梁朋光, 蒙晓琳, 杜昱忻, 等. 动态超高压微射流辅助提取银耳多糖的工艺优化、结构特性及抗炎作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 286−296. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080072

LIANG Pengguang, MENG Xiaolin, DU Yuxin, et al. Process Optimization, Structural Characterization, and Anti-inflammatory Activity of *Tremella fuciformis* Polysaccharides Extracted by Dynamic High-pressure Microfluidization[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 286−296. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080072

· 工艺技术 ·

动态超高压微射流辅助提取银耳多糖的工艺优化、结构特性及抗炎作用

梁朋光[1], 蒙晓琳[2], 杜昱忻[3], 李欣怡[3], 马　珂[2], 韦　珍[2], 唐雅园[2], 牙丽娜[2], 何雪梅[2,*]

（1.山东城市服务职业学院, 山东烟台 264670;
2.广西壮族自治区农业科学院, 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室, 广西南宁 530007;
3.西南林业大学生物与食品工程学院, 云南昆明 650224）

摘　要: 为提高银耳多糖的提取效率并探究其结构特性及抗炎活性，本文采用动态超高压微射流（DHPM）技术辅助提取银耳多糖（TP），并通过单因素实验及 Box-Behnken 响应面法优化提取工艺参数。运用高效凝胶渗透色谱法（HPGPC）、离子色谱（IC）及傅里叶变换红外光谱仪（FT-IR）对 TP 进行结构表征，并建立脂多糖（LPS）诱导的 RAW264.7 巨噬细胞炎症模型评价其抗炎活性。结果显示，在单因素实验基础上，以微射流压力、料液比和提取时间为自变量建立的回归模型拟合良好，得到的最佳提取条件为：微射流压力 140 MPa、料液比 1∶40 g/mL、提取时间 90 min，在该条件下 TP 得率为 36.01%。化学成分分析显示，TP 总糖含量为 86.12%，糖醛酸含量达 33.11%，未检测到游离蛋白质和游离单糖，表明该样品为高纯度酸性多糖。结构分析结果显示，TP 分子量为 568385 Da，单糖组成由木糖、岩藻糖、甘露糖、葡萄糖醛酸、半乳糖及葡萄糖构成，其中较高比例的葡萄糖醛酸进一步证实了其酸性多糖特性；FT-IR 分析表明 TP 为典型的 β-吡喃型糖苷键连接的多糖结构。在细胞实验中，TP 在 100~200 μg/mL 浓度范围内未见细胞毒性，且显著降低 LPS 诱导的 RAW264.7 细胞中 NO、TNF-α 和 IL-1β 的分泌水平，并上调抗炎因子 IL-10 的表达（P<0.05），表现出良好的抗炎潜力。综上，通过 DHPM 技术可高效制备结构明确、纯度较高的银耳多糖，其表现出的显著抗炎活性表明其具有作为天然抗炎功能性成分的开发价值。

关键词: 银耳多糖, 动态超高压微射流, 响应面优化, 结构特性, 抗炎活性

中图分类号: TS201.4　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0286−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080072

本文网刊:

Process Optimization, Structural Characterization, and Anti-inflammatory Activity of *Tremella fuciformis* Polysaccharides Extracted by Dynamic High-pressure Microfluidization

LIANG Pengguang[1], MENG Xiaolin[2], DU Yuxin[3], LI Xinyi[3], MA Ke[2], WEI Zhen[2], TANG Yayuan[2], YA Lina[2], HE Xuemei[2,*]

（1.Shandong City Service Technician College, Yantai 264670, China;
2.Guangxi Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-Processing Technology, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China;
3.College of Biological and Food Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China）

Abstract: To improve the extraction efficiency of *Tremella fuciformis* polysaccharides (TP) and to investigate their struc-

收稿日期: 2025−08−11

基金项目: 广西科技计划项目（桂科 AA25069004）; 广西特色作物试验站建设任务（TS202223）。

作者简介: 梁朋光（1979−）, 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 农产品加工、教学管理, E-mail: pgliang@126.com。

*** 通信作者:** 何雪梅（1981−）, 女, 硕士, 研究员, 研究方向: 天然产物化学, E-mail: xuemeihe1981@126.com。

tural characteristics and anti-inflammatory activity, dynamic high-pressure microfluidization (DHPM) was employed as an auxiliary extraction technique, and the extraction parameters were optimized using single-factor experiments and Box-Behnken response surface methodology. TP was structurally characterized by high-performance gel permeation chromatography (HPGPC), ion chromatography (IC), and Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), and its anti-inflammatory activity was evaluated in a lipopolysaccharide (LPS)-induced RAW264.7 macrophage inflammation model. Results showed that a regression model with microfluidization pressure, solid-liquid ratio, and extraction time as independent variables exhibited good fitness. The optimal extraction conditions were determined to be a microfluidization pressure of 140 MPa, a solid-liquid ratio of 1∶40 (g/mL), and an extraction time of 90 min, under which the TP yield reached 36.01%. Chemical composition analysis revealed that TP contained 86.12% total sugars and 33.11% uronic acids, with no detectable free proteins or monosaccharides, indicating that TP was a highly purified acidic polysaccharide. Structural analyses further showed that TP had an average molecular weight of 568385 Da and was composed of xylose, fucose, mannose, glucuronic acid, galactose, and glucose, in which the relatively high proportion of glucuronic acid confirmed its acidic characteristics. FT-IR spectra demonstrated that TP was mainly composed of β-pyranose-linked polysaccharide chains. *In vitro* experiments indicated that TP exhibited no cytotoxicity within the concentration range of 100~200 μg/mL and significantly reduced the LPS-induced secretion of NO, TNF-α, and IL-1β, while increasing the production of the anti-inflammatory cytokine IL-10 (P<0.05), demonstrating its notable anti-inflammatory potential. In conclusion, TP prepared by DHPM exhibits clear structural features, high purity, and remarkable anti-inflammatory activity, highlighting its potential as a natural functional ingredient for inflammation-related applications.

Key words: *Tremella fuciformis* polysaccharides; dynamic high-pressure microfluidization; response surface optimization; structural characteristics; anti-inflammatory activity

银耳（*Tremella fuciformis*），又称雪耳、白木耳，素有“菌中之冠”美誉[1]，是一种重要的食药同源真菌，富含多糖、蛋白质（包括 17 种氨基酸，其中约 7 种为人体必需氨基酸）、膳食纤维、脂肪及钙、铁、镁、钾等多种微量矿物元素，具有滋阴润肺、益气补脑等传统功效[2−3]。其中，银耳多糖（*Tremella* polysaccharides, TP）是其主要活性成分之一，以葡萄糖、木糖、甘露糖等为主的杂多糖，分子量较大，结构复杂，具备良好的水溶性和生物相容性，在免疫调节、抗氧化、降血脂、抗肿瘤、保肝护肾及抗炎等方面均表现出显著生物活性[4−6]。

炎症是机体对有害刺激产生的免疫应答反应，但持续性炎症反应可能引发慢性疾病，如糖尿病、动脉粥样硬化、类风湿性关节炎等[7]。研究发现，天然多糖类物质具有调节炎症因子表达、缓解氧化应激、抑制炎症信号通路等多重抗炎机制[8−9]，成为功能食品和天然药物研究的热点。魏炜等[10] 研究发现沙枣花均一多糖能有效抑制 IL-6 等炎症因子的过度分泌，并促进 IL-10 抗炎因子的表达，从而发挥显著抗炎活性。倪立颖等[11] 发现金针菇菇脚多糖能显著降低脂多糖诱导 RAW264.7 细胞中 NO 的产生，表现出良好的抗炎活性。然而，关于银耳多糖的抗炎机制研究仍不系统，尤其缺乏基于结构特性关联的细胞模型实验证据。

天然多糖结构复杂，其生物活性受提取方法和工艺条件影响显著。传统热水提取法虽操作简便，但存在得率低、耗时长、能耗高及易降解等问题，多糖得率通常仅在 10%~20% 之间[12]；超声波、微波和酶法等辅助技术虽能在一定程度上可提升至约 20%~30%，但在规模化应用中仍受成本和稳定性限制[13−16]。近年来，动态超高压微射流（Dynamic High-Pressure Microfluidization, DHPM）技术在天然产物提取中备受关注，其通过高剪切、空化与冲击力等作用，可更高效地破碎细胞壁，促进细胞内活性成分的释放，加快传质速率，从而提高多糖的得率[17]。已有研究采用该技术对石榴、多种植物或真菌多糖进行优化提取[18−20]，显著提高了得率和活性。然而，目前 DHPM 在银耳多糖中的应用仍缺乏系统性研究，尤其是其对银耳多糖得率提升及结构特征可能产生的影响尚未被深入探讨。因此，有必要基于 DHPM 构建高效提取工艺，并在此基础上对所得多糖进行结构特征分析及生物活性评价。

本研究以银耳为原料，采用动态超高压微射流辅助提取技术，结合响应面法优化多糖的提取工艺，分析其结构特性，并通过 LPS 诱导的 RAW264.7 巨噬细胞炎症模型，评价 TP 对 NO、TNF-α、IL-1β 及 IL-10 等关键炎症因子的调控作用。研究结果旨在揭示 TP 的抗炎潜力及其结构基础，为其作为天然抗炎功能成分的开发利用提供理论依据与数据支持。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

银耳　由广西壮族自治区农业科学院提供；16 种单糖标准品（岩藻糖、盐酸氨基半乳糖、鼠李糖、阿拉伯糖、盐酸氨基葡萄糖、半乳糖、葡萄糖、N-乙酰-D 氨基葡萄糖、木糖、甘露糖、D-果糖、D-核糖、半乳糖醛酸、L-古罗糖醛酸、葡萄糖醛酸、D-甘露糖醛酸）　江苏博睿糖生物科技有限公司；总 NO 试剂盒　碧云天生物技术有限公司；RAW264.7 细胞、胎牛血清　武汉普诺赛生命科技有限公司；脂多糖（LPS）、双抗（青霉素、链霉素）、PBS 缓冲液

索莱宝生化科技有限公司; DMEM 高糖培养基、胰酶(225 USP/mg) Gibco 公司; 细胞计数试剂 CCK-8 广州硕谱生物科技有限公司; 小鼠白细胞介素 IL-6 ELISA 试剂盒、小鼠肿瘤坏死因子 TNF-α ELISA 试剂盒、小鼠白细胞介素 IL-10 ELISA 试剂盒 江苏酶免实业有限公司; 无水乙醇、浓硫酸、苯酚、溴化钾、三氯乙酸、三氟乙酸 成都金山化学试剂有限公司; 所有试剂均为分析纯。

GYB40-10S 均质机 上海东华高压均质机厂; M-110EH 型微射流均质机 美国 Microfluidics 公司; PILOT10-15M 真空冷冻干燥机 北京博医康实验仪器有限公司; RE-52AA 旋转蒸发器 上海亚荣生化仪器厂; 3-18ks 型台式高速冷冻离心机 美国 Sigma 公司; SQ510C 高温灭菌锅 雅马拓科技贸易(上海)有限公司; DK-6D 恒温水浴锅 常州万顺仪器制造有限公司; UV-1800PC 紫外分光光度计 上海美析仪器有限公司; Waters1525 高效凝胶渗透色谱 美国 Waters 公司; Nicolet iS50 傅里叶红外光谱、ICS5000 离子色谱仪 美国 Thermo Fisher 公司; UGC-24Mz 氮吹仪 力辰科技(上海)有限公司; EPDCH 酶标仪 美国伯腾仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 动态超高压微射流法提取银耳多糖 参考秦令祥等[21] 的方法并作适当修改。称取 5 g 干银耳按 1∶10~1∶60 g/mL 的比例分散于蒸馏水中, 通过微射流均质机均质 5 min 后进行热水浴浸提。将提取液于 4000 r/min 离心 10 min, 保留上清液并进行浓缩, 再加入 3 倍体积的 95% 乙醇, 于 4 ℃ 静置 24 h, 在 4000 r/min 离心 10 min, 去掉上清液, 沉淀物冻干后得到银耳粗多糖(CTP)。

为与 DHPM 辅助提取进行对比, 设置传统热水提取作为对照组。称取 5 g 干银耳, 按 1∶40 g/mL 的料液比加入适量蒸馏水, 于 100 ℃ 水浴中提取 90 min。提取结束后, 以 4000 r/min 离心 10 min, 保留上清液并进行浓缩, 再加入 3 倍体积的 95% 乙醇, 于 4 ℃ 静置 24 h, 在 4000 r/min 离心 10 min, 去掉上清液, 沉淀物冻干后得到热水提取银耳多糖样品, 其提取得率用于与 DHPM 提取组进行比较。多糖得率计算公式如下:

$$多糖得率(\%)=\frac{提取所得多糖质量(g)}{原料质量(g)}\times 100 \quad 式(1)$$

1.2.2 单因素实验设计 在单因素实验中, 为考察不同因素对银耳多糖得率的影响, 试验过程中每次仅改变其中一个因素, 其余条件均按预实验结果设定为固定值(微射流压力 120 MPa、微射流处理次数 1 次、料液比 1∶40 g/mL、提取温度 90 ℃、提取时间 90 min)。在此基础上, 分别考察微射流压力(60、80、100、120、140、160 MPa)、微射流处理次数(1、2、3、4 次)、料液比(1∶10、1∶20、1∶30、1∶40、1∶50、1∶60 g/mL)、提取温度(50、60、70、80、90、100 ℃)及提取时间(30、60、90、120、150、180 min)对银耳多糖得率的影响。多糖得率按式(1)计算。

1.2.3 响应面法试验设计 在单因素实验基础上, 根据 Box-Behnken 试验设计原理, 优选微射流压力、料液比、提取时间建立 3 因素 3 水平试验, 以提取得率为响应值, 每组实验重复 3 次, 总共 17 组, 获取 TP 的最佳提取条件, 试验设计见表 1。

表 1 响应面试验因素及水平

Table 1 Factors and levels of response surface experiment

水平	因素		
	A微射流压力(MPa)	B料液比(g/mL)	C提取时间(min)
1	100	1∶30	30
2	120	1∶40	60
3	140	1∶50	90

1.2.4 化学成分分析 在响应面优化确定提取条件后, 参照彭云飞[22] 的方法对粗多糖(CTP)进行除杂纯化。将 CTP 以 1∶30(m/v)溶于蒸馏水, 加入体积分数 10% 的三氯乙酸(TCA)溶液调 pH 至 2.5, 于 4 ℃ 静置 12 h 后以 5000 r/min 离心 10 min 去除蛋白质。取上清液加入其 1/4 体积的 AB-8 大孔树脂, 于 50 ℃、1000 r/min 脱色 2 h, 抽滤除树脂后装入 8000~14000 Da 透析袋, 在 4 ℃ 透析 3 d(每 6 h 换水)。透析液经浓缩、95% 乙醇醇沉后冻干, 即得纯化银耳多糖(TP)。本研究后续所有结构测定、化学成分分析及抗炎活性评价均采用响应面优化条件下提取得到并经纯化处理后的 TP 作为测试样品。

TP 的化学成分按常规方法测定: 总糖采用苯酚-硫酸法[23], 还原糖采用 DNS 法[24], 糖醛酸采用间羟基联苯法[25], 蛋白质采用考马斯亮蓝法[26], 均通过相应标准曲线换算, 按照公式(2)计算相关含量。

$$含量(\%)=\frac{C\times V\times N}{m\times 1000}\times 100 \quad 式(2)$$

式中, C 为银耳多糖的总糖、还原糖、糖醛酸、蛋白质质量浓度, mg/mL; V 为反应体系中银耳多糖溶液的总体积, mL; N 为稀释倍数; m 为称取银耳质量, g。

1.2.5 分子量测定 参考刘鑫[27] 的方法, 采用高效凝胶渗透色谱法(HPGPC)来测定银耳多糖的分子量, 称取银耳多糖样品配制成 2.0 mg/mL 的多糖溶液, 经 0.22 μm 无菌滤膜过滤后备用。所用色谱柱为 Agilent PL aquqgel-OH Mixed(300 mm×7.5 mm, 8 μm), 进样量 50 μL, 柱温 35 ℃, 流动相为超纯水, 设定 0.6 mL/min 的流速。

1.2.6 单糖组成测定 使用 IC 测定 TP 样品的单糖组成[28]。准确称取 5 mg TP 样品置于安瓿瓶中, 后向瓶中加入 2 mL 3 mol/L 的三氟乙酸, 于 120 ℃ 条件下水解 3 h。将水解后的样品溶液转移至 10 mL

离心管中，用氮吹仪吹干，后加入 5 mL 超纯水，涡旋混匀。接着，吸取 50 μL 混匀后的样品溶液，加入 950 μL 超纯水，以 12000 r/min 转速离心 5 min。取上清液进 IC 分析。

1.2.7　红外光谱分析　采用 FT-IR 650 型傅里叶变换红外光谱仪测定银耳多糖红外吸收，扫描波数范围：500~4000 cm^{-1}。称取银耳多糖样品 2 mg，混合 200 mg 的溴化钾，并压制成片进行红外分析。

1.2.8　细胞培养及活力测定　细胞培养：将 RAW264.7 细胞解冻复苏后置于完全培养基(DMEM 高糖培养基+10% 胎牛血清+1% 双抗)中，细胞培养箱设置为 37 ℃、5% CO_2，待细胞贴壁且覆盖培养瓶 70% 左右时进行传代，传代比例为 1∶5。

CCK-8 法测定细胞活力：参考吴聪等[29] 的方法并作适当修改，将正常生长期细胞从培养瓶中吹落，离心并重悬后用细胞计数板自动计数，配制成浓度为 1×10^5 cells/mL 的细胞溶液，按每孔 100 μL 接种于 96 板中，37 ℃ 培养 24 h，吸出上清液，每孔加入 100 μL 完全培养基配制的不同浓度银耳多糖溶液(50、100、200、500 μg/mL)，同时，以不同浓度的透明质酸(HA)溶液作为参比对照组，每组设置 3 个重复。另外设置没有细胞的空白组和只加完全培养基的空白对照组。37 ℃ 培养 24 h，吸出上清液，每孔加入 10% CCK-8 溶液 100 μL，37 ℃ 培养 1.5 h 后在 450 nm 波长测定 OD 值，按照以下公式计算细胞活力：

$$细胞活力(\%)=\frac{OD_{实验}-OD_{空白}}{OD_{空白对照}-OD_{空白}}\times100 \qquad 式（3）$$

1.2.9　细胞 NO 分泌水平测定　配制成浓度为 1×10^5 cells/mL 的细胞悬液，每孔加入 100 μL 接种于 96 孔板中，于 37 ℃、5% CO_2 条件下培养 24 h 以贴壁。弃去上清液后，按下列分组进行处理：空白对照组(仅加完全培养基)、LPS 模型组(完全培养基+10 μg/mL LPS)、低剂量组(100 μg/mL 银耳多糖溶液+10 μg/mL LPS)、高剂量组(200 μg/mL 银耳多糖溶液+10 μg/mL LPS)、HA 参比低剂量组(100 μg/mL 透明质酸溶液+10 μg/mL LPS)和 HA 参比高剂量组(200 μg/mL 透明质酸溶液+10 μg/mL LPS)。在正式诱导前，所有组均先加入 100 μL 对应培养基(对照组和模型组为不含样品的完全培养基，其余组为含样品的培养基)，于 37 ℃ 下预孵育 2 h 后弃去上清。随后，除对照组外，其余各组均加入 100 μL 含 10 μg/mL LPS 的完全培养基继续孵育 24 h，将上清液吸入新的 96 孔板中，按照 NO 试剂盒说明书测定细胞中产生的 NO 含量。

1.2.10　TNF-α、IL-1β 和 IL-10 释放量测定　将配制成浓度为 1×10^5 cells/mL 的细胞悬液，按每孔 100 μL 接种于 96 板中，37 ℃ 培养 24 h，吸出上清液，按 1.2.9 节中方法进行分组和处理，收集培养上清液，按照联酶免疫检测试剂盒说明书测定炎症因子 TNF-α、IL-1β 和 IL-10 的含量。

1.3　数据处理

所有实验均设置 3 组平行实验，并计算平均值±标准差。数据通过 Origin 2019 和 GraphPad Prism 9.4.1 软件进行分析和绘图，通过使用 SPSS 16.0 软件对实验数据进行单因素方差分析(ANOVA)，采用 Duncan 检验进行显著性分析，$P<0.05$ 被认为具有统计学意义。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果

不同微射流压力对银耳多糖得率的影响如图 1A 所示，在 60~160 MPa 范围内，银耳多糖得率

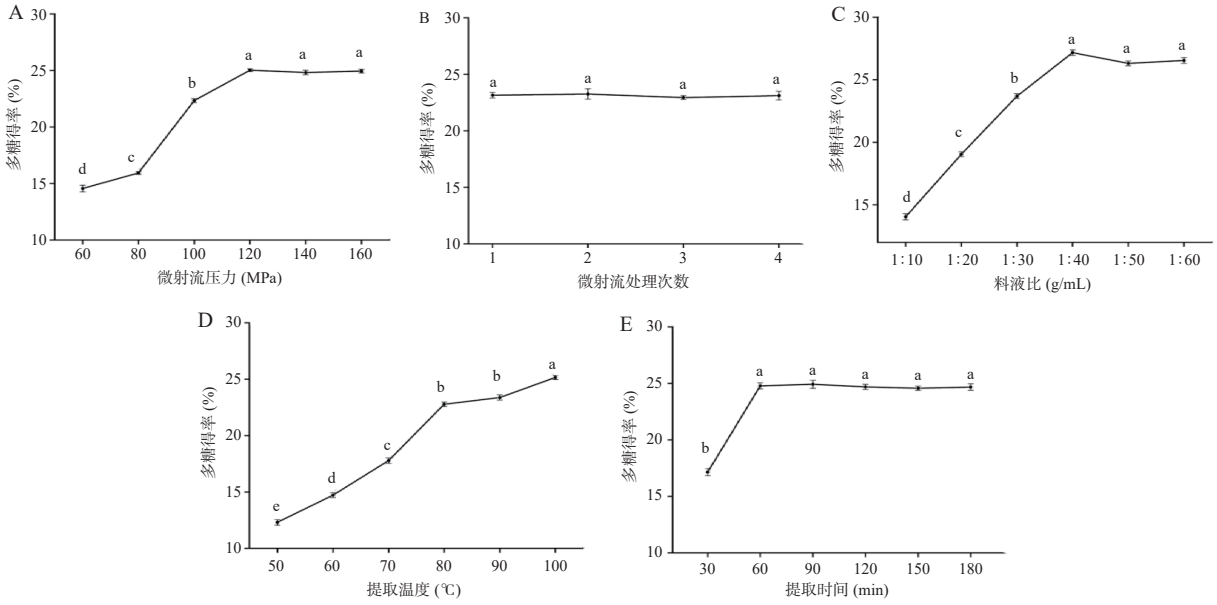


图 1　不同提取因素对多糖得率的影响

Fig.1　Effects of different extraction factors on the yields of polysaccharides

注：A-微射流压力；B-微射流处理次数；C-料液比；D-提取温度；E-提取时间；不同字母表示组间差异显著($P<0.05$)，图 6~图 8 同。

随微射流压力的增大先升高后趋于平稳，在 120 MPa 时达到最大值，得率为 25.03%。当微射流压力超过 120 MPa 后，多糖得率差异不显著（P>0.05），这可能是由于微射流压力在一定范围内能够有效促进细胞破碎并增强物质传质，从而提高多糖得率，但过高压力可能导致部分脆弱多糖降解，导致得率下降，这与高岳等[30] 关于石榴皮多糖的结果一致。因此，选择微射流压力 100、120、140 MPa 进行后续实验。

不同微射流处理次数对银耳多糖得率的影响如图 1B 所示，随着处理次数的增加，得率未见显著变化（P>0.05），表明一次处理即可满足细胞壁破碎需求。后续响应面试验无需考察处理次数对银耳得率的影响。

不同料液比对银耳多糖得率的影响如图 1C 所示，在 1∶40 g/mL 时达到最大值，得率为 27.16%，当料液比进一步增加时，得率未见明显提升。有研究表明溶剂不足会限制溶出，而过量溶剂可能引入杂质并影响醇沉效率[31−32]，进而影响得率。因此，选择料液比 1∶30、1∶40、1∶50 g/mL 进行后续实验。

不同提取温度对银耳多糖得率的影响如图 1D 所示，当提取温度逐渐升高，银耳多糖得率呈上升趋势，在 100 ℃ 时达到最大值，得率为 25.16%。这可能是由于随着溶剂分子与溶质分子间的运动加快，高温使得银耳子实体细胞壁软化，从而有分子利于扩散，使多糖得率升高[33]。因此，提取温度选择 100 ℃ 为宜，后续响应面实验无需考察提取温度对银耳得率的影响。

不同提取时间对银耳多糖得率的影响如图 1E 所示。在 30~60 min 内得率显著升高，由 17.37% 增加至 24.97%，这可能是随着提取时间延长，溶剂可以更完全地渗入物料中，促进多糖从组织细胞中溶出[34]。当时间延长至 180 min 时，得率变化不明显。因此，提取时间选取 30、60、90 min 进行后续实验。综合分析表明，单因素实验结果为后续响应面优化提供了参数依据。

2.2 响应面优化试验结果

通过软件 Design Expert 11 对表 2 中数据进行拟合分析，得到线性回归方程：$Y=31.08+1.88A+1.86B+3.36C-1.24AB+0.715AC+1.31BC+0.7777A^2-0.6547B^2-1.20C^2$。由表 3 可知，模型的 F 值为 82.25，P<0.001，失拟项 P>0.05，差异不显著（P=0.0616），说明该模型可靠。R^2 为 0.9906，说明该模型拟合性好。由 F 值可知，各个因素对多糖得率的影响顺序为：C>A>B，其中，一次项 A、B、C，交互项 AB、BC 和二次项 C^2 对多糖得率具有极显著影响（P<0.01），交互项 AC 和二次项 A^2、B^2 对多糖得率具有显著影响（P<0.05）。图 2 反映了各因素（微射流压力、液料比、提取时间）之间的交互作用对多糖得率的影响，AB、AC、BC 的曲面坡度陡峭，等高线密集呈椭圆形，表示两两交互作用显著。

表 2 Box-Behnken 响应面试验设计结果

Table 2 Design and results of Box-Behnken response surface test

试验号	A微射流压力（MPa）	B料液比（g/mL）	C提取时间（min）	得率（%）
1	120	50	90	36.02
2	100	50	60	32.15
3	140	50	60	34.01
4	140	40	90	36.04
5	140	30	60	32.75
6	120	40	60	31.25
7	100	30	60	25.91
8	140	40	30	28.45
9	120	40	60	30.91
10	120	40	60	31.45
11	100	40	90	31.43
12	120	30	90	29.71
13	100	40	30	26.7
14	120	40	60	31.05
15	120	30	30	25.05
16	120	50	30	26.11
17	120	40	60	30.75

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	171.73	9	19.08	82.25	<0.0001	**
A-微射流压力	28.35	1	28.35	122.21	<0.0001	**
B-料液比	27.64	1	27.64	119.15	<0.0001	**
C-提取时间	90.38	1	90.38	389.62	<0.0001	**
AB	6.20	1	6.20	26.73	0.0013	**
AC	2.04	1	2.04	8.82	0.0208	*
BC	6.89	1	6.89	29.70	0.0010	**
A^2	2.55	1	2.55	10.98	0.0129	*
B^2	1.81	1	1.81	7.78	0.0269	*
C^2	6.11	1	6.11	26.34	0.0013	**
残差	1.62	7	0.2320			
失拟项	1.32	3	0.4398	5.78	0.0616	
纯误差	0.3045	4	0.0761			
总离差	173.35	16				

注：**表示差异极显著（P<0.01）；*表示差异显著（P<0.05）。

2.3 响应面最优条件验证

运用 Design Expert 11 软件由模型分析得出，动态超高压微射流辅助提取银耳多糖的最佳工艺参数为：微射流压力 139.61 MPa、料液比 1∶40.87 g/mL、提取时间 89.36 min，此条件下银耳多糖得率为 36.58%。为了在实际中可操作，将最佳工艺参数调整为：微射流压力 140 MPa、料液比 1∶40 g/mL、提取时间 90 min。根据调整后的最佳工艺进行 3 次验证实验，银耳多糖得率为 36.01%±0.08%，达到理论预测值的 98.44%，表明响应面法优化的提取工艺可行。

此外，为验证 DHPM 辅助提取的优势，设置传统热水提取对照组。如表 4 所示，热水提取得率为 15.61%，显著低于 DHPM 辅助提取的 36.01%（P<0.05），提升约 2.3 倍。

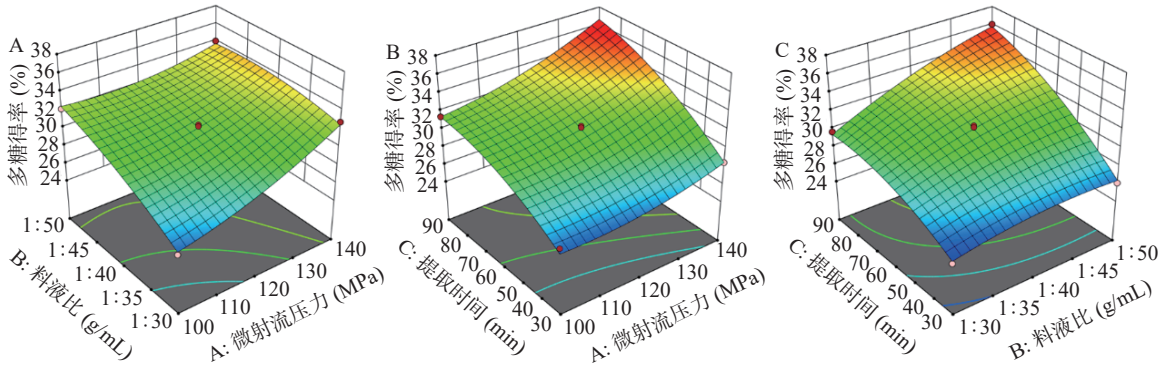


图 2　两因素间交互作用响应面图

Fig.2　Response surface plots of interaction between two factors

注：A-微射流压力与料液比；B -微射流压力与提取时间；C-料液比与提取时间。

表 4　不同提取方法对银耳多糖得率的影响

Table 4　Effects of different extraction methods on the yield of *Tremella* polysaccharide

提取方法	提取条件	得率(%)
DHPM辅助提取	140 MPa, 1∶40(g/mL), 90 min, 100 ℃	36.01±0.08[a]
热水提取	1∶40(g/mL), 90 min, 100 ℃	15.61±0.03[b]

注：同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

2.4　银耳多糖的化学成分分析

TP 的基本化学成分如表 5 所示。经 TCA 脱蛋白、大孔树脂脱色及透析处理后，CTP 得到的纯化银耳多糖(TP)呈现较高的多糖纯度，其中，总糖含量为 86.12%，糖醛酸含量为 33.11%，表明 TP 中含有一定比例的酸性糖残基，具有典型的酸性多糖特征。另外，TP 中未检测到游离蛋白质和游离单糖，进一步证明经纯化处理后的样品杂质含量较低，可用于后续结构表征与功能活性研究。

表 5　TP 的基本化学成分

Table 5　Basic chemical composition of TP

测定指标	数值结果(%)
总糖含量	86.12±0.15
还原糖含量	ND
糖醛酸含量	33.11±4.04
蛋白质含量	ND

注：ND 表示未检测到。

2.5　银耳多糖的相对分子质量

TP 的分子量测定结果如图 3 所示，样品仅出现单一主峰，表明其分子量分布均一。主峰对应的保留时间约为 33.4 min，根据标准曲线方程 y=−0.1961x+12.35(R^2=0.9934)计算，TP 平均分子量为 568385 Da，与魏正勋[35]分离获得的均一银耳多糖分子量(5.6×10^5 Da)基本一致。46.5 min 处的小峰经与流动相空白(0.05 mol/L NaCl)对照，其保留时间一致，确认为流动相本底信号，与样品成分无关，不影响分子量计算。

2.6　银耳多糖的单糖组成

采用离子色谱(IC)对 TP 的单糖组成进行测定，

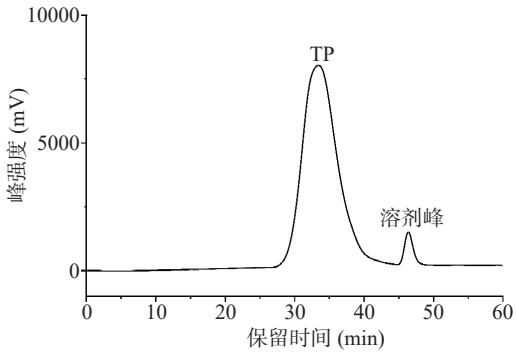


图 3　TP 的分子量图谱

Fig.3　Molecular weight map of TP

结果如图 4 所示。在所选条件下，各标准单糖实现了有效分离，并通过保留时间进行定性分析。结果表明，TP 主要由木糖(Xyl)、岩藻糖(Fuc)、甘露糖(Man)、葡萄糖醛酸(GlcA)、葡萄糖(Glc)和半乳糖(Gal)等 6 种单糖组成(表 6)。其中木糖含量最高，其次为岩藻糖和甘露糖，半乳糖与葡萄糖含量较低。根据峰面积计算的相对摩尔比为 0.423∶0.362∶0.137∶0.053∶0.013∶0.011。TP 中检测到一定量的葡

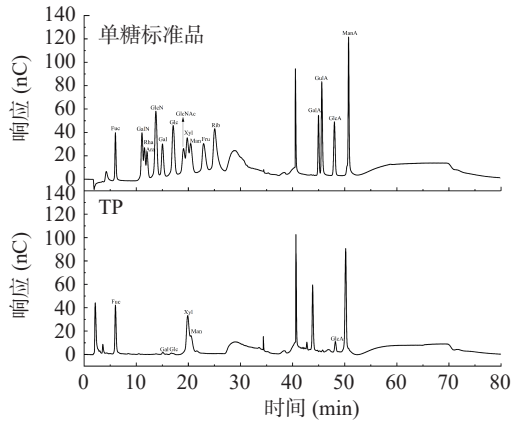


图 4　混合单糖标准品和 TP 的离子色谱图

Fig.4　IC chromatograms of monosaccharide standards and TP

注：Fuc-岩藻糖、GalN-盐酸氨基半乳糖、Rha-鼠李糖、Ara-阿拉伯糖、GlcN-盐酸氨基葡萄糖、Gal-半乳糖、Glc-葡萄糖、GlcNAc-N-乙酰-D 氨基葡萄糖、Xyl-木糖、Man-甘露糖、Fru-果糖、Rib-核糖、GalA-半乳糖醛酸、GulA-古罗糖醛酸、GlcA-葡萄糖醛酸、ManA-甘露糖醛酸。

葡糖醛酸，其相对摩尔比例与前述化学组成分析中获得的较高糖醛酸含量(33.11%)相吻合。已有研究表明，银耳多糖普遍富含葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸等酸性糖结构，是其形成螺旋结构及发挥生物活性的关键结构基础之一[36]。

表 6 TP 的单糖组成及相对摩尔比

Table 6 Monosaccharide composition and relative molar ratio of TP

名称	保留时间 (min)	摩尔比	峰面积
岩藻糖	5.984	0.362	11.292
半乳糖	16.075	0.013	0.507
葡萄糖	18.275	0.011	0.82
木糖	21.484	0.423	18.893
甘露糖	22.484	0.137	6.575
葡萄糖醛酸	48.959	0.053	2.816

2.7 银耳多糖的外光谱分析

TP 的红外光谱结果如图 5 所示，在 3600~3200 cm^{-1} 范围内出现宽广的吸收峰，为羟基(-OH)伸缩振动的特征吸收[37]；2929 cm^{-1} 的吸收峰对应 C-H 的伸缩振动，表明样品中存在-CH 和-CH_2 基团[38]；1635 cm^{-1} 吸收峰主要来源于结合水分子的 H-O-H 弯曲振动，同时也可能部分来源于羧基(-COOH)中 C=O 的伸缩振动[38]；1558 cm^{-1} 和 1540 cm^{-1} 吸收峰则可归属于羧酸盐(-COO^-)的不对称伸缩振动[39]，与单糖组成中检测到葡萄糖醛酸(GlcA)相吻合，进一步证明 TP 属于酸性多糖[40]；在 1455~1066 cm^{-1} 区域内出现多个中等强度吸收带，为 C-O-C、C-O-H 及 C-O 键的弯曲与伸缩振动，是多糖糖环结构的典型特征吸收[38]；低波数区中，917 cm^{-1} 与 894 cm^{-1} 的特征吸收分别对应吡喃环结构的环振动以及 β-构型糖苷键的 C-H 变角振动[41]，表明 TP 以 β-型糖苷键连接的吡喃糖残基为主。综上，TP 的红外光谱特征表明其属于酸性多糖，具有丰富的羟基和羧基/羧酸盐基团，以 β-型糖苷键连接的吡喃糖残基构成了其典型的多糖结构。DHPM 辅助提取所得 TP 仍完整呈现这些关键吸收峰，说明该工艺在提升提取效率的同时并未造成主链结构或官能团的明显破坏，保持了多糖固有的结构完整性。这一结构稳定性为后续功能活性研究提供了可靠基础。

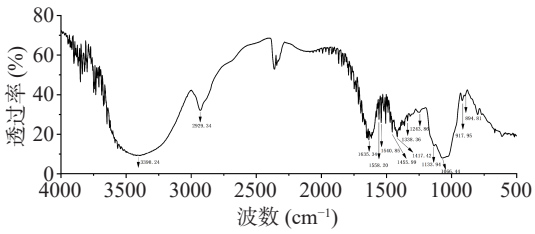


图 5 TP 的红外光谱图

Fig.5 Infrared spectrogram of TP

2.8 银耳多糖对 RAW264.7 细胞活力的影响

为评估 TP 及参比物 HA 在不同浓度下对 RAW264.7 细胞活力的影响，采用 CCK-8 法进行检测，结果如图 6 所示。TP 在 50~200 μg/mL 范围内对细胞无抑制作用，其中 100 和 200 μg/mL 浓度下细胞活力显著提升(P<0.05)，表明 TP 在该区间具有良好的生物相容性。已有研究指出，多种食药用真菌多糖在适中浓度下均可促进巨噬细胞增殖，被认为与其提供可利用的代谢底物、改善细胞能量代谢或微环境相关[42]。TP 的单糖组成中含有一定比例的葡萄糖、木糖和甘露糖，这些单糖残基具备一定生物可利用性，可能在一定程度上被细胞摄取并参与代谢，从而增强细胞增殖能力[43]。相反，浓度升至 500 μg/mL 时，细胞活力下降，可能与高浓度条件下的渗透压或成分堆积有关，与文献报道的真菌多糖高浓度效应一致[44]。此外，HA 在中等浓度下促进细胞活力的效果略强于 TP，表明其在促进细胞增殖方面具有更高的敏感性。综上，TP 在 100~200 μg/mL 浓度范围内对 RAW264.7 细胞无明显毒性，适合作为后续实验的使用浓度。

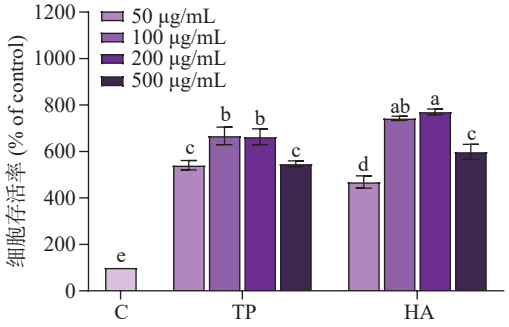


图 6 TP 对 RAW264.7 细胞存活率的影响

Fig.6 Effect of TP on the survival rate of RAW264.7 cells

注：C 为空白对照组，TP 为银耳多糖处理组，HA 为透明质酸参比对照组。

2.9 银耳多糖对 RAW264.7 细胞 NO 分泌水平的影响

NO 是 RAW264.7 细胞在受到刺激后释放的重要炎症介质，其在免疫调节中发挥关键作用。然而，过量的 NO 可引发氧化应激，导致组织损伤并进一步加剧炎症反应[45]。如图 7 所示，与空白对照组相比，

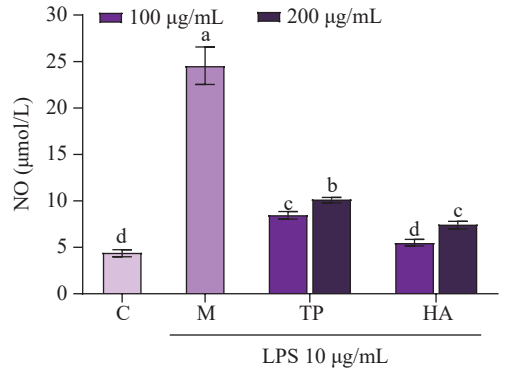


图 7 TP 对 RAW264.7 细胞 NO 分泌水平的影响

Fig.7 Effect of TP on NO secretion levels of RAW264.7 cells

注：C 为空白对照组，M 为模型组(LPS 模型组)，TP 为银耳多糖处理组，HA 为透明质酸参比对照组。

模型组在 LPS 诱导下 NO 分泌水平显著升高（$P<0.05$），说明炎症模型建立成功。与模型组相比，TP 处理组在 100 μg/mL 和 200 μg/mL 浓度下显著降低 NO 的分泌水平（$P<0.05$），分别降低 65.37% 和 58.49%。此外，HA 组的 NO 抑制作用与 TP 组相近。已有研究表明，多种真菌多糖可通过调节 iNOS 表达或阻断相关炎症信号通路而降低 NO 的过量生成，从而减轻炎症反应[46−47]。TP 能有效抑制 NO 的产生，表明其具有抑制巨噬细胞过度活化的能力。

2.10　银耳多糖对 RAW264.7 细胞 TNF-α、IL-1β 和 IL-10 释放量的影响

机体的炎症反应取决于促炎因子与抗炎因子间的平衡，其中 TNF-α 和 IL-1β 是主要的促炎介质，而 IL-10 是具有代表性的抗炎细胞因子[48−50]。如图 8 所示，与空白对照组相比，LPS 诱导的模型组 TNF-α 和 IL-1β 分泌水平显著升高（$P<0.05$），表明炎症模型建立成功。经不同浓度的 TP 及参比物 HA 处理后，TNF-α 和 IL-1β 的分泌水平均不同程度下降，其中 200 μg/mL 组抑制作用更为显著（$P<0.05$）。此外，TP 和 HA 均可促进 IL-10 的分泌，其中 100 μg/mL 处理组升幅最明显（$P<0.05$）。已有研究显示，真菌来源的多糖通常能通过“抑制促炎+提升抗炎”的双向调节方式发挥抗炎作用。Chan 等[51] 报道绒革菌（*Amauroderma rugosum*）子实体提取物可在 LPS 刺激的 RAW264.7 细胞中降低 TNF-α 与 NO 的水平，并促进 IL-10 分泌。Suabjakyong 等[52] 研究发现桑黄（*Phellinus linteus*）与火木层孔菌（*Phellinus igniarius*）多糖同样可同时抑制 TNF-α、IL-1β 并上调 IL-10。TP 在本研究中的调节模式与上述真菌多糖较为一致，表明其具备良好的细胞抗炎潜力。

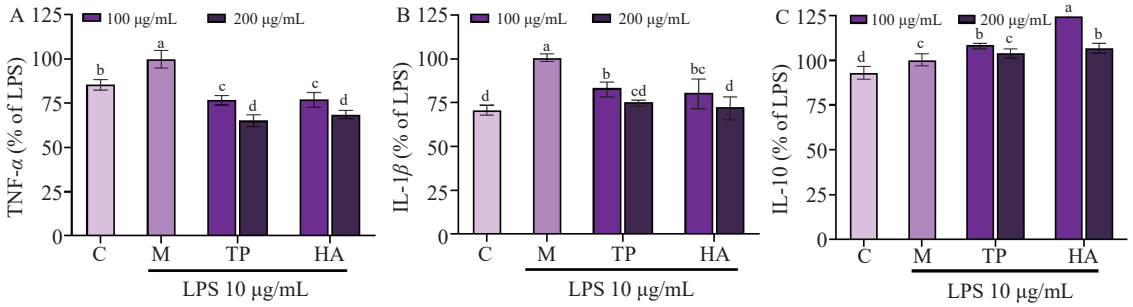


图 8　TP 对 RAW264.7 细胞分泌 TNF-α（A）、IL-1β（B）、IL-10（C）水平的影响

Fig.8　Effect of TP on the secretion levels of TNF-α (A), IL-1β (B), and IL-10 (C) in RAW264.7 cells

注：C 为空白对照组，M 为模型组（LPS 模型组），TP 为银耳多糖处理组，HA 为透明质酸参比对照组。

食药用真菌多糖的免疫调节与抗炎作用往往受到多种结构因素的共同影响，包括分子量范围、单糖组成、酸性结构单元含量、糖链构象、糖苷键类型及支化特征等[53]。已有研究表明，分子量位于 10^5~10^6 Da 区间的真菌多糖更易形成稳定的螺旋或柔性卷曲构象，有利于其与巨噬细胞表面的免疫识别受体结合，从而参与炎症介质的调控[53−54]。此外，富含葡萄糖醛酸或半乳糖醛酸等酸性单元的多糖被报道具有更显著的免疫调节倾向，可通过影响 iNOS、NF-κB 或 MAPKs 等通路降低 NO、TNF-α 和 IL-1β 的过度产生，并促进 IL-10 的表达[47]。β-构型糖苷键是多数真菌多糖的共同特征，被认为与其免疫活性密切相关，特别是在调节巨噬细胞活化和炎症因子的双向调节方面[55]。另外，含木糖、甘露糖或岩藻糖的糖链残基也被报道可增强多糖与甘露糖受体（MR）或其他识别蛋白的结合能力，从而参与巨噬细胞的免疫调控[56−57]。结合这些研究结果可推测，本研究中 TP 在 RAW264.7 细胞中表现出的抑制 NO、TNF-α、IL-1β 并促进 IL-10 的双向调节作用，很可能与其所具有的酸性糖残基、β-型糖苷键结构特征以及真菌多糖常见的糖链构象等综合结构因素相关，从而在细胞水平实现显著的抗炎活性。

3　结论

本研究基于动态超高压微射流技术建立了银耳多糖的高效提取工艺，并对其结构特征与细胞水平抗炎活性进行了系统解析。响应面优化结果表明，微射流压力 140 MPa、料液比 1∶40（g/mL）、提取时间 90 min 为最佳提取条件，在此条件下 TP 得率达 36.01%，显著高于传统热水提取。经纯化所得 TP 为高纯度酸性杂多糖，总糖含量为 86.12%，糖醛酸含量为 33.11%，平均分子量约 5.68×10^5 Da，单糖组成以木糖、岩藻糖和甘露糖为主，红外光谱显示其主要由 β-吡喃型糖苷键构成，并具有丰富的羟基与羧基结构。抗炎结果显示，TP 在 100~200 μg/mL 浓度范围内表现出良好生物相容性，能显著抑制 LPS 诱导的 RAW264.7 巨噬细胞中 NO、TNF-α 和 IL-1β 的过量生成，同时上调 IL-10 的分泌，呈现典型的“双向调节”抗炎特征。结合现有研究，TP 的抗炎作用可能与其中等分子量、较高比例的酸性单元及 β-构型糖苷键等结构因素相关。本研究结果表明，通过 DHPM 可实现结构完整、纯度较高且具有显著抗炎潜力的银耳多糖制备。未来可从 TP 与 TLR4、MR、Dectin-1 等免疫识别受体的相互作用机制、基于多组学的信号通路解析、体内抗炎验证以及与其他功能成分的

协同效应等方面进一步深入，为其在天然抗炎剂和功能食品领域的开发提供更坚实的科学依据。

© 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] 张宝华. “菌中之冠”话银耳[J]. 健康生活, 2023(10): 45−46. [ZHANG Baohua. "The crown of bacteria" *Tremella fuciformis* [J]. Health Life, 2023(10): 45−46.]

[2] YOON Y, HAN N, LEE J H, et al. Review of the effects of *Tremella fuciformis* Berk extract as a functional phytochemical[J]. Asian Journal of Beauty and Cosmetology, 2023, 21(1): 151−164.

[3] 李曦, 邓兰, 周娅, 等. 金耳、银耳与木耳的营养成分比较[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(16): 77−82. [LI Xi, DENG Lan, ZHOU Ya, et al. Nutritional components comparison between *Tremella aurantialba*, *Tremella fucitormis* and *Auricularia auricula*[J]. Food Research and Development, 2021, 42(16): 77−82.]

[4] WANG Xue, ZHANG Zhuo, LEI Huan, et al. Treatment of ulcerative colitis via the *in situ* restoration of local immune and microbial homeostasis by oral administration of *Tremella* polysaccharide drug-carrying hydrogel[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 285: 138223.

[5] 邬雨季, 邓佳颖, 魏正勋, 等. 银耳多糖的制备、功能和产品开发的研究进展[J]. 食药用菌, 2018, 26(3): 161−165. [WU Yuji, DENG Jiaying, WEI Zhengxun, et al. Research progress on preparation, characteristics and product development of functional polysaccharide of *Tremella fuciformis*[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2018, 26(3): 161−165.]

[6] RUAN Yang, LI Hong, PU Lianmei, et al. *Tremella fuciformis* polysaccharides attenuate oxidative stress and inflammation in macrophages through miR-155[J]. Analytical Cellular Pathology, 2018, 2018: 5762371.

[7] KANG S M, KIM K N, LEE S H, et al. Anti-inflammatory activity of polysaccharide purified from AMG-assistant extract of *Ecklonia cava* in LPS-stimulated RAW 264.7 macrophages[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 85(1): 80−85.

[8] XIE Zhenglu, WANG Yang, HUANG Juqing, et al. Anti-inflammatory activity of polysaccharides from *Phellinus linteus* by regulating the NF-κB translocation in LPS-stimulated RAW264.7 macrophages[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 129: 61−67.

[9] HUANG Linlin, SUN Qi, LI Quanhong, et al. Screening and characterization of an anti-inflammatory pectic polysaccharide from *Cucurbita moschata* Duch[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 264: 130510.

[10] 魏炜, 加沙尔·阿拜, 李沅泽, 等. 沙枣花均一多糖分离纯化、结构分析及体内抗炎活性研究[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(6): 131−137. [WEI W, GASHAR A, LI Y Z, et al. Study on the isolation and purification, structural analysis and *in vivo* anti-inflammatory activity of homogeneous polysaccharides from *Elaeagnus angustifolia* L. flowers[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(6): 131−137.]

[11] 倪立颖, 胡付侠, 孙梦雪, 等. 蒸汽爆破预处理金针菇菇脚多糖提取工艺优化及其抗炎活性[J]. 食品科技, 2025, 50(3): 190−198. [NI Liying, HU Fuxia, SUN Mengxue, et al. Optimization of extraction process and anti-inflammatory activity of polysaccharide from *Flammulina velutipes* mycorrhizae with steam explosion pretreatment[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(3): 190−198.]

[12] 周帅飞, 毛淑敏, 秦红岩, 等. 银耳多糖的提取工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2013(27): 11148−11149. [ZHOU Shuaifei, MAO Shumin, QIN Hongyan, et al. Study on the extraction technology of polysaccharide from *Tremella fuciformis*[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013(27): 11148−11149.]

[13] 鲍会梅. 酶解法提取银耳多糖的工艺及稳定性研究[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(11): 17−21. [BAO Huimei. Study on extraction technology and stability of *Tremella* polysaccharide by enzymatic hydrolysis[J]. Food Research and Development, 2015, 36(11): 17−21.]

[14] 陈洁, 郭淋凯, 宋东晓, 等. 微波辅助提取银耳多糖工艺研究[J]. 中国果菜, 2024, 44(8): 1−5,12. [CHEN Jie, GUO Linkai, SONG Dongxiao, et al. Optimization of microwave-assisted extraction of *Tremella fuciformis* polysaccharide[J]. China Fruit & Vegetable, 2024, 44(8): 1−5,12.]

[15] 杨嘉丹, 刘婷婷, 张闪闪, 等. 微波辅助提取银耳多糖工艺优化及其流变、凝胶特性[J]. 食品科学, 2019, 40(14): 289−295. [YANG Jiadan, LIU Tingting, ZHANG Shanshan, et al. Optimization of microwave-assisted extraction and rheological and gelling properties of polysaccharide from *Tremella fuciformis*[J]. Food Science, 2019, 40(14): 289−295.]

[16] 钟姝霞, 邓杰, 万世旅, 等. 超声波辅助提取金耳多糖的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(21): 54−57. [ZHONG Shuxia, DENG Jie, WAN Shilü, et al. Optimization of polysaccharides extracting process from *Tremella* by ultrasonic assisted[J]. Food Research and Development, 2016, 37(21): 54−57.]

[17] 何雪梅, 岳健, 邱福荣, 等. 动态超高压微射流辅助提取对滇黄精多糖结构和活性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 95−101. [HE Xuemei, YUE Jian, QIU Furong, et al. Effect of dynamic high-pressure microfluidization assisted extraction on the structure and activity of polysaccharides from *Polygonatum kingianum* Coll. et Hemsl[J]. Food Science, 2022, 43(19): 95−101.]

[18] 陈美丽, 许艳华, 纵伟, 等. 超高压微射流对石榴汁品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(3): 81−85. [CHEN Meili, XU Yanhua, ZONG Wei, et al. Effects of ultra-high pressure microfluidization treatment on quality of pomegranate juice[J]. Food Research and Development, 2017, 38(3): 81−85.]

[19] 姜颖, 涂宗财, 陈媛, 等. 动态超高压微射流预处理对香菇多糖得率的影响[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 62−65. [JIANG Ying, TU Zongcai, CHEN Yuan, et al. Effect of dynamic high-pressure microfluidization pretreatment on the yield of lentinan[J]. Food Science, 2010, 31(24): 62−65.]

[20] 李志, 涂宗财, 毛沅文, 等. 动态超高压微射流技术提取甘薯叶黄酮[J]. 食品科学, 2010, 31(24): 83−86. [LI Zhi, TU Zongcai, MAO Yuanwen, et al. Extraction of flavonoids from sweet potato leaves by dynamic high-pressure microfluidization technology[J]. Food Science, 2010, 31(24): 83−86.]

[21] 秦令祥, 周婧琦, 崔胜文, 等. 动态超高压微射流法提取黑木耳多糖工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(19): 155−159. [QIN Lingxiang, ZHOU Jingqi, CUI Shengwen, et al. Study on extraction of polysauharides from *Auricularia auricular* by dynamic high pressure micro-fluidization technology[J]. Food Research and Development, 2019, 40(19): 155−159.]

[22] 彭云飞. 银耳多糖酶法提取及生物活性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017. [PENG Yunfei. Enzymatic extraction and bio-

logical activity of *Tremella* polysaccharide[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.]
[23] 王迎香, 唐子惟, 彭腾, 等. 苯酚-硫酸法测定酒蒸多花黄精多糖含量的优化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 308−316. [WANG Yingxiang, TANG Ziwei, PENG Teng, et al. Optimization of phenol sulfuric acid method for the polysaccharide content of wine-steamed *Polygonatum cyrtonema* Hua[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(18): 308−316.]
[24] 余丽梅, 向平, 叶丽娟, 等. 四种水果中还原糖含量的测定与分析[J]. 广东化工, 2021, 48(16): 243−244,248. [YU Limei, XIANG Ping, YE Lijuan, et al. Determination and analysis of reducing sugar in four kinds of fruits[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(16): 243−244,248.]
[25] 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. [REN Zhenyun, LIU Aiping, CHEN Xiaohang, et al. An improved m-hydroxyldiphenyl assay for determination of uronic acid content in pneumococcal polysaccharide[J]. Chinese Journal of New Drugs, 2018, 27(6): 644−649.]
[26] 徐亚, 范会芬, 赵玎玲, 等. 考马斯亮蓝法测定大豆水溶性蛋白提取方法的优化[J]. 大豆科学, 2022, 41(2): 196−202. [XU Ya, FAN Huifen, ZHAO Dingling, et al. Optimization of extraction method for water-soluble protein determination by coomassie bright blue method[J]. Soybean Science, 2022, 41(2): 196−202.]
[27] 刘鑫. 灰肉红菇多糖的结构表征及其基于免疫调节的促造血功能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023. [LIU Xin. Study on the structural characterization of *Russula griseocarnosa* polysaccharide and its improvement on hematopoietic function based on immunoregulation[D]. Changchun: Jilin University, 2023.]
[28] 淳于彦洁, 陆震鸣, 耿燕, 等. 蝉虫草子实体与发酵菌丝体胞内多糖成分分析[J]. 菌物学报, 2019, 38(7): 1141−1148. [CHUNYU Yanjie, LU Zhenming, GENG Yan, et al. Analysis of the intracellular polysaccharides extracted from the fruiting bodies and fermented mycelia of *Cordyceps cicadae*[J]. Mycosystema, 2019, 38(7): 1141−1148.]
[29] 吴聪, 劳致湛, 游雪莲, 等. 基于脂多糖诱导 $RAW_{264.7}$ 细胞模型的白茶寡肽分段物抗炎能力评估[J]. 茶叶学报, 2024, 65(5): 51−62. [WU Cong, LAO Zhizhan, YOU Xuelian, et al. *In vitro* anti-inflammatory activity of white tea oligopeptide fractions[J]. Acta Tea Sinica, 2024, 65(5): 51−62.]
[30] 高岳, 刘玉, 袁欣彤, 等. 动态高压微射流辅助提取石榴皮多糖工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(13): 136−143. [GAO Yue, LIU Yu, YUAN Xintong, et al. Optimization of dynamic high-pressure microfluidization-assisted extraction and antioxidant activities of polysaccharides from pomegranate peel[J]. Food Research and Development, 2024, 45(13): 136−143.]
[31] 尹文辉, 梁增澜, 张睿, 等. 银耳多糖分离提取工艺的优化研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(9): 93−97. [YIN Wenhui, LIANG Zenglan, ZHANG Rui, et al. Extraction and isolation technology of *Tremella fuciformis* polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2020, 41(9): 93−97.]
[32] 刘杰, 李雅双, 包瑛, 等. 响应面试验优化新疆阿魏根多糖微波辅助提取工艺及其体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 57−62. [LIU Jie, LI Yashuang, BAO Ying, et al. Extraction optimization of polysaccharides from the roots of *Ferula sinkiangensis* K. M. Shen and their antioxidant activities *in vitro*[J]. Food Science, 2015, 36(22): 57−62.]
[33] 蒋益, 郑惠华, 刘广建, 等. 响应面优化超声波辅助提取金耳多糖的研究[J]. 食用菌, 2019, 41(6): 60−64. [JIANG Yi, ZHENG Huihua, LIU Guangjian, et al. Study on ultrasonic-assisted extraction optimization of *Tremella aurantialba* polysaccharides via response surface methodology[J]. Edible Fungi, 2019, 41(6): 60−64.]
[34] VINATORU M. Ultrasonically assisted extraction (UAE) of natural products some guidelines for good practice and reporting[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2015, 25: 94−95.
[35] 魏正勋. 银耳子实体多糖的提取分离、结构鉴定及生物活性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015. [WEI Zhengxun. Study on extraction, isolation, structural identification and biological activities of polysaccharides from *Tremella fuciformis* fruiting bodies. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015.]
[36] YUAN Hongjie, DONG Lin, ZHANG Zhiyuan, et al. Production, structure, and bioactivity of polysaccharide isolated from *Tremella fuciformis*[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(4): 1010−1017.
[37] 王瑞. 蒸附子多糖的化学表征及其抗炎抗氧化作用研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, 2021. [WANG Rui. Study on chemical characterization, anti-inflammatory and antioxidant activities of polysaccharides from steamed Aconiti Radix Lateralis Preparata[D]. Harbin: Heilongjiang University of Chinese Medicine, 2021.]
[38] WEI Qiang, ZHANG Yihan. Ultrasound-assisted polysaccharide extraction from *Cercis chinensis* and properites, antioxidant activity of polysaccharide[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 96: 106422.
[39] HOU Shoubu, TAN Minghui, CHANG Senlin, et al. Effects of different processing (Paozhi) on structural characterization and antioxidant activities of polysaccharides from *Cistanche deserticola*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 245: 125507.
[40] 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(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(8): 55−57.]
[41] WEN L R, GAO Q, MA C W, et al. Effect of polysaccharides from *Tremella fuciformis* on UV-induced photoaging[J]. Journal of Functional Foods, 2016, 20: 400−410.
[42] ZHANG Ying, ZENG Yan, MEN Yan, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of exopolysaccharides from submerged culture of *Auricularia auricula*-judae[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 115: 978−984.
[43] CALDAS L A, SANTOS P D, CARBONERO E R, et al. Immunomodulatory effect of polysaccharides from the mushroom-forming basidiomycete *Gymnopilus imperialis* (Agaricomycetes, Basidiomycota)[J]. Pharmaceuticals, 2022, 15(10): 1179.
[44] HOU Chunyan, CHEN Lili, YANG Liuzhi, et al. An insight into anti-inflammatory effects of natural polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 248−255.
[45] 张会敏, 邢岩, 仇润慷, 等. 马齿苋中抗炎活性物质的提取、分离及结构鉴定[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 191−199. [ZHANG Huimin, XING Yan, QIU Runkang, et al. Extraction, separation and structural identification of anti-inflammatory active substances from purslane (*Portulaca oleracea* L.)[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(3): 191−199.]
[46] 杜小琴, 夏炎, 张万超, 等. 不同提取方法的灵芝多糖体外抗炎活性比较[J]. 中国食品学报, 2025, 25(2): 124−133. [DU

Xiaoqin, XIA Yan, ZHANG Wanchao, et al. Comparison of anti-inflammatory activity of *Ganoderma lucidum* polysaccharides *in vitro* by different extraction methods[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(2): 124−133.]

[47] JEN C I, SU C H, LAI M N, et al. Comparative anti-inflammatory characterization of selected fungal and plant water soluble polysaccharides[J]. Food Science and Technology Research, 2021, 27(3): 453−462.

[48] YIN Miao, ZHANG Ying, LI Hua. Advances in research on immunoregulation of macrophages by plant polysaccharides[J]. Frontiers in Immunology, 2019, 10: 145.

[49] OUYANG W J, O'GARRA A. IL-10 family cytokines IL-10 and IL-22: From basic science to clinical translation[J]. Immunity, 2019, 50(4): 871−891.

[50] RALLIS K S, CORRIGAN A E, DADAH H, et al. IL-10 in cancer: An essential thermostatic regulator between homeostatic immunity and inflammation-a comprehensive review[J]. Future Oncology, 2022, 18(29): 3349−3365.

[51] CHAN P M, TAN Y S, CHUA K H, et al. Attenuation of inflammatory mediators (TNF-α and nitric oxide) and up-regulation of IL-10 by wild and domesticated basidiocarps of *Amauroderma rugosum* (Blume & T. Nees) torrend in LPS-stimulated RAW264.7 cells[J]. PLoS One, 2015, 10(10): e0139593.

[52] SUABJAKYONG P, NISHIMURA K, TOIDA T, et al. Structural characterization and immunomodulatory effects of polysaccharides from *Phellinus linteus* and *Phellinus igniarius* on the IL-6/IL-10 cytokine balance of the mouse macrophage cell lines (RAW264.7)[J]. Food & Function, 2015, 6(8): 2834−2844.

[53] YIN Zhenhua, LIANG Zhenhua, LI Changqin, et al. Immunomodulatory effects of polysaccharides from edible fungus: A review[J]. Food Science and Human Wellness, 2021, 10(4): 393−400.

[54] SUN Liqin, WANG Ling, ZHOU Yan. Immunomodulation and antitumor activities of different-molecular-weight polysaccharides from *Porphyridium cruentum*[J]. Carbohydrate Polymers, 2012, 87(2): 1206−1210.

[55] NOVAK M, VETVICKA V. β-Glucans, history, and the present: Immunomodulatory aspects and mechanisms of action[J]. Journal of Immunotoxicology, 2008, 5(1): 47−57.

[56] LI Wenjuan, TANG Xiaofang, SHUAI Xiaoxue, et al. Mannose receptor mediates the immune response to *Ganoderma atrum* polysaccharides in macrophages[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(2): 348−357.

[57] TANG Jun, HE Zihan, ZHANG Baohui, et al. Structural properties, bioactivities, structure-activity relationships and bio-applications of polysaccharides from *Auricularia auricula*: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135941.