食品科技，2019，35(1)：114-120，251.
JIAO Y C，YU M，ZHANG Y，et al. Optimization of polysaccharide from *Agaricus bitorquis* mushroom by ultrasonic-assisited extraction method and its anti-hypoxia activity[J]. Modern Food Science and Technology，2019，35(1)：114-120，251.(in Chinese)

[6] 焦迎春，旷慧，吴嘉南，等. 柴达木大肥菇多糖对小鼠的抗疲劳作用[J]. 现代食品科技，2018，34(8)：24-30，193.
JIAO Y C，KUANG H，WU J N，et al. The anti-fatigue activities of polysaccharides extracted from the *Agaricus bitorquis*（QuéL.）Sacc. Chaidam[J]. Modern Food Science and Technology，2018，34(8)：24-30，193.(in Chinese)

[7] 康茂约，倪赞，陈芳芳，等. 植物天然产物体外抗氧化功效评价及机理分析[J]. 农产品加工，2024(24)：43-46，51.
KANG M Y，NI Z，CHEN F F，et al. The efficacy evaluation and mechanism of *in vitro* antioxidant of plant natural products[J]. Farm Products Processing，2024(24)：43-46，51.(in Chinese)

[8] 孙晓燕，郭慧，余君彤，等. 自溶对双孢菇多糖体外抗氧化和抗肿瘤活性的影响[J]. 食品科学，2022，43(17)：74-83.
SUN X Y，GUO H，YU J T，et al. Autolysis alters the *in vitro* antioxidant and antitumor activities of *Agaricus bisporus* polysaccharides[J]. Food Science，2022，43(17)：74-83.(in Chinese)

[9] RUTHES A C，RATTMANN Y D，CARBONERO E R，et al. Structural characterization and protective effect against murine sepsis of fucogalactans from *Agaricus bisporus* and *Lactarius rufus*[J]. Carbohydrate Polymers，2012，87(2)：1620-1627.

[10] YANG M H，QIN X M，LIU X J. A review of polysaccharides from *Ganoderma lucidum*：preparation methods，structural characteristics，bioactivities，structure-activity relationships and potential applications[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2025，303：140645.

[11] CUI F J，YANG Y M，SUN L，et al. *Grifola frondosa* polysaccharides：a review on structure/activity，biosynthesis and engineering strategies[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2024，257：128584.

[12] SONG Q Q，JIANG L，YANG X Q，et al. Physicochemical and functional properties of a water-soluble polysaccharide extracted from Mung bean（*Vigna radiate* L.）and its antioxidant activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules，2019，138：874-880.

[13] 梁琰，赵志国，张敏敏，等. 超声辅助提取苯酚-硫酸法测定野生平盖灵芝多糖含量[J]. 食品研究与开发，2018，39(16)：125-129.
LIANG Y，ZHAO Z G，ZHANG M M，et al. Ultrasonic assisted extraction of phenol-sulfuric acid method for determination of *Ganoderma applanatum* polysaccharides in wild[J]. Food Research and Development，2018，39(16)：125-129.(in Chinese)

[14] 刘志庆，郭绍芬，孙清新，等. 不同年份茶薰子叶状层菌多糖含量及抗氧化性比较研究[J]. 山东农业科学，2017，49(1)：73-76.
LIU Z Q，GUO S F，SUN Q X，et al. Comparative study on polysaccharide content and its antioxidant activity of *Phylloporia ribis*（Schumach.：Fr.）Ryvarden of different years[J]. Shandong Agricultural Sciences，2017，49(1)：73-76.(in Chinese)

[15] ZHANG H，YANG Y F，ZHOU Z Q. Phenolic and flavonoid contents of mandarin（*Citrus reticulata* Blanco）fruit tissues and their antioxidant capacity as evaluated by

DPPH and ABTS methods[J]. Journal of Integrative Agriculture,2018,17(1):256-263.

[16] 蒋德旗,黄利敏,王艳,等. 响应面优化纤维素酶法提取桂花多糖工艺及其抗氧活性研究[J]. 食品工业科技,2015,36(2):271-275,281.
JIANG D Q, HUANG L M, WANG Y, et al. Optimization of enzymatic extraction technology of polysaccharide from *Osmanthus fragrans* using response surface methodology and investigation on its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015,36(2):271-275,281.(in Chinese)

[17] 郑林龙,蒋剑平,许海顺,等. 响应面法优化土茯苓多糖的提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 中华中医药杂志,2014,29(3):918-922.
ZHENG L L,JIANG J P,XU H S,et al. Optimization of ultrasonic extraction of *Smilax glabra* polysaccharides by response surface methodology and studies on its antioxidant activity[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy,2014,29(3):918-922.(in Chinese)

[18] YIN C M, FAN X Z, FAN Z, et al. Optimization of enzymes-microwave-ultrasound assisted extraction of *Lentinus edodes* polysaccharides and determination of its antioxidant activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2018,111:446-454.

[19] 孙思燕,江宁,戴竹青,等. 荷叶离褶伞多糖提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技,2020,41(9):155-160,167.
SUN S Y, JIANG N, DAI Z Q, et al. Study on the optimization of extraction technology and antioxidant activity of polysaccharides from *Lyophyllum decastes*(Fr.) Singer[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020,41(9):155-160,167.(in Chinese)

[21] 李奕葶,王文振,赵嘉伟,等. 真姬菇菌丝体发酵藜麦产物中多糖的抗氧化和α-淀粉酶抑制活性[J]. 食品研究与开发,2022,43(2):19-27.
LI Y T, WANG W Z, ZHAO J W, et al. Antioxidant and α-amylase inhibitory activity evaluation of polysaccharides extracted from fermented quinoa by *Hypsizygus marmoreus* mycelium[J]. Food Research and Development, 2022, 43(2):19-27.(in Chinese)

[22] 董赵微,王岸娜,王慧,等. 香菇多糖内源性金属离子对其结构和活性的影响[J]. 中国食品学报,2024,24(9):60-68.
DONG Z W, WANG A N, WANG H, et al. Effects of endogenous metal ions on the structure and activity of lentinan[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2024,24(9):60-68.(in Chinese)

[23] 许女,贾瑞娟,陈旭峰,等. 鸡腿菇子实体多糖的体内、体外抗氧化活性[J]. 中国食品学报,2019,19(1):34-40.
XU N,JIA R J,CHEN X F,et al. Antioxidant activity *in vitro* and *vivo* of polysaccharide from *Coprinus comatus*[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019,19(1):34-40.(in Chinese)

[24] 郭富金. 松乳菇多糖的分离纯化及其抗氧化活性的研究[D]. 泰安:山东农业大学,2019.

[25] 肖建勇,陈智超,朱育娴,等. 不同灰树花多糖提取及其体外抗氧化活性研究[J]. 食品工业,2022,43(8):59-63.
XIAO J Y, CHEN Z C, ZHU Y X, et al. Study on extraction and antioxidant activity of different *Grifola frondosa* polysaccharides[J]. The Food Industry, 2022, 43(8):59-63.(in Chinese)

[26] 李平,胡建燃,史宝忠,等. 黄芩多糖的提取及其抗氧化和抗肿瘤活性研究[J]. 生物技术通报,2021,37(4):155-163.
LI P, HU J R, SHI B Z, et al. Extraction of *Scutellaria baicalensis* polysaccharides and its antioxidant and antitumor activities[J]. Biotechnology Bulletin, 2021, 37(4):155-163.(in Chinese)

[27] 刘功成,王作伟,李亭亭,等. 重楼叶多糖改善*D*-半乳糖衰老模型小鼠脾脏免疫功能和抗氧化能力[J]. 食品工业科技,2015,36(16):366-369,383.
LIU G C, WANG Z W, LI T T, et al. Effect of polysaccharides from the leaves of *Paris polyphylla* on immune function and antioxidant capacities of mouse spleen tissue in a *D*-galactose-induced aging mouse model[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 366-369,383.(in Chinese)

[28] 田敏,王荣荣,冯翠萍,等. 珊瑚状猴头菌多糖抗氧化作用研究[J]. 中国食品学报,2015,15(1):25-33.
TIAN M, WANG R R, FENG C P, et al. Studies on polysaccharides from *Hericium coralloids* on the antioxidant activity in mice[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2015,15(1):25-33.(in Chinese)

[29] ZHANG C W,ZOU Y F,ZOU Y,et al. Ultrasonic-assisted extraction of polysaccharide from Paeoniae Radix alba: extraction optimization, structural characterization and antioxidant mechanism *in vitro*[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2024,268:131816.

[30] 任天赐,张方方,李莹,等. 富含谷胱甘肽酵母制品在葡萄酒酿造中的应用进展[J]. 食品与发酵工业,2024,50(11):336-343.
REN T C, ZHANG F F, LI Y, et al. Advances on the application of glutathione-enriched inactive dry yeast derivatives during winemaking[J]. Food and Fermentation Industries,2024,50(11):336-343.(in Chinese)

（责任编辑：史润东东）