

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.022

白玉菇多糖理化性质及免疫活性研究

唐方媛^{1,2}, 张娅娣^{2,3}, 刘咏², 王军辉^{1,2,3}

(1. 合肥工业大学 农产品生物化工教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601; 3. 合肥工业大学 安徽省农产品精深加工重点实验室, 安徽 合肥 230601)

摘要:文章采用常温水提和热水浸提法从白玉菇子实体中提取常温水提多糖(WHN)和沸水浸提多糖(WHB),通过 DEAE-Cellulose 离子交换层析柱进行分离纯化获得 6 种分级组分 WHN1、WHN2、WHN3、WHB1、WHB2、WHB3。理化性质结果表明:WHN 和 WHB 的总糖质量分数为 67.72% 和 80.54%, 分级组分总糖质量分数为 93.48%~98.77%, 含有少量蛋白质和糖醛酸;多糖组分的单糖摩尔分数各不相同, WHN、WHN1、WHN2、WHN3 是以半乳糖和葡萄糖为主的杂多糖, WHB、WHB1、WHB2、WHB3 组分中葡萄糖占比均最大, WHB3 为葡聚糖。采用药理学模型考察多糖对鼠巨噬细胞增殖活性、吞噬活性以及 NO 释放量的影响, 结果表明, 多糖 WHN1 和 WHB3 在体外细胞实验中表现出较好的免疫调节活性。研究结果为白玉菇多糖在药物和功能性食品中的应用提供理论基础。

关键词:白玉菇; 多糖; 巨噬细胞; 免疫活性

中图分类号: TS201.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2024)02-0283-06

Physicochemical properties and immune activities of polysaccharides from white *Hypsizygus marmoreus*

TANG Fangyuan^{1,2}, ZHANG Yadi^{2,3}, LIU Yong², WANG Junhui^{1,2,3}

(1. Engineering Research Center of Bio-process of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 3. Key Laboratory for Agricultural Products Processing of Anhui Province, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

Abstract: In this study, the polysaccharides WHN and WHB were isolated from the fruiting bodies of white *Hypsizygus marmoreus* by water extraction at normal and boiling temperatures. After purification by DEAE-Cellulose ion exchange chromatography, six fractions WHN1, WHN2, WHN3, WHB1, WHB2 and WHB3 were obtained. The results of physicochemical properties showed that the total sugar content of WHN and WHB was 67.72% and 80.54%, while the total sugar content of fractions ranged from 93.48% to 98.77%. The content of protein and uronic acid was little. The mole fraction of monosaccharide in eight components was different. WHN, WHN1, WHN2 and WHN3 were heteropolysaccharides dominated by galactose and glucose, and the highest proportion of glucose was found in WHB, WHB1, WHB2 and WHB3, among which WHB3 was glucan. Pharmacological models were used to investigate the effects of polysaccharides on the proliferation activity, phagocytosis activity and NO release of macrophages in mice. It was revealed that polysaccharides WHN1 and WHB3 showed better immunomodulatory activities in *in vitro* cell experiments. The results provide a theoretical basis for the application of white *Hypsizygus marmoreus* polysaccharides in medicine and

收稿日期: 2021-07-19; 修回日期: 2021-08-22

基金项目: 安徽省科技重大专项资助项目(201903a06020024)

作者简介: 唐方媛(1997—), 女, 安徽滁州人, 合肥工业大学硕士生;

刘咏(1968—), 女, 安徽凤阳人, 合肥工业大学教授, 硕士生导师;

王军辉(1976—), 男, 广西陆川人, 博士, 合肥工业大学教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: juihuiwang@hfut.edu.cn.

functional food.

Key words: white *Hypsizygus marmoreus*; polysaccharides; macrophages; immune activity

0 引 言

食用菌指子实体硕大、可供食用的大型真菌^[1],因独特的风味、营养及保健功能受到研究人员的广泛关注。多糖是真菌发挥生理活性的重要活性物质^[2],是细胞壁的组成、能量储备的细胞内包涵体和细胞外用于保护细胞的附着物^[3],在增强免疫、抗氧化、抗炎、抗肿瘤等方面具有显著的药理学功效^[4-7]。多糖作为天然免疫调节剂,通过激活补体系统和免疫细胞,促进多种细胞因子的释放从而诱导免疫调节活性^[8],成为功能食品和药物领域的研究热点。巨噬细胞是参与机体免疫的一种重要效应细胞,在先天性和适应性免疫反应中可发挥吞噬、呈递抗原和分泌细胞因子等作用^[9]。

白玉菇又名白玉蕈(*white Hypsizygus marmoreus*),属担子菌亚门、层菌纲、伞菌目、白蘑科、玉蕈属,是真姬菇的一种稳定白色变异体菌株^[10]。其色泽剔透,口感优越,深受消费者青睐。白玉菇富含多种维生素和矿物质,多糖质量分数达 7.50%,高于其他食药用菌(如香菇、猴头菇、竹荪、金耳、猪苓等),是一种高蛋白、低脂肪的功能性食品^[11]。研究表明,具有较好生物活性的真菌提取物大多来自担子菌纲和子囊菌纲^[12]。因此,对白玉菇多糖进行生物活性的研究具有重要意义。

本文对白玉菇子实体多糖进行多层次提取,在分离纯化的基础上通过药理学模型,研究白玉菇多糖对巨噬细胞增殖、吞噬能力和 NO 释放量的影响,评价其对机体的免疫活性,筛选出较优的活性组分,为深入研究白玉菇多糖免疫调节机制以及开发多糖资源提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜白玉菇子实体购于安徽省合肥市某大型市场;无水乙醇、正丁醇、三氯甲烷、三氟乙酸、硼氢化钠、氯仿等均为分析纯,购于国药集团化学试剂有限公司;DEAE-Cellulose 购于索莱宝科技有限公司;DMEM 培养基、脂多糖、胎牛血清购于 Hyclone 公司;NO 检测试剂盒购自上海碧云天生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

酶标仪(Thermo Fisher Scientific 公司);旋转蒸发仪(上海申胜生物技术有限公司);冷冻干燥机(北京博医康实验仪器有限公司);气相色谱仪(Agilent 公司);CO₂ 培养箱(日本三洋电机株式会社)。

1.3 白玉菇多糖的提取

新鲜白玉菇子实体经冷冻干燥后,使用高速药品粉碎机粉碎,过 200 目筛后置于索氏提取器中在 90 °C 无水乙醇脱色脱脂 24 h,烘干备用。

白玉菇粉末以 1:20 的料液比在 0.9% 氯化钠溶液常温提取 12 h,重复提取 3 次。提取液离心去除不溶物,上清液浓缩后用 Sevag 试剂脱蛋白,重复数次后取分液漏斗上层溶液减压蒸馏,除去有机溶液。浓缩液用 30% H₂O₂ 脱色后于流水和去离子水中分别透析 3 d,透析液冻融离心后冷冻干燥得到白玉菇常温温水提多糖(WHN)。

常温提取残渣以 1:20 的料液比在 0.9% 氯化钠溶液 100 °C 提取 2 h,离心除去不溶物,重复提取 2 次。上清液经浓缩、脱蛋白、脱色、透析和冻融后冷冻干燥得到白玉菇沸水浸提多糖(WHB)。

称取 120 mg 白玉菇多糖溶解于 10 mL 去离子水中,离心后用移液管将上清液缓慢滴加到预装完成的 DEAE-Cellulose 阴离子交换层析柱(3.0 cm×40 cm)中,依次用不同浓度的氯化钠溶液(0、0.1、0.2 mol/L)逐步洗脱,流速 2 mL/min。自动收集洗脱液(10 mL/管),并通过苯酚-硫酸法测定多糖质量分数。收集多糖质量分数高的峰,冻干得到纯化多糖。

1.4 白玉菇多糖的理化性质测定

总糖质量分数采用苯酚-硫酸法^[13]测定其在 490 nm 处的吸光度,以葡萄糖为标准品,根据建立的标准曲线计算样品中总糖质量分数。

蛋白质质量分数采用考马斯亮蓝法^[14]测定其在 595 nm 处的吸光度,以牛血清白蛋白为标准品,根据标准曲线计算样品中蛋白质质量分数。

糖醛酸质量分数采用间羟基联苯法^[15]测定其在 520 nm 处的吸光度,以半乳糖醛酸作为标准品,根据标准曲线计算样品中糖醛酸质量分数。

根据文献^[13]的方法稍作修改进行单糖组成分析。取 5 mg 待测样品置于安瓿管中,加入三

氟乙酸 110 °C 水解 4 h 后,减压蒸干。将完全水解后的样品在 NaBH₄ 水溶液中还原 3 h,25% 的醋酸溶液中和后减压蒸干,于 115 °C 烘箱中干燥 20 min。加入等体积的乙酸酐和吡啶,在密封条件下 100 °C 反应 1 h。减压蒸干至有粉末物质出现,加入适量的氯仿和去离子水,萃取至水层澄清。用无水硫酸钠除去有机相中水分,过有机滤膜(孔径为 0.22 μm)后将样品溶液装入瓶中于气相色谱仪中进行检测。根据标准品的出峰时间判定多糖中的单糖成分,以峰面积计算单糖的摩尔分数。

1.5 多糖的免疫活性研究

小鼠巨噬细胞株 RAW264.7 细胞于 DMEM 培养基(含 10% 小牛血清、100 U/mL 青霉素和 100 U/mL 链霉素)中,37 °C 和 5% CO₂ 培养箱条件下培养。

采用 MTT 法测定白玉菇多糖对小鼠巨噬细胞 RAW264.7 的增殖活性的影响。用 DMEM 培养液将对数生长期细胞密度稀释至 1.0×10^5 个/mL,等量接种 150 μL 于 96 孔板中,孵育 24 h。加入 50 μL 不同质量浓度的多糖溶液(终质量浓度为 0、50、100、200、500 μg/mL),继续培养 24 h 后分别加入 20 μL MTT 试剂(5 mg/mL),继续培养 4 h。吸除孔板中的液体,快速加入 200 μL DMSO,室温振荡 10 min,使用酶标仪在 570 nm 处测定吸光度。空白对照组为 DMEM 培养基,阳性对照组为脂多糖 LPS。增值指数计算公式如下:

$$\text{增值指数} = A_1 / A_0,$$

其中: A_1 为样品在 570 nm 处的吸光度; A_0 为空白对照在 570 nm 处的吸光度。

通过 NO 检测试剂盒测定白玉菇多糖对 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞中 NO 产生的影响。按照上述方法培养 48 h 后,吸取 100 μL 培养液于新板中,加入 Griess 试剂,静置 10 min;酶标仪 540 nm 处测定吸光度。空白对照组为 DMEM 培养基,阳性对照组为 LPS。根据标准品 NaNO₂ 绘制的标准曲线计算 NO 释放量。

按照上述方法培养 48 h 后移除培养液,PBS 清洗 2 次,加入 100 μL 中性红溶液,培养 4 h 后移除多余溶液;PBS 清洗 2 次,加入细胞裂解液,室温放置 1 h;酶标仪 540 nm 下测量吸光度。空白对照组为 DMEM 培养基,阳性对照组为 LPS。

1.6 数据处理

实验至少重复 3 次,实验数据以(平均值 ±

标准差)形式表示。采用 Origin 8.0 软件绘制图表,利用 SPSS 21.0 软件进行数据统计学处理,使用 t 检验法进行数据比较。* 表示 $P < 0.05$ 差异显著,** 表示 $P < 0.01$ 差异极显著。

2 结果分析

2.1 白玉菇多糖的分离纯化

白玉菇子实体粉末经脱色脱脂后,常温提取液浓缩、脱蛋白、脱色、透析后得到多糖 WHN。常温提取残渣经沸水浸提、离心、浓缩、脱蛋白、脱色、透析后得到多糖 WHB。WHN 和 WHB 分别通过 DEAE-Cellulose 离子交换层析柱进行分离纯化,如图 1 所示。经 0、0.1、0.2 mol/L NaCl 溶液洗脱后共获得 6 个洗脱片段,浓缩、透析和冷冻干燥后,分别命名为 WHN1、WHN2、WHN3、WHB1、WHB2、WHB3。

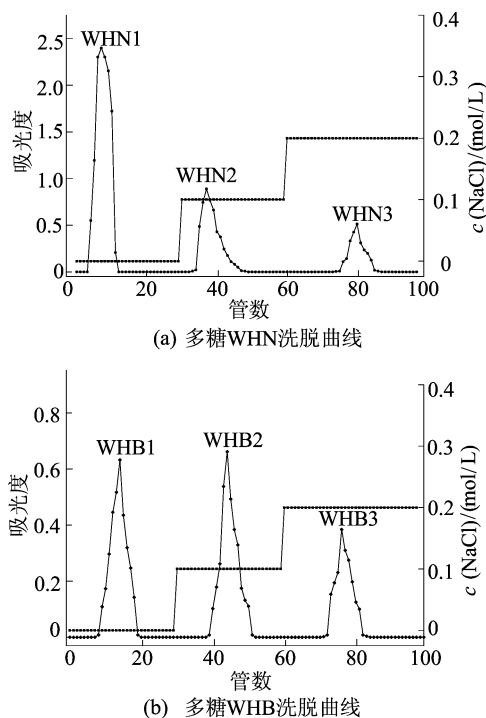


图1 DEAE-Cellulose 离子交换层析柱洗脱曲线

2.2 白玉菇多糖化学组成分析

各组分的单糖组成及其成分分析结果见表 1 所列。从表 1 可以看出,WHN 和 WHB 的总糖质量分数分别为 67.72%、80.54%,蛋白质质量分数分别为 28.65%、15.63%,糖醛酸质量分数分别为 2.13%、0.41%。随着提取温度的增加,更有益于多糖的溶出。2 种粗多糖经分离纯化后得到 6 种组分,总糖质量分数为 93.48% ~ 98.77%,同时蛋白质、糖醛酸得到有效洗脱,质量

分数较小。

单糖组成分析结果显示 2 种粗多糖均为含有 6 种单糖的杂多糖。WHN 中半乳糖的摩尔分数最大,达到 49.8%。WHB 的单糖组成以葡萄糖为主,摩尔分数为 79.8%。组分间差异可能是由于 WHN 是在温和条件下提取到的胞外多糖,WHB 为剧烈条件下提取到的不同部位多糖。常温水提多糖 WHN 的半乳糖随着 DEAE-Cellulose 离子交换层析柱的洗脱逐渐减少,WHN1、

WHN2、WHN3 中半乳糖的摩尔分数分别为 39.4%、35.6%、26.5%,同时各组分间葡萄糖的摩尔分数增加到 34.3%、25.8%、25.4%。WHB 的各分级组分的单糖组成以葡萄糖为主,摩尔分数分别为 78.5%、90.8%、100.0%。结果显示 WHB3 为葡聚糖,WHB1 和 WHB2 为含有葡萄糖和少量的甘露糖、半乳糖或阿拉伯糖的杂多糖。比较 8 种多糖组分发现,单糖组成差异可能与提取温度及纯化方法有关。

表 1 白玉菇粗多糖和分级组分的理化性质分析

组分	x						w		
	鼠李糖	阿拉伯糖	木糖	甘露糖	葡萄糖	半乳糖	总糖	糖醛酸	蛋白质
WHN	15.2	0.9	0.8	18.8	14.6	49.8	67.72	2.13	28.65
WHN1	4.6	2.3	2.3	19.3	34.3	39.4	96.89	0.67	1.82
WHN2	8.4	17.2	2.8	14.3	25.8	35.6	93.48	1.07	—
WHN3	18.7	5.8	7.4	16.2	25.4	26.5	95.90	1.45	—
WHB	12.1	0.7	0.7	2.6	79.8	4.2	80.54	0.41	15.63
WHB1	—	3.2	—	6.2	78.5	12.1	97.26	0.08	—
WHB2	—	—	—	3.5	90.8	5.7	98.77	0.36	—
WHB3	—	—	—	—	100.0	—	98.64	—	—

2.3 白玉菇多糖的免疫活性分析

多糖 WHN 及其 3 种分级组分对多巨噬细胞增殖活性的影响如图 2a 所示。从图 2a 可以看出:在实验质量浓度范围内,与空白对照组相比,WHN 及其 3 种分级组分对 RAW264.7 细胞均无毒性,表现为促进细胞增殖且增殖指数随多糖质量浓度的增大呈剂量依赖性减小;WHN1、WHN2、WHN3 在实验质量浓度范围内极显著地提高了细胞增殖指数($P < 0.01$),20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 处理时增殖指数最大,分别达到 1.48、1.25、1.27,3 种分离组分对细胞增殖活性的促进作用均高于 WHN,其中 WHN1 最优。

WHB 及其 3 种分级组分对巨噬细胞增殖活性的影响如图 2b 所示。从图 2b 可以看出,在实验质量浓度范围内,与空白对照组相比,4 种组分对 RAW264.7 无细胞毒性,均显著促进细胞增殖($P < 0.01$)。其中,WHB 在质量浓度为 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时增殖指数达到最大值 1.50。WHB1 处理的细胞增殖活性随着多糖质量浓度的增大呈剂量依赖性减小,20 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 处理时增殖指数最大为 1.32。50 $\mu\text{g}/\text{mL}$ WHB2 和 WHB3 处理时细胞增殖指数最大,分别为 1.37 和 1.53,其中 WHB3 在实验质量浓度范围内表现出最佳的增殖活性。比较 8 种多糖片段,多糖对细胞增殖活性的影响可能与葡萄糖的摩尔分数有关。

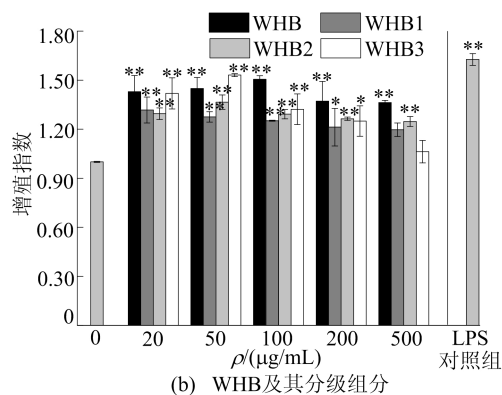
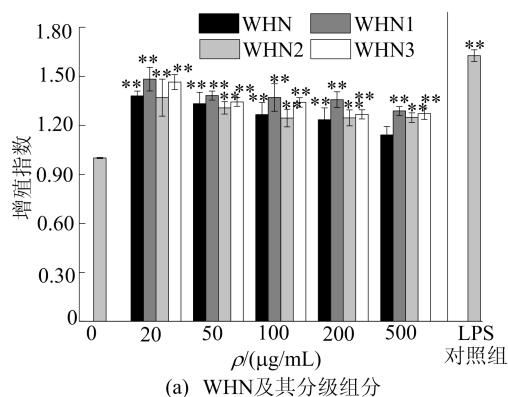
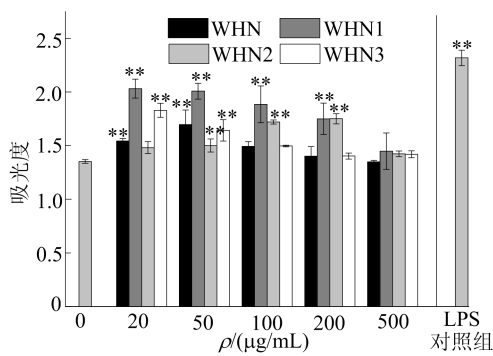


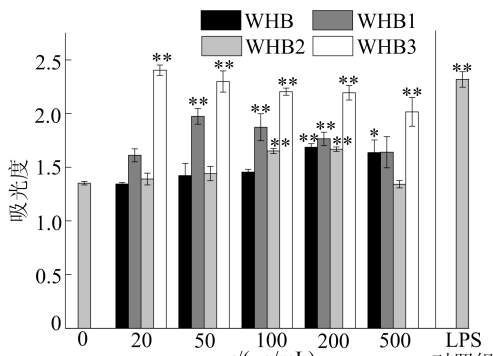
图 2 白玉菇多糖对巨噬细胞增殖活性的影响

研究表明,巨噬细胞的吞噬作用在免疫反应中起重要作用,是免疫反应中的第 1 个关键步

骤^[16]。8 种多糖组分对 RAW264.7 细胞吞噬作用的影响如图 3 所示。从图 3a 可以看出,WHN 及其分级组分均在不同程度上刺激提升了巨噬细胞 RAW264.7 的吞噬能力。在多糖质量浓度为 20~50 μg/mL,与空白对照相比,WHN 和 WHN3 极显著地促进细胞吞噬作用($P<0.01$)。在实验质量浓度范围内,WHN1 促进巨噬细胞 RAW264.7 吞噬的活性随着质量浓度的增加而减小,20 μg/mL 时,吞噬能力最佳,与空白对照组相比,差异极显著($P<0.01$)。结果表明,WHN1 在各质量浓度下促进巨噬细胞 RAW264.7 吞噬作用的活性优于其他 2 种组分。



(a) WHN 及其分级组分



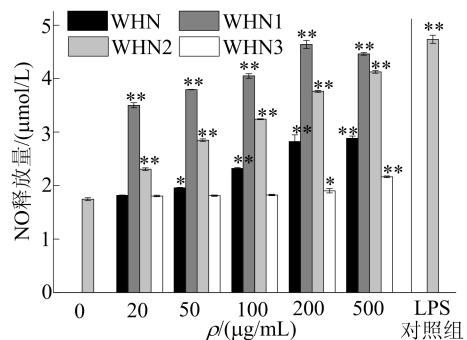
(b) WHB 及其分级组分

图 3 白玉菇多糖对巨噬细胞吞噬活性的影响

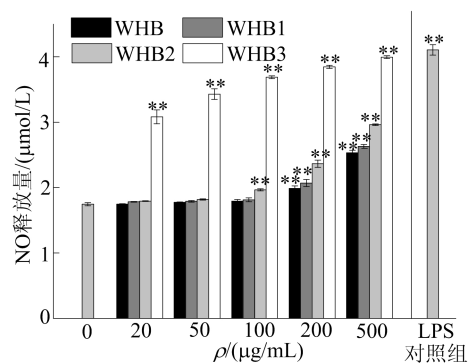
从图 3b 可以看出,随着多糖 WHB 质量浓度的增加,细胞吞噬作用增强,在质量浓度为 200 μg/mL 时,巨噬细胞 RAW264.7 的吞噬活性显著提高($P<0.01$),质量浓度超过 200 μg/mL 后,吞噬活性随之减小。WHB1 对吞噬作用的促进作用随着多糖质量浓度的增加先增大后减小,在 50 μg/mL 时,吞噬活性达到最大,差异极显著($P<0.01$);WHB2 对巨噬细胞 RAW264.7 吞噬能力的促进作用与 WHB 有相似的趋势,在多糖质量浓度为 200 μg/mL 时,细胞吞噬能力最佳,

与空白对照组相比,显示出极显著差异($P<0.01$)。WHB3 对 RAW264.7 细胞吞噬能力的作用随着多糖质量浓度的增加显示出剂量依赖性减弱,20 μg/mL 时,吞噬活性达到最大 2.40,与空白对照组相比差异极显著($P<0.01$)。在实验范围的各质量浓度下,WHB3 的吞噬活性优于其他组分。

NO 是巨噬细胞攻击异物时释放的主要活性氧(reactive oxide species, ROS)之一^[17]。8 种组分对巨噬细胞 NO 释放量的影响如图 4 所示。从图 4a 可以看出,在实验质量浓度范围内,实验组与空白对照组相比均表现为促进 NO 产生。其中水提组分 WHN、WHN2、WHN3 对 NO 释放量的影响随着多糖质量浓度的增大呈剂量依赖性增大,质量浓度为 500 μg/mL 时 NO 释放量达到最大值,分别为 2.89、4.12、2.16 μmol/L。WHN1 刺激 RAW264.7 细胞释放的 NO 释放量呈先增大后降低的趋势,在 200 μg/mL 时达到最大值 4.64 μmol/L,促进 NO 产生效果优于其他组分。



(a) WHN 及其分级组分



(b) WHB 及其分级组分

图 4 白玉菇多糖对巨噬细胞 NO 释放量的影响

热水提组分 WHB、WHB1、WHB2 刺激 RAW264.7 细胞 NO 释放的效果与多糖质量浓度成正比。在各实验质量浓度下,WHB3 刺激 RAW264.7 细胞释放 NO 与空白对照组相比均差

异极显著($P < 0.01$),与多糖 WHB1 和 WHB2 相比,WHN3 显示出最佳的刺激活性,在 500 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 时达到最大值 4.11 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 。

3 结 论

本文对白玉菇常温水提多糖 WHN 和沸水浸提多糖 WHB 分离纯化出 6 种分级组分 WHN1、WHN2、WHN3、WHB1、WHB2、WHB3,并对这 8 种组分进行理化性质和免疫活性的筛选。6 种分级组分总糖质量分数为 93.48%~98.77%,高于粗多糖,且蛋白质和糖醛酸的质量分数明显降低。受提取温度影响,单糖组成结果显示 8 种组分的单糖摩尔分数均不相同,其中 WHN 及其分级组分是以半乳糖和葡萄糖为主的杂多糖,WHB、WHB1、WHB2 是以葡萄糖为主的杂多糖,WHB3 为葡聚糖。体外免疫实验中,各组分对 RAW264.7 均无细胞毒性,表现为促进细胞增殖和吞噬,其中 WHN1 和 WHB3 处理的巨噬细胞表现出优异的免疫调节活性。WHN1 在 200 $\mu\text{g}/\text{L}$ 时 NO 释放量为 4.64 $\mu\text{mol}/\text{L}$,500 $\mu\text{g}/\text{L}$ WHN3 处理时 NO 释放量为 4.11 $\mu\text{mol}/\text{L}$,较好的免疫活性可能与高摩尔分数的葡萄糖有关。

研究结果从理化性质和免疫活性 2 个方面筛选出 2 种活性较好的白玉菇多糖,为其在药物和功能性食品的应用提供理论基础。文献[1]指出,具有 1,3- β -Glc 和 1,6- β -Glc 连接方式的香菇多糖和平菇多糖,通过促进细胞吞噬及上调 NO 释放来发挥较好的免疫调节活性,白玉菇多糖结构对免疫发生机制与信号通路调控的关系有待进一步研究。

[参 考 文 献]

- [1] 刘苏,姜玥,罗建平,等. 5 种食用菌多糖理化性质及免疫活性的比较研究[J]. 食品科学,2015,36(13):252-256.
- [2] 董楠,李明智,徐德昌,等. 5 种食用菌多糖及复配多糖对 RAW264.7 细胞的免疫调节作用[J]. 食品研究与开发,2021,42(9):1-10.
- [3] ŽIFČKOVÁ L, BALDRIAN P. Fungal polysaccharide monoxygenases: new players in the decomposition of cellulose [J]. Fungal Ecology, 2012, 5(5): 481-489.
- [4] 黄青,李丽媛,刘晴晴,等. 灵芝多糖和猪苓多糖及其复方的免疫调节作用研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(17): 275-282.
- [5] 江和栋,牛仙,万仁口,等. 灵芝孢子多糖的提取工艺优化及单糖组成、抗氧化活性分析[J]. 中国食品学报, 2021, 21(4): 159-167.
- [6] MASUDA Y, NAWA D, NAKAYAMA Y, et al. Soluble beta-glucan from *Grifola frondosa* induces tumor regression in synergy with TLR9 agonist via dendritic cell-mediated immunity[J]. Journal of Leukocyte Biology, 2015, 98(6): 1015-1025.
- [7] 张锦锦,陈菲菲,严展鹏,等. 灵芝 β -葡聚糖的碱提取及其抗肿瘤免疫调节研究[J]. 药学报, 2020, 55(3): 512-521.
- [8] 艾拉旦·麦提艾力,李洋,姚军,等. 管花肉苁蓉多糖水提物的分离及免疫活性研究[J]. 中国药房, 2021, 32(12): 1479-1484.
- [9] KIM A, LIM J W, FME H, et al. Supplementation with *Angelica keiskei* inhibits expression of inflammatory mediators in the gastric mucosa of *Helicobacter pylori*-infected mice [J]. Nutrition Research, 2016, 36(5): 488-497.
- [10] 贺立虎,杜双田,吴秀珍,等. 白玉菇的营养生理研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(4): 180-184, 190.
- [11] 王耀松,邢增涛,白冰,等. 白玉蕈营养成分的测定[J]. 西北农业学报, 2006, 15(5): 222-224, 228.
- [12] MENG X, LIANG H, LUO L. Antitumor polysaccharides from mushrooms: a review on the structural characteristics, antitumor mechanisms and immunomodulating activities[J]. Carbohydrate Research, 2016, 424(7): 30-41.
- [13] 吴磊,吴静,胡居吾,等. 白莲蓬子皮多糖的理化性质及免疫调节活性[J]. 现代食品科技, 2021, 37(5): 100-108, 129.
- [14] 沈育伊,覃香香,滕秋梅,等. 荸荠多糖中蛋白含量的测定[J]. 微量元素与健康研究, 2019, 36(6): 50-52.
- [15] 任珍芸,刘爱萍,陈晓航,等. 改良间羟基联苯法用于测定肺炎球菌荚膜多糖中糖醛酸含量[J]. 中国新药杂志, 2018, 27(6): 644-649.
- [16] KASIMU R, CHEN C, XIE X, et al. Water-soluble polysaccharide from *Erythronium sibiricum* bulb: structural characterisation and immunomodulating activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 105(1): 452-462.
- [17] JEFF I B, FAN E, TIAN M, et al. In vivo anticancer and immunomodulating activities of mannogalactoglucan-type polysaccharides from *Lentinus edodes* (Berkeley) Singer [J]. Central-European Journal of Immunology, 2016, 41(1): 47-53.

(责任编辑 闫杏丽)