

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.02.007

胶状鳞伞菌多糖的理化性质及其体外生物学活性

刘燕¹, 罗扬², 李刘敏¹, 毛琪琪¹, 肖茜¹, 刘成国¹, 张博宁³, 周辉^{1*}

(1. 湖南农业大学 食品科学技术学院, 湖南 长沙 410125; 2. 长沙市农产品质量监测中心, 湖南 长沙 410003; 3. 沅江芦小妹食品有限公司, 湖南 沅江 413000)

摘要: 为研究胶状鳞伞菌多糖的理化性质及体外生物学活性, 采用水提醇沉法制备胶状鳞伞菌多糖, 并对其理化特性和抗氧化、抗肿瘤、降血糖活性进行研究。结果表明: 胶状鳞伞菌多糖主要由葡萄糖、甘露糖、木糖、半乳糖组成, 具有典型的多糖特殊红外光谱吸收峰, 含有吡喃糖苷与糖醛酸, 分子量为 29 754 Da。抗氧化结果表明胶状鳞伞菌多糖具有 DPPH 自由基、羟自由基、ABTS⁺ 自由基、超氧阴离子自由基清除能力及还原力。胶状鳞伞菌多糖可抑制肿瘤细胞 BGC-823、HepG2、Caco-2 的增殖, 对 α -淀粉酶活性有抑制作用。

关键词: 胶状鳞伞菌; 多糖; 理化性质; 抗氧化; 抗肿瘤; 降血糖

Physicochemical Properties and *in vitro* Biological Activities of Polysaccharide from Colloidal Scale Umbrella Fungus

LIU Yan¹, LUO Yang², LI Liumin¹, MAO Qiqi¹, XIAO Qian¹, LIU Chengguo¹, ZHANG Boning³, ZHOU Hui^{1*}

(1. School of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410125, Hunan, China; 2. Agricultural Product Quality Monitoring Center of Changsha, Changsha 410003, Hunan, China; 3. Yuanjiang Luxiaomei Food Co., Ltd., Yuanjiang 413000, Hunan, China)

Abstract: The physicochemical properties and *in vitro* biological activities of the polysaccharide from colloidal scale umbrella fungus were studied. The polysaccharide was prepared by aqueous extraction and alcohol precipitation, and its physicochemical properties and antioxidant, anti-tumor, and blood glucose-lowering activities were investigated. The results showed that the polysaccharide of colloidal scale umbrella fungus was mainly composed of glucose, mannose, xylose, and galactose. The extracted polysaccharide showed typical infrared absorption peaks of polysaccharides, containing pyranoside and uronic acid, with the molecular weight of 29 754 Da. The extracted polysaccharide showcased scavenging activities against DPPH, hydroxyl, ABTS⁺, and superoxide anion free radicals and ferric ion reducing antioxidant power. In addition, the extracted polysaccharide inhibited the proliferation of BGC-823, HepG2, and Caco-2 cells and inhibited the activity of α -amylase.

Key words: colloidal scale umbrella fungus; polysaccharide; physicochemical property; antioxidant; anti-tumor; lowering blood glucose

引文格式:

刘燕, 罗扬, 李刘敏, 等. 胶状鳞伞菌多糖的理化性质及其体外生物学活性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(2): 49-56.

LIU Yan, LUO Yang, LI Liumin, et al. Physicochemical Properties and *in vitro* Biological Activities of Polysaccharide from Colloidal Scale Umbrella Fungus[J]. Food Research and Development, 2025, 46(2): 49-56.

食用菌多糖是一类从食用菌菌丝体、子实体或发酵液中提取得到的天然高分子聚合物, 具有多种功能

活性和应用价值^[1]。研究表明, 食用菌多糖具有增强免疫力^[2]、抑制肿瘤生长^[3]、降低血糖^[4]、调节肠道菌

基金项目: 湖南省重点研发项目(2022NK4072、2023NK2040)

作者简介: 刘燕(1996—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品生物技术。

*通信作者: 周辉(1980—), 男, 副教授, 博士, 研究方向: 食品生物技术。

群^[5]、抗氧化^[6]、抗炎^[7]等多种功效,是一种重要的药用和保健原料。此外,食用菌多糖还在食品工业领域得到广泛应用,在食品中添加食用菌多糖,可以有效增强其营养价值和健康功效^[8]。随着人们对健康饮食和保健意识的不断增强,食用菌多糖受到越来越多的关注。对于食用菌多糖的研究和应用将会更加深入和广泛,展现出广阔的前景。

胶状鳞伞菌是一种从南洞庭湖畔芦苇荡里筛选、驯化、培育的本地特色食用菌品种^[9],其子实体一般呈黄色或黄褐色,直径为4~17 cm,菌盖上附有一层黏性胶状物质,因而被称为胶状鳞伞菌^[10]。胶状鳞伞菌具有较高的营养价值,除了含有丰富的蛋白质和多种必需氨基酸以及维生素、矿物质等营养成分,还含有多糖、多酚、生物碱等生物活性成分,且该食用菌味道鲜美、风味独特,是一种优质的药食两用食用菌^[11],具有一定的研究开发价值。目前,关于胶状鳞伞菌的研究报道甚少,特别是关于胶状鳞伞菌多糖的提取及其活性的研究未见报道。

本研究以胶状鳞伞菌为原料,采用水提醇沉法制备多糖,并对胶状鳞伞菌多糖的理化性质进行分析,明确其基本化学成分及结构,最后探究其体外抗氧化活性、对肿瘤细胞增殖的作用、降血糖活性,以期对胶状鳞伞菌多糖的深入开发以及综合应用提供参考,为胶状鳞伞菌多糖更好地应用于食品、药品等领域提供理论支持,实现胶状鳞伞菌价值及经济效益的最大化。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

胶状鳞伞菌粉:沅江市芦小妹食品有限公司;葡萄糖标准品(纯度 $\geq 98\%$):北京索莱宝科技有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH):上海阿拉丁生化科技股份有限公司; α -淀粉酶(3 700 U/g)、阿卡波糖、3-(4,5-二甲基噻唑-2)-2,5-二苯基四氮唑盐[3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide, MTT]细胞增殖试剂盒、考马斯亮蓝(Bradford)蛋白浓度测定试剂盒:北京索莱宝科技有限公司;超氧阴离子、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]自由基清除能力检测试剂盒:苏州科铭生物技术有限公司;DMEM高糖培养基、RPMI-1640培养基、青霉素-链霉素、胎牛血清(fetal bovine serum, FBS):以色列 Biological Industries (BI)公司;HepG2细胞、BGC-823细胞、Caco-2细胞:湖南丰晖生物科技有限公司;三氯甲烷、硫酸亚铁、正丁醇、浓硫酸(均为分析纯):国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

真空冷冻干燥机(LGJ-18C):北京四环科学仪器厂

有限公司;全波长酶标仪(Multiskan GO):赛默飞世尔科技(中国)有限公司;傅里叶变换红外光谱仪(FTIR-8400S):日本岛津公司;纳米粒度仪(Nano-ZS):英国 Malvern 公司;高效液相色谱仪(Agilent 1100):美国安捷伦科技有限公司;凝胶渗透色谱仪:美国 Waters 公司;倒置显微镜(CKX41):奥林巴斯(中国)有限公司;二级生物安全柜(BHC-1000IIA/B3):苏州市华宇净化设备有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 胶状鳞伞菌基本成分测定

水分、灰分、粗蛋白、粗脂肪、氨基酸的含量分别采用 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的直接干燥法、GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》中的灼烧法、GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》中的凯氏定氮法、GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的索氏抽提法、GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》中的方法进行测定。

1.3.2 胶状鳞伞菌多糖的制备

将胶状鳞伞菌粉末按照料液比 1:80 (g/mL)加入蒸馏水,沸水浴提取 2 h 后离心 10 min (9 500 r/min、10 °C);沉淀加入蒸馏水进行二次浸提离心,合并两次滤液加入其 3 倍体积的无水乙醇,4 °C 醇沉 12 h,离心 10 min (9 500 r/min、4 °C)收集沉淀后加入适量无水乙醇脱色,再次离心将沉淀复溶于蒸馏水中。在多糖溶液中加入其 1/4 体积现配的 Sevage 试剂(三氯甲烷与正丁醇的体积比为 4:1),剧烈振荡 30 min,10 000 r/min 离心 15 min,弃去蛋白层,重复上述步骤多次,将溶液再次剧烈振荡 30 min 后于分液漏斗中静置 6 h,取上层水相。将多糖水溶液转移至透析袋 4 °C 透析 72 h,每 12 h 换超纯水,冷冻干燥 3 d 后得胶状鳞伞菌多糖。

1.3.3 胶状鳞伞菌多糖理化性质测定

1.3.3.1 基本成分测定

水分含量的测定同 1.3.1;总糖含量采用苯酚-硫酸法进行测定;蛋白质含量按照 Bradford 蛋白浓度测定试剂盒进行测定;还原糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸法进行测定。

1.3.3.2 红外光谱测定

称取胶状鳞伞菌多糖 1.00 mg 以及 150 mg 干燥 KBr 混合,研磨均匀,压制成薄片,在 4 000~400 cm^{-1} 范围内进行红外光谱扫描。

1.3.3.3 单糖组成测定

参照文献[12]的 1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(1-phenyl-3-methyl-5-pyrazolone, PMP)柱前衍生化高效液相色谱法进行胶状鳞伞菌多糖的单糖组成测定。高效液相色谱仪(配二极管阵列检测器)色谱柱 C18 柱

(250 mm×4.6 mm, 5 μm); 流动相 A 为 100 mmol/L 磷酸钠缓冲液 (pH6.7); 流动相 B 为乙腈; 检测波长 250 nm; 柱温 30 °C; 流速 1 mL/min; 进样量 5 μL。

1.3.3.4 分子量测定

将不同分子量 (5.8、19.0、51.5、185.0、591.0、1 214.0 kDa) 的聚乙二醇分子量标准品及胶状鳞伞菌多糖用超纯水配制成 5 mg/mL 的溶液, 过 0.22 μm 水相膜备用。凝胶渗透色谱仪 (gel permeation chromatography, GPC): Waters 1525 型色谱仪配 Waters 2414 示差折光检测器; 检测条件为色谱柱: PL aquagel-OH MIXED (7.8 mm×300 mm, 8 μm); 流动相 0.2 mol/L NaNO₃、0.01 mol/L NaH₂PO₄ (pH7); 流速 1 mL/min; 进样量 10 μL; 温度 30 °C。

1.3.3.5 粒径和电位测定

称取 5 mg 胶状鳞伞菌多糖, 加入超纯水配制成 1 mg/mL 的多糖溶液, 检测粒径及电位, 重复扫描 3 次。

1.3.4 体外生物活性测定

1.3.4.1 抗氧化活性

1) DPPH 自由基清除能力的测定

参照文献[13]的方法, 进行胶状鳞伞菌多糖 DPPH 自由基清除能力的测定。配制与胶状鳞伞菌多糖质量浓度梯度相同的抗坏血酸溶液作为对照, 将 1 mL 胶状鳞伞菌多糖溶液或对照溶液与等量 100 μmol/L DPPH 溶液 (使用无水乙醇溶解) 加入棕色试管中, 混匀后于暗处静置 30 min, 取出后 8 000 r/min 离心 10 min, 取上清液, 测定各组 OD_{517 nm} 值。按下式计算胶状鳞伞菌多糖的 DPPH 自由基清除率 (Y₁, %)。

$$Y_1 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0} \right) \times 100$$

式中: A₁ 为试验组吸光度; A₂ 为对照组吸光度 (无水乙醇代替 DPPH 溶液); A₀ 为试验组空白吸光度 (蒸馏水代替样品)。

2) 羟自由基清除能力的测定

参照严尚隆[14]的方法, 进行胶状鳞伞菌多糖羟自由基清除能力的测定。按下式计算胶状鳞伞菌多糖的羟自由基清除率 (Y₂, %)。

$$Y_2 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0} \right) \times 100$$

式中: A₁ 为样品吸光度; A₂ 为蒸馏水代替水杨酸吸光度; A₀ 为蒸馏水代替样品吸光度。

3) ABTS⁺自由基清除能力的测定

采用 ABTS⁺自由基清除能力检测试剂盒检测胶状鳞伞菌多糖溶液的 ABTS⁺自由基清除率 (Y₃, %)。

$$Y_3 = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

式中: A₀ 为蒸馏水代替样品吸光度; A₁ 为样品吸光度。

4) 超氧阴离子自由基清除能力的测定

采用超氧阴离子自由基清除能力检测试剂盒检测胶状鳞伞菌多糖溶液的超氧阴离子自由基清除率 (Y₄, %)。

$$Y_4 = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

式中: A₀ 为蒸馏水代替样品吸光度; A₁ 为样品吸光度。

5) 还原力的测定

参照向瑞琪等[15]的测定方法, 进行胶状鳞伞菌多糖还原力的测定, 以吸光度的大小表示胶状鳞伞菌多糖的还原力 (Y₅)。

$$Y_5 = A_1 - A_0$$

式中: A₀ 为蒸馏水代替样品吸光度; A₁ 为样品吸光度。

1.3.4.2 抗肿瘤活性的测定

将活化后的肿瘤细胞 (BGC-823 细胞、HepG2 细胞、Caco-2 细胞) 通过消化、计数、稀释等步骤调节细胞浓度为 1×10⁵ 个/mL, 将肿瘤细胞按 1×10⁴ 个/孔的密度接种于 96 孔板, 每孔加入对应的培养液, 培养 24 h 细胞贴壁后, 弃培养液; 试验组加入含不同质量浓度胶状鳞伞菌多糖的培养液 100 μL、阴性对照组加等量培养液于细胞孔中、空白组加等量培养液于无细胞空白孔中, 每组设 5 个平行, 培养 24 h 后吸取上清液, 使用 MTT 细胞增殖试剂盒测定细胞增殖率[16]。按下列公式计算细胞增殖的抑制率 (Y₆, %)。

$$Y_6 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3 - A_2} \right) \times 100$$

式中: A₁ 为试验组吸光度; A₂ 为空白组吸光度; A₃ 为阴性对照组吸光度。

1.3.4.3 α-淀粉酶抑制活性的测定

参照文献[17]的方法并稍作修改, 往 96 孔板中每孔加入 100 μL 的 α-淀粉酶溶液以及 50 μL 不同质量浓度的胶状鳞伞菌多糖溶液, 37 °C 孵育 10 min 后再加入 50 μL 的 1% 淀粉溶液, 37 °C 孵育 10 min, 加入 100 μL 的 3,5-二硝基水杨酸, 100 °C 下孵育 5 min, 测定其 A_{540 nm}, 阿卡波糖做阳性对照。按下列公式计算胶状鳞伞菌多糖对 α-淀粉酶的抑制率 (Y₇, %)。

$$Y_7 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0} \right) \times 100$$

式中: A₁ 为试验组吸光度; A₂ 为磷酸盐缓冲盐液 (pH7.4) 代替 α-淀粉酶的本底组吸光度; A₀ 为磷酸盐缓冲盐液 (pH7.4) 代替样品的空白对照组吸光度。

1.4 数据处理

采用 Excel 2021 软件进行数据整理与统计分析, 以 SPSS Statistics 22 进行试验方差分析, 包括单因素

方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA)和最小显著性差异法(least significant difference, LSD)多重比较;使用 Origin 2022 软件绘制结果图。

2 结果与分析

2.1 胶状鳞伞菌基本成分分析

胶状鳞伞菌基本成分测定结果见表 1。

表 1 胶状鳞伞菌基本化学成分测定结果

fungus					%
水分含量	灰分含量	蛋白质含量	粗脂肪含量	氨基酸含量	
12.05±0.05	11.02±0.08	20.25±0.31	1.43±0.02	13.50±0.05	

由表 1 可知,胶状鳞伞菌的水分含量(12.05±0.05)%,灰分含量为(11.02±0.08)%,粗脂肪含量为(1.43±0.02)%,氨基酸含量为(13.50±0.05)%。其中,胶状鳞伞菌的蛋白质含量为(20.25±0.31)%,按照 GB 28050—2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》中提到的蛋白质营养素参考值(nutrient reference values, NRV)等于 60 g 计,每 100 g 食品中蛋白质的含量≥20% NRV 的可以声称“高”蛋白或“富含”蛋白质。因此,胶状鳞伞菌属于高蛋白食品,有较高的营养价值。

胶状鳞伞菌的氨基酸结果见图 1。

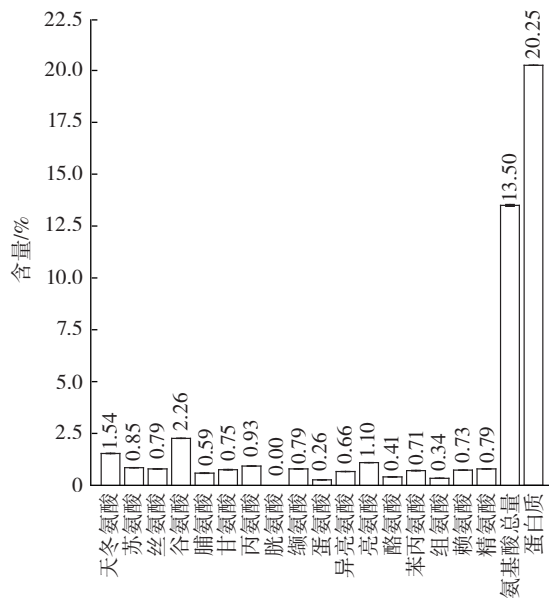


图 1 胶状鳞伞菌氨基酸含量

Fig.1 Content of amino acids in colloidal scale umbrella fungus

由图 1 可知,胶状鳞伞菌含有 16 种氨基酸(色氨酸未测,不含胱氨酸),其中 7 种必需氨基酸(essential amino acid, EAA)(赖氨酸、苯丙氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、缬氨酸)总含量为 5.10%,9 种非必需氨基酸(nonessential amino acid, NEAA)总含量为 8.40%,总氨基酸含量(total amino acid, TAA)为 13.50%。根据

联合国粮食和农业组织/联合国世界卫生组织提出的理想蛋白质中 EAA/TAA 为 40% 左右, EAA/NEAA 在 60% 以上的要求,胶状鳞伞菌的蛋白质模式(EAA 与 TAA 的比值为 37.80%, EAA 与 NEAA 的比值为 60.72%)接近理想蛋白模式^[18]。鲜味氨基酸主要是谷氨酸与天门冬氨酸 2 种^[19],胶状鳞伞菌的谷氨酸与天门冬氨酸含量均高于其他氨基酸,赋予了其独特的鲜味,因此,以胶状鳞伞菌为原料开发一系列产品的潜力很大。

2.2 胶状鳞伞菌多糖理化性质测定结果分析

2.2.1 胶状鳞伞菌多糖的基本成分分析

胶状鳞伞菌多糖的基本成分测定结果见表 2。

表 2 胶状鳞伞菌多糖基本化学成分

colloidal scale umbrella fungus				%
总糖含量	蛋白质含量	水分含量	还原糖含量	
80.92±0.56	4.17±0.49	9.76±0.34	0.09±0.00	

由表 2 可知,胶状鳞伞菌多糖总糖含量为(80.92±0.56)%,蛋白质含量为(4.17±0.49)%,水分含量为(9.76±0.34)%,还原糖含量为(0.09±0.00)%。

2.2.2 胶状鳞伞菌多糖的红外光谱分析

胶状鳞伞菌多糖的红外光谱图见图 2。

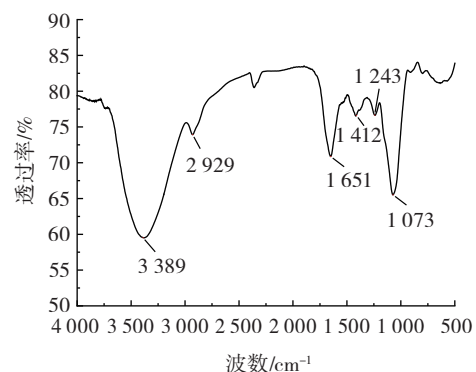


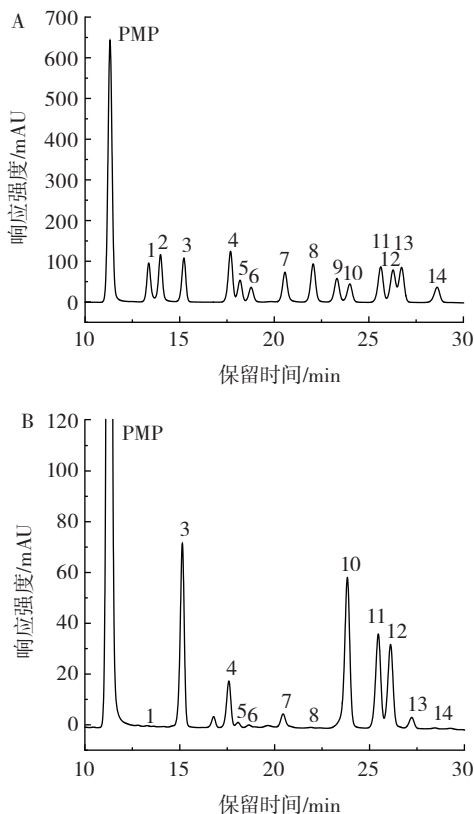
图 2 胶状鳞伞菌多糖红外光谱图

Fig.2 Infrared spectrum of polysaccharide from colloidal scale umbrella fungus

由图 2 可知,在 3389 cm⁻¹ 处显示出宽而强的吸收峰是由于胶状鳞伞菌多糖中存在大量羟基(O—H)键的伸缩振动造成的^[20];在 2929 cm⁻¹ 附近的吸收峰是由 C—H 伸缩振动引起的^[21],这两种吸收峰为多糖的典型吸收峰^[22],证明该样品为多糖。在 1651 cm⁻¹ 处出现的强吸收峰通常是羰基的伸缩振动,在 1412 cm⁻¹ 附近出现的吸收峰是 C=O 伸缩振动引起的^[23],表明胶状鳞伞菌多糖含有糖醛酸。在 1243 cm⁻¹ 与 1073 cm⁻¹ 处的吸收峰应为 C—O—C 与 C—O—H 的弯曲振动^[24-25],是吡喃糖苷的特征吸收峰,表明胶状鳞伞菌多糖中吡喃糖环的存在。

2.2.3 胶状鳞伞菌多糖的单糖组成分析

混合单糖标准品与胶状鳞伞菌多糖的 PMP 柱前衍生化高效液相色谱图见图 3。



A. 混合标准品; B. 胶状鳞伞菌多糖。1. 古洛糖醛酸; 2. 甘露糖醛酸; 3. 甘露糖; 4. 核糖; 5. 鼠李糖; 6. 氨基葡萄糖; 7. 葡萄糖醛酸; 8. 半乳糖醛酸; 9. 氨基半乳糖; 10. 葡萄糖; 11. 半乳糖; 12. 木糖; 13. 阿拉伯糖; 14. L-岩藻糖。

图 3 混合标准品和胶状鳞伞菌多糖单糖组成高效液相色谱图
Fig.3 High performance liquid chromatogram of mixed monosaccharide standard and monosaccharide composition of polysaccharide from colloidal scale umbrella fungus

由图 3 可知,胶状鳞伞菌多糖由甘露糖、核糖、鼠李糖、氨基葡萄糖、葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖、L-岩藻糖、古洛糖醛酸、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸组成,其摩尔百分比为 20.16: 5.17: 1.12: 0.70: 40.80: 12.70: 14.97: 1.88: 0.27: 0.07: 2.05: 0.10。由此可知,胶状鳞伞菌多糖以葡萄糖、甘露糖、木糖、半乳糖为主,葡萄糖含量最高,且含有 3 种糖醛酸与前面红外光谱分析的结果一致。

2.2.4 胶状鳞伞菌多糖的分子量测定结果分析

胶状鳞伞菌多糖的水相 GPC 洗脱曲线见图 4。

由图 4 可知,胶状鳞伞菌多糖呈单一峰(倒立的峰为溶剂峰),说明胶状鳞伞菌多糖分子量的分布比较均一。经计算可得胶状鳞伞菌多糖的重均分子量(M_w)、数均分子量(M_n)和峰值分子量(M_p)分别为 29 754、13 120、26 607 Da。

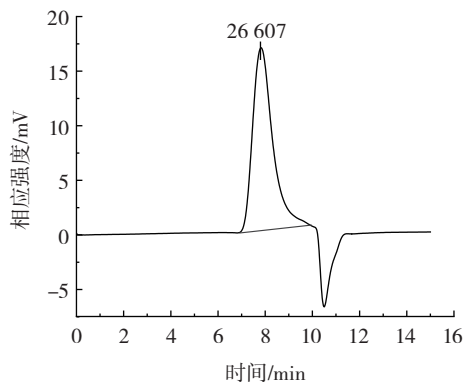
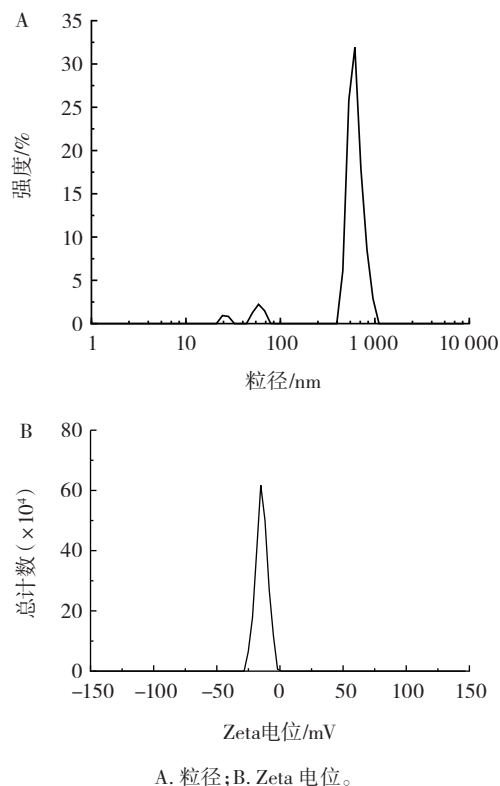


图 4 胶状鳞伞菌多糖的 GPC 洗脱曲线
Fig.4 GPC elution curve of polysaccharide from colloidal scale umbrella fungus

2.2.5 胶状鳞伞菌多糖的粒径和电位分析

胶状鳞伞菌多糖溶液的粒径及 Zeta 电位分布见图 5。



A. 粒径; B. Zeta 电位。
图 5 胶状鳞伞菌多糖的粒径和 Zeta 电位分布图
Fig.5 Particle size and Zeta potential distribution of polysaccharide from colloidal scale umbrella fungus

粒径大小与多糖的生物利用率有关。如图 5A 所示,胶状鳞伞菌多糖溶液的粒径大小分布呈现出 3 个峰,主要集中在 500~1 000 nm,少部分分布在 20~80 nm。经计算所得,多糖溶液的平均粒径为 683.0 nm。有研究表明,带负电荷的多糖比中性糖具有更高的生物活性^[26]。如图 5B 所示,胶状鳞伞菌多糖溶液表面均以负电荷为主,是一种阴离子多糖,经计算

所得 Zeta 电位为-14.4 mV。

2.3 胶状鳞伞菌多糖的体外生物活性

2.3.1 胶状鳞伞菌多糖的抗氧化活性结果分析

胶状鳞伞菌多糖抗氧化活性结果见表 3。

表 3 胶状鳞伞菌多糖抗氧化活性

Table 3 Antioxidant capacity of polysaccharide from colloidal scale umbrella fungus

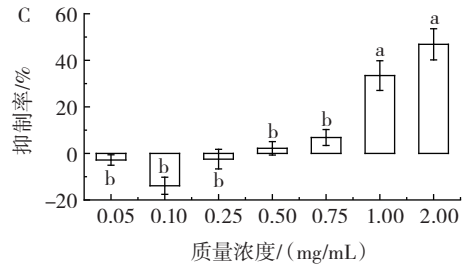
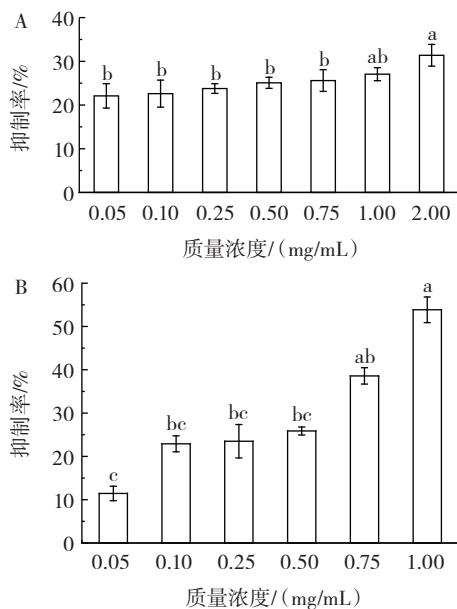
多糖质 量浓度/ (mg/mL)	DPPH 自由基 清除率/%	ABTS ⁺ 自由基 清除率/%	羟自由 基清除 率/%	超氧阴 离子自 由基清 除率/%	还原力
0.10	25.07±4.73 ^f	2.45±0.29 ^d	0.86±0.33 ^d	20.34±3.36 ^d	0.10±0.20 ^d
0.25	31.72±1.15 ^e	5.17±0.19 ^{cd}	1.64±0.52 ^{cd}	33.79±1.20 ^e	0.11±0.26 ^d
0.50	42.76±3.81 ^d	6.07±1.53 ^{bcd}	3.88±1.31 ^{cd}	39.66±1.79 ^{bc}	0.12±0.21 ^e
0.75	52.62±1.28 ^c	6.44±0.60 ^{bc}	5.43±1.23 ^c	44.75±0.90 ^{ab}	0.13±0.17 ^e
1.00	59.98±1.03 ^b	9.87±0.83 ^b	11.58±0.55 ^b	45.42±2.06 ^{ab}	0.14±1.12 ^b
2.00	78.27±1.23 ^a	15.12±0.72 ^a	16.93±0.18 ^a	48.36±0.85 ^a	0.20±0.14 ^a

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

由表 3 可知,多糖质量浓度为 0.10~2.00 mg/mL 时,胶状鳞伞菌多糖具有不同的 DPPH 自由基、ABTS⁺ 自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基清除能力及还原力,且抗氧化能力及还原力随着多糖质量浓度的提高而提升,呈浓度依赖性。在质量浓度为 2.00 mg/mL 时,胶状鳞伞菌多糖的 DPPH 自由基清除率最高,为 78.27%,对 ABTS⁺ 自由基、羟自由基、超氧阴离子自由基的最大清除率分别为 15.12%、16.93%、48.36%;多糖质量浓度为 0.10~2.00 mg/mL 时,胶状鳞伞菌多糖的还原力在 2.00 mg/mL 时达到最大值,吸光度为 0.20。以上结果均表明,胶状鳞伞菌多糖具有一定的抗氧化活性。

2.3.2 胶状鳞伞菌多糖的抗肿瘤活性分析

胶状鳞伞菌多糖对不同肿瘤细胞的抑制作用见图 6。



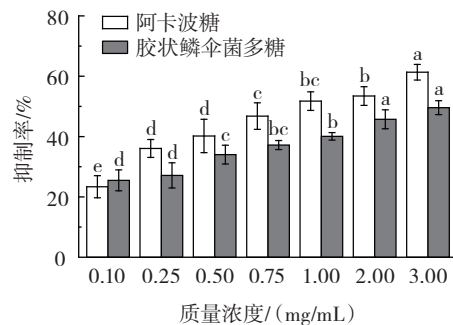
A. BGC-823 细胞;B. HepG2 细胞;C. Caco-2 细胞;不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

图 6 胶状鳞伞菌多糖对不同肿瘤细胞的抑制作用
Fig.6 Inhibition of polysaccharide from colloidal scale umbrella fungus on different tumor cells

由图 6 可知,胶状鳞伞菌多糖对 BGC-823 细胞、HepG2 细胞、Caco-2 细胞的增殖均有一定的抑制作用,且抑制效果呈浓度依赖性。其中胶状鳞伞菌多糖对 HepG-2 细胞的抑制效果最明显,抑制率最高达到了 53.86%;在质量浓度为 2.00 mg/mL 时,胶状鳞伞菌多糖对 BGC-823 细胞增殖的抑制率为 31.38%。胶状鳞伞菌多糖对 Caco-2 细胞的抑制作用与其他细胞不同,在质量浓度为 0.05~0.25 mg/mL 时其对 Caco-2 细胞并无抑制作用,反而促进 Caco-2 的增殖;在 0.50~2.00 mg/mL 质量浓度范围内,胶状鳞伞菌多糖对 Caco-2 细胞的抑制作用逐渐增强,抑制率最高达 46.89%,以上在钟瑞芳^[27]的研究中也出现了类似的现象。综上,胶状鳞伞菌多糖对肿瘤细胞的增殖有抑制效果,且对不同的肿瘤细胞增殖的抑制作用存在差异。

2.3.3 胶状鳞伞菌多糖对 α-淀粉酶的抑制作用分析

胶状鳞伞菌多糖对 α-淀粉酶的抑制作用见图 7。



不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$)。

图 7 胶状鳞伞菌多糖对 α-淀粉酶的抑制作用
Fig.7 Inhibition of polysaccharide from colloidal scale umbrella fungus on α-amylase

由图 7 可知,胶状鳞伞菌多糖具有一定的抑制 α-淀粉酶活性。随着胶状鳞伞菌多糖质量浓度的增加,阿卡波糖、胶状鳞伞菌多糖对 α-淀粉酶的抑制率逐渐升高;在胶状鳞伞菌多糖质量浓度为 3.00 mg/mL 时,抑制率最高为 49.59%;作为阳性对照的阿卡波糖在此浓度下表现出更高的抑制率,为 61.33%,说明胶状鳞

伞菌多糖可作为潜在活性物质抑制 α -淀粉酶活性。

3 结论

本研究以胶状鳞伞菌为原料,通过水提醇沉法得到胶状鳞伞菌多糖,对胶状鳞伞菌多糖的组成成分、结构及体外生物活性进行了初步的研究。结果表明,胶状鳞伞菌多糖具有典型的多糖特殊红外光谱吸收峰,含有吡喃糖苷与糖醛酸,是一种阴离子多糖,分子量为 29 754 Da。胶状鳞伞菌多糖由甘露糖、核糖、鼠李糖、氨基葡萄糖、葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖、L-岩藻糖、古洛糖醛酸、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸组成,葡萄糖含量最高。抗氧化结果表明胶状鳞伞菌多糖对 DPPH 自由基、羟自由基、ABTS⁺ 自由基以及超氧阴离子自由基均具有一定的清除能力,也具有还原力。抗肿瘤结果表明胶状鳞伞菌多糖对肿瘤细胞 BGC-823、HepG2、Caco-2 的增殖活性均有抑制作用。降血糖结果表明,胶状鳞伞菌多糖对 α -淀粉酶有抑制效果,具有一定的降血糖活性。上述研究结果可为胶状鳞伞菌及其多糖的开发和应用提供参考,关于胶状鳞伞菌多糖的理化性质、结构等与其生物活性之间的构效关系还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] SUN Y J, HE H Q, WANG Q, et al. A review of development and utilization for edible fungal polysaccharides: Extraction, chemical characteristics, and bioactivities[J]. *Polymers*, 2022, 14(20): 4454.
- [2] MURPHY E J, FEHRENBACH G W, ABIDIN I Z, et al. Polysaccharides - naturally occurring immune modulators[J]. *Polymers*, 2023, 15(10): 2373.
- [3] GUO R, CHEN M, DING Y Y, et al. Polysaccharides as potential anti-tumor biomacromolecules - A review[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 838179.
- [4] GONG P, LONG H, GUO Y X, et al. Isolation, structural characterization, and hypoglycemic activities *in vitro* of polysaccharides from *Pleurotus eryngii*[J]. *Molecules*, 2022, 27(20): 7140.
- [5] MA G X, DU H J, HU Q H, et al. Health benefits of edible mushroom polysaccharides and associated gut microbiota regulation[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(24): 6646-6663.
- [6] FERNANDES P A R, COIMBRA M A. The antioxidant activity of polysaccharides: A structure-function relationship overview[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2023, 314: 120965.
- [7] SANG Y M, HAN X Z, GAO Y C, et al. Research progress on biological activities of polysaccharides from edible fungus[J]. *Starch-Stärke*, 2023, 75(5/6): 2200219.
- [8] 吕欣彧, 赵文文, 陈喜君. 食用菌多糖在功能性酸奶中的应用研究进展[J]. *食用菌*, 2022, 44(6): 6-9.
LÜ Xinyu, ZHAO Wenwen, CHEN Xijun. Research progress on fungal polysaccharides compounded with probiotics to ferment functional yogurt[J]. *Edible Fungi*, 2022, 44(6): 6-9.
- [9] 韩晓磊, 方志辉, 梁珏钦, 等. 沅江市芦苇食用菌产业发展现状、模式与建议[J]. *湖南农业科学*, 2021(11): 96-99.
HAN Xiaolei, FANG Zhihui, LIANG Jueqin, et al. Development

- status, mode and suggestion of edible fungi industry in Yuanjiang [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2021(11): 96-99.
- [10] 韩晓磊, 梁珏钦, 方志辉, 等. 魔芋葡甘聚糖涂膜处理对采后胶状鳞伞菌保鲜效果的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(4): 341-349.
HAN Xiaolei, LIANG Jueqin, FANG Zhihui, et al. Effect of konjac glucomannan coating treatment on fresh-keeping effect of postharvest colloidal scale umbrella fungus[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(4): 341-349.
 - [11] 罗健夫. 芦菇吹响芦苇产业转型号角[J]. *林业与生态*, 2020(9): 33-34.
LUO Jianfu. Reed mushroom blows the horn of reed industry transformation[J]. *Forestry and Ecology*, 2020(9): 33-34.
 - [12] 刘锦程, 弓志青, 杨鹏, 等. 桑黄营养成分、活性成分及多糖性质分析[J]. *食品工业科技*, 2023, 9(22): 241-248.
LIU Jincheng, GONG Zhiqing, YANG Peng, et al. Analysis of nutritional components, active components and polysaccharide properties of *Phellinus igniarius*[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 9(22): 241-248.
 - [13] 秦丹丹, 曹慧馨, 白洋, 等. 黑木耳黑枸杞复合饮料研制及其体外抗氧化性[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(3): 108-116.
QIN Dandan, CAO Huixin, BAI Yang, et al. Study on preparation of *Auricularia auricular* and *Lycium ruthenicum* Murr. compound beverage and its antioxidant activity[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(3): 108-116.
 - [14] 严尚隆. 长松藻多糖降解、结构解析及生物活性研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
YAN Shanglong. Study on degradation, structure analysis and biological activity of polysaccharide from *Pinus sylvestris*[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
 - [15] 向瑞琪, 谢锋, 谭红, 等. 三种食用菌多糖的基本结构与抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(14): 69-76.
XIANG Ruiqi, XIE Feng, TAN Hong, et al. Study on basic structure and antioxidant activity of polysaccharides from three edible fungi[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(14): 69-76.
 - [16] 唐方媛. 双孢菇多糖的分子结构及生物活性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
TANG Fangyuan. Study on the molecular structures and biological activities of polysaccharides from *Agaricus bisporus*[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.
 - [17] CHEN C, YOU L J, ABBASI A M, et al. Characterization of polysaccharide fractions in mulberry fruit and assessment of their antioxidant and hypoglycemic activities *in vitro*[J]. *Food & Function*, 2016, 7(1): 530-539.
 - [18] FORBES G. Joint FAO/WHO ad hoc expert committee, energy and protein requirements, who technical report series 522[J]. *JAMA Pediatrics*, 1974, 127: 296-297.
 - [19] 罗晓莉, 张沙沙, 严明, 等. 云南 8 种栽培食用菌蛋白质和氨基酸分析及营养价值评价[J]. *食品工业*, 2021, 42(8): 328-332.
LUO Xiaoli, ZHANG Shasha, YAN Ming, et al. Protein and amino acid analysis and nutritional value evaluation of eight cultivation edible fungi in Yunnan Province[J]. *The Food Industry*, 2021, 42(8): 328-332.
 - [20] ZHANG Y, LIU Y H, NI G Y, et al. Sulfated modification, basic characterization, antioxidant and anticoagulant potentials of polysaccharide from *Sagittaria trifolia*[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2023, 16(7): 104812.
 - [21] MUHAXI M, LIU F, NG T B. Structural characterization and *in vitro* hepatoprotective activity of a novel antioxidant polysaccharide

- from fruiting bodies of the mushroom *Pleurotus ferulae*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 243: 125124.
- [22] WANG L Y, LI K, CUI Y D, et al. Preparation, structural characterization and neuroprotective effects to against H₂O₂-induced oxidative damage in PC12 cells of polysaccharides from *Pleurotus ostreatus*[J]. Food Research International, 2023, 163: 112146.
- [23] 姚月华, 唐宁, 应熙锐, 等. 红萍多糖结构特征、流变特性及抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 154-159, 172.
YAO Yuehua, TANG Ning, YING Xirui, et al. Characterization, rheological study and antioxidant activities of polysaccharide from *Azolla*[J]. Food and Machinery, 2022, 38(3): 154-159, 172.
- [24] 马高兴, 王晗, 杨文建, 等. 不同提取工艺对杏鲍菇多糖结构特征及免疫活性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 42-49.
MA Gaoxing, WANG Han, YANG Wenjian, et al. Effects of different extraction processes on structural characteristic and immunomodulatory activity of *Pleurotus eryngii* polysaccharide[J]. Food Science, 2022, 43(17): 42-49.
- [25] KUANG M T, XU J Y, LI J Y, et al. Purification, structural characterization and immunomodulatory activities of a polysaccharide from the fruiting body of *Morchella sextelata*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 213: 394-403.
- [26] AYYASH M, ABU-JDAYIL B, ITSARANUWAT P, et al. Characterization, bioactivities, and rheological properties of exopolysaccharide produced by novel probiotic *Lactobacillus plantarum* C70 isolated from camel milk[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 144: 938-946.
- [27] 钟瑞芳. 梨菇多糖的分离纯化、结构表征及生物活性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
ZHONG Ruifang. Isolation, purification, structural characterization and biological activity of polysaccharide from *Pleurotus ostreatus* [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.

加工编辑: 刘艳美
收稿日期: 2023-10-09

(上接第 22 页)

- SHEN Kaifeng, LIU Qi, ZHU Qi. Study on the auxiliary hypoglycemic efficacy of combined extract of *cy-clocarya paliurus*, *Ganoderma*, and *Dendrobium*[J]. Strait Pharmaceutical Journal, 2020, 32(6): 18-21.
- [17] 唐茹萌, 焦文雅, 桑亚新, 等. 裙带菜多糖体外和体内降血脂活性[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 142-149.
TANG Rumeng, JIAO Wenya, SAN Yaxin, et al. *In vitro* and *in vivo* hypolipidemic effect of *Undaria pinnatifida* polysaccharide[J]. Food Science, 2022, 43(1): 142-149.
- [18] 杨玉洁, 刘静宜, 谭艳, 等. 多糖降血糖活性构效关系及作用机制研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 355-363.
YANG Yujie, LIU Jingyi, TAN Yan, et al. Progress in understanding the structure - activity relationship and hypoglycemic mechanism of polysaccharides[J]. Food Science, 2021, 42(23): 355-363.
- [19] RAJAN L, PALANISWAMY D, MOHANKUMAR S K. Targeting obesity with plant-derived pancreatic lipase inhibitors: A comprehensive review[J]. Pharmacological Research, 2020, 155: 104681.
- [20] 周婷. 黄杞叶醇提物生物活性研究及功能性食品开发[D]. 成都: 成都大学, 2022.
ZHOU Ting. Study on biological activity of alcohol extract from *Lycium barbarum* leaves and development of functional food[D]. Chengdu: Chengdu University, 2022.
- [21] 肖晔, 卢芯仪, 任天宇, 等. 长茎葡萄蕨藻提取物对胰脂肪酶与 α -葡萄糖苷酶的抑制作用[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(3): 17-25.
XIAO Ye, LU Xinyi, REN Tianyu, et al. Inhibitory effects of *Caulerpa lentillifera* extracts on pancreatic lipase and α -glucosidase[J]. Food Research and Development, 2023, 44(3): 17-25.
- [22] HEYMSFIELD S B, WADDEN T A. Mechanisms, pathophysiology, and management of obesity[J]. New England Journal of Medicine, 2017, 376(3): 254-266.
- [23] TU J, DENG L Q, LING Y, et al. Transcriptome profiling reveals multiple pathways responsible for the beneficial metabolic effects of *Smilax glabra* flavonoids in mouse 3T3-L1 adipocytes[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2020, 125: 110011.
- [24] WEI C Y, WANG J J, DUAN C C, et al. Aqueous extracts of Se-enriched *Auricularia auricular* exhibits antioxidant capacity and attenuate liver damage in high-fat diet/streptozotocin-induced diabetic mice[J]. Journal of Medicinal Food, 2020, 23(2): 153-160.
- [25] GUO X Q, ZHOU T, XING H X, et al. Antioxidant and *in vivo* hypoglycemic activities of ethanol extract from the leaves of *Engelhardtia roxburghiana* wall, a comparative study of the extract and astilbin[J]. Foods, 2023, 12(5): 927.

责任编辑: 张璐
收稿日期: 2024-04-18