Botanical Research 植物学研究, 2026, 15(2), 96-108
Published Online March 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/br
https://doi.org/10.12677/br.2026.152012

Hans汉斯

黄精多糖提取工艺优化及抗氧化与降血糖活性研究

蒋丝丝[1]，马　敏[1*]，叶　菊[2]，董　丹[1]，李庆群[2]

[1]青海民族大学药学院，青海　西宁
[2]遵义医药高等专科学校，药学院，贵州　遵义

收稿日期：2025年11月11日；录用日期：2026年2月24日；发布日期：2026年3月6日

摘　要

目的：优化黄精多糖提取工艺及评价其抗氧化和降血糖活性。方法：以黄精多糖提取率为指标，考察粉碎粒度、提取时间、pH值、提取次数对热回流法提取效果的影响，采用Box-Behnken响应面法优化多糖的最佳提取工艺，并测定该条件下黄精多糖的抗氧化和降血糖活性。结果：黄精多糖的热回流法最佳提取工艺为粉碎粒度120目、提取时间2 h/次、提取次数2次、pH 8、水浴温度80℃，该工艺条件下总多糖的提取率达到(13.08 ± 0.42)%。当黄精多糖质量浓度为1.0 mg/mL时，其对ABTS$^+$自由基的清除率达到86.6%，对α-淀粉酶的抑制率达到56.8%。结论：最佳提取工艺条件为提高黄精多糖提取率以及开发具有抗氧化、降血糖产品提供了可靠的研究依据。

关键词

黄精多糖，响应面法，抗氧化活性，降血糖活性

Optimization of Polysaccharide Extraction Process from *Polygonatum sibiricum* and Study on Its Antioxidant and Hypoglycemic Activities

Sisi Jiang[1], Min Ma[1*], Ju Ye[2], Dan Dong[1], Qingqun Li[2]

[1]College of Pharmacy, Qinghai Minzu University, Xining Qinghai
[2]College of Pharmacy, Zunyi Medical and Pharmaceutical College, Zunyi Guizhou

Received: November 11, 2025; accepted: February 24, 2026; published: March 6, 2026

[*]通讯作者。

文章引用: 蒋丝丝, 马敏, 叶菊, 董丹, 李庆群. 黄精多糖提取工艺优化及抗氧化与降血糖活性研究[J]. 植物学研究, 2026, 15(2): 96-108. DOI: 10.12677/br.2026.152012

Abstract

Objective: To optimize the extraction process of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* and evaluate their antioxidant and hypoglycemic activities. Methods: Taking the extraction rate of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* as the index, the effects of particle size, extraction time, pH value and extraction times on the extraction efficiency by hot reflux method were investigated. The optimal extraction process of polysaccharides was optimized by Box-Behnken response surface methodology, and the antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides under this condition were determined. Results: The optimal extraction process of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* by hot reflux method is as follows: particle size of 120 mesh, extraction time of 2 hours per time, extraction times of 2, pH of 8, and water bath temperature of 80˚C. Under these conditions, the extraction rate of total polysaccharides reaches (13.08 ± 0.42)%. When the mass concentration of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* is 1.0 mg/mL, the scavenging rate of $ABTS^+$ free radicals reaches 86.6%, and the inhibitory rate of α-amylase reaches 56.8%. Conclusion: The process conditions provide a reliable research basis for improving the extraction rate of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* and developing products with antioxidant and hypoglycemic activities.

Keywords

***Polygonatum sibiricum* Polysaccharide, Response Surface Methodology, Antioxidant Activity, Hypoglycemic Activity**

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

黄精来源于百合科(*Liliaceae*)黄精属(*Polygonatum*)多年生草本植物，是我国传统的药食两用药材，其药用记载最早见于晋代《名医别录》[1]。根据 2020 年版《中华人民共和国药典》规定，包括滇黄精(*Polygonatum kingianum* Coll. et Hemsl.)、黄精(*P. sibiricum* Red.)和多花黄精(*P. cyrtonema* Hua)，均以干燥根茎入药[2]。中药黄精富含多糖、生物碱、黄酮、三萜、甾体皂苷、木脂素及挥发油等活性物质，具有降血糖、提高免疫力、抗肿瘤、抗炎、抗衰老和抗氧化等药理活性[3]-[5]，用于治疗心脑血管疾病、感染性疾病、糖尿病、高血脂、骨质疏松、阿尔茨海默病、肝病、肾病等[6]-[8]。其中，多糖含量最高，降血糖活性显著[9]；皂苷含量高达 6.49%，具有抗疲劳、抗氧化、降血糖、降血脂、增强免疫力、抗炎、抗病毒等药理活性[10]；黄酮类化合物种类亦很丰富，具有降血糖、抗氧化、抗肿瘤、抗炎、抗菌等活性[11]。

目前黄精多糖的提取方法主要包括热回流提取法、水提醇沉法、热水提取法和超声提取法等[12]-[15]。方法虽多，但提取率均不高，且不同提取方法对其组成、糖苷键构型、分子量等产生显著的影响，从而导致药理活性研究结果缺乏统一性[16]-[18]。本研究采用热回流提取法获得水提物后再经水提醇沉得到黄精中的总多糖，以蒽酮－硫酸比色法测定的多糖提取率为指标，从粉碎粒度、提取时间、提取次数和 pH 值考察影响多糖提取率的单因素，采用响应面法进一步获得提取条件的优化实验。在此基础上，测试最佳提取工艺下获得的黄精多糖体外抗氧化和降血糖活性。

2. 材料

2.1. 药材、试剂及试剂盒

黄精购自贵州省遵义市药材市场，经遵义医药高等专科学校叶菊教授鉴定。蒽酮，国药集团化学试剂有限公司；浓硫酸，重庆川东化工集团有限公司；石油醚、正丁醇、三氯甲烷、氢氧化钠，成都金山化学试剂有限公司；无水葡萄糖，上海麦克林生化科技股份有限公司；所用其他化学试剂均为分析纯。$ABTS^+$自由基、DPPH 自由基、OH^-自由基和O_2^-自由基清除能力检测试剂盒均购自北京索莱宝科技有限公司；α-淀粉酶活性检测试剂盒购自北京盒子生工科技有限公司；α-葡萄糖甘酶活性检测试剂盒购自上海科艾博生物有限公司。

2.2. 仪器

电子天平(PTX-FA210)，华志电子科技有限公司；中药粉碎机(DFY-600C)，上海左乐仪器有限公司；旋转蒸发仪(IKARV3)，郑州长城科工贸有限公司；恒温水浴锅(HH-ZK8)，巩义市科瑞仪器有限公司；循环水式真空泵(SHZ-Dш)，常州金坛精达仪器制造有限公司；电热恒温干燥箱(101-2A)，天津市泰斯特仪器有限公司；台式低速离心机(TD6)，长沙英泰仪器有限公司；omega 多功能酶标仪，德国 BMG LABTECH 公司。

3. 方法

3.1. 供试品溶液制备

称取 3.03 g 黄精粉末，加入 75.0 mL 蒸馏水，置于 80℃热水浴回流，提取时间 2 h，过滤，收集上清液，沉淀再次重复上述步骤提取 1 次，将两次得到的上清液合并，减压浓缩至 10.0 mL。向浓缩液中加入 50.0 mL 的 95%乙醇，充分混匀后，4℃静置过夜，离心，收集所得的多糖沉淀，用适量蒸馏水完全溶解，再加入 Sevage 试剂(氯仿与正丁醇的体积比为 4:1)，充分振荡混合，以除去溶液中的蛋白质，对上层多糖溶液进行减压浓缩处理，干燥后即得。

3.2. 多糖提取率测定

3.2.1. 对照品溶液制备及线性关系考察

称取无水葡萄糖 10.01 mg，蒸馏水定容至 100 mL 的容量瓶，即得。分别移取 0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 的葡萄糖对照品溶液，转移至 10 mL 具塞试管中，分别加入蒸馏水定容至 2.0 mL，另取 2.0 mL 蒸馏水作为空白对照，在 625 nm 波长处测定各试管内溶液的吸光度。以葡萄糖溶液浓度为横坐标，吸光度(A)为纵坐标进行回归，得方程为 $A = 20.071x + 0.1004$ ($R^2 = 0.9994$)，在 0~0.05 mg/mL 范围内线性关系良好。

3.2.2. 测定方法

适当稀释黄精多糖样品，代入绘制好的标准曲线，计算出样品中的多糖浓度，从而计算出黄精多糖提取率。

$$多糖得率(\%) = C \times V \times N/M \times 10^3 \times 100\%$$

式中：C 为提取液中多糖的浓度；V 为多糖提取液的总体积；N 为稀释倍数；M 为样品粉末质量。

3.3. 方法学考察

3.3.1. 精密度试验

取对照品溶液适量，按“3.2.2”项下方法测定吸光度 6 次，计算日内精密度，测得 RSD 值为 1.56%，

表明仪器精密度满足试验要求。

3.3.2. 稳定性试验

取供试品溶液，每隔 4 h 按“3.2.2”项下方法测定吸光度进行测定，即 0、4、8、12、16、20、24 h，测得 RSD 值为 1.10%，表明溶液在 24 h 内稳定性良好。

3.3.3. 重复性试验

取同一批药材 6 份，按“3.1”项下方法制备供试品溶液，按“3.2.2”项下方法测定吸光度，测得 RSD 值为 1.66%，表明该方法重复性良好。

3.3.4. 加样回收率试验

取多糖含量已知的供试品溶液 6 份，加入对照品溶液，按“3.2.2”项下方法测定吸光度，计算回收率。得到平均加样回收率为 99.86%，RSD 值为 2.49%。

3.4. 单因素试验

在“3.1”项下供试品提取方法的基础上，选择粉碎粒度(50 目、65 目、80 目、100 目、120 目、150 目)、提取时间(1 h, 1.5 h, 2 h, 2.5 h, 3 h)、提取次数(2 次、3 次、4 次)、pH 值(6, 7, 8, 9, 10)作为影响因素，按“3.2.2”项下方法考察其对多糖提取率的影响，平行 3 次。

3.5. 响应面法优化总多糖的提取

依据 Box-Behnken 中心设计原理，对黄精多糖的提取工艺进行优化[19]。在单因素试验的基础上，选取对黄精多糖提取效果影响较大的因素粉碎粒度、提取时间、pH 值为自变量，以黄精多糖提取率为响应值。利用 Design-Expert.12 软件进行响应面实验设计以及进行数据分析，所有响应面试验均进行三次独立重复，表中数据为平均值 ± 标准差[20] [21]。响应面的水平设计见表 1。

Table 1. Response surface experimental factor design and level
表 1. 响应面实验因素设计与水平

水平	因素		
	*X*1 (粉碎粒度)	*X*2 (提取时间)	*X*3 (pH 值)
−1	100	1.5	7
0	120	2.0	8
1	150	2.5	9

3.6. 体外抗氧化活性测定

将多糖配制 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的溶液作为测定组，将 Trolox 配成 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 溶液作为阳性对照组，以甲醇为空白组。首先，在 96 孔板先加入 190 μL 工作液，其次在空白组加入 10 μL 甲醇，在阳性对照组加入 10 μL Trolox、在测定组加入不同浓度多糖，最后涡旋混匀，室温避光静置 30 min。酶标仪预热 30 min 以上，调节波长至 515 nm，测其吸光度，分别记为 *A* 空白、*A* 对照、*A* 测定，计算公式如下。

$$\text{DPPH 自由基清除率} = [A_{\text{空白}} - (A_{\text{测定}} - A_{\text{对照}})] \div A_{\text{空白}} \times 100\%$$

3.6.1. $ABTS^{+}$自由基清除能力测定

在“3.6.1”项下的基础上，首先在 96 孔板先加入 170 μL 工作液、20 μL 反应液，其次在空白组加入

10 μL 甲醇、在阳性对照组加入 10 μL Trolox、在测定组加入不同浓度多糖，最后充分混匀，室温避光静置 6 min。酶标仪预热 30 min 以上，调节波长至 405 nm，测其吸光度，分别记为 *A* 空白、*A* 对照、*A* 测定，计算公式如下。

$$ABTS^{+}自由基清除率 = [A_{空白} - (A_{测定} - A_{对照})] \div A_{空白} \times 100\%$$

3.6.2. OH^-自由基清除能力测定

在“3.6.1”项下的基础上，于 1.5 mL EP 管中，加入提取液与反应液，充分混匀。在空白组加入 100 μL 甲醇、在阳性对照组加入 50 μL Trolox、在测定组加入不同浓度多糖，涡旋混匀，置于 37℃水浴锅准确反应 60 min。10000 rpm，常温离心 10 min，取 200 μL 上清于 96 孔板中。酶标仪预热 30 min 以上，调节波长至 536 nm，测其吸光度，分别记为 *A* 空白、*A* 对照、*A* 测定，计算公式如下。

$$OH^{-}自由基清除率 = (A_{测定} - A_{对照}) \div (A_{空白} - A_{对照}) \times 100\%$$

3.6.3. O_2^-自由基清除能力测定

在“3.6.1”项下的基础上，于 1.5 mL EP 管中，首先在空白组加入 100 μL 甲醇、在阳性对照组加入 100 μL Trolox、在测定组加入不同浓度多糖，其次分别加入提取液，混匀，37℃水浴 20 min。再加入反应液，混匀，37℃水浴 20 min。最后加入 100 μL 氯仿。混匀，8000 rpm，常温离心 5 min，取 200 μL 水相于 96 孔板中。酶标仪预热 30 min 以上，调节波长至 530 nm，测其吸光度，分别记为 *A* 空白、*A* 对照、*A* 测定，计算公式如下，其中，*W* 是提取超氧阴离子的样品的重量。

$$O_2^- 含量 = 0.0625 \times (A_{测定} - A_{空白}) \div (A_{对照} - A_{空白}) \div W$$

3.7. 体外降血糖活性测定

3.7.1. *α*-葡萄糖甘酶抑制活性

在“3.6.1”项下的基础上，将阿卡波糖配成 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 溶液作为阳性对照组。于 1.5 mL EP 管中，首先加入提取液与反应液，在测定组加入不同浓度多糖，充分混匀，37℃水浴 30 min，立即放入沸水浴中煮沸 5 min。在阳性对照组加入 100 μL 阿卡波糖，混匀，8000 rpm，常温离心 5 min，取 70 μL 上清液和 130 μL 工作液于 96 孔板中。酶标仪预热 30 min 以上，调节波长至 400 nm，测其吸光度，分别记为 A 空白、A 对照、A 测定，计算公式如下。

$$\alpha\text{-葡萄糖甘酶抑制率\%} = [A_{空白} - (A_{测定} - A_{对照})] \div A_{空白} \times 100\%$$

3.7.2. *α*-淀粉酶抑制活性

在“3.6.1”项下的基础上，于 1.5 mL EP 管中，首先，在测定组加入 0.5 mL 不同浓度多糖和 900 μL 蒸馏水充分混匀，置于冰上待测。其次在阳性对照组加入 100 μL 阿卡波糖，在空白组加入 100 μL 甲醇。混匀，70℃水浴 15 min。最后加入反应液与工作液，沸水浴处理 10 min。吸取 200 μL 于 96 孔板中。酶标仪预热 30 min 以上，调节波长至 540 nm，测其吸光度，分别记为 *A* 空白、*A* 对照、*A* 测定，计算公式如下。

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率\%} = [A_{空白} - (A_{测定} - A_{对照})] \div A_{空白} \times 100\%$$

3.8. 数据分析

采用 Excel 2021 软件整理原始数据，IBM SPSS Statistics 27 软件进行方差分析，Origin 2024 软件绘制折线图，Design-Expert.12 件进行响应面分析。

4. 结果与分析

4.1. 单因素试验

4.1.1. 粉碎粒度参数筛选

由图 1 可知，粉碎粒度对提取率影响显著，在粒度为 120 目时多糖提取率达到峰值为 8.12%。当粉碎粒度为 150 目时，易导致粉末结块和杂质溶出剧增，阻碍了溶剂的有效渗透与多糖的充分溶出，致使提取率下降，故选择 100 目、120 目、150 目。

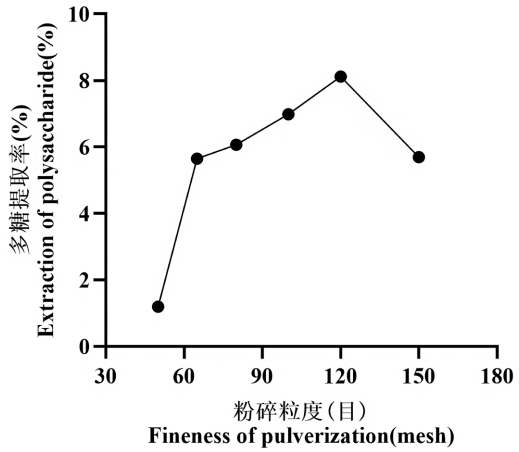


Figure 1. Effect of crushing size on extraction rate of *P. sibiricum* polysaccharide
图 1. 粉碎粒度对黄精多糖提取率的影响

4.1.2. 提取时间参数筛选

由图 2 可知，提取时间达到 2 h 时，黄精多糖提取率达到最大值 8.6%。随着提取时间的延长，热渗透与溶剂扩散作用持续增强，有利于细胞内多糖成分的充分溶出，1~2 h 时间内多糖提取率显著增高。2 h 后多糖提取率呈下降趋势分析原因与高温加热易导致多糖类成分发生降解、水解或结构变性影响后续醇沉效果有关，故选择 1.5 h、2 h、2.5 h。

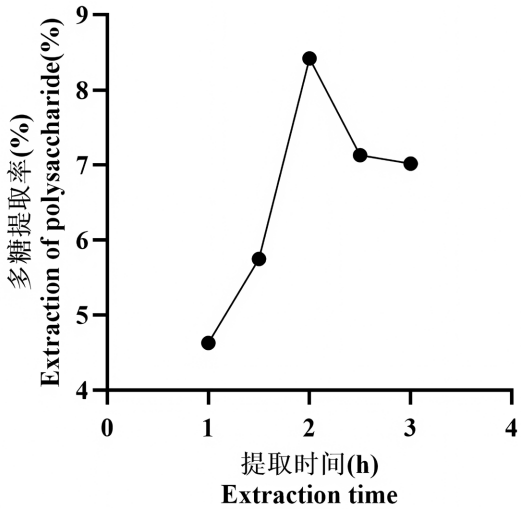


Figure 2. Effect of extraction time on extraction rate of *P. sibiricum* polysaccharide
图 2. 提取时间对黄精多糖提取率的影响

4.1.3. 提取次数参数筛选

由图 3 可知，多糖提取率随提取次数增加呈先增后缓的趋势，提取 3 次多糖得率最佳，表明提取 3 次原料中可溶性多糖可得到充分的提取，故确定提取次数为 3 次。

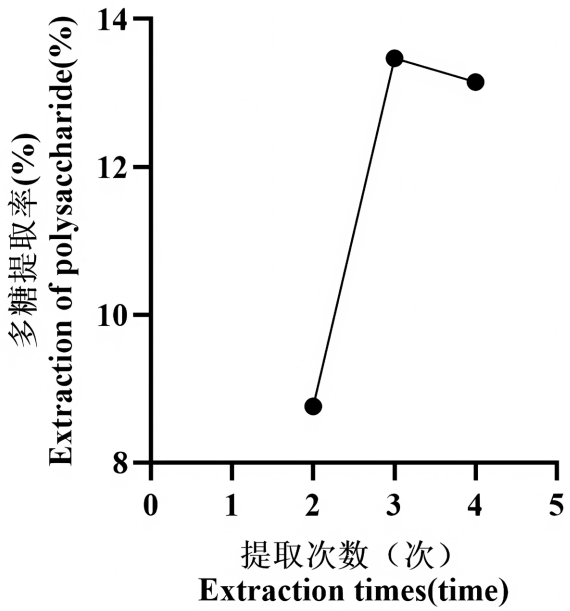


Figure 3. Effect of extraction times on extraction yield of *P. sibiricum* polysaccharide
图 3. 提取次数对黄精多糖提取率的影响

4.1.4. 提取 pH 值参数筛选

由图 4 可知，植物受到碱性环境的影响使其细胞壁发生软化有利于多糖的溶出，结果显示当 pH 值为 8 时达到峰值 8.62%。pH 值为 9 时，提取环境为较强的碱性环境，多糖类成分会发生降解反应，结果显示多糖得率显著降低，故选择 pH 值为 7、8、9。

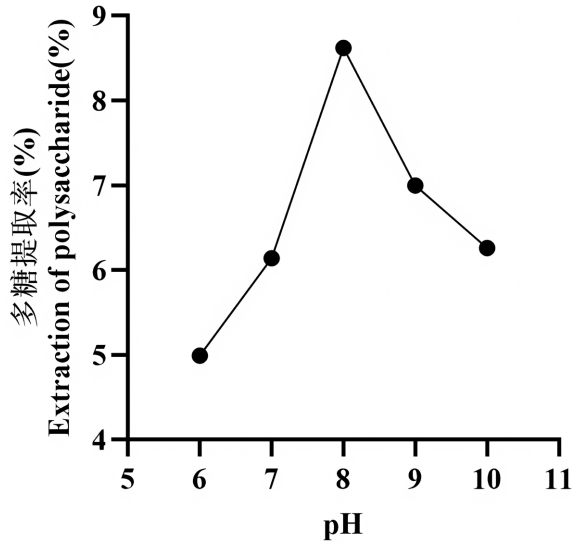


Figure 4. Effect of pH on extraction rate of *P. sibiricum* polysaccharide
图 4. pH 对黄精多糖提取率的影响

4.2. 响应面优化多糖提取实验

以粉碎粒度、提取时间、提取 pH 作为实验因素，设定响应值为黄精总多糖提取率，实验设计和结果见表 2。对表 2 中数据进行回归拟合得到方程：$Y = -39.75192 + 0.217849X1 + 6.08298X2 + 8.07975X3 + 0.048196X1X2 + 0.004549X1X3 + 1.19000X2X3 - 0.001543X1^2 - 5.48800X2^2 - 0.707000X3^2$ ($R^2 = 0.9638$, $R^2a = 0.9172$)。回归分析及方差分析结果见表 3。

Table 2. Experimental design and determination results of response surface for extraction of *P. sibiricum* polysaccharide ($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)
表 2. 黄精多糖提取响应面试验设计及测定结果($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)

试验号	因素			
	*X*1	*X*2	*X*3	黄精多糖含量(%)
1	1	0	1	5.63
2	−1	0	−1	8.51
3	0	0	0	9.16
4	0	1	1	6.89
5	0	0	0	9.07
6	0	0	0	8.28
7	1	1	0	5.91
8	1	0	−1	6.14
9	−1	1	0	6.08
10	0	−1	−1	7.63
11	1	−1	0	5.21
12	0	−1	1	6.04
13	0	0	0	8.77
14	−1	0	1	7.46
15	−1	−1	0	7.88
16	0	1	−1	6.10
17	0	0	0	8.44

Table 3. Analysis of variance of regression model
表 3. 回归模型的各项方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	27.00	9	3.00	20.69	0.0003	**
*X*1	6.20	1	6.20	42.73	0.0003	**
*X*2	0.2066	1	0.2066	1.42	0.2715	-
*X*3	0.6312	1	0.6312	4.35	0.0754	-
*X*1*X*2	1.48	1	1.48	10.21	0.0152	*
*X*1*X*3	0.0528	1	0.0528	0.3639	0.5654	-
*X*2*X*3	1.42	1	1.42	9.77	0.0167	*
$X1^2$	3.54	1	3.54	24.39	0.0017	**

续表

$X2^2$	7.93	1	7.93	54.66	0.0002	**
$X3^2$	2.10	1	2.10	14.52	0.0066	-
残差	1.01	7	0.1450	-	-	-
失拟向	0.4273	3	0.1424	0.9693	0.4897	>0.05
误差	0.5877	4	0.1469	-	-	-
总差	28.02	16	-	-	-	-

注：*表示差异显著($P < 0.05$)，**表示差异极显著($P < 0.01$)，统计分析方法：方差分析。

方差分析结果显示，回归方程的 $P < 0.01$，表明该模型在本次试验研究范围内具有统计学意义。失拟项 $P > 0.05$，表明失拟向不显著，说明回归方程拟合程度良好，可反映出黄精多糖的含量与粉碎粒度、提取时间及 pH 值之间的关系；多元相关系数 R^2 为 0.9638，R^2_{adj} 为 0.9172，这充分说明所构建模型的实际值与预测值之间存在较强的相关性，模型对数据的拟合效果良好。从 F 值可以看出，在所选因素水平范围内，各个因素对黄精多糖提取率影响程度的顺序是：粉碎粒度 > 提取 pH 值 > 提取时间。

最佳提取工艺条件的确定及验证试验

通过对模型的拟合分析，得出最佳的提取工艺为：粉碎粒度 120 目、提取时间 2 h/次、提取次数 2 次、pH 8、水浴温度 80℃。在此条件下对黄精多糖进行提取方法的验证，并进行了 3 次重复提取，结果得到多糖的提取率分别是 13.50%、13.08%和 13.40%，RSD 值为 2.97%，低于 3%，结果表明此提取工艺不存在显著性差异，重复性良好，具有可行性。

为了清晰且直观地展现出两两因素之间交互作用对响应值变化强度的影响，借助所构建的回归方程，绘制响应面图及其对应的等高线图。结果见图 5~7。

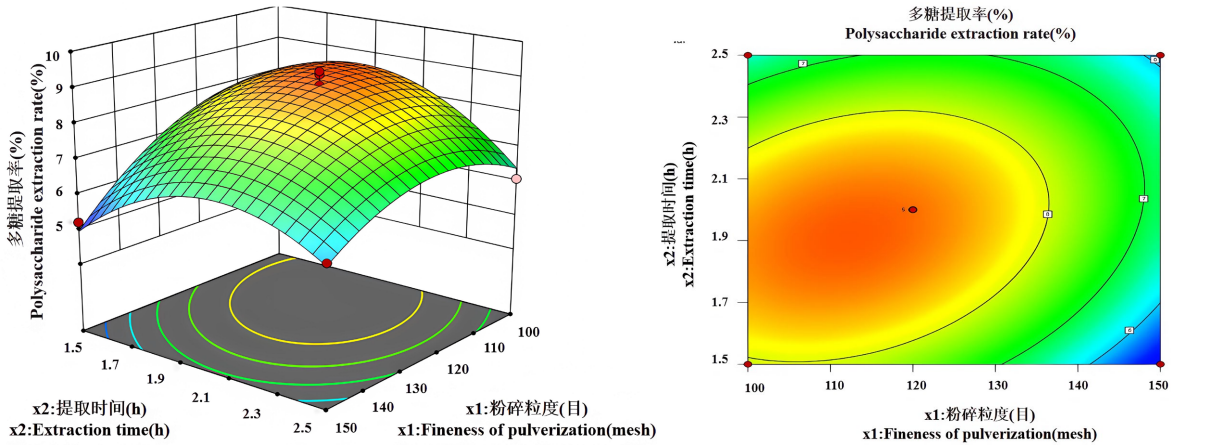


Figure 5. Response surface and contours of the effect of crushing particle size and extraction time on the extraction rate of *P. sibiricum* polysaccharide

图 5. 粉碎粒度与提取时间对黄精多糖提取率影响的响应面和等高线

响应面的坡度以及等高线的密集程度，是能够直观体现各因素间交互作用对响应值影响程度的重要指标[22]。响应面的坡度越陡峭，意味着在该区域内，因素之间的交互作用对响应值的改变效果越显著，即交互作用对响应值的影响越大。而对于等高线而言，当它们较为密集且呈现出椭圆形时，说明在这一因素水平组合的范围内，各因素之间的交互作用对响应值的作用明显；反之亦然[23]。由图 5 可知，粉碎

粒度(*X*1)与提取时间(*X*2)交互作用的等高线图似椭圆形，且响应面图坡度较陡，表明这两因素间交互作用对多糖提取率的影响显著；由图 6 可知，粉碎粒度(*X*1)与提取 pH 值(*X*3)交互作用的响应面图坡度较缓，等高线较疏，倾向于圆形，表明粉碎粒度和 pH 值之间交互作用影响不显著；由图 7 可知，提取时间(*X*2)与提取 pH 值(*X*3)之间相互作用的响应面图坡度陡峭，等高线图椭圆形分布较密集，说明提取时间与提取 pH 值两两交互作用对黄精多糖提取率影响显著。综合分析，两两交互作用影响程度依次是：*X*1*X*2 (粉碎粒度与提取时间) > *X*2*X*3 (提取时间与提取 pH 值) > *X*1*X*3 (粉碎粒度与提取 pH 值)。

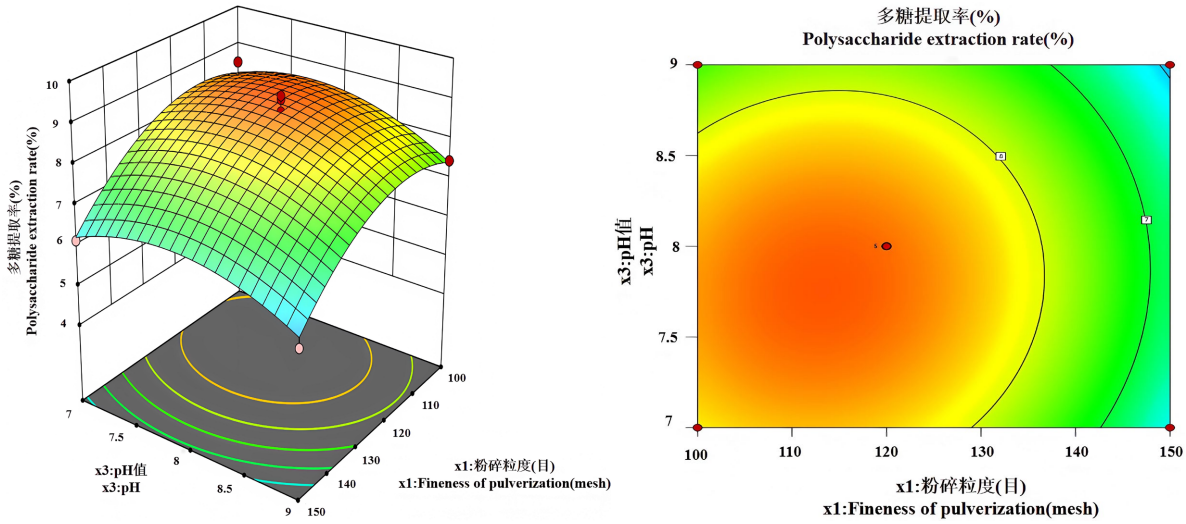


Figure 6. Response surface and contours of the effect of crushing particle size and extraction pH on the extraction rate of *P. sibiricum* polysaccharide

图 6. 粉碎粒度与提取 pH 值对黄精多糖提取率影响的响应面和等高线

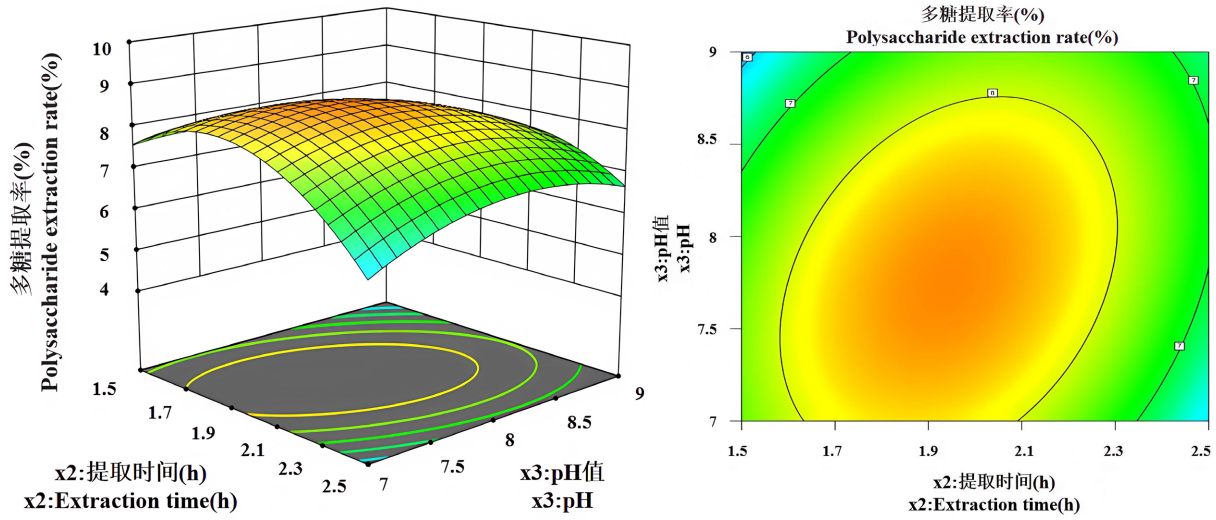


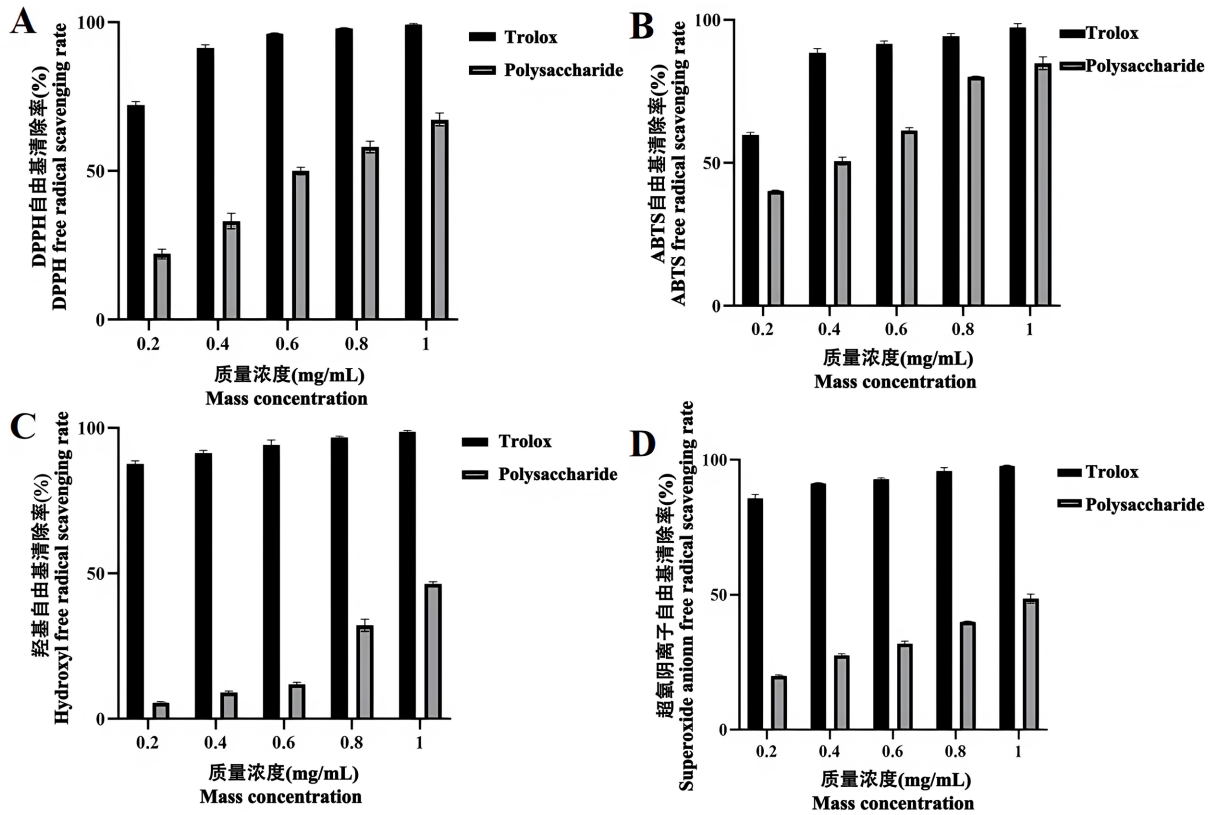
Figure 7. Response surface and contours of the effect of extraction time and extraction pH on the extraction rate of *P. sibiricum* polysaccharide

图 7. 提取时间与提取 pH 值对黄精多糖提取率影响的响应面和等高线

4.3. 体外抗氧化活性测定结果

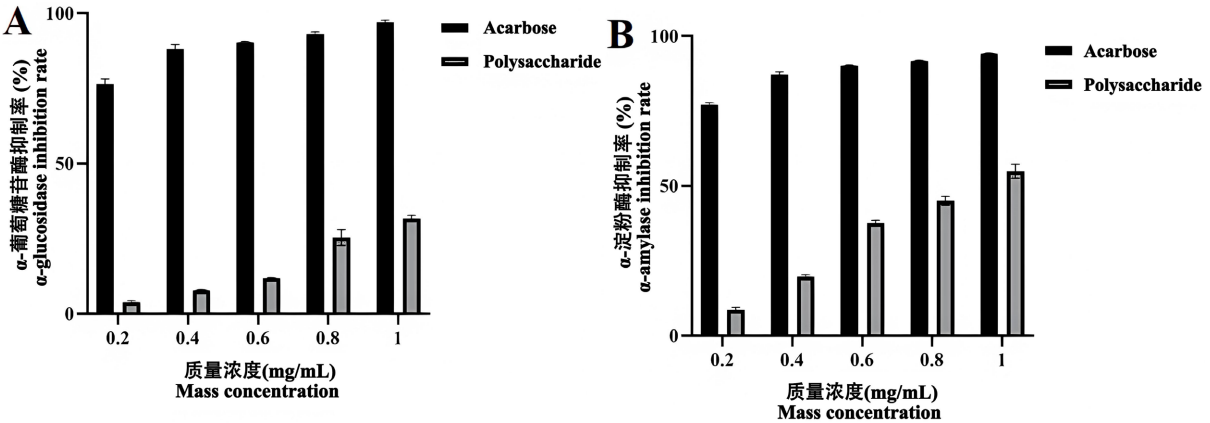
以 Trolox 作为阳性对照，黄精多糖对 DPPH 自由基的清除能力如图 8(A)所示。随着多糖溶液质量浓

度的升高，其 DPPH 自由基清除能力逐渐增强，在质量浓度达到 1.0 mg/mL 时，清除能力接近阳性对照，但整体仍低于阳性对照。在 $ABTS^{+}$自由基清除实验中，黄精多糖的清除效果表现出浓度依赖性(图 8(B))，当质量浓度为 1.0 mg/mL 时，清除率达到 86.6%。此外，黄精多糖对羟基自由基和超氧阴离子自由基也表现出一定的清除能力(图 8(C)、图 8(D))，在 1.0 mg/mL 质量浓度下清除率最高，分别为 47.3%和 50.5%。



注：($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)。

Figure 8. *In vitro* antioxidant activity of *P. sibiricum* polysaccharide
图 8. 黄精多糖的体外抗氧化活性



注：($\bar{x} \pm s$, $n = 3$)。

Figure 9. *In vitro* hypoglycemic activity of *P. sibiricum* polysaccharide
图 9. 黄精多糖的体外降血糖活性

4.4. 体外降血糖活性测定结果

如图 9(A)所示，黄精多糖对 α-葡萄糖苷酶具有浓度依赖性的抑制作用，在质量浓度为 1.0 mg/mL 时，抑制率达到 32.9%，表明其具备一定的酶抑制能力，但整体抑制效果弱于阳性对照阿卡波糖。从图 9(B)可以看出，黄精多糖对 α-淀粉酶同样表现出抑制活性，在质量浓度为 1.0 mg/mL 时，抑制率最高，为 56.8%，进一步证实其对 α-淀粉酶也具有抑制能力。

5. 讨论

响应面分析法作为一种有效的工艺优化方法，已广泛应用于天然药物活性成分的提取工艺研究[24] [25]。本研究首先通过单因素试验确定了影响黄精总多糖提取的关键参数范围，继而采用 Box-Behnken 响应面设计建立了蒽酮－硫酸法测定黄精多糖含量的二次回归模型(R^2 = 0.982)。方差分析表明，各因素对黄精多糖提取率的影响程度依次为：粉碎粒度 > 提取 pH 值 > 提取时间。在实际操作过程中，研究发现药材粉碎粒度过细，比表面积增大，易导致药材粉末在提取溶剂中发生团聚结块，溶出的多糖分子与药渣形成物理吸附的可能性增加，除多糖以外淀粉、果胶、色素等杂质也会大量溶出，以上因素均会降低多糖的提取率。另外，多糖的提取效果还会受到提取时间、高温加热、pH 偏强碱性的影响，如多糖分子因发生糖苷键断裂、β-消除反应使其结构变化，继而因分子量减小导致后续目标成分的醇沉量降低。因此，在单因素实验的基础上，经响应面法优化的黄精多糖热回流提取法的最佳提取工艺参数为：粉碎粒度 120 目、提取时间 2 h/次、提取次数 2 次、pH 8、水浴温度 80℃。验证实验显示，在此条件下黄精多糖的提取率为(13.08 ± 0.42)%与模型预测值(13.01%)的相对误差 < 1%，证实了模型的可靠性。

多糖类成分易受提取温度、提取时间、酸碱性提取环境的影响，高温、强碱的条件易导致糖苷键的断裂、官能团的破坏，从而削弱其生理功能。本工艺采用温和且精准控制的条件，有效减少了多糖的降解与结构破坏，既可实现较高的提取率，也可在保证目标成分结构的同时保护与传统功效相契合的活性。本研究显示最佳工艺条件下获得的黄精多糖具有良好的抗氧化和降血糖活性。

本研究通过系统优化粉碎粒度、提取时间、pH 及提取次数等关键参数，建立了以“温和碱性水提”为核心的提取工艺。该工艺将 pH 精确控制在 8.0，在利用弱碱性软化细胞壁、促进溶出的同时，有效避免了强碱条件下 β-消除反应导致的结构破坏，相比传统方法更能保持产物的天然活性。该工艺条件明确、重复性好，具备向规模化生产转化的潜力，为开发高活性黄精多糖功能产品提供了可靠的原料制备基础。

基金项目

青海民族大学大学生创新训练计划项目(DCXM-2025-048)，遵 KCTD(2025)90 号，遵义市科合 HZ 字(2023)454 号。

参考文献

[1] 名医别录[M]. 陶弘景, 集. 尚志钧, 辑校. 北京: 人民卫生出版社, 1986: 6.

[2] 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: 319.

[3] 蒋丝丝, 叶菊, 何旭光, 等. 基于 MaxEnt 与 GIS 的黄精生态适宜分布区研究[J]. 草地学报, 2025, 33(5): 1622-1630.

[4] 李得天, 封亮, 贾晓斌, 等. 黄精炮制原理解析及工艺优化策略[J]. 中草药, 2024, 55(20): 7110-7121.

[5] Zhang, R., Zhou, J., Wen, R., Qin, X., Tan, C., Zhou, X., *et al*. (2025) Preparation, Structural Identification, and *in Vitro* Activity Study of Polysaccharides and Derivatives from Polygonatum Hunanense. *Carbohydrate Research*, **555**, Article 109550. https://doi.org/10.1016/j.carres.2025.109550

[6] 罗长琴, 蒋忠岑. 黄精多糖提取工艺的研究进展[J]. 农产品加工, 2024(11): 90-92.

[7] Gao, X., Zheng, B., Zhou, Q., Li, J., Xie, J., Chen, Y., *et al*. (2025) *Polygonatum cyrtonema* Polysaccharides Target Gut Microbiota to Suppress NOD2-Driven Inflammation and Modulate Bile Acid Metabolism in Colitis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, **73**, 20190-20204. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5c04155

[8] Zhou, Y., Yang, G., Liu, H., Li, Y., Wang, X. and Liu, J. (2025) *Polygonatum sibiricum* Polysaccharides Combat Fatty Liver Haemorrhage Syndrome in Hens *via* Regulation of Lipid Metabolism, Oxidative Stress and Inflammatory Response. *British Poultry Science*, 1-12. https://doi.org/10.1080/00071668.2025.2536340

[9] 章笑寒, 施凯允, 金文闻, 等. 黄精多糖检测研究进展[J]. 植物生理学报, 2024, 60(9): 1390-1400.

[10] 翟玉凤, 丁兰, 余叶敏, 等. 黄精皂苷的化学成分、生物合成及药理作用研究进展[J]. 中国农学通报, 2024, 40(29): 21-30.

[11] 陶爱恩, 张晓灿, 杜泽飞, 等. 黄精属植物中黄酮类化合物及其药理活性研究进展[J]. 中草药, 2018, 49(9): 2163-2171.

[12] 楚冬海, 张振秋. 响应面分析法优化黄精多糖提取工艺及含量测定[J]. 辽宁中医杂志, 2020, 47(2): 162-165.

[13] 林志銮, 金晓怀, 张传海, 等. 超声辅助提取多花黄精多糖工艺及生物活性研究[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(20): 221-225.

[14] 刘日斌, 张宇鹏, 马崇坚, 等. 超声波辅助酶法优化黄精多糖提取工艺的研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(7): 141-146.

[15] 李智敏, 石瑶, 赵纯希, 等. 滇黄精多糖的提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2020, 29(6): 535-540.

[16] Chen, Y., Du, H., Qu, W., Sun, C., Chen, Q., Du, Y., *et al*. (2025) Comparison of Polygonatum Sibiricum Polysaccharides from Different Extraction Methods. *Foods*, **14**, Article 2188. https://doi.org/10.3390/foods14132188

[17] Alhalafi, M.H., Sallam, S., Al-Ahmed, Z.A., Mogharbel, A.T., Jawhari, A.H., Sari, A.A.A., *et al*. (2025) Development and Characterization of RH-MOF Encapsulated on Double Layer Hydrogel of Carboxymethyl Cellulose/Chitosan for Enhanced and Reusable Adsorptive Removal of Brilliant Green Dye: Kinetics, Isotherms, Thermodynamic Evaluation and Process of Optimization via Box-Behnken Design. *International Journal of Biological Macromolecules*, **321**, Article 146611. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.146611

[18] Gafforov, Y., Bekić, S., Yarasheva, M., *et al*. (2025) Bioactivity Profiling of Sanghuangporus Lonicerinus: Antioxidant, Hypoglycaemic, and Anticancer Potential via *in-Vitro* and *in-Silico* Approaches. *Journal of Enzyme Inhibition and Medicinal Chemistry*, **40**, Article 2461185.

[19] 周东月, 关敬, 付博, 等. 黄精多糖提取工艺优化及体外抗氧化研究[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(13): 180-183.

[20] 肖坤敏, 马佳钰, 王军民, 等. 滇黄精多糖提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2022, 42(4): 147-154.

[21] Bhavar, A., Kolekar, K.A., Yadav, T., Kole, K., Bhagwat, D., Singh, S.K., *et al*. (2025) Formulation of Repurposed Celecoxib-Loaded Nanostructured Lipid Carriers Using Box-Behnken Design, Its Characterization, and Anticancer Evaluation. *Annales Pharmaceutiques Françaises*, **83**, 862-875. https://doi.org/10.1016/j.pharma.2025.03.005

[22] 郑坤, 尕项卓玛, 王敏, 等. 西北沼委陵菜总黄酮提取工艺优化及其抑菌活性评价[J]. 中成药, 2025, 47(9): 2870-2875.

[23] 张凯, 张昭, 范永芳, 等. 药食同源药材黄精玉竹营养及生物活性成分分析[J]. 中国现代中药, 2022, 24(8): 1463-1472.

[24] 李安琳, 李文竞, 吴望, 等. 不同黄精根茎中黄酮、氨基酸和酚酸类物质成分的系统比较[J]. 应用与环境生物学报, 2024, 30(2): 353-359.

[25] 容易, 饶欣浩, 江永康, 等. 黄精皂苷提取工艺的研究进展[J]. 轻工科技, 2022, 38(1): 25-27.