石婕婕, 李赫, 陆华源, 等. 竹叶卷芯粗多糖提取工艺优化与流变特性分析及其免疫调节活性评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(4): 260−270. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100291
SHI Jiejie, LI He, LU Huayuan, et al. Optimization of Extraction Process, Analysis of Rheological Properties and Evaluation of Immunomodulatory Activity of Crude Polysaccharide from Common Lopatherum Herb[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(4): 260−270. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100291

· 工艺技术 ·

竹叶卷芯粗多糖提取工艺优化与流变特性分析及其免疫调节活性评价

石婕婕, 李　赫+, 陆华源, 满运英, 龙青蓝, 潘晓丹, 陈　永*
（广西民族师范学院农业与生物学院, 广西崇左 532200）

摘　要: 为探究竹叶卷芯粗多糖的最佳提取工艺与流变特性并对其免疫活性进行评价。试验以竹叶卷芯为原料，通过单因素实验结合响应面试验优化竹叶卷芯粗多糖的最佳提取工艺条件，并利用离子色谱法检测其单糖分子组成；采用马尔文 Kinexus Pro+流变仪测定竹叶卷芯粗多糖的流变特性；并采用 CCK-8 法检测竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞增殖活性的影响，根据 TNF-α、IL-6 和 NO 的表达水平对其免疫调节活性进行评价。结果确定最佳提取条件为提取时间 92 min、提取温度 67 ℃、碱浓度 0.04 mol/L、料液比 1∶28 g/mL，此条件下竹叶卷芯粗多糖得率最高，为 3.21%±0.17%；经苯酚-硫酸法测定竹叶卷芯粗多糖中的总糖含量为 54.7%±0.7%，单糖组成主要为岩藻糖、阿拉伯糖、鼠李糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸，其摩尔百分比为 0.81∶7.53∶21.45∶20.70∶30.61∶3.50∶3.05∶9.52∶2.84；稳态剪切试验结果说明，竹叶卷芯粗多糖溶液属于具有剪切稀化特性的假塑性流体，动态剪切测试结果表明，高频率的出现能够增强竹叶卷芯粗多糖溶液的凝胶性。竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞增殖活性无明显影响，在 50~400 μg/mL 的竹叶卷芯粗多糖溶液范围内对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞分泌 TNF-α、IL-6 和 NO 具有一定促进作用。研究结果可为竹叶卷芯粗多糖在食物与药物等领域开发应用提供理论依据。

关键词: 竹叶卷芯, 多糖, 响应面优化, 流变特性, 免疫活性
中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)04−0260−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024100291　　本文网刊:

Optimization of Extraction Process, Analysis of Rheological Properties and Evaluation of Immunomodulatory Activity of Crude Polysaccharide from Common Lopatherum Herb

SHI Jiejie, **LI He+**, **LU Huayuan**, **MAN Yunying**, **LONG Qinglan**, **PAN Xiaodan**, **CHEN Yong***
（College of Agriculture and Biology, Guangxi Minzu Normal University, Chongzuo 532200, China）

Abstract: To explore the optimal extraction process and rheological properties of crude polysaccharides from common lopatherum herb and evaluate their immunological activity. In this experiment, common lopatherum herb was used as raw materials. The optimal extraction process conditions for the crude polysaccharides from common lopatherum herb were optimized by combining single-factor experiments with the response surface methodology, and the monosaccharide composition was detected by ion chromatography. Moreover, the rheological properties of the crude polysaccharides from common lopatherum herb were determined using a Malvern Kinexus Pro+rheometer. The effect of the crude polysaccharides from common lopatherum herb on the proliferation activity of RAW 264.7 mouse macrophages was

收稿日期: 2024−10−25　　+并列第一作者
基金项目: 广西民族师范学院自治区级大学生创新创业训练计划项目（S202510604189）；广西民族师范学院国家级大学生创新创业训练计划项目（202410604049）；2024 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目（2024KY0788）；2025 年崇左市青年拔尖人才培养支持项目。
作者简介: 石婕婕（2003−）, 女, 大学本科, 研究方向: 天然产物开发与综合利用, E-mail: 469446818@qq.com。
李赫（2000−）, 男, 本科, 研究方向: 天然产物开发与综合利用, E-mail: 3279018874@qq.com。
*** 通信作者:** 陈永（1990−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物的综合利用及功能性食品开发, E-mail: chenyong@gxnun.edu.cn。

detected by the CCK-8 method, and their immunomodulatory activity was evaluated based on the expression levels of TNF-*α*, IL-6, and NO. The optimal extraction conditions were determined as follows: extraction time of 92 min, extraction temperature of 67 ℃, alkali concentration of 0.04 mol/L, and solid-liquid ratio of 1∶28 g/mL. Under these conditions, the yield of crude polysaccharides from common lopatherum herb was the highest, reaching 3.21%±0.17%. The total sugar content of crude polysaccharide from common lopatherum herb was determined to be 54.7%±0.7% by the phenol-sulfuric acid method. The monosaccharide composition mainly consisted of fucose, arabinose, rhamnose, galactose, glucose, xylose, mannose, galacturonic acid, and glucuronic acid, with a molar percentage of 0.81∶7.53∶21.45∶20.70∶30.61∶3.50∶3.05∶9.52∶2.84. The steady shear test results indicated that the crude polysaccharide solution of common lopatherum herb was a pseudoplastic fluid with shear thinning characteristics. The dynamic shear test results showed that the presence of high frequency could enhance the gel property of the crude polysaccharide solution of common lopatherum herb. The crude polysaccharides extracted from common lopatherum herb had no significant effect on the proliferation activity of RAW 264.7 mouse macrophages. However, within the concentration range of 50~400 μg/mL, the crude polysaccharide solution from common lopatherum herb could moderately promote the secretion of TNF-*α*, IL-6, and NO by RAW 264.7 mouse macrophages. The research results can provide a theoretical basis for the development and application of crude polysaccharides from common lopatherum herb in the fields of food and medicine.

Key words: common lopatherum herb; polysaccharides; response surface optimization; rheological properties; immunomodulatory activity

早园竹（*Phyllostachys violascens*），又被称为雷竹、雷公竹，属禾本科刚竹属竹种[1]，其中，早园竹的竹叶卷芯（Common Lopatherum Herb）是一种尚未能展开呈卷筒形的幼叶，其味甘性凉，有清心泻火、解毒除烦之功效，入药历史悠久，最早记载于清朝何克谏的《生草药性备要》中[2]。竹叶中含有黄酮类化合物、多糖、多酚等活性物质，大多表现出较强的生物活性[3]。目前对竹叶的有效活性成分和开发应用的研究较多，但关于竹叶卷芯的研究极其匮乏，竹叶卷芯资源尚未得到充分开发。随着对植物多糖在医药及食品领域的进一步研究，从竹叶卷芯中有效提取粗多糖并探究其生物活性，不仅可以提升竹叶卷芯的经济价值，还能够为其活性成分在医药与食品领域中实现更广泛的应用拓展。

目前关于竹叶多糖的免疫调节活性已有相关的研究。张亚兰[4]的研究发现，经纯化的箬竹叶多糖不仅可以通过刺激 p38 磷酸化而促进 MAPKs 信号传递，还可以显著增强 NF-*κ*B 信号通路的活性，进而提高 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞的免疫活性；唐莉莉等[5]发现竹叶多糖可使正常小鼠及荷瘤小鼠的脾指数和胸腺指数升高，对小鼠巨噬细胞的非特异性免疫具有一定促进作用；而目前关于竹叶卷芯多糖的生物活性研究尚未见相关报道。常用多糖提取的方法包括碱提取法、酶法、微波辅助提取法和超临界流体萃取法等[6]。超临界流体萃取法适用性强、效率高和成本低，但对所用设备仪器要求高[7]；微波辅助提取法具有高效率高产率的特点，但微波功率过高可能破坏竹叶多糖的结构；酶法成本高且条件苛刻，不适宜竹叶多糖的大规模提取[8]；碱提取法破坏键合能力强，操作简单且提取率高[9]。

本文以早园竹的竹叶卷芯为研究对象，采用碱法提取竹叶卷芯粗多糖，结合单因素实验初步确定提取条件以及采用 Box-Behnken 响应面试验进一步优化提取工艺；同时为反映竹叶卷芯粗多糖的结构变化，采用马尔文 Kinexus Pro+流变仪测定竹叶卷芯粗多糖的流变特性，且为探究竹叶卷芯粗多糖免疫调节方面的作用，采用 CCK-8 法测定竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞增殖活性的影响，并检测 TNF-*α*、IL-6 及 NO 等细胞免疫调节因子的分泌量以评价竹叶卷芯粗多糖免疫调节活性，研究结果可为竹叶卷芯粗多糖在医学和保健品的进一步开发和利用提供理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料及仪器

竹叶卷芯　购自广西南宁马山县；糖类基准物质、甲醇　色谱纯（LC），鼎盛生物有限公司；乙醇、苯酚、乙醚等有机试剂　均为国产分析纯，北京华康国泰生物科技有限公司；氢氧化钠、浓硫酸、盐酸等国产分析纯，三益化工药品；单糖标准品：岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖、核糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、古罗糖醛酸、甘露糖醛酸、八肽胆囊收缩素（CCK-8）试剂盒　美国 Sigma 公司；TNF-*α*、IL-6 ELISA 试剂盒　武汉华联科生物技术有限公司；NO 检测试剂盒　欣博盛生物科技有限公司；RAW264.7 小鼠巨噬细胞　武汉普诺赛生命科技有限公司；DMEM　美国 Hyclone 公司。

DHG-9143BS 恒温真空干燥箱　上海越众仪器有限公司；Uv-1602 差速离心机、HK-1822 数显恒温水浴锅　湖南湘仪有限公司；AST-9100 抽滤泵　北京云迪生物有限公司；ICS5000 离子色谱仪　美国 Thermo Fisher Scientific 公司；Thermo ICS 5000+离子色谱系统　美国赛默飞公司；马尔文 Kinexus Pro+流变仪　英国马尔文仪器有限公司；Alpha1-2 冷冻干燥机　德国 Christ 公司；UV-1600 紫外分光光度计　日本三井物产株式会社；F50 全波长酶

标仪　德国 Tecan 公司; SW-CJ-1F 超净工作台　苏州净化设备有限公司; HF100 三气培养箱　上海力申科学仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　竹叶卷芯粗多糖的制备流程　参考戴天伦等[10]的实验方法, 取新鲜早园竹的竹叶卷芯经 90 ℃ 干燥后粉碎过 80 目筛得竹叶卷芯粉末。将粉末与石油醚混合, 并在 70 ℃ 恒温条件下回流 6~8 次以进行脱脂、脱色; 通风至石油醚完全挥发, 置于浓度为 8% 的 NaOH 溶液, 在 90 ℃ 下浸提 2.0 h, 冷却至室温后加 3.8% 稀盐酸将 pH 调至 7.0; 经 3500 r/min 离心 15 min, 收集上清液, 并添加等体积 Sevage 试剂(氯仿与正丁醇的体积比为 4∶1), 充分搅拌振荡后 3500 r/min 离心 15 min, 收集上清液, 重复脱蛋白操作 6 次。脱蛋白后将收集的上清液进行旋蒸浓缩约至原体积 1/5, 加入 3 倍体积的无水乙醇, 并于低温下静置 12 h 醇沉; 3500 r/min 离心操作取其沉淀, 加入少量纯水重新溶解, 并于 4 ℃ 低温用纯水透析, 至透析液电导率接近纯水; 透析液经冷冻干燥得到竹叶卷芯粗多糖。

1.2.2　单因素实验设计

1.2.2.1　提取时间对竹叶卷芯粗多糖得率的影响　在固定提取温度 70 ℃、NaOH 碱浓度 0.03 mol/L、料液比 1∶25 g/mL 条件下, 分别设定提取时间为 30、60、90、120、150 min, 探究不同提取时间对竹叶卷芯粗多糖得率的影响。

1.2.2.2　碱浓度对竹叶卷芯粗多糖得率的影响　在固定料液比 1∶25 g/mL、提取时间 90 min、提取温度 70 ℃ 条件下, 分别设定碱浓度为 0.01、0.02、0.03、0.04、0.05 mol/L, 探究不同碱浓度对竹叶卷芯粗多糖得率的影响。

1.2.2.3　提取温度对竹叶卷芯粗多糖得率的影响　在固定提取时间 90 min、NaOH 碱浓度 0.03 mol/L、料液比 1∶25 g/mL 条件下, 分别设定提取温度为 55、60、65、70、75 ℃, 探究不同提取温度对竹叶卷芯粗多糖得率的影响。

1.2.2.4　料液比对竹叶卷芯粗多糖得率的影响　在固定 NaOH 碱浓度 0.03 mol/L、提取时间 90 min、提取温度 70 ℃ 条件下, 分别设定料液比为 1∶10、1∶15、1∶20、1∶25、1∶30 g/mL, 探究不同料液比对竹叶卷芯粗多糖得率的影响。

1.2.3　响应面优化试验　以单因素实验为基础, 通过 Box-Behnken 法对竹叶卷芯粗多糖提取工艺作进一步优化。探究提取时间(A)、提取温度(B)、NaOH 碱浓度(C)、料液比(D)四个变量因素对竹叶卷芯粗多糖得率的影响, 因素和水平的设计如表 1 所示。

1.2.4　苯酚硫酸法测定竹叶卷芯粗多糖的总糖含量及得率　参照罗雨菲等[11]的方法配制质量浓度梯度为 0、2、4、6、8、10、12、14 mg/mL 的葡萄糖溶液各 1.0 mL, 依次添加 6% 苯酚 1.0 mL、H_2SO_4 5.0 mL, 避光环境静置 30 min 至反应完成, 于波长 490 nm 处测定吸光度, 以葡萄糖标准溶液浓度作为横坐标, 吸光度 $OD_{490\ nm}$ 作为纵坐标, 经绘制得到葡萄糖浓度和吸光度的线性回归方程: y=0.00724x+0.1362, 其决定系数 R^2=0.9914。配制 5.0 mg/mL 竹叶卷芯粗多糖溶液 1.0 mL, 按以上步骤测定吸光值, 平行实验三次取平均值, 代入上述葡萄糖标准曲线求得竹叶卷芯粗多糖的总糖含量为 54.7%±0.7%。竹叶卷芯粗多糖得率计算公式如下:

$$竹叶卷芯粗多糖得率(\%)=\frac{竹叶卷芯粗多糖质量}{原料总质量}\times 100$$

表 1　响应面试验设计因素与水平

Table 1　Design factors and levels of the responses surface experiment

因素	水平		
	−1	0	1
A 提取时间(min)	75	90	105
B提取温度(℃)	65	70	75
C NaOH碱浓度(mol/L)	0.02	0.03	0.04
D料液比(g/mL)	1∶20	1∶25	1∶30

1.2.5　竹叶卷芯粗多糖的单糖组成测定

1.2.5.1　单糖标准品的制备　参考 Liu 等[12]的方法稍加改动, 精确称取岩藻糖、阿拉伯糖、鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、木糖、甘露糖、果糖、核糖、半乳糖醛酸、古罗糖醛酸、甘露糖醛酸、葡萄糖醛酸 13 种单糖标准品, 分别将 8 mL 无菌水加入至 15 mL 的 EP 刻度离心管中, 随后将单糖进行溶解处理并定容至 10 mL, 以制成浓度为 10 mg/mL 的标准溶液母液。

1.2.5.2　样品水解　参照 Chen 等[13]的方法并进行适当修改, 将 5 mg 的竹叶卷芯粗多糖样品精准称量后置于洁净的色谱瓶中。随后, 向瓶中加入 1 mL 的 2 mol/L 三氟乙酸(TFA)溶液, 置于 121 ℃ 水浴中加热 2 h, 随后通入氮气将溶液吹干管内, 接着用纯度为 99.99% 的甲醇对样品进行多次(2~3 次)清洗, 并再次用氮气吹干, 用无菌水溶解样品, 转移至色谱瓶中, 以备后续检测。

1.2.5.3　色谱条件　采用 Dionex™ CarboPac™ PA20 离子色谱柱(尺寸: 150 mm×3.0 mm, 粒径: 10 μm)。其中, 流动相 A 为超纯水, 流动相 B 为 100 mmol/L NaOH 溶液, 流动相 C 为 100 mmol/L NaOH 与 200 mmol/L NaOAc 的混合溶液; 色谱柱温度设定为 30 ℃, 进样量为 5 μL; 洗脱梯度为 0~26 min 时 97.5% A、2.5% B, 26~40 min 时 77.5% A、2.5% B、20% C, 40~60 min 时 97.5% A、2.5% B。

1.2.6　竹叶卷芯粗多糖流变特性测定

1.2.6.1　动态流变测试　参考 Zou 等[14]的方法稍作

改进，采用马尔文 Kinexus Pro+流变仪，在直径为 40 mm 的不锈钢平板上，于温度 25 ℃ 下，设定线性黏弹区的应变为 1%，间隙为 1 mm，测定竹叶卷芯粗多糖溶液于频率范围 0.01~100 Hz 的储能模量（G'）和损耗模量（G"）随频率变化的情况测定。

1.2.6.2　静态流变测试　参照 Quainoo 等[15] 的方法稍加修改，利用马尔文 Kinexus Pro+流变仪测定在温度为 25 ℃，1% 浓度下的竹叶卷芯粗多糖溶液在剪切速率为 0.01~1000 s^{-1} 中，其表观黏度随剪切速率的变化情况。

1.2.7　竹叶卷芯粗多糖免疫调节活性测定

1.2.7.1　RAW 264.7 小鼠巨噬细胞的培养　参考 Watanabe 等[16] 的操作方法并进行略微改进，将小鼠巨噬细胞从液氮中取出，并经过 37 ℃ 复苏后，在无菌超净操作台上将细胞悬液转入新的含 5 mL 培养基的离心管内，1000 r/min 离心 5 min，去除上层清液，将经沉淀处理后的细胞再放入至含有 10% 胎牛血清的 DMEM 完全培养基中重悬细胞，并将其接种到细胞培养皿内，在 37 ℃、95% O_2、5% CO_2 的恒定环境下进行培养，后续以对数生长期的巨噬细胞进行试验。

1.2.7.2　竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞活性的影响　根据李文静等[17] 的方法并进行略微改良，按照每孔 80 μL，将小鼠巨噬细胞浓度调整为 1×10^6 个/mL 接种至 96 孔细胞培养板中，并在 37 ℃、5% CO_2、95% O_2 的恒定培养箱中持续培养 24 h，随后移除上清液。添加 80 μL 浓度为 50、100、200、400、800 μg/mL 的竹叶卷芯粗多糖溶液，同时设定 DEME 培养基作为空白对照组以及 10 μg/mL 脂多糖作为阳性对照组，每组均设置 3 个复孔，并重复实验三次，于上述相同恒定环境下继续培养 24 h 后，移除上清液，并向每个样品孔添加 30 μL 的 CCK-8 试剂继续在培养箱中培养 1 h，采用酶标仪检测波长为 490 nm 时的各孔光密度值，并对各组实验数据进行处理，小鼠巨噬细胞相对存活率（%）的公式表示为：

$$小鼠巨噬细胞相对存活率(\%) = (A/B)\times100$$

其中：各试验组的光密度值为 A；空白对照组光密度值为 B。

1.2.7.3　竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 细胞分泌 TNF-α、IL-6 和 NO 的影响　参考 Qin 等[18] 的操作方法，进行略微改动，将处于对数生长期的小鼠巨噬细胞以 1×10^4 个/孔的密度接种于 96 孔细胞培养板中，并在 37 ℃、5% CO_2 的条件下培养 24 h 后，对上清液进行移除处理，按 50 μL/孔加入不同浓度（50、100、200、400、800 μg/mL）的竹叶卷芯粗多糖溶液，并在相同的条件下继续培养，24 h 后收集上清液，按照细胞因子测定试剂盒的操作方法检测上清液中 TNF-α、IL-6、NO 的含量。

1.3　数据处理

所有实验重复三次，数据的分析和图形绘制采用 Origin-2021 和 Design-Expert 13 软件，此外，Excel 2019 和 SPSS 软件用于进一步处理数据，并进行显著性差异分析（定量资料以平均数±标准差（SD）表示，组间比较采用 t 检验；定性资料以数量及百分比表示，组间比较采用 X^2 检验；$P<0.01$ 为差异极显著，$P<0.05$ 为差异显著），触变性测试的结果则通过流变仪数据处理系统中的 Power Law 模型进行拟合分析。

2　结果与分析

2.1　竹叶卷芯粗多糖提取工艺

2.1.1　提取时间对竹叶卷芯粗多糖得率的影响　多糖的提取与时间密切相关，充足的提取时间对于多糖的充分溶解和释放至关重要[19]，从图 1 中可以看出，在提取时间为 30~90 min 时，竹叶卷芯粗多糖得率由 2.57%±0.14% 上升至 3.13%±0.11%，随着提取时间从 90 min 延长至 150 min，竹叶卷芯粗多糖得率并未出现明显变化，而当提取时间为 120 min 时，粗多糖得率为 3.14%±0.12%，与 90 min 和 150 min 时的粗多糖得率相比无显著性差异（$P>0.05$），原因是多糖在长时间的高温作用下会容易造成结构的破坏，从而抑制多糖得率的升高[20]。故选择提取时间 75、90、105 min 以进行响应面试验。

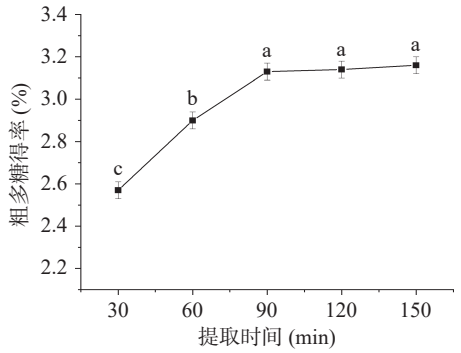


图 1　不同提取时间对竹叶卷芯粗多糖得率的影响

Fig.1　Effect of varying extraction time on the yield of crude polysaccharides from common lopatherum herb

注：图中不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），图 2~图 4、图 9~图 10 同。

2.1.2　碱浓度对竹叶卷芯粗多糖得率的影响　一般认为，碱既可促进多糖从细胞复合物中的释放，同时也可能导致其分子结构的降解[21]。结合图 2 中可以看出，在 0.01~0.03 mol/L 的碱浓度范围内，竹叶卷芯粗多糖得率呈显著上升（$P<0.05$），由 2.54%±0.11% 升高至 3.12%±0.05%；而当碱浓度从 0.03 mol/L 增加至 0.05 mol/L 时，竹叶卷芯粗多糖得率无明显变化，当碱浓度为 0.04 mol/L 时，竹叶卷芯粗多糖得率为 3.15%±0.08%，较碱浓度为 0.03 mol/L 和 0.05 mol/L 的竹叶卷芯粗多糖得率无显著性差异（$P>0.05$），这是因为一定范围的碱液浓度有利于解除分子间的

理化作用, 进而提高多糖提取率, 但碱浓度过高会引起多糖结构的破坏, 导致部分多糖降解[22], 从而使得粗多糖得率增加缓慢。故选择碱浓度 0.02、0.03、0.04 mol/L 进行响应面试验。

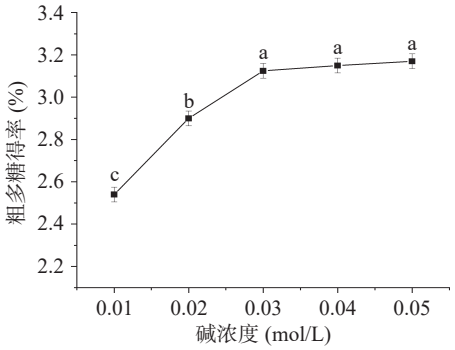


图 2 不同碱浓度对竹叶卷芯粗多糖得率的影响

Fig.2 Effect of varying alkali concentrations on the yield of crude polysaccharides from common lopatherum herb

2.1.3 提取温度对竹叶卷芯粗多糖得率的影响 提取温度主要是通过控制反应体系所处环境的温度大小来影响在相同条件下多糖的溶出率[23]。由图 3 可以看出, 在提取温度为 55~75 ℃ 的整体范围内, 竹叶卷芯粗多糖得率随温度的增加而呈上升的趋势, 这是由于较高的温度有利于多糖的溶出[11]。当提取温度为 55~70 ℃ 时, 竹叶卷芯粗多糖得率从 2.51%±0.12% 升高至 3.13%±0.07%, 而当提取温度超过 70 ℃ 后, 粗多糖得率上升不明显, 75 ℃ 时的粗多糖得率为 3.15%±0.09%, 与 70 ℃ 时的粗多糖得率相比无显著性差异(P>0.05), 原因是温度过高时会导致料液中的多糖分子结构受损, 进而引发多糖分解, 从而限制多糖溶出率的提高[24], 故选择提取温度 65、70、75 ℃ 进行响应面试验。

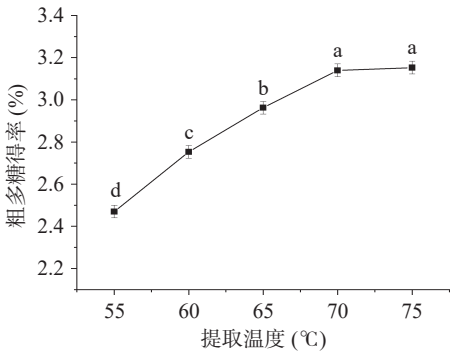


图 3 不同提取温度对竹叶卷芯粗多糖得率的影响

Fig.3 Effect of varying extraction temperature on the yield of crude polysaccharides from common lopatherum herb

2.1.4 料液比对竹叶卷芯粗多糖得率的影响 料液比能够影响细胞膜内外渗透压, 适当的料液比不仅能提高多糖得率, 还能节约成本[25]。从图 4 中的曲线可以看出, 竹叶卷芯粗多糖得率在料液比为 1∶10~1∶25 g/mL 的范围内增长迅速, 从 2.29%±0.12% 上升至 3.16%±0.24%, 这是因为适度增加液料比会提升植物组织内外的多糖浓度差, 从而加快多糖的扩散和溶出速率[26], 而当料液比超过 1∶25 g/mL 上升至 1∶30 g/mL 时, 竹叶卷芯粗多糖得率增长缓慢, 原因是溶剂量增大会降低多糖质量浓度, 导致其他杂质溶出率增大[27], 从而抑制多糖分子的溶出率, 故选择料液比 1∶20、1∶25、1∶30 g/mL 进行响应面试验。

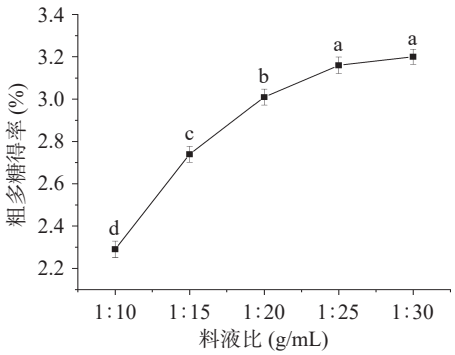


图 4 不同料液比对竹叶卷芯粗多糖得率的影响

Fig.4 Effect of varying solid-liquid ratio on the yield of crude polysaccharides from common lopatherum herb

2.2 响应面试验分析

2.2.1 响应面试验优化结果与方差分析 在单因素实验的基础上, 以竹叶卷芯粗多糖得率为响应值, 考察 A 提取时间、B 提取温度、C 碱浓度、D 料液比对竹叶卷芯粗多糖得率的影响, 使用 Design-Expert13 软件的 Box-Behnken 响应面设计方法, 进行三水平

表 2 响应面优化设计试验结果

Table 2 Results of response surface optimization design

实验号	A提取时间	B提取温度	C碱浓度	D料液比	粗多糖得率(%)
1	0	0	0	0	3.15±0.07
2	1	0	0	1	3.21±0.12
3	1	1	0	0	3.16±0.08
4	0	0	1	−1	3.06±0.15
5	0	−1	0	−1	2.91±0.11
6	0	0	−1	1	3.00±0.15
7	0	0	0	0	3.11±0.03
8	−1	0	−1	0	2.77±0.09
9	−1	−1	0	0	2.84±0.18
10	0	−1	−1	0	2.76±0.17
11	0	1	0	1	3.19±0.05
12	−1	0	0	1	3.12±0.08
13	0	1	1	0	3.17±0.04
14	0	0	0	0	3.09±0.06
15	0	0	0	0	3.13±0.15
16	0	1	0	−1	2.98±0.09
17	1	0	0	−1	3.02±0.07
18	−1	1	0	0	3.08±0.18
19	−1	0	1	0	3.09±0.08
20	0	−1	0	1	3.20±0.11
21	1	0	−1	0	2.90±0.14
22	0	0	1	1	3.21±0.16
23	−1	0	0	−1	2.84±0.19
24	0	1	−1	0	2.91±0.04
25	0	0	−1	−1	2.67±0.15
26	0	−1	1	0	3.12±0.13
27	1	−1	0	0	3.14±0.17
28	0	0	0	0	3.17±0.04
29	1	0	1	0	3.20±0.13

四因素的试验设计，共 29 组，以探究最优试验条件，详细试验数据及结果如表 2 所示。

利用表 2 响应面试验数据进行回归拟合，得竹叶卷芯粗多糖得率 Y 对料液比、提取时间、提取温度、碱浓度的回归方程模型为：$Y=3.13+0.0683A+0.0492B+0.1533C+0.1208D-0.0375AB-0.0050AC-0.0225AD-0.0250BC-0.0200BD-0.0475CD-0.0475A^2-0.0363B^2-0.1025C^2-0.0338D^2$。从表 3 中的回归方差（ANOVE）结果可以看出，模型 $P<0.0001$，为极显著（$P<0.01$），而失拟项不显著 $P=0.4913>0.05$。模型的决定系数（R^2）为 0.9765，表明其对数据的拟合效果较为理想，显示出其具有较强的拟合能力。同时，模型的调整 R^2 为 0.9530，与 R^2 相近，这进一步证实了模型的准确性和可靠性。可用于优化竹叶卷芯多糖提取工艺分析和预测。由各项 F 值可知，影响竹叶卷芯多糖响应值四个因素显著性顺序为：C（碱浓度）>D（料液比）>A（提取时间）>B（提取温度）；由该模型的 P 值可得，影响竹叶卷芯多糖得率的各个因素中，一次项 A、B、C、D 表现为差异极显著（$P<0.01$），二次项 B^2、D^2 表现为差异显著（$P<0.05$），C^2、A^2 表现为差异极显著（$P<0.01$），交互项 AB、CD 表现为差异显著（$P<0.05$）。

表 3　二次回归模型的方差分析数据显著性检验

Table 3　ANOVA data significance test for the secondary regression models

方差来源	平方和	自由度	均方和	F值	P值	显著性
模型	0.6373	14	0.0455	41.54	< 0.0001	**
A-提取时间	0.0560	1	0.0560	51.13	< 0.0001	**
B-提取温度	0.0290	1	0.0290	26.47	0.0001	**
C-碱浓度	0.2821	1	0.2821	257.46	< 0.0001	**
D-料液比	0.1752	1	0.1752	159.89	< 0.0001	**
AB	0.0056	1	0.0056	5.13	0.0399	*
AC	0.0001	1	0.0001	0.0913	0.7670	NS
AD	0.0020	1	0.0020	1.85	0.1955	NS
BC	0.0025	1	0.0025	2.28	0.1532	NS
BD	0.0016	1	0.0016	1.46	0.2469	NS
CD	0.0081	1	0.0081	7.39	0.0166	*
A^2	0.0146	1	0.0146	13.36	0.0026	**
B^2	0.0085	1	0.0085	7.78	0.0145	*
C^2	0.0681	1	0.0681	62.19	< 0.0001	**
D^2	0.0074	1	0.0074	6.74	0.0211	*
残差	0.0153	14	0.0011	–	–	–
失拟值	0.0113	10	0.0011	1.13	0.4913	NS
误差	0.0040	4	0.0010	–	–	–
总离度	0.6527	28	–	–	变异系数CV=1.09%	
R^2=0.9765	R^2_{Adj}=0.9530				R^2_{Pre}=0.8903	

注：*表示差异显著（$P<0.05$）；**表示差异极显著（$P<0.01$），NS表示差异不显著（$P>0.05$）。

2.2.2　响应面的二次项交互作用分析　根据响应面的陡峭度和等高线的形状及密集程度来判断各因素交互作用对竹叶卷芯粗多糖得率的影响，响应曲面越陡峭，颜色越深，表明影响越显著；在三维曲面图中，坡面陡峭程度越大，表明两因素的交互作用越强；在等高线图中，越靠近中心点提取率越高，等高线越密集且越接近椭圆形时交互作用越强[28]。由图 5（A）所示，提取时间和提取温度交互作用的三维响应曲面坡面较陡峭，两个因素之间的等高线呈椭圆形且较密集，表明提取时间与提取温度的交互作用对竹叶卷芯粗多糖影响显著（$P<0.05$）；提取时间相比于提取温度的响应曲面坡面更陡峭，说明提取时间对竹叶卷芯粗多糖得率的影响程度更大。由图 5（B）所示，碱浓度和料液比交互作用的响应面颜色较深，等高线呈椭圆形且较密集，表明碱浓度和料液比的交互作用对竹叶卷芯粗多糖影响显著（$P<0.05$）；碱浓度的响应曲面比料液比的响应曲面坡面更为陡峭，说明碱浓度对竹叶卷芯粗多糖得率的影响程度要大于料液比。根据响应曲面的陡峭程度以及两因素间等高线的形状和密集程度表明，四个因素对竹叶卷芯粗多糖得率的影响依次为 C（碱浓度）>D（料液比）>A（提取时间）>B（提取温度），这与表 3 方差分析结果一致。

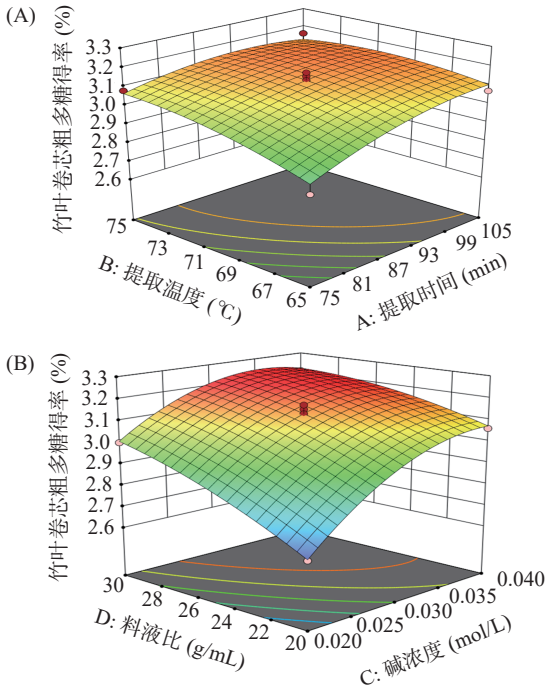


图 5　不同因素的交互作用对竹叶卷芯粗多糖得率影响的响应曲面图

Fig.5　Response surface diagram of effect of interaction of different factors on yield of crude polysaccharide from common lopatherum herb

2.2.3　最佳工艺的确定　利用 Design-Expert 13 软件对各因素分析，最终得到竹叶卷芯粗多糖的最佳条件为：提取时间为 91.856 min、提取温度为 67.377 ℃，碱浓度为 0.038 mol/L、料液比 1∶28.063 g/mL、该条件下预测竹叶卷芯粗多糖的得率为 3.21%±0.06%。为试验的可操作性考虑，将最佳提取工艺参数修正为提取时间 92 min、提取温度 67 ℃、碱浓度 0.04 mol/L、料液比 1∶28 g/mL，在该条件下重复试验 3 次，得竹叶卷芯粗多糖实际得率为 3.21%±0.17%，与理论值无明显差异，说明该试验模型可靠，

对实际竹叶卷芯粗多糖的提取具有一定指导性。

2.2.4 竹叶卷芯粗多糖的单糖组成分析 图 6 为竹叶卷芯粗多糖的单糖组成离子色谱分析结果，竹叶卷芯粗多糖单糖组成主要包括岩藻糖(Fuc)、鼠李糖(Rha)、阿拉伯糖(Ara)、半乳糖(Gal)、葡萄糖(Glc)、木糖(Xyl)、甘露糖(Man)、半乳糖醛酸(Gal-UA)、葡萄糖醛酸(Glc-UA)，其摩尔百分比为 0.81∶7.53∶21.45∶20.70∶30.61∶3.50∶3.05∶9.52∶2.84。以往的文献表明单糖组成及其比例是多糖构效关系的基础，其中与免疫调节活性高度相关的单糖主要有甘露糖、阿拉伯糖、半乳糖、木糖以及各类糖醛酸，由此推测竹叶卷芯粗多糖在一定程度上可能具备较好的免疫调节活性[29−31]。

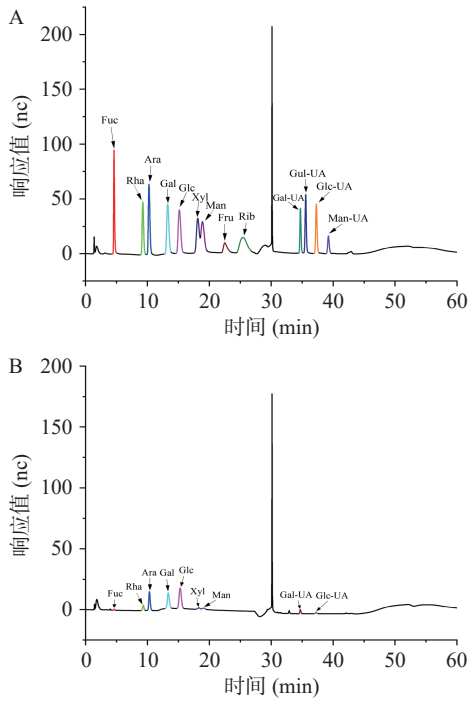


图 6 竹叶卷芯粗多糖的单糖组成

Fig.6 Monosaccharide composition of common lopatherum herb

注：A：单糖混合标准品；B：竹叶卷芯粗多糖。

2.3 竹叶卷芯粗多糖的流变特性研究

2.3.1 动态流变特性 通过动态振荡扫描探究竹叶卷芯粗多糖的动态流变特性。如图 7 所示，G'表示弹性(固体)特征，而 G"表示黏性(液体)特征[32]。在频率为 0.001~100 Hz 的整体范围内，G'和 G"随频率的提升而不断增大，说明竹叶卷芯粗多糖溶液具备频率依附性[33]。当频率在 0~5.034 Hz 低频率范围内，G"大于 G'，此时竹叶卷芯粗多糖溶液表现为液体黏性特性[33]；当频率为 5.034 Hz 时，储能模量(G')与损耗模量(G")相交，且二者数值相等，此时，该交点所对应的频率被定义为交叉频率，反映出竹叶卷芯粗多糖溶液具备粘弹性行为，常被定义为弹性行为或凝胶状态的开始[32]；而当频率大于 5.034 Hz 后，G'高于 G"，此时竹叶卷芯粗多糖溶液主要表现为固体弹性特性，

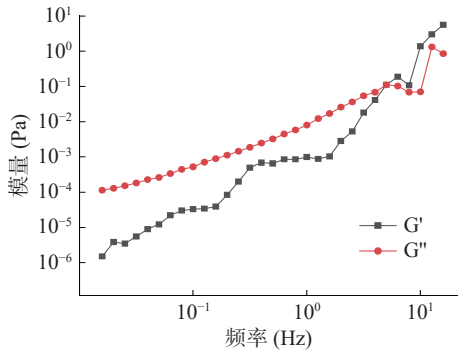


图 7 竹叶卷芯粗多糖溶液的动态剪切情况

Fig.7 Dynamic shear situation of crude polysaccharide solution in common lopatherum herb

即呈现弱凝胶特征[32]，通过频率扫描结果表明，高频率的出现能够增强竹叶卷芯粗多糖的凝胶性[34]。

2.3.2 静态流变特性 从图 8 可以看出，在温度为 25 ℃ 下，浓度为 1% 的竹叶卷芯粗多糖溶液的静态流变曲线。图中显示，竹叶卷芯粗多糖溶液在剪切速率为 0.01~0.043 s^{-1} 内，其表观黏度呈现急剧下降的趋势，其原因可能是竹叶卷芯粗多糖中存在较低的分子量以及半乳糖醛酸含量，从而削弱了分子内以及分子间的相互作用，同时由于较短的分子链长度，使得竹叶卷芯粗多糖分子在剪切力的作用下更易重新排列，形成有序结构，进而使竹叶卷芯粗多糖溶液的表观黏度呈现大幅度降低[35]；而在 0.043~1000 s^{-1} 内，随着剪切速率持续增加，其表观黏度逐渐趋于平稳状态，原因是高分子链间的结合和缠绕结构逐渐解开，物理交联的网络结构也会随之逐步分散，直至达到一种平衡状态[36]；这表现出竹叶卷芯粗多糖溶液存在剪切稀化的假塑性流体特征[37]。

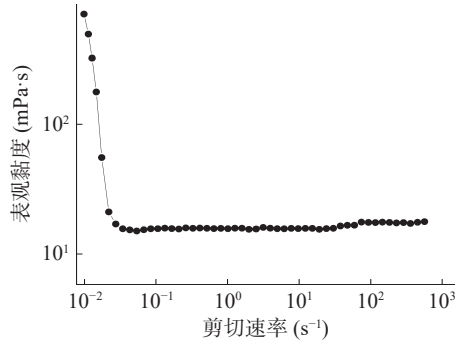


图 8 竹叶卷芯粗多糖溶液的稳态剪切情况

Fig.8 Steady-state shear behavior of crude polysaccharide solution from common lopatherum herb

2.4 竹叶卷芯粗多糖的体外免疫活性

2.4.1 竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞活性的影响 多糖通过识别并结合免疫细胞表面的特定受体从而促进相关细胞因子的表达[38]。本研究测定了不同浓度竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞存活率的影响。结合图 9 可以看出，与空白对照组对比，在 50~800 μg/mL 竹叶卷芯粗多糖

整体浓度范围内，RAW 264. 7 小鼠巨噬细胞相对存活率随竹叶卷芯粗多糖质量浓度增加而有所下降，当多糖质量浓度为 50 μg/mL 时，小鼠巨噬细胞的存活率达到最高，为 98.7%±0.6%；而当竹叶卷芯粗多糖质量浓度为 800 μg/mL 时，细胞相对存活率最低，但存活率仍达 95% 以上。由此可以说明，竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞并无明显毒性作用，且对小鼠巨噬细胞增殖均无明显影响，可利用该小鼠巨噬细胞模型研究竹叶卷芯粗多糖免疫活性机理。

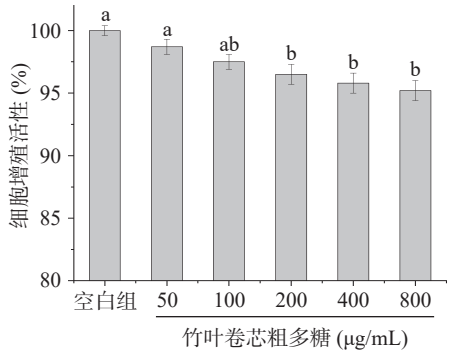


图 9　不同竹叶卷芯粗多糖浓度对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞存活率的影响

Fig.9　Effect of varying concentrations of common lopatherum herb polysaccharides on the viability of RAW 264.7 macrophage cells

2.4.2　竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞因子分泌的影响　TNF-α 作为机体免疫防护的重要介质，既能够促进巨噬细胞的修复和活化，也能够参与机体免疫反应病理损伤过程[39]。IL-6 是由巨噬细胞、淋巴细胞等免疫细胞分泌的细胞因子[40]。NO 作为一种重要的信号传导介质，能促进巨噬细胞的溶解和吞噬，参与免疫应答相关的生理过程[41]。

图 10(A)显示在 50~400 μg/mL 的范围内，竹叶卷芯粗多糖在一定程度上提高了 TNF-α 的分泌量。当多糖浓度为 50 μg/mL 时，RAW 264.7 小鼠巨噬细胞 TNF-α 分泌量显著高于空白对照组(P<0.05)；且竹叶卷芯粗多糖浓度为 400 μg/mL 时的 TNF-α 分泌量与 800 μg/mL 时的 TNF-α 分泌量相较，并无显著性差异(P>0.05)；由图 10(B)所示 50~400 μg/mL 质量浓度范围的竹叶卷芯粗多糖作用于巨噬细胞后，IL-6 的分泌量也随多糖浓度的增加而提高。50 μg/mL 的竹叶卷芯粗多糖浓度下，RAW 264.7 小鼠巨噬细胞 IL-6 分泌量显著高于空白对照组(P<0.05)，且 400 μg/mL 下 IL-6 的分泌水平与 800 μg/mL 时的分泌水平相比，两者差异并无显著性差异(P>0.05)；图 10(C)所示在 50~400 μg/mL 的竹叶卷芯粗多糖浓度范围内，NO 释放量随多糖浓度的增高而提升；竹叶卷芯粗多糖浓度为 400 μg/mL 下的 NO 释放量较浓度为 800 μg/mL 时的 NO 释放量并无显著差异(P>0.05)。可以看出，竹叶卷芯粗多糖对

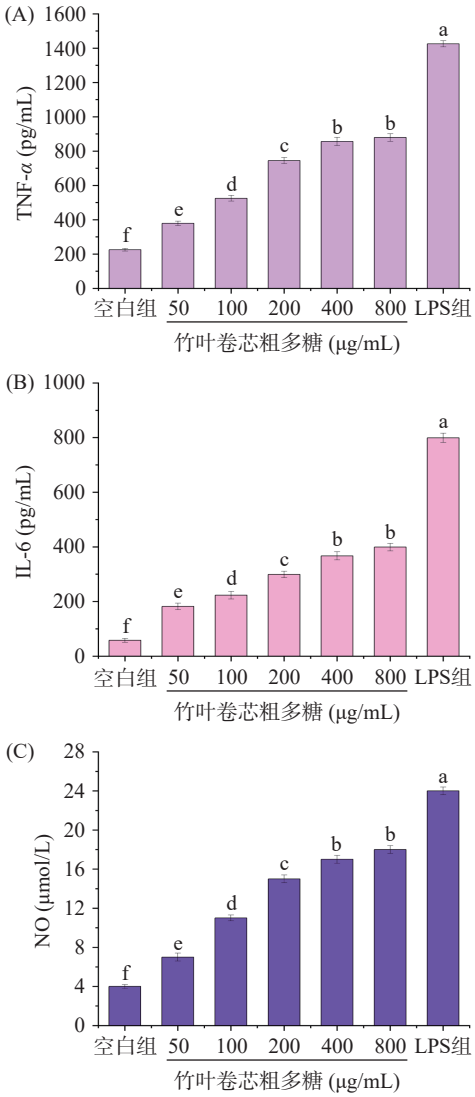


图 10　不同竹叶卷芯粗多糖浓度对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞分泌细胞因子的影响

Fig.10　Efffect of different concentrations of common lopatherum herb polysaccharides on cytokine secretion in RAW264.7 cells

注：A：TNF-α；B：IL-6；C：NO。

TNF-α、IL-6 和 NO 分泌量的促进水平是有限度的，均显著低于 LPS 阳性对照组(P<0.05)，表明竹叶卷芯粗多糖能提高机体的免疫水平，但又至于引发机体炎症。多糖发挥免疫调节功能的作用机制主要为通过刺激单核-巨噬细胞系统的吞噬能力、促进淋巴细胞增殖与转化、诱导抗体生成、激活细胞因子分泌以及激活补体系统等途径有效实现免疫调节效果[42]，其中，大多数多糖通过与细胞表面受体结合，激活下端信号通路，进而促进细胞因子的表达以实现免疫调节作用。目前研究发现的多糖受体包括 TLR4、清道夫受体(Scavenger recep-tor, SR)、甘露糖受体(Mannose receptor, MR)、CR3/CD14 和 Dectin-1 等[43]，根据竹叶卷芯粗多糖的单糖组成分析显示，其含有甘露糖(mannose, MA)，可与甘露糖受体特异性结合，以实现精准靶向，有效调节免疫系统并增强免疫调节效果[44−45]。对于低浓度时的多糖溶液能够促进细胞因

子的分泌及其受体的表达，但当浓度逐渐升高后，这种促进作用也会逐渐受到削弱，且高浓度时则会受到不同程度的抑制作用，这种现象被称为双向调节作用[46]。

3 结论

本文通过单因素实验和响应面试验优化竹叶卷芯粗多糖的碱法提取工艺，确定最佳条件为提取时间 92 min、提取温度 67 ℃、碱浓度 0.04 mol/L、料液比 1∶28 g/mL，该条件下得率为 3.21%±0.17%，经苯酚硫酸法测出竹叶卷芯粗多糖的总糖含量 54.7%±0.7%，单糖组成主要为岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、半乳糖醛酸和葡萄糖醛酸，其摩尔百分比为 0.81∶7.53∶21.45∶20.70∶30.61∶3.50∶3.05∶9.52∶2.84；动态剪切测试分析结果表明，竹叶卷芯粗多糖溶液表现为剪切稀化的假塑性流体；动态剪切测试分析结果显示，高频率的出现能够增强竹叶卷芯粗多糖溶液的凝胶性。体外免疫活性调节表明，竹叶卷芯粗多糖对 RAW 264.7 小鼠巨噬细胞无明显毒性，且在 50~400 μg/mL 浓度下能促进细胞因子的分泌，表明其具有较强的免疫调节活性。本文研究成果为今后竹叶卷芯粗多糖在食品工业及医药领域的开发及应用提供理论依据。

© 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] 朱为静, 王经邦, 吴佳, 等. 不同秸秆覆盖方式调控地温对雷笋产量和经济效益的影响[J]. 安徽农业科学, 2024, 52(11): 97−100. [ZHU W J, WANG J B, WU J, et al. Effects of different straw mulching methods on regulating soil temperature and their impacts on bamboo bhoot yield and economic benefits[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2024, 52(11): 97−100.]

[2] 陈守平, 张靖也. 中药竹叶、淡竹叶及竹卷心考辨[J]. 中国实用医药, 2021, 16(11): 208−210. [CHEN S P, ZHANG J Y. Textual research on Chinese medicine bamboo leaf, light bamboo leaf and bamboo roll heart[J]. China Practical Medicine, 2021, 16(11): 208−210.]

[3] 姚佳. 竹叶提取物的生物学功能及其在动物生产中的应用研究进展[J]. 饲料研究, 2023, 46(5): 155−159. [YAO J. Research progress on biological function of bamboo leaf extract and application in animal production[J]. Feed Research, 2023, 46(5): 155−159.]

[4] 张亚兰. 箬竹叶多糖分离纯化、结构表征及免疫活性研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2023. [ZHANG Y L. Isolation and purification, structure characterization and immunoreactivity of polysaccharides from Indocalamus leaves[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.]

[5] 唐莉莉, 丁霄霖. 竹叶多糖的分离提取及其生物活性研究[J]. 食品研究与开发, 2000, 21(1): 8–10. [TANG L L, DING X L. Separation, extraction and biological activity of polysaccharides from bamboo leaves[J]. Food Res Dev, 2000, 21(1): 8–10.]

[6] 曹文丹, 韦佳汝, 李圣淇, 等. 竹叶多糖的提取纯化、结构解析及生物活性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 240−247. [CAO W D, WEI J R, LI S Q, et al. Research progress on the extraction and purification, structure analysis and biological activity of bamboo leaf polysaccharides[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(3): 240−247.]

[7] 任美玲, 吕兆林, 张柏林. 竹叶多糖的研究现状与进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(13): 383−387. [REN M L, LÜ Z L, ZHANG B L. Research and development of polysaccharide from bamboo leaves[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(13): 383−387.]

[8] 许梦粤, 曾长立, 王红波. 药食同源植物多糖提取方法、结构解析和生物活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(19): 216−224. [XU M Y, ZENG C L, WANG H B. Advances in Extraction Method, Structural analysis and bioactivity of polysaccharides from medicinal and edible homologous plants[J]. Food Research and Development, 2023, 44(19): 216−224.]

[9] 金瑾, 隋志方, 秦令祥, 等. 加压辅助碱法提取蝉花子实体多糖工艺优化及体外免疫活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(20): 96−103. [JIN J, SUI Z F, QIN L X, et al. Optimization of process of Cordyceps cicadae fruiting body polysaccharides by pressurization-assisted alkaline extraction method and its *in vitro* immunoactivity[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(20): 96−103.]

[10] 戴天伦, 李洪庆, 陶文亮, 等. 赤水麻竹叶多糖提取工艺优化及体外抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(5): 69−74. [DAI T L, LI H Q, TAO W L, et al. Study on the extraction process optimization and antixidant activity *in vitro* of polysaccharides from dendrocalamus lati florus Munro Leaves in Chishui City[J]. China Condiment, 2022, 47(5): 69−74.]

[11] 罗雨菲, 黄秀壁, 苏芬安, 等. 姑辽茶粗多糖提取工艺优化及其免疫调节活性评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 161−169. [LUO Y F, HUANG X B, SU F A, et al. Optimization of the extraction process of crude polysaccharide from Guliao Tea and evaluation of its immunomodulatory activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 161−169.]

[12] LIU Dan, TANG Wei, YIN Junyi, et al. Monosaccharide composition analysis of polysaccharides from natural sources: Hydrolysis condition and detection method development[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 116: 106641.

[13] CHEN Di, LI Jin, GAO Qian, et al. Structural characterization of polysaccharide fractions in Areca (*Areca catechu* L.) inflorescence and study of its immunological enhancement activity *in vitro* and *in vivo*[J]. Food Research International, 2023, 171: 113006.

[14] ZOU Xialong, XIE Hongyu, LI Jiang, et al. Innovative application of coffee grounds oil as an asphalt modifier: extraction, preparation, and rheological properties[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e04012.

[15] QUAINOO K A, NEGASH M B, BAVOH B C, et al. Natural amino acids as potential swelling and dispersion inhibitors for montmorillonite-rich shale formations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2021, 196: 107664.

[16] WATANABE H, YOSHIIKE K, YAMAGUCHI M, et al. The marine factor 3, 5-dihydroxy-4-methoxybenzyl alcohol suppresses cell growth, inflammatory cytokine production, and NF-κB signaling-enhanced Osteoclastogenesis in *in vitro* mouse macrophages RAW264.7 cells[J]. Current Molecular Medicine, 2024, 24(6): 813−825.

[17] 李文静, 郝翠翠, 杨超. 丹参酮ⅡA 对高糖诱导的胰岛 β 细胞存活、凋亡及胰岛素分泌的影响及其潜在分子机制[J]. 中国老

年学杂志，2023，43(16)：4051−4055. ［LI W J, HAO C C, YANG C. Effects of tanshinone IIA on survival, apoptosis and insulin secretion of islet *β* cells induced by high glucose and its potential molecular mechanism[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2023, 43(16): 4051−4055.］

［18］ QIN Guozheng, LI Ping, ZHANG Mingrui, et al. Exopolysaccharide from Rhizopus nigricans modulates antitumor Immune responses by promoting tumor-associated macrophage polarization toward the M1 phenotype in C57BL/6J Mice[J]. Russian Journal of Bioorganic Chemistry, 2024, 50(6): 2519−2528.

［19］ DONG Shiyi, WU Yu, LUO Yutong, et al. Study on the extraction technology and antioxidant capacity of Rhodymenia intricata polysaccharides[J]. Foods, 2024, 13(23): 3964.

［20］ 陈永，宋真萍，吴晖，等. 红蓝草多糖提取工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技，2023，44(5)：166−173. ［CHEN Y, SONG Z P, WU H, et al. Optimization of the extraction process of Peristrophe roxburghiana polysaccharide and analysis of its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 166−173.］

［21］ 张玉梅. 槐花多糖的提取、结构表征及抗肿瘤活性研究[D]. 天津：天津科技大学，2023. ［ZHANG Y M. Study on extraction, structure characterization and antitumor activity of polysaccharides from Flos Sophorae[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2023.］

［22］ CHEN Shuai, QIN Li, XIE Liuming, et al. Physicochemical characterization, rheological and antioxidant properties of three alkali-extracted polysaccharides from mung bean skin[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107867.

［23］ ELIYAS N, XIAO H X, ZHAN Y, et al. Effects of different temperatures on the chemical structure and antitumor activities of polysaccharides from cordyceps militaris.[J]. Polymers, 2018, 10(4): 430−430.

［24］ 袁书会，陈强，刘红波，等. 低共熔溶剂提取酸枣果肉多糖工艺及其对 *α*-葡萄糖苷酶抑制活性研究[J]. 中国野生植物资源，2024，43(7)：1−8. ［YUAN S H, CHEN Q, LIU H B, et al. Deep eutectic solvent extraction polysaccharide of wild jujube flesh and research on its inhibitory activity against *α*-Glucosidase[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2024, 43(7): 1−8.］

［25］ 王燕，段雪伟，张敏君，等. 响应面法优化黑玉米粒多糖提取工艺及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技，2023，44(22)：191−200. ［WANG Y, DUAN X W, ZHANG M J, et al. Optimization of extraction process and antioxidant activity of polysaccharide from black corn kernel by response surface method[J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 44(22): 191−200.］

［26］ 赵婷婷，戴映笛，舒昉，等. 灵芝菌丝体多糖提取工艺优化及其对慢性酒精肝损伤的保护作用[J]. 食品工业科技，2023，44(5)：388−396. ［ZHAO T T, DAI Y D, SHU F, et al. Optimization of extraction technology of polysaccharides from Ganoderma lingzhi mycelium and its protective effecton alcoholic liver injury[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(5): 388−396.］

［27］ 黄秋萍，韦友欢，郑燕菲，等. 银叶金合欢叶多酚提取工艺优化及抗氧化性研究[J]. 中国酿造，2023，42(11)：183−188. ［HUANG Q P, WEI Y H, ZHENG Y F, et al. Optimization of extraction technology and antioxidant activity of polyphenols from *Acacia podalyriifolia* leaves[J]. China Brewing, 2023, 42(11): 183−188.］

［28］ 张晨，赵金，严俊杰，等. 响应面法优化黑皮鸡枞总黄酮提取工艺[J]. 中国调味品，2022，47(11)：138−143. ［ZHANG C, ZHAO J, YAN J J, et al. Optimization of extraction process of total flavonoids from *Oudemansiella raphanipes* by response surface methodology[J]. China Condiment, 2022, 47(11): 138−143.］

［29］ WANG Zichao, ZHEN Yi, LAI Ziru, et al. Effect of monosaccharide composition and proportion on the bioactivity of polysaccharides: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 254(P2): 127955.

［30］ 张颖，曾艳，邱广君，等. 刺五加黑木耳酸性多糖化学组成及免疫活性研究[J]. 食品工业科技，2017，38(10)：119−123,128. ［ZHANG Y, ZENG Y, QIU G J, et al. Structural properties and immunostimulatory activity of an acidic polysaccharide from Auricularia auricular-judae cultivated on *Eleutherococcus senticosus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(10): 119−123, 128.］

［31］ 毛贵珠. 高 RG-I 型柑橘囊衣果胶的肠道益生及降脂功效研究[D]. 杭州：浙江大学，2020. ［MAO G Z. Effect of RG-I-enriched pectin from citrus segment membrane on gut microbiota modulation and prevention of diet-induced obesity of mice[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.］

［32］ 计宇航. 迎春草多糖及其化学修饰产物理化性质及抗氧化性的研究[D]. 安徽：合肥工业大学，2020. ［JI Y H. Physicochemical properties and antioxidant activitiesof polysaccharides and chemical modificationsfrom Amana eduli[D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2020.］

［33］ 陈志娜，杨希娟，师俊玲. 西藏灵菇发酵乳胞外多糖的流变学特性[J]. 食品科学，2016，37(5)：1−5. ［CHEN Z N, YANG X J, SHI J L. Rheological properties of exopolysaccharide produced by Tibetan Kefir[J]. Food Science, 2016, 37(5): 1−5.］

［34］ 琚晶晶，胡飞阳，赵保堂，等. 当归多糖提取方法对其提取率及理化性质的影响[J]. 食品科技，2024，49(2)：195−202. ［JU J J, HU F Y, ZHAO B T, et al. Effects of extraction methods on the extraction rate and physicochemical properties of Angelica sinensis polysaccharides[J]. Food Technology, 2024, 49(2): 195−202.］

［35］ 王欣. 亚临界水法提取果渣果胶及其品质研究[D]. 杨凌：西北农林科技大学，2015. ［WANG X. A study on extraction and characterization of pectin obtained bysubcritical water from pomace[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015.］

［36］ 梁小杰，陈鹏，梁兵. 一种疏水缔合聚合物的合成及溶液性能[J]. 精细化工，2013，30(6)：680−685. ［LIANG X J, CHEN P, LIANG B. Synthesis of a hydrophobic associated polymer and its solution properties[J]. Fine Chemicals, 2013, 30(6): 680−685.］

［37］ 黄晓玲，胡丹，邓颖诗，等. 剪切工艺对特医食品全营养乳液稳定性的影响[J]. 现代食品，2023，29(17)：131−136. ［HUANG X L, HU D, DENG Y S, et al. Effect of shearing process on stability of emulsion-type foods for special medical purpose[J]. Modern Food, 2023, 29(17): 131−136.］

［38］ DEVI K S P, DHANESH K, JOYJYOTI D, et al. Molecular mechanisms associated with particulate and soluble heteroglycan mediated immune response[J]. Journal of Cellular Biochemistry, 2016, 117(7): 1580−1593.

［39］ ZAMANIAN Y M, ZAFARI H, OSMININA K M, et al. Improving dexamethasone drug loading and efficacy in treating rheumatoid arthritis via liposome: Focusing on inflammation and molecular mechanisms[J]. Animal Models and Experimental Medicine, 2024, 8(1): 5−19.

［40］ WU Xiaoshuai, WANG Bailei, LI Yichen, et al. NIR driven catalytic enhanced acute lung injury therapy by using polydopamine@Co nanozyme via scavenging ROS[J]. Chinese Chemical Letters, 2025, 36(2): 110211.

［41］ DAVIAUD C, FERRAZ A A C, SILVA E G M, et al. Polymethoxy flavones from Gardenia oudiepe and semi-synthetic derivatives reduce nociception in mice: Evidence for the involvement of the MAPK pathway[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2025, 182: 117742.

［42］ 王阳, 王伯初, 周菁, 等. 多糖的免疫调节功能研究进展[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2004, 27(3): 104−107113. ［WANG Y, WANG B C, ZHOU J, et al. Investigatied development on immune regulation of polysaccharide[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2004, 27(3): 104−107, 113.］

［43］ 李容, 陈华国, 周欣. 植物多糖免疫调节机制研究进展[J]. 天然产物研究与开发, 2018, 30(11): 2017−2022,2031. ［LI R, CHEN H G, ZHOU X. Immunomodulatory effects of plant polysaccharides: A review of the mechanisms[J]. Natural Product Research and Development, 2018, 30(11): 2017−2022,2031.］

［44］ 麻玉清, 柳海云, 王晓强, 等. 多糖修饰脂质纳米颗粒递药系统的研究进展[J]. 生物工程学报, 2024, 40(12): 4339−4350. ［MA Y Q, LIU H Y, WANG X Q, et al. Research progress in polysaccharide-modified lipid nanoparticles for drug delivery[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2024, 40(12): 4339−4350.］

［45］ YU Jiankun, WANG Shanshan, QI Jing, et al. Mannose-modified liposome designed for epitope peptide drug delivery in cancer immunotherapy[J]. International Immunopharmacology, 2021, 101(Pt A): 108148.

［46］ 张松莲, 兰琦杰, 曾富华, 等. 仙人掌多糖对小鼠非特异性免疫的影响[J]. 湛江师范学院学报, 2007(3): 95−99. ［ZHANG S L, LAN Q J, ZENG F H, et al. Effects of polysaccharides from *Opuntia dillenii* Haw on non-specific immune function in mice[J]. Journal of Zhanjiang Normal College, 2007(3): 95−99.］