周威, 申红佳, 甘泉, 等. 平菇液态发酵多糖与其子实体多糖抗氧化活性对比 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(5): 428−434. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050071

ZHOU Wei, SHEN Hongjia, GAN Quan, et al. Comparative Study on Antioxidant Activities of Liquid Fermented and Fruiting Body Polysaccharides from *Pleurotus ostreatus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(5): 428−434. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050071

· 营养与保健 ·

平菇液态发酵多糖与其子实体多糖抗氧化活性对比

周　威[1], 申红佳[1], 甘　泉[1], 宋翠颖[1], 张　蕾[2], 张黎明[1], 韩培培[1,*], 郝利民[2,*], 贾士儒[1]

（1.天津科技大学, 工业发酵微生物教育部重点实验室, 天津 300457;
2.军事科学院系统工程研究院, 北京 100010）

摘　要: 为研究平菇液态发酵胞外多糖（POFP）、平菇菌丝体多糖（POMP）和平菇子实体多糖（POP）的抗氧化活性差异，本研究采用食用菌液态发酵、多糖分离纯化等技术制备了 POFP 和 POMP，并与 POP 进行抗氧化活性对比评价。研究采用 DPPH 自由基、$ABTS^+$自由基、OH 自由基清除能力和总还原力评价三种多糖的体外抗氧化活性，并采用紫外线氧化损伤和 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞模型来评估其氧化损伤防护作用。结果表明：三种多糖均由两种不同分子量的组分构成，分子量在 375.31~9788.14 Da 之间，大小排序为 POP>POMP>POFP；三种多糖对 DPPH、$ABTS^+$、OH 自由基均有较好的清除能力，并且具有良好的还原能力，且呈现剂量依赖性。其中 POFP 的总还原力最强，在 5 mg/mL 时 OD_{700} 值可达 0.51±0.04，高于 POMP 和 POP。此外，三种多糖均可显著提高紫外线和 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞存活率；POP 防护效果较强，在 25 mg/mL 时可使紫外线损伤酵母细胞活力恢复至 96.05%±4.02%，在 15 mg/mL 可使 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞活力恢复至 91.60%±3.26%，与 V_C 处理组效果相当。综上所述，不同来源的平菇多糖均具有良好的抗氧化活性，液态发酵技术为新型抗氧化天然产物的制备提供了新路径。

关键词: 平菇, 液态发酵, 平菇多糖, 抗氧化活性, 氧化损伤

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)05−0428−07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050071　　本文网刊:

Comparative Study on Antioxidant Activities of Liquid Fermented and Fruiting Body Polysaccharides from *Pleurotus ostreatus*

ZHOU Wei[1], SHEN Hongjia[1], GAN Quan[1], SONG Cuiying[1], ZHANG Lei[2], ZHANG Liming[1], HAN Peipei[1,*], HAO Limin[2,*], JIA Shiru[1]

（1.Key Laboratory of Industrial Fermentation Microbiology, Ministry of Education, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;
2.Systems Engineering Institute, Academy of Military Sciences (AMS), Beijing 100010, China）

Abstract: In order to study the difference of antioxidant activities among the extracellular polysaccharide (POFP), mycelium polysaccharide (POMP) and fruiting body polysaccharide (POP) of *Pleurotus ostreatus* by liquid fermentation, this study prepared POFP and POMP through liquid-state fermentation of edible fungi, polysaccharide isolation and purification, as well as other techniques, followed by a comparative evaluation of their antioxidant activities with POP. The study assessed the *in vitro* antioxidant activity of the three polysaccharides using DPPH radical, $ABTS^+$ radical, and OH radical scavenging activities as well as total reducing power. Additionally, yeast cell models subjected to ultraviolet (UV)-induced oxidative damage and H_2O_2-induced oxidative damage were employed to evaluate their protective effects against

收稿日期: 2025−05−12

基金项目: “十四五”重点研发计划重点专项（2023YFD2100801）。

作者简介: 周威（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 生物工程, E-mail: 18816264357@163.com。

*** 通信作者:** 韩培培（1983−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 生物工程, E-mail: pphan@tust.edu.cn。
郝利民（1969−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 特殊功能食品与食品生物技术, E-mail: hlm2005@163.com。

oxidative injury. The results showed that the three kinds of polysaccharides were composed of two kinds of components with different molecular weights, which ranged from 375.31~9788.14 Da, and the order of molecular weight was POP>POMP>POFP. All three polysaccharides demonstrated significant scavenging activities against DPPH, $ABTS^{+}$, and OH radicals, along with notable reducing power, all of which exhibited a dose-dependent manner. Among them, POFP displayed the strongest total reducing power, achieving an OD_{700} value of 0.51±0.04 at a concentration of 5 mg/mL, which was higher than that of POMP and POP. Furthermore, all three polysaccharides significantly increased the survival rates of yeast cells subjected to UV- and H_2O_2-induced oxidative damage. Among them, POP demonstrated stronger protective effects, restoring the viability of UV-damaged yeast cells to 96.05%±4.02% at a concentration of 25 mg/mL, and that of H_2O_2-damaged yeast cells to 91.6%±3.26% at 15 mg/mL, which was comparable to the effects observed in the vitamin C (V_C) treatment group. In summary, *Pleurotus ostreatus* polysaccharides from different sources exhibited significant antioxidant activities, and liquid fermentation technology provided a new way for the preparation of new antioxidant natural products.

Key words: *Pleurotus ostreatus*; liquid fermentation; *Pleurotus ostreatus* polysaccharide; antioxidant activity; oxidative damage

平菇（*Pleurotus ostreatus*）属担子菌门（Basidiomycotina）侧耳属（*Pleurotus*），又被称为北风菌、蚝菌，在我国食用菌产量排名中位居前列，是全球继双孢蘑菇之后的第二大栽培食用菌，具有重要的经济、生态及食药用价值[1−2]。平菇多糖是平菇中最主要的活性物质之一，具有抗疲劳、抗氧化、调节免疫、抗肿瘤、降血糖、降血脂、抗凝血和保肝护肝等作用，对机体健康有诸多益处[3]。平菇多糖通常分为子实体多糖和液态发酵多糖，其中子实体多糖从平菇子实体中提取获得，不同的提取方法会影响多糖的提取得率、结构特征以及生物活性。传统食用菌多糖提取法主要有热水浸提法和酸碱溶液提取法，近年超声辅助法、酶提取辅助法、双水相提取法等也逐渐兴起[4]。然而平菇子实体培养周期较长，一般为 30~45 d，受天气和季节等自然因素影响较大，生产成本高、效率低；而且生产中存在原料提取率低、废渣大量浪费的现象[5−8]。平菇液态发酵培养可以缩短培养周期，减少人力投入，且不受季节和地域限制，规模化和自动化程度较高，发酵过程中的关键参数如温度和 pH 能够精确调控[9]，从而保证发酵始终在最优状态下进行；此外，液态发酵技术简化了平菇活性物质提取步骤，提高了生产效率，是平菇多糖产业化制备的重要技术路径。

人体内氧化和抗氧化失衡会引发机体氧化应激，导致自由基和炎症因子的增加，进而对机体产生多方面的影响，例如加速机体衰老，提高慢病发生率等，对健康造成危害[10−12]。研究表明，平菇多糖具有良好的抗氧化活性，其作用机制主要是提高自由基清除能力或增强抗氧化酶活性[13]。程超等[14] 研究发现平菇子实体多糖对超氧阴离子和 OH 自由基具有良好的清除能力；Li 等[15] 发现平菇多糖能够显著提高环磷酰胺（CTX）诱导的小鼠睾丸组织中核转录因子 Nrf2 及其下游 *ARE* 基因的表达，同时改变 Keap1 蛋白域结构，降低其表达，促进抗氧化酶的产生。董博斐等[16] 研究表明，红平菇液体发酵胞外多糖对机体的氧化应激损伤具有良好的修复作用；曹向宇等[17] 使用酶解的方法提取纯化了平菇胞内多糖，其对超氧阴离子和 OH 自由基均具有清除作用。虽然目前对平菇多糖的研究较多，但大部分集中在单一来源多糖的抗氧化活性研究，而对不同来源多糖例如子实体多糖和液态发酵多糖之间的抗氧化活性差异比较研究较少。

本文系统比较了平菇发酵液多糖（POFP）、平菇菌丝体多糖（POMP）与平菇子实体多糖（POP）的体外抗氧化活性差异，探究了三类多糖对 DPPH、$ABTS^{+}$、OH 自由基的清除能力及对紫外线、H_2O_2 氧化损伤酵母细胞的保护作用，为不同来源平菇多糖在功能性食品和美容护肤品领域的应用提供了参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

平菇 2180 菌种　天津农学院农学与资源环境学院食用菌研发中心；平菇子实体　河南菇太郎食品有限公司；酿酒酵母 A.S.2399　天津科技大学食品营养与安全国家重点实验室；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（DPPH）、2,2-联氮基双（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）二铵盐（ABTS）、牛血清蛋白、单糖标准样　美国 Sigma 公司；二喹啉甲酸（bicinchoninic acid, BCA）蛋白浓度测定试剂盒　上海阿拉丁试剂有限公司；无水乙醇、苯酚、浓硫酸、氯仿、正丁醇、氯化钠、三氟乙酸　均为国产分析纯。

LDZX-75L 型立式高压蒸汽灭菌器　上海申安医疗器械厂；HYG 型恒温摇床培养箱　上海欣蕊自动化设备有限公司；TGL16G 型高速离心机　上海医用分析仪器厂；TDA-8002 型恒温水浴锅　天津市中环试验电炉有限公司；ALPHA 1-2/LD 型真空冷冻干燥机　德国 CHRIS 公司；JA12002 型电子天平　上海精科天平仪器厂；RE-3000 型旋转蒸发仪　上海亚荣生化仪器厂；Infinite M200 Pro 型多功能酶标仪　瑞士 Tecan公司；Aglient 1200 液相色谱仪　德国安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 平菇发酵液多糖和菌丝体多糖的制备 采用王菲菲等[18]的菌种发酵方法并稍作修改。通过前期试验得到最优液态培养基配方为：葡萄糖 30.0 g/L、酵母粉 8.5 g/L、KH_2PO_4 1.5 g/L、$MgSO_4·7H_2O$ 0.5 g/L、V_{B1} 0.1 g/L，pH 自然。将活化好的平菇菌种接种 5% 于液态培养基中，在 26 ℃、180 r/min 条件下摇床培养 5 d，4 ℃ 下 10000 r/min 离心处理 5 min 后获得平菇发酵液（POF）和菌丝体（POM），并通过 5 L 至 500 L 发酵罐进行逐级放大试验。

采用刘宇[19]的方法制备 POFP 和 POMP。将 POM 用蒸馏水清洗干净后冷冻干燥，取一定量 POM 粉末进行研磨破壁处理，按料液比 1∶35（g/mL）热水浸提（90 ℃、2 h）2 次，4 ℃ 下 10000 r/min 离心处理 5 min 后合并上清液，得 POM 提取液。将上述制得的 POF 和 POM 提取液分别浓缩至一定体积，加入 3 倍体积 95% 乙醇溶液，在 4 ℃ 的环境下，醇沉 12 h，8000 r/min 离心 5 min 收集沉淀，用 95% 乙醇溶液进行多次冲洗，加适量水溶解后经过冷冻干燥后分别得到 POFP 和 POMP。

1.2.2 平菇子实体多糖的制备 将平菇子实体在 60 ℃ 烘箱内烘干、粉碎[20]，取一定量平菇子实体干粉，后续操作按照 1.2.1 中热水浸提方法提取子实体多糖 POP。

1.2.3 多糖理化性质测定 总糖含量采用苯酚-硫酸法测定；蛋白含量采用 BCA 法测定；水分含量采用食用水分蒸发仪进行检测[21]。

1.2.4 相对分子量的测定 POFP、POMP 和 POP 多糖经过 Sevage 法除蛋白、AB-8 大孔树脂脱色、真空浓缩，冷冻干燥后制得待测样品。采用高效凝胶过滤色谱法（High performance gel filtration chromatography，HPGFC）测定粗多糖相对分子质量。测试条件如下，色谱柱：TSK GEL4000SWXL（7.8 mm×30.0 cm）；检测器：RI-101 示差折光检测器；流动相：超纯水；流速：0.5 mL/min；柱温：35 ℃；将样品溶解在液相中，用 0.22 μm 微孔滤膜过滤，进样量为 20 μL。葡聚糖标准曲线采用超纯水配制浓度为 1 mg/mL 的葡聚糖标准品溶液，并依照所述色谱分析条件进行检测。根据标准品葡聚糖分子量的对数值（lgM_w）与保留时间（t_R）进行线性回归分析，其回归方程为 $y=-0.2839x+6.03478$，$R^2=0.9966$，根据标准曲线计算平菇多糖样品分子质量。

1.2.5 体外抗氧化活性的测定

1.2.5.1 DPPH 自由基清除能力测定 参考 Chen 等[22]的方法测定 DPPH 自由基的清除能力，并稍作修改。配制不同浓度（1、2、3、4、5 mg/mL）的粗多糖溶液，取 100 μL 粗多糖溶液于 96 孔板中，加入 100 μL DPPH 溶液（0.1 mmol/L，溶剂为无水乙醇）后，在 37 ℃ 的环境下，黑暗处理 30 min，在 517 nm 处测定混合物的吸光度。其中，V_C 为阳性对照。DPPH 自由基清除率根据公式（1）计算：

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%)=\left[\frac{A_k-(A_i-A_j)}{A_k}\right]\times 100 \quad \text{式（1）}$$

式中，A_k 表示空白组吸光度；A_i 表示样品组吸光度；A_j 表示样品本底吸光度。

1.2.5.2 $ABTS^+$自由基清除能力测定 按照 Wang 等[23]的方法进行测定。将浓度为 7.4 mmol/L 的 $ABTS^+$溶液、浓度为 2.6 mmol/L 的过硫酸钾溶液，等比例混匀后在黑暗条件下反应 16 h，并用 pH7.4 的 PBS 缓冲液稀释，在 734 nm 下测吸光度，该吸光度在 0.70±0.02 范围内，制得 $ABTS^+$工作液。取 30 μL 不同浓度（1、2、3、4、5 mg/mL）多糖溶液于 96 孔板内，加入 180 μL $ABTS^+$工作液并混匀，室温下反应 6 min，测定 734 nm 处的吸光度。以 V_C 溶液作阳性对照。$ABTS^+$自由基清除率根据公式（2）计算：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%)=\left[\frac{A_k-(A_i-A_j)}{A_k}\right]\times 100 \quad \text{式（2）}$$

式中，A_k 表示空白组吸光度；A_i 表示样品组吸光度；A_j 表示样品本底吸光度。

1.2.5.3 OH 自由基清除能力测定 根据 Zhang 等[24]的方法并稍作改进。配制不同浓度（1、2、3、4、5 mg/mL）的粗多糖溶液，依次在 96 孔板中加入 50 μL 的粗多糖溶液、5.0 mmol/L 水杨酸-乙醇溶液、5.0 mmol/L $FeSO_4$ 溶液和 5.0 mmol/L H_2O_2 溶液，充分混匀后在水浴锅中加热 30 min，温度为 37 ℃，并在 510 nm 处测定其吸光度。以 V_C 为阳性对照。OH 自由基清除率根据公式（3）计算：

$$\text{OH 自由基清除率}(\%)=\left[\frac{A_k-(A_i-A_j)}{A_k}\right]\times 100 \quad \text{式（3）}$$

式中，A_k 表示空白组吸光度；A_i 表示样品组吸光度；A_j 表示样品本底吸光度。

1.2.5.4 总还原力测定 参照 Fan 等[25]所述的方法进行铁还原抗氧化能力测定，并稍作修改。在试管内加入 2 mL 不同浓度（1、2、3、4、5 mg/mL）的多糖样品后，分别加入 2 mL 的 1% 的铁氰化钾溶液和 pH6.6 的 PBS 缓冲液，在水浴锅中加热 20 min，温度为 50 ℃，加入 2 mL 10% 三氯乙酸溶液，混匀后 5000 r/min 离心 10 min。取上清液 100 μL 于 96 孔板内，继续加入 10 μL 的 0.1% 三氯化铁溶液，混匀后 50 ℃ 水浴 10 min，待温度降至室温后，在 700 nm 下测定混合液的吸光度。以 V_C 溶液作阳性对照。还原能力根据公式（4）计算：

$$\text{还原能力}=A_i-A_j \quad \text{式（4）}$$

式中，A_i 表示样品组吸光度；A_j 表示样品本底吸光度。

1.2.6　氧化损伤酵母细胞保护作用的测定

1.2.6.1　对紫外线氧化损伤酵母细胞保护作用　参照圣志存等[26]的方法进行测定，并稍加修改。将活化好的酵母细胞接种于 YEPD 液体培养基中，培养至对数期后，取适量酵母培养液 4000 r/min 离心 5 min，弃上清，用生理盐水将菌体重复洗涤两次后制成酵母菌悬液。将不同质量浓度（5、10、15、20、25 mg/mL）的粗多糖样品与酵母菌悬液按 4∶1 的体积比充分混匀，紫外线照射处理 60 s 后稀释涂布，将涂布后的平板置于 30 ℃ 恒温培养箱中，避光培养 48 h，待菌落形态稳定后进行计数，并计算氧化损伤酵母细胞的存活率。以 V_C 溶液作阳性对照。氧化损伤酵母细胞存活率根据公式（5）计算：

$$\text{紫外氧化损伤酵母细胞存活率}(\%) = \frac{A_i - A_j}{A_k - A_j} \times 100 \quad \text{式（5）}$$

式中，A_k 表示未经紫外线照射处理的酵母单菌落数；A_i 表示样品组的酵母单菌落数；A_j 表示对照组的酵母单菌落数。

1.2.6.2　对 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞保护作用　参照胡亚平等[27]的方法稍作改动。按 1.2.6.1 的方法制得酵母菌悬液。取对数期酵母培养液 50 mL，4000 r/min 离心 10 min 后收集菌体。用生理盐水洗涤 2 次至不含培养基颜色后制备菌悬液。按照 4∶1 的比例将不同质量浓度（5、10、15、20、25 mg/mL）的多糖溶液与菌悬液混合后，加入 1 mL 2% H_2O_2 溶液，并充分混合，于 37 ℃ 孵育振荡 1 h，稀释涂布，在 30 ℃ 条件下培养 48 h，并进行菌落计数。以 V_C 为阳性对照，按公式（6）计算酵母细胞存活率：

$$\text{存活率}(\%) = \frac{A_i - A_j}{A_0 - A_j} \times 100 \quad \text{式（6）}$$

式中，A_i 表示添加样品后氧化损伤酵母单菌落数；A_j 表示氧化损伤酵母单菌落数；A_0 表示未经处理酵母单菌落数。

1.3　数据处理

实验结果通过每组三个独立实验的均值±标准差（n=3）表示。采用 IBM SPSS 20.0 进行数据处理分析，组间比较采用 tukey 检验，显著水平 $P<0.05$。使用 OriginPro 2015 绘图。

2　结果与分析

2.1　平菇多糖的基本组成

三种平菇多糖的基本组成见表 1，其中 POP 中的总糖含量最高为 84.20%±0.28%，显著高于 POFP（55.53%±0.09%）和 POMP（44.72%±0.17%）（$P<0.05$）；POMP 中的蛋白质含量最高为 27.00%±0.12%，显著高于 POFP（14.50%±0.90%）和 POP（10.84%±0.29%）（$P<0.05$），蛋白质含量是粗多糖的重要检测指标。三种多糖的水分含量由大到小分别为 POFP>POP>POMP，水分含量的不同反映出多糖在纯度、活性和提取效率等方面存在的差异。

表 1　POFP、POMP 和 POP 的基本组成

Table 1　Basic composition of POFP, POMP and POP

指标	POP	POFP	POMP
总糖含量（%）	84.20±0.28^a	55.53±0.09^b	44.72±0.17^c
蛋白质含量（%）	10.84±0.29^c	14.50±0.90^b	27.00±0.12^a
水分含量（%）	3.21±0.46^b	5.18±0.08^a	1.34±0.22^c

注：同行数据上标不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

2.2　三种平菇多糖的相对分子量

对三种平菇多糖的相对分子量进行检测，结果显示 POFP、POMP、POP 多糖均由 2 种不同分子量的多糖组成，其保留时间接近，结果见表 2。三种多糖的分子量的大小范围在 375.31~9788.14 Da 之间。分子量大小排序为 POP>POMP>POFP。这与 Hao 等[28]对红缘拟层孔菌子实体多糖、菌丝体多糖和发酵液多糖的分子量研究结果类似。有研究表明，分子质量的大小可能会影响多糖的构象、与自由基的相互作用方式及其在生物体系中的稳定性，从而对多糖的抗氧化活性产生显著影响[29]。低分子量多糖因在溶液中具有更好的扩散性，能更易与自由基发生反应，而高分子量多糖由于分子间存在较强的相互作用，更有利于金属离子的螯合[30]。分子量的差异为后续多糖抗氧化活性对比研究提供了重要参考。

表 2　POFP、POMP 和 POP 的相对分子量

Table 2　Relative molecular weights of POFP, POMP and POP

粗多糖	保留时间（min）	重均分子量Mw（Da）
POFP	12.19	375.31
	12.01	421.83
POMP	9.90	1675.60
	8.51	4157.11
POP	7.75	6832.11
	7.20	9788.14

2.3　体外抗氧化活性

2.3.1　DPPH 自由基清除能力　DPPH 自由基在 517 nm 处有最强吸收峰，抗氧化剂与之结合会使溶液颜色变浅，吸光度降低，因此抗氧化剂的还原能力与吸光度呈现反比的关系，吸光度越低，表明还原能力越强[26]。三种平菇多糖对 DPPH 自由基的清除能力如图 1 所示，其清除能力呈现剂量依赖性，在多糖浓度为 1~5 mg/mL 范围内，三种粗多糖的 DPPH 自由基清除能力与多糖溶液的浓度具有正相关关系。将 DPPH 自由基清除率与多糖浓度进行线性拟合得到回归方程，根据回归方程求出清除率为 50% 时的多糖浓度即为半清除率浓度 IC_{50}，POFP、POMP 和 POP 的 IC_{50} 分别是 3.37、0.82、0.09 mg/mL。当多糖浓度为 5 mg/mL 时，POP 和 POMP 的清除率都达到 90% 以上，与 V_C 清除效果相当，并且显著高于 POFP 的清除率（75.13%±1.97%）（$P<0.05$），清除率大小排序为 POP>POMP>POFP。

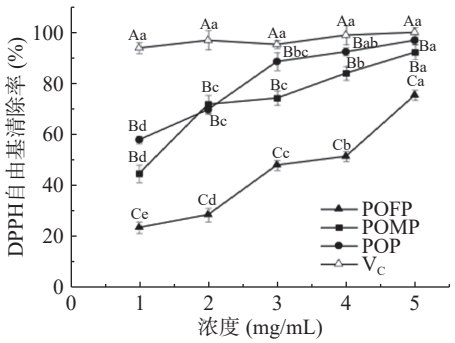


图 1 三种粗多糖对 DPPH 自由基的清除能力

Fig.1 DPPH radical scavenging activity of three polysaccharide samples

注: 不同大写字母表示同一浓度下不同来源平菇多糖的清除率存在显著差异(P<0.05), 不同小写字母表示同一来源平菇多糖不同浓度的清除率存在显著差异(P<0.05), 图 2~图 6 同。

2.3.2 $ABTS^+$自由基清除能力 $ABTS^+$自由基的检测波长约为 734 nm, 数值大小与被测样品抗氧化能力有关, 数值越小, 说明自由基越少, 即样品对 $ABTS^+$自由基的清除能力越强[20]。三种多糖对 $ABTS^+$自由基的清除结果如图 2 所示。在 1~5 mg/mL 浓度范围内, 三种多糖对 $ABTS^+$自由基清除率呈现剂量依赖性。线性拟合得到, POFP、POMP 和 POP 的 IC_{50} 分别是 8.58、6.06、5.09 mg/mL。当多糖浓度为 5 mg/mL 时, 对三种多糖及 V_C 的自由基清除率进行测定, 结果发现其清除率由大到小依次为 V_C>POP>POMP>POFP。具体来看, 在 $ABTS^+$自由基清除方面, POP 的清除率为 49.71%±2.75%, POMP 的清除率为 40.24%±2.53%, 二者均显著高于 POFP 的清除率(29.67%±2.41%)(P<0.05)。尽管三种多糖对 $ABTS^+$自由基的清除率均低于其对 DPPH 自由基的清除率, 但总体趋势保持一致。

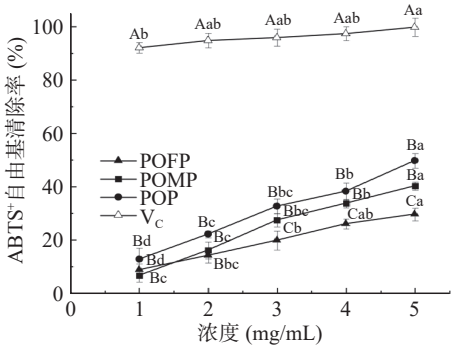


图 2 三种粗多糖对 $ABTS^+$自由基的清除能力

Fig.2 $ABTS^+$ radical scavenging activity of three polysaccharide samples

2.3.3 OH 自由基清除能力 OH 自由基与活细胞中的任何分子发生反应均会造成损伤, 其反应速度非常快, 引起的自由基链反应对生物体造成较大范围的损害[28]。不同浓度的三种粗多糖对 OH 自由基的清除能力如图 3 所示。在 1~5 mg/mL 浓度范围内, 三类粗多糖对 OH 自由基清除能力随着浓度增加而增加。将 OH 自由基清除率与多糖浓度进行线性拟合, POFP、POMP 和 POP 的 IC_{50} 值分别是 0.46、0.91、0.48 mg/mL。当多糖浓度为 5 mg/mL 时, POP 对 OH 自由基清除率最高为 97.25%±1.71%, 与 V_C 对 OH 自由基的清除效果接近, 其次是 POMP 为 93.52%±1.61%, 两者均显著高于 POFP 对 OH 自由基清除率(86.32%±3.01%)(P<0.05)。

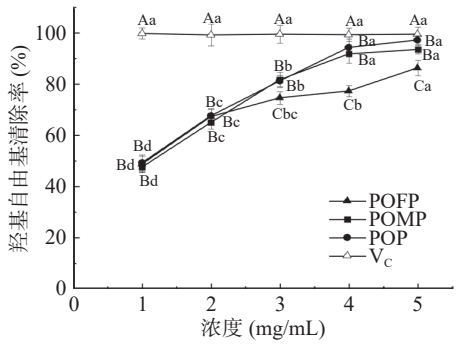


图 3 三种粗多糖对 OH 自由基的清除能力

Fig.3 Hydroxyl radical scavenging activity of three polysaccharide samples

2.3.4 总还原力 抗氧化剂通过自身还原作用给出电子而清除自由基, 还原力越强, 抗氧化活性越强, 其在 700 nm 处有最大吸收峰, 其吸光度与还原力表现出正相关关系[31]。三种粗多糖的总还原力如图 4 所示。在 1~5 mg/mL 浓度范围内, 三种多糖的总还原力呈现一定的剂量依赖性。当多糖含量为 5 mg/mL 时, POFP、POMP 和 POP 的总还原力吸光度分别为 0.51±0.04、0.38±0.04、0.31±0.03, 由大到小排序为 POFP>POMP>POP。由此可知, 液态发酵平菇多糖总还原力高于菌丝体多糖和子实体多糖。

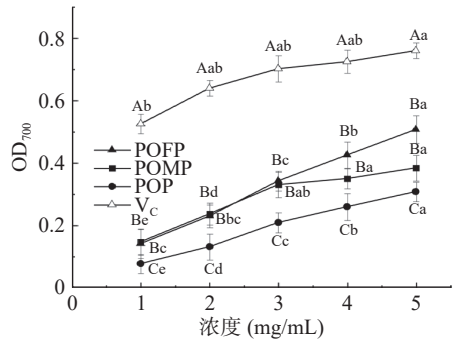


图 4 三种粗多糖的总还原力

Fig.4 Reducing power of three crude polysaccharides

2.3.5 三种多糖对氧化损伤酵母细胞的保护作用

2.3.5.1 对紫外线氧化损伤酵母细胞的保护作用 紫外线照射皮肤容易引起活性自由基和活性氧, 其与皮肤衰老和癌症的发生密切相关, 抗氧化剂的存在可减少紫外线照射对细胞造成的损伤[32]。如图 5 所示, 三种粗多糖对紫外线损伤酵母细胞均具有一定程度的保护作用, 且在试验浓度范围内其保护作用与多糖浓度呈正相关。将酵母细胞存活率与多糖

浓度进行线性拟合，POFP、POMP 和 POP 的 IC_{50} 值分别是 23.51、12.34、10.09 mg/mL。当多糖浓度为 25 mg/mL 时，三种多糖均显著提高了酵母细胞的存活能力（P<0.05）；其中，POP 对紫外线氧化损伤酵母细胞的保护效果尤为突出，其存活率可达 96.05%±4.02%，显著大于 POMP（72.37%±1.99%）和 POFP（53.29%±2.63%）（P<0.05），甚至超过了阳性对照样 V_C 对损伤酵母细胞的保护效果，这表明平菇多糖对氧化损伤酵母细胞具有显著的保护作用，未来其有可能成为防晒霜和美容护肤品开发的重要活性原料。

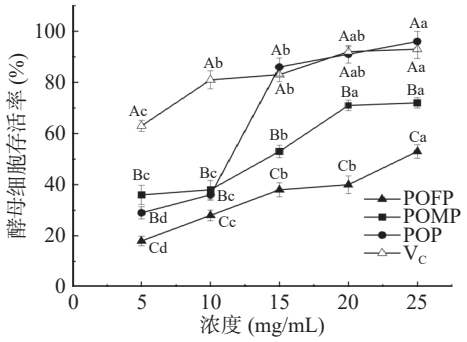


图 5　三种粗多糖对紫外线氧化损伤酵母细胞的保护能力

Fig.5　UV damage to yeast cells protection of three crude polysaccharides

2.3.5.2　对 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞的保护作用

H_2O_2 常被用于诱导细胞或组织发生氧化应激损伤，通过产生 OH 自由基，破坏机体内的活性分子，从而发生病变[33]。如图 6 所示，三种粗多糖对 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞均具有保护作用，且均在 15 mg/mL 时对酵母细胞的保护作用达到最大值并趋于平稳。将酵母细胞存活率与多糖浓度进行线性拟合，POFP、POMP 和 POP 的 IC_{50} 值分别是 9.35、8.57、7.79 mg/mL。当多糖浓度为 15 mg/mL 时，POP、POMP 和 POFP 多糖组 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞存活率分别为 91.60%±3.26%、84.20%±3.06% 和 74.80%±2.88%；而且，POP 多糖组 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞存活率与 V_C 组相当，进一步说明平菇多糖具有显著的抗氧化活性。

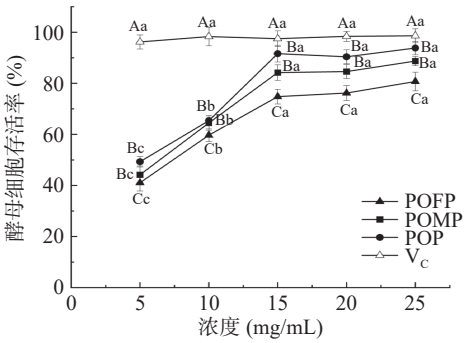


图 6　三种粗多糖对 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞的保护能力

Fig.6　Protective effects of three crude polysaccharides on yeast cells from H_2O_2 oxidative damage

3　结论

本文对比了平菇发酵液多糖（POFP）、平菇菌丝体多糖（POMP）和平菇子实体多糖（POP）的基本组成、分子量及其抗氧化活性。结果表明：三种多糖的基本组成存在显著差异，其中 POP 中的总糖含量最高（84.20%±0.28%），显著高于 POFP（55.53%±0.09%）和 POMP（44.72%±0.17%）；POMP 的蛋白质含量（27.00%±0.12%）显著高于 POFP（14.50%±0.90%）和 POP（10.84%±0.29%）。三种多糖均由两种不同分子量的多糖组成，其分子量由大到小顺序为：POP>POMP>POFP。体外抗氧化活性结果显示，在一定的浓度下，三种多糖均有显著的 DPPH 自由基、$ABTS^+$自由基、OH 自由基清除能力，并能显著提高氧化损伤酵母细胞的保护效果。其中 5 mg/mL 的 POFP 的总还原力为 0.51±0.04，高于 POMP 和 POP。POP 保护作用最强，25 mg/mL 和 15 mg/mL 的 POP 可将紫外线和 H_2O_2 氧化损伤酵母细胞活力分别恢复至 96.05%±4.02% 和 91.60%±3.26%，与 V_C 处理组效果相当。本研究不仅采用液态发酵技术高效制备平菇多糖，为抗氧化资源库提供了新的选择，也为平菇多糖在功能性食品和美容护肤品等领域的应用提供了技术支撑。未来可进一步探究平菇多糖基本组成、分子量和结构与其抗氧化活性之间的关系，为基于平菇多糖的抗氧化产品开发提供参考。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] ZHANG Kexin, PU Yuanyuan, SUN Dawen. Recent advances in quality preservation of postharvest mushrooms (*Agaricus bisporus*): A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78: 72−82.

[2] SÁNCHEZ C. Cultivation of *Pleurotus ostreatus* and other edible mushrooms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2010, 85(5): 1321−1337.

[3] 刘欣欣. 不同菌株平菇活性成分分析及其多糖体外抗癌活性评价[D]. 宜春：宜春学院, 2024. [LIU X X. Analysis of bioactive components of *Pleurotus ostreatus* with different strains and *in vitro* anticancer activity evaluation of its polysaccharides[D]. Yichun: Yichun University, 2024.]

[4] 关颖贤, 江洁, 潘玲, 等. 食用菌发酵食品的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(10): 454−462. [GUAN Yingxian, GANG Jie, PAN Ling, et al. Research progress on fermented food by edible fungi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(10): 454−462.]

[5] 郑婷婷, 张文杰, 龚婉莹, 等. 食用菌多糖提取纯化及结构修饰研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 231−240. [ZHENG Tingting, ZHANG Wenjie, GONG Wanying, et al. Research progress on extraction, purification and structural modification of polysaccharides from edible fungi[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 231−240.]

[6] BARBOSA J R, FREITAS M M S, OLIVEIRA L C, et al. Obtaining extracts rich in antioxidant polysaccharides from the edible mushroom *Pleurotus ostreatus* using binary system with hot water and supercritical CO_2[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127173.

[7] 周鹏程, 张黎明, 崔燕, 等. 红缘拟层孔菌子实体和发酵菌丝体营养成分比较分析[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 159−165. [ZHOU Pengcheng, ZHANG Liming, CUI Yan, et al. Comparative analysis of nutrients in fruiting bodies and cultured mycelia of *Fomitopsis pinicola*[J]. Food Science, 2021, 42(24): 159−165.]
[8] 万宁威, 雷帮星, 何劲, 等. 猴头菌液体发酵产多糖、核苷、萜类工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(2): 233−240. [WAN Ningwei, LEI Bangxing, HE Jin, et al. Optimization of polysaccharides, nucleosides and terpenes production from *Hericium erinaceus* by liquid fermentation and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(2): 233−240.]
[9] 林杉, 赵萍, 付云娜, 等. 羊肚菌胞外多糖液态发酵培养基配方优化及其体外降血糖活性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(20): 196−203. [LIN Shan, ZHAO Ping, FU Yunna, et al. Optimization of liquid fermentation medium formulation of *Morchella eohespera* exopolysaccharide and its hypoglycemic activity *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(20): 196−203.]
[10] FORMAN H J, ZHANG Hongqiao. Targeting oxidative stress in disease: Promise and limitations of antioxidant therapy[J]. Nature Reviews Drug Discovery, 2021, 20(9): 689−709.
[11] 吴铭, 纪晨萱, 吴小勇, 等. 天然活性产物抗电离辐射活性研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(11): 390−400. [WU Ming, JI Chenxuan, WU Xiaoyong, et al. Research progress on the anti-ionizing radiation activity of active natural products[J]. Food Science, 2023, 44(11): 390−400.]
[12] CHANDIMALI N, BAK S G, PARK E H, et al. Free radicals and their impact on health and antioxidant defenses: A review[J]. Cell Death Discovery, 2025, 11: 19.
[13] 姜明, 么越, 范蓓, 等. 食用菌活性成分抗氧化机制的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(9): 257−265. [JIANG M, YUE M, FAN B, et al. Research progress on antioxidant mechanisms of active components in edible fungi[J]. Journal of Food Safety & Quality Detection, 2023, 14(9): 257−265.]
[14] 程超, 李伟, 汪兴平. 平菇水溶性多糖结构表征与体外抗氧化作用[J]. 食品科学, 2005, 26(8): 55−57. [CHENG Chao, LI Wei, WANG Xingping. Study on the structure analysis and antioxidation effect *in vitro* of water soluble polysaccharide of *Pleurotus ostreatus*[J]. Food Science, 2005, 26(8): 55−57.]
[15] LI Shijie, SONG Zhuoyue, LIU Tingting, et al. Polysaccharide from *Ostrea rivularis* attenuates reproductive oxidative stress damage via activating Keap1-Nrf2/ARE pathway[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 186: 321−331.
[16] 董博斐, 彭文欣, 杨凤霞, 等. 红平菇胞外多糖体外抗氧化及对高血脂小鼠体内抗氧化能力探究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 305−310. [DONG Bofei, PENG Wenxin, YANG Fengxia, et al. Study on the antioxidant capacity of extracellular polysaccharides of *Pleurotus djamor in vitro* and in hyperlipidemia mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 305−310.]
[17] 曹向宇, 刘剑利, 芦秀丽, 等. 平菇菌丝体多糖的分离纯化和体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2010, 31(22): 124−128. [CAO Xiangyu, LIU Jianli, LU Xiuli, et al. Purification and antioxidant activity of polysaccharides from *Pleurotus ostreatus* mycelium[J]. Food Science, 2010, 31(22): 124−128.]
[18] 王菲菲, 郝利民, 王宗臻, 等. 云芝总发酵物及其多糖抗氧化活性比较研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(13): 109−112. [WANG Feifei, HAO Limin, WANG Zongzhen, et al. Comparison of antioxidation activities of the fermentation products of *Coriolus versicolor* and its polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(13): 109−112.]
[19] 刘宇. 平菇多糖分离纯化、结构分析及其抗疲劳活性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020. [LIU Yu. Isolation, purification, identification and anti-fatigue activity of polysaccharides from *Pleurotus ostreatus*[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020.]
[20] BINSAN W, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, et al. Antioxidative activity of Mungoong, an extract paste, from the cephalothorax of white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 185−193.
[21] 张乐乐. 灵芝交替氧化酶对多糖生物合成的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2022. [ZHANG L L. Effect of *Ganoderma* alternating oxidase on polysaccharide biosynthesis[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2022.]
[22] CHEN Guitang, MA Xuemei, LIU Shengtao, et al. Isolation, purification and antioxidant activities of polysaccharides from *Grifola frondosa*[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 89(1): 61−66.
[23] WANG Zichao, JIA Shutong, CUI Jingwen, et al. Antioxidant activity of a polysaccharide produced by *Chaetomium globosum* CGMCC 6882[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 141: 955−960.
[24] ZHANG Tao, XIANG Jialin, ZHENG Guobo, et al. Preliminary characterization and anti-hyperglycemic activity of a pectic polysaccharide from okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench)[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 41: 19−24.
[25] FAN Liuping, LI Jinwei, DENG Kequan, et al. Effects of drying methods on the antioxidant activities of polysaccharides extracted from *Ganoderma lucidum*[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(2): 1849−1854.
[26] 圣志存, 郝利民, 陶如玉, 等. 红缘拟层孔菌发酵物体外抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2014, 35(13): 129−133. [SHENG Zhicun, HAO Limin, TAO Ruyu, et al. Study of antioxidant activities of the fermentation products from *Fomitopsis pinicola*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(13): 129−133.]
[27] 胡亚平, 张金秀, 赵立强, 等. 双孢菇蛋白粉废料中多糖的分离纯化及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2018, 39(3): 32−38. [HU Yaping, ZHANG Jinxiu, ZHAO Liqiang, et al. Isolation, purification and antioxidant activity of polysaccharide from *Agaricus bisporus* protein powder waste[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(3): 32−38.]
[28] HAO Limin, SHENG Zhicun, LU Jike, et al. Characterization and antioxidant activities of extracellular and intracellular polysaccharides from *Fomitopsis pinicola*[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 141: 54−59.
[29] 刘宇, 贾滋坤, 王天赐, 等. 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 Yu, JIA Zikun, WANG Tianci, et al. Structural characterization and antioxidant activity of *Pleurotus ostreatus* polysaccharide extracted by wall-broken method[J]. Journal of Fungal Research, 2022, 20(2): 122−127.]
[30] 单政欣. 天然植物多糖分子量对其抗氧化活性的影响分析[J]. 中国食品工业, 2025(2): 131−133. [SHAN Z X. Analysis of the effect of molecular weight of natural plant polysaccharides on antioxidant activity[J]. China Food Industry, 2025(2): 131−133.]
[31] 廖日滔, 郭静科, 李冰洁, 等. 自由基相关细胞信号传导的研究进展[J]. 中国细胞生物学学报, 2014, 36(11): 1573−1583. [LIAO Ritao, GUO Jingke, LI Bingjie, et al. The review on the cell signal transduction pathway related to free radicals[J]. Chinese Journal of Cell Biology, 2014, 36(11): 1573−1583.]
[32] OYAIZU M. Studies on products of browning reaction. Antioxidative activities of products of browning reaction prepared from glucosamine[J]. The Japanese Journal of Nutrition and Dietetics, 1986, 44(6): 307−315.
[33] HERRLING T, FUCHS J, REHBERG J, et al. UV-induced free radicals in the skin detected by ESR spectroscopy and imaging using nitroxides[J]. Free Radical Biology & Medicine, 2003, 35(1): 59−67.