当归多糖的提取纯化及其基于斑马鱼模型的免疫调节功能研究

石万银[1]，赖富丽[1]，崔灵敏[1]，唐万[1]，陈阳[1]，王喆[1,2]，杨强[1,2]，徐剑[1,*]

（1. 劲牌有限公司，黄石　435000；2. 中药保健食品质量与安全湖北省重点实验室，大冶　435100）

摘要：为了确定当归药材中当归多糖成分的提取、分离纯化工艺及免疫调节功能，以当归药材中多糖的提取效率为考察指标，通过单因素实验和正交实验考察当归药材中多糖的提取工艺条件，并对当归药材中多糖进行纯化，考察纯化后不同当归多糖组分的免疫调节功能。结果显示当归多糖最佳提取工艺为：当归药材粉碎，加入3%的纤维素酶和150倍的纯水，柠檬酸调节pH值为5，50 ℃下提取2.5 h，当归多糖的提取率为(36.71±0.38)%。提取物分离纯化得到不同当归多糖组分APS−1和APS−2，免疫调节实验结果显示APS−1和APS−2均能促进斑马鱼巨噬细胞吞噬作用，两种组分的起效浓度均在50 μg/mL左右；因此，本研究的方法对当归多糖提取纯化效果较好，获得的当归多糖组分具有较好的免疫调节功能，为当归多糖提取纯化和功能研究提供数据支撑。

关键词：当归；多糖；提取纯化；免疫调节；细胞吞噬

中图分类号：TS202.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1006−2513(2025)11−0001−0007

doi：10.19804/j.issn1006−2513.2025.11.001

Extraction and purification of polysaccharides from *Angelica* and their immunoregulation effects based on a zebrafish model

SHI Wanyin[1]，LAI Fuli[1]，CUI Lingmin[1]，TANG Wan[1]，CHEN Yang[1]，WANG Zhe[1,2]，YANG Qiang[1,2]，XU Jian[1,*]

（1. Jing Brand Co. Ltd.，Huangshi　435000；2. Hubei Provincial Key Lab for Quality and Safety of Traditional Chinese Medicine Health Food，Daye　435100）

Abstract：In order to optimize the extraction and purification process of *Angelica sinensis* polysaccharide and evaluate their immune regulation functions. The extraction yield of *Angelica* polysaccharide was used as the primary index. The extraction conditions were optimized via single−factor and orthogonal experiments，followed by purification of the extracts. The immunoregulatory effects of different purified polysaccharide fractions were then investigated. The results showed that the optimal extraction process was as follows：crushing *Angelica sinensis*，adding 3% cellulase and 150 times pure water，adjusting the pH to 5 with citric acid，and extracted at 50 ℃ for 2.5 h. Under the above conditions，the polysaccharide extraction yield was (36.71±0.38)%. The crude polysaccharide was separated and purified to obtain two main polysaccharide fractions：APS−1 and APS−2. Immunomodulatory assays demonstrated that both APS−1

收稿日期：2025−02−12

基金项目：湖北省自然科学基金项目（2022CFD077）

作者简介：石万银（1985−），女，硕士，工程师，研究方向：药食两用药材提取纯化及功能研究。

***通信作者**：徐剑（1979−），男，博士，高级工程师，研究方向：药食两用药材提取纯化及功能研究。E−mail:2358053760@qq.com

and APS−2 significantly enhanced the phagocytic activity of zebrafish macrophages，with the effective concentration was about 50 μg/mL. Thus，the method employed in this study was demonstrated to efficiently extract and purify *Angelica* polysaccharides，The obtained *Angelica* polysaccharide fractions demonstrated notable immunomodulatory activity，providing data support for the extraction，purification and functional research of *Angelica* polysaccharide in the future.

Keywords：*Angelica sinensis*；polysaccharides；extraction and purification；immunoregulation；phagocytosis

当归既是食品也是药品，来源为伞形科植物 *Angelica sinensis*（Oliv.）Diels 的根部。当归有多种功效，例如补血活血、缓解痛经和通便润肠等[1]。当归含有多重化学成分，其中具有较好药理活性的成分有多糖、挥发油、黄酮、有机酸及香豆素等[2]。其中当归多糖是当归重要活性成分之一，主要有保肝护肝、降糖降脂、抗贫血、抗肿瘤等功能，临床应用十分广泛，所以有必要对当归多糖进行深入研究[3]。

当归多糖（APS）的常用的提取方法较多，目前使用较多的有水加热提取、超声波提取、生物酶辅助提取和微波辅助提取等方法。现有方法对当归多糖的提取效率普遍不高，且会造成多糖结构或构象的改变，影响当归多糖的药理活性。纤维素酶辅助水加热提取当归多糖不仅能提升当归多糖提取效率，该方法还能降低提取温度并缩短提取时间，减少了能源消耗，也为热敏性多糖的提取提供了更适宜的条件，且酶的作用较为温和，能够最大程度减少对多糖结构的破坏，确保多糖结构和生物活性的完整性。当归多糖的分离及纯化方法主要是水提醇沉后用适当的方法去除蛋白质等杂质后，再采用凝胶树脂纯化、冷冻干燥等方法得到纯度较高的当归多糖[4−7]。

目前行业内对于多糖类成分的免疫调节活性研究以小鼠模型和细胞实验为主。两种方法各有优劣，例如小鼠模型能从生物整体层面进行多指标评价，但也存在研究成本高、研究周期长、研究过程操作要求高等问题。细胞实验通常是在离体的环境下进行，研究操作要求较小鼠模型低，但存在实验稳定性差、评价指标单一等问题。近年来，斑马鱼已成为食品与药品功能评价的热门生物，斑马鱼巨噬细胞通过吞噬和杀灭胞内寄生虫、细菌等异物发挥机体的免疫防御、免疫自稳等功能。将纳米荧光微球作为异物，通过静脉注射将一定数量的荧光微球注射到斑马鱼体内能够激活吞噬细胞的吞噬功能。巨噬细胞吞噬功能越强，则未被吞噬的荧光微球数量越少。通过统计剩余荧光微球的数量，可以有效地评价样品的免疫调节作用[8−10]。

本研究采用纤维素酶辅助水加热提取的方法对当归多糖进行提取研究，并对得到的当归粗多糖进行纯化，纯化后的当归多糖组分进行分子量分布和基于斑马鱼模型的免疫调节功能研究，为当归药材中多糖的提取纯化和免疫调节活性研究提供参考。

1 材料

1.1 材料与试剂

当归药材：河北省安国药材市场；DEAE Seplife A−25 树脂：蓝晓科技；无水乙醇、硫酸、苯酚、硝酸钠、柠檬酸、纤维素酶、氯仿：国药集团；超纯水：ELGAOption−Q 超纯水系统。酒石酸长春瑞滨注射液：江苏豪森药业；百令胶囊：杭州中美华东制药；荧光微球：Sigma 公司；NaCl 注射液：科伦制药；野生型 AB 品系斑马鱼：杭州环特。

1.2 仪器与设备

1260 高效液相色谱系统（包括泵和进样器）：安捷伦科技（中国）有限公司；高效凝胶渗透色谱仪、OPTILAB T-Rex 示差检测器、DAWNHELEOS-II 激光检测器：美国怀雅特技术有限公司；AB135-S 十万分之一电子天平：梅特勒托利多科技（中国）有限公司；JJ1000A 电子天平：常熟市双杰测试仪器厂；SK8200LHC 超声仪：上海科导超声仪器有限公司；TU1901 紫外可见分光光度计：北京普析通用有限公司；W5-100SP 恒温水浴锅：上海申生科技有限公司；Zeiss-Stemi508 体视显微镜、Zeiss-Axio Zoom V16 荧光体视显微镜：德国蔡司公司；Narishige-IM-400 显微注射仪、Narishige-PC-100 拉针仪：

日本成茂公司；SPX-250B-Z 生化培养箱：上海博讯实业有限公司；斑马鱼养殖系统（定制）：爱生科技有限公司。

2 实验方法

2.1 当归多糖提取工艺

2.1.1 单因素实验

称取 50 g 当归药材粉末，分别考察纤维素酶添的加量（1.0%、1.5%、2.0%、2.5%、3.0%）、酶解 pH 值（3、4、5、6、7）、酶解时间（0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 h）、酶解温度（40、45、50、55、60 ℃）和溶剂倍数（5、10、15、20、25 BV）对当归药材中多糖提取率的影响 [11]。

2.1.2 正交实验

根据单因素实验的分析结果，采用四因素三水平的正交优化试验，实验设计表如表 1 所示。

表 1 当归多糖提取工艺正交试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels for orthogonal experiment on *Angelica* polysaccharides extraction

水平	酶添加量 /%（*A*）	酶解 pH 值（*B*）	酶解温度 /℃（*C*）	酶解时间 /h（*D*）
1	2.0	5	45	1.5
2	2.5	6	50	2.0
3	3.0	7	55	2.5

2.2 多糖提取率测定

采用硫酸 − 苯酚法测定提取液中当归多糖的浓度，多糖提取率按照公式（1）计算。

$$Y/\%=\frac{m\times n}{M}\times 100 \quad (1)$$

式中：Y 为当归多糖提取率，%；m 为样品中当归多糖质量，g；n 为样品稀释倍数；M 为实验用当归样品质量，g。

2.3 当归多糖纯化

当归粗多糖提取液采用减压浓缩到生药浓度为 1 g/mL，加入无水乙醇调节浓缩液中的乙醇浓度为 30%，8000 r/min 离心 10 min 后取上清液，再加入无水乙醇调节上清液乙醇浓度到 80%，8000 r/min 离心 10 min，弃去上清液收集沉淀，采用冷冻干燥得到当归多糖提取物。然后，参照谢佳艺等 [12] 的方法，使用 Savag 法将冷冻干燥后的当归多糖反复除蛋白 3 次，采用 DEAE Seplife A−25 葡聚糖凝胶层析柱纯化，以 0.5 BV/h 的上样流速上样，再分别按顺序使用超纯水、不同浓度氯化钠溶液（0.3 mol/L NaCl、0.5 mol/L NaCl）洗脱，收集洗脱液，10 mL/ 管。并采用硫酸 − 苯酚法测定吸光度，以吸光度作为纵坐标，洗脱液管数编号作为横坐标绘制曲线。分别收集合并洗脱曲线峰所对应的样品管中的样品，并采用分子量为 10000 Da 透析袋除盐，减压浓缩后冷冻干燥得到当归多糖（APS）样品。

2.4 当归多糖分子量测定

分别取 APS−1 和 APS−2 各 10 mg，加水 10 mL 溶解，采用高效凝胶渗透色谱仪，Shodex OHpak SB−803HQ 和 Shodex OHpak SB−805HQ 色谱柱串联，流动相为 0.15 M 硝酸钠溶液，流速 0.6 mL/min，进样量 200 μL，检测当归多糖组分 APS−1 和 APS−2 的分子质量分布范围。

2.5 免疫调节活性研究

2.5.1 样品制备

取 APS−1 适量，用纯化水配制成 1 mg/mL 的母液，现配现用，APS−2 配制方法同上。取百令胶囊配制成 10 mg/L 的溶液作为阳性对照样品母液，采用标准稀释水稀释阳性对照品母液至 15 μg/mL 作为百令胶囊溶液备用。

2.5.2 斑马鱼对当归多糖的最大耐受浓度（MTC）考察及给药浓度确定

随机选取受精后 3 d（3 dpf）的野生型 AB 品系斑马鱼，正常组显微注射生理盐水和荧光微球混合液，模型组和实验组均显微注射酒石酸长春瑞滨与荧光微球混合液，建立免疫低下模型，用标准稀释水对注射完成后的斑马鱼进行 3 次清洗，然后随机分组，每组 30 尾放入 6 孔板内。采用标准稀释水分别稀释 APS−1 母液至 1000、500、250、125、62.5、31.25 μg/mL，将稀释后的不同浓度 ASP−1 溶液分别取 3 mL 加入每孔实验组，分别取 3 mL 标准稀释水加入每孔正常组和模型组。APS−2 稀释和给药方法同上。每天定时观察斑马鱼的存活情况，实验周期为 48 h，实验完成后再在显微镜下观察斑马鱼的状态和脏器发育情况，以对斑马鱼无毒无害的最大给药浓度确定为 APS−1 和 APS−2 对斑马鱼的 MTC，并根

据 MTC 的结果确定给药浓度。

2.5.3 促进巨噬细胞吞噬功能评价

随机选取受精后 3 d（3 dpf）的野生型 AB 品系斑马鱼，正常组显微注射生理盐水和荧光微球混合液，模型组、阳性组和实验组均显微注射酒石酸长春瑞滨和荧光微球混合液，建立免疫低下模型，用标准稀释水对注射完成后的斑马鱼进行 3 次清洗，然后随机分组，每组 30 尾放入 6 孔板内。根据 MTC 实验结果设置不同浓度的当归多糖剂量组（每孔加 3 mL 不同浓度的 APS−1 或 APS−2 溶液）、阳性组（加入 3 mL 稀释后的百令胶囊溶液）、模型组和正常组（加入 3 mL 标准稀释水）。28 ℃处理 48 h 后，清洗三次并重新加样一次，累计处理 96 h 后，分别将各组斑马鱼置于荧光显微镜下拍照，保存图片并使用 Image−J 图像处理软件分析斑马鱼体内剩余荧光颗粒的数量，根据实验结果调整优化给药剂量，确定 APS−1 和 APS−2 的最低起效浓度。

2.5.4 统计学方法

以 SPSS 26.0 软件进行实验数据的统计分析。$P<0.05$ 表明差异具有统计学意义。

3 结果与分析

3.1 单因素实验结果

3.1.1 添加纤维素酶的浓度对当归药材中多糖提取率的影响

由图 1A 可知，当归多糖的提取率随着纤维素酶的添加浓度升高而升高。当纤维素酶浓度达到 2.5% 时当归药材中多糖的提取率最高为（34.71±0.15）%，随后再增加酶的添加量，当归多糖得率稍有降低。这可能是因为在纤维素酶浓度达到最好的效果之后，再增加酶浓度对多糖提取率影响较小，同时采用硫酸 − 苯酚法检测多糖得率存在一定的检测误差。因此，纤维素酶浓度在 2%～3% 之间较为适宜。

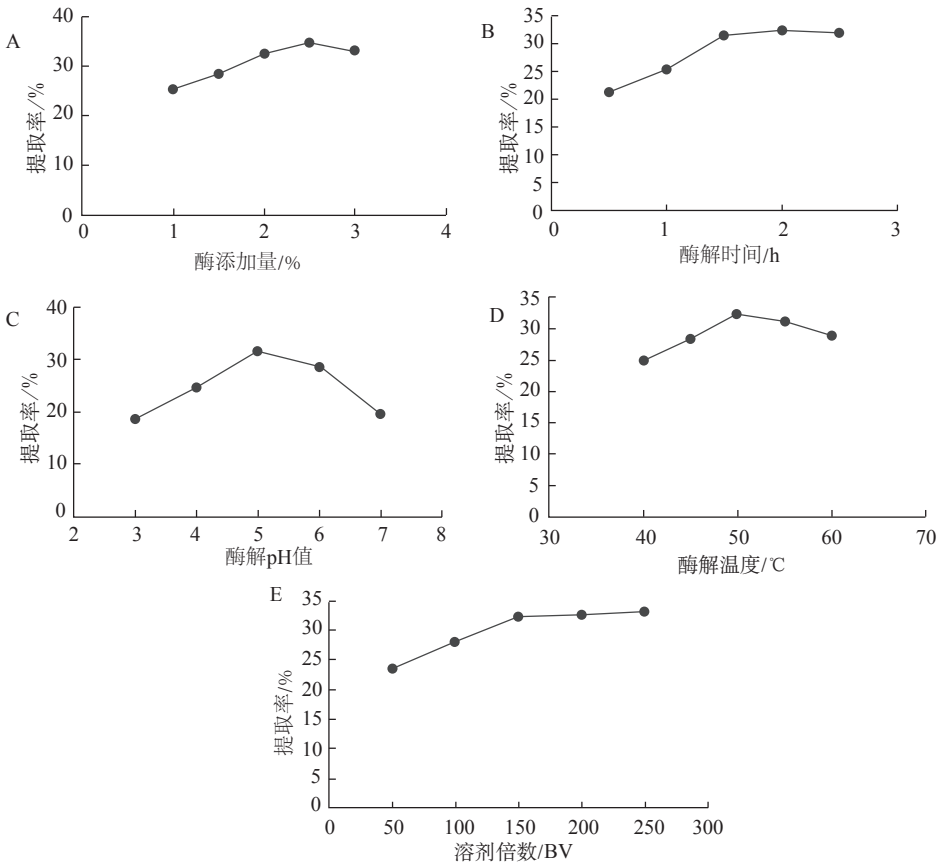

图 1 酶添加量（*A*）、酶解时间（*B*）、酶解 pH 值（*C*）、酶解温度（*D*）以及溶剂倍数（*E*）对当归多糖提取率的影响

Figure 1 Effects of enzyme amount (*A*), enzymolysis time (*B*), enzymolysis pH (*C*), enzymolysis temperature (*D*), and solvent−to−material ratio (*E*) on the extraction yield of *Angelica* polysaccharides

3.1.2 酶解时间对当归药材中多糖提取率的影响

由图 1B 可知，当归多糖提取率随着酶解时间的延长而不断升高。当酶解时间达到 2 h 时当归多糖提取率最高为（32.35±0.38）%，通过数据分析发现酶解时间达到 1.5 h 之后当归药材中多糖提取率升高速率变慢，这可能是由于酶解时间 1.5 h 左右，当归药材中绝大部分多糖被提取，因此酶解时间为 1.5～2.5 h 最佳。

3.1.3 酶解环境的 pH 值对当归药材中多糖提取率的影响

由图 1C 可知，当归多糖的提取率最高为（31.55±0.29）%，此时酶解 pH 值为 5，酶解 pH 值大于 5 或者小于 5 时，多糖提取率均明显降低，可能由于纤维素酶提取当归多糖的最佳反应 pH 值在 5 附近，pH 值过高或者过低都会影响当归多糖的提取率。因此，当归多糖提取酶解 pH 值在 4～6 之间较为合理。

3.1.4 酶解温度对当归药材中多糖提取率的影响

由图 1D 可知，当归多糖提取率随温度的上升表现出先升后降的趋势，50 ℃时多糖提取率最高为（32.47±0.32）%。可能是由于大于 50 ℃时纤维素酶的活性降低，当归多糖提取率随之降低。因此，酶解温度设置在 45～55 ℃之间为宜。

3.1.5 溶剂倍数对当归药材中多糖提取率的影响

由图 1E 可知，当归药材中多糖的提取率随着溶剂倍数增加而增加后逐渐稳定。当溶剂倍数为 150 倍时，当归多糖提取率达到最高为（32.19±0.43）%，这可能是由于增加溶剂量，会提高酶与当归药材的接触面积，使多糖溶出率增加，当达到一定溶剂倍数时多糖已基本溶出，从而导致继续提高溶剂倍数对多糖提取率无明显变化。因此，综合考虑提取成本，溶剂倍数选择为 150 倍较为合理。

3.2 正交试验优化分析

正交实验结果见表 2。

以多糖提取率为指标，极差分析结果表明实验选择的各个因素对多糖提取率影响顺序从大到小依次为：酶解 pH 值＞酶解温度＞酶添加量＞酶解时间，其中以酶解 pH 值对多糖提取率的影响最大。同时通过每个因素均值比较结果表明，以酶添加量 A_3、酶解时间 B_3、酶解温度 C_2、酶解 pH 值 D_2 为最佳提取条件。结合单因素实验中对多糖提取次数的考察，最终确定当归多糖的提取工艺为：当归药材粉碎，加入 3% 的纤维素酶和 150 倍的纯水，柠檬酸调节 pH 值为 5，50 ℃下提取 2.5 h。按照确定的当归多糖最佳提取工艺进行提取验证，得到当归药材中多糖的提取率为（36.71±0.38）%。

表 2 正交实验结果分析表

Table 2 Analysis of orthogonal experiments

因素	酶添加量/%	酶解时间/h	酶解温度/℃	酶解 pH 值	多糖提取率/%
1	2	1.5	45	4	28.36±0.39
2	2	2	50	5	32.09±0.28
3	2	2.5	55	6	26.23±0.54
4	2.5	1.5	50	6	29.30±0.43
5	2.5	2	55	4	26.01±0.57
6	2.5	2.5	45	5	33.29±0.36
7	3	1.5	55	5	30.49±0.25
8	3	2	45	6	29.33±0.47
9	3	2.5	50	4	31.51±0.55
均值 1	28.893	29.383	30.327	28.627	
均值 2	29.533	29.143	30.967	31.957	
均值 3	30.443	30.343	27.577	28.287	
极差	1.550	1.200	3.390	3.670	

3.3 当归多糖纯化

从图 2 可以看出，当归多糖采用 DEAE Seplife A25 葡聚糖凝胶纯化后，分别收集并合并洗脱曲线中两个峰所对应的样品，采用截留分子量为 10000 Da 透析袋除盐，冷冻干燥后得到纯化后的当归多糖两个组分：APS−1 和 APS−2。

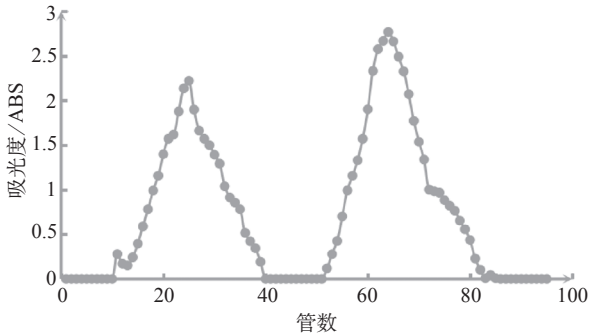

图 2 当归多糖洗脱曲线

Figure 2 The elution curve of *Angelica* polysaccharides

3.4 当归多糖的分子量分析

分子量测定结果分析表明，APS−1 的重均分子量（Mw）为 2.010×10^5 Da，分子量分布范围为（$5.85\times10^5\sim4.50\times10^5$ Da）；APS−2 的重均分子量（Mw）为 2.050×10^4 Da，分子量分布范围为（$1.05\times10^4\sim3.10\times10^4$ Da）。

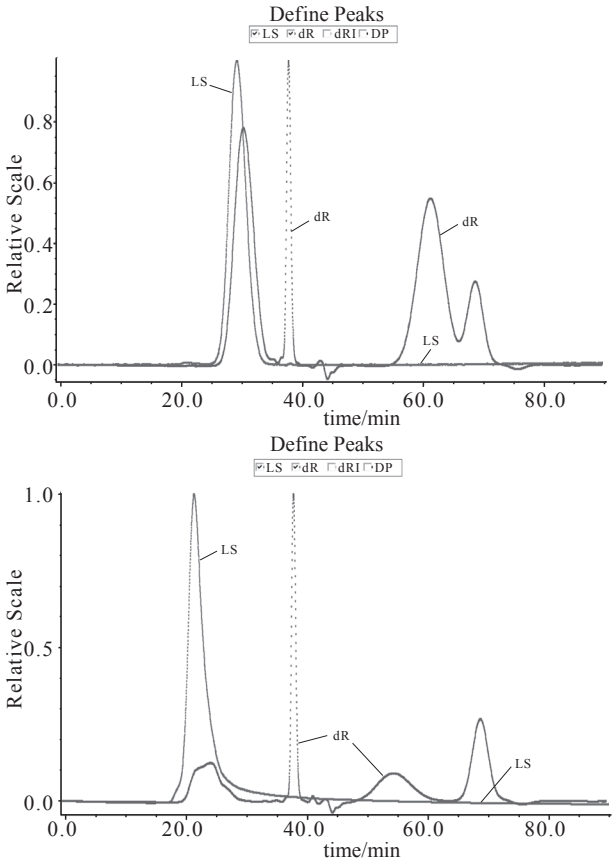

图 3 APS−1（上）和 APS−2（下）分子量测定色谱图

Figure 3 Molecular weight determination chromatogram of APS−1 and APS−2

3.5 APS−1 和 APS−2 免疫调节活性研究

3.5.1 APS−1 和 APS−2 最大耐受浓度考察及给药浓度确定

MTC 结果显示，当 APS−1 的给药剂量 ≤ 1000 μg/mL 时，正常组和样品组均没有出现斑马鱼的死亡和毒性现象。因此，确定 APS−1 的浓度≤ 1000 μg/mL 是安全的，APS−2 的最大耐受浓度实验结果同 APS−1。根据 MTC 实验结果设置 APS−1 和 APS−2 的给药浓度均为 1000、500、250、125、62.5、31.25 μg/mL，正常组加标准稀释谁，阳性组加入百令胶囊溶液。结果显示在 31.25 μg/mL 时 APS−1 和 APS−2 均没有促进巨噬细胞吞噬功能，为了进一步确认当归多糖促进巨噬细胞吞噬功能的最低起效浓度，继续优化给药剂量并进行实验验证，设置后续免疫调节功能研究的给药浓度为 100、50、25 μg/mL。

3.5.2 促进巨噬细胞吞噬功能评价

验数据分析结果见表 3，与模型组比较，正常组和阳性组斑马鱼体内剩下的荧光微球显著减少，表明造模成功；APS−1 在 100 μg/mL 和 50 μg/mL 处理斑马鱼 96 h 后，斑马鱼体内剩下的荧光微球与模型组相比有显著性差异（$P<0.05$），在 25 μg/mL 处理后，斑马鱼体内剩下的荧光微球数量与模型组相比没有显著性差异，APS−2 的实验结果与 APS−1 一致。表明 APS−1 和 APS−2 能促进斑马鱼巨噬细胞吞噬作用，具体的起效浓度在 50 μg/mL 左右。

表 3 不同浓度 APS−1 和 APS−2 对巨噬细胞吞噬作用影响

Table 3 Effects of APS−1 and APS−2 concentrations on macrophage phagocytosis

组别	剩余荧光微球数量（APS−1）	剩余荧光微球数量（APS−2）
模型组	65.25 ± 6.126	67.01 ± 4.329
正常组	54.09 ± 3.201*	56.32 ± 3.301*
阳性组	52.91 ± 3.542*	53.30 ± 3.798*
100 μg/mL	52.23 ± 3.793*	53.44 ± 3.336*
50 μg/mL	52.55 ± 4.018*	53.21 ± 3.819*
25 μg/mL	54.43 ± 5.235	56.29 ± 5.900

注：与模型组比较，*：$P < 0.05$

4 结论

当归富含多种化学成分，本研究采用纤维素酶辅助水加热进行当归多糖最佳提取工艺考察，确定当归多糖最佳提取工艺为：当归药材粉碎，加入 3% 的纤维素酶和 150 倍的纯水，柠檬酸调节 pH 值为 5，50 ℃下提取 2.5 h，当归多糖的提取率为（36.71 ± 0.38）%。然后使用分级醇沉、凝胶柱层析等方法对当归粗多糖进行纯化，得到两个当归多糖组分：APS−1 和 APS−2，重均分子量（Mw）分别为 2.010×10^5 Da、2.050×10^4 Da，分子量分布范围分别为 $5.85\times10^5\sim4.50\times10^5$ Da、

$1.05\times10^4\sim3.10\times10^4$ Da。免疫调节实验结果表明，APS−1 和 APS−2 均能促进斑马鱼巨噬细胞吞噬作用，两种组分的起效浓度均在 50 μg/mL 左右，低于 25 μg/mL 的当归多糖对斑马鱼巨噬细胞吞噬作用影响较小。本研究可为当归多糖的提取纯化及免疫调节功能研究提供理论参考。

参考文献：

[1] 国家药典委员会 . 中华人民共和国药典 [M]. 北京：中国医药科技出版社，2020.

[2] 董晴，陈明苍 . 当归化学成分及药理作用研究进展 [J]. 亚太传统医药，2016，12（2）：32−34.

[3] 张玉，王凯平 . 当归多糖的研究进展 [J]. 中国药学杂志，2023，58（12）：1065−1073.

[4] 王利华，王菲菲，刘悦，等 . 当归多糖的研究进展 [J]. 天津药学，2017，29（3）：67−70.

[5] Yu F，Li H L，Meng Y，et al. Extraction optimization of *Angelica sinensis* polysaccharides and its antioxidant activity *in vivo* [J]. Carbohydrate Polymers，2013，94（1）：114−119.

[6] Zhang Y，Zhou T，Wang H J，et al. Structural characterization and *in vitro* antitumor activity of an acidic polysaccharide from *Angelica sinensis*（Oliv.）Diels [J]. Carbohydrate Polymers，2016，147：401−408.

[7] Zhao Y，Shi Y Y，Yang H X，et al. Extraction of *Angelica sinensis* polysaccharides using ultrasound−assisted way and its bioactivity [J]. International Journal of Biological Macromolecules，2016，88：44−50.

[8] Lohi O，Parikka M，Rämet M. The zebrafish as a model for paediatric diseases [J]. Acta Paediatrica，2013，102（2）：104−110.

[9] 秦小妹，郭帅杰，李悦，等 . 斑马鱼模型在中药心血管药理学研究中的应用 [J]. 世界中医药，2021，16（15）：2358−2362.

[10] 钱星文，谭转换，朱晨，等 . 益甘舒抗乙醇诱导斑马鱼兴奋期醉酒的作用研究 [J]. 今日药学，2020，30（7）：474−477.

[11] 曹淼 . 酶联合超声波提取下夏秋茶多糖工艺的优化及抗氧化性研究 [J]. 粮食与油脂，2022，35（11）：88−92.

[12] 谢佳艺，赵瑞华，杨静 . 羊肚菌多糖的提取分离纯化及保健功效研究 [J]. 中国食品工业，2024（9）：122−124.