DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260318004
引用格式: 程雷娜, 申奥, 陈衍真, 等. 高速剪切辅助提取肉苁蓉多糖的工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 89–99.
Cheng Leina, Shen Ao, Chen Yanzhen, et al. Process optimization of high-speed shear-assisted extraction of *Cistanche deserticola* polysaccharides and study on its antioxidant activity [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 89–99. (in Chinese with English abstract).

高速剪切辅助提取肉苁蓉多糖的工艺优化及其抗氧化活性研究

程雷娜[1], 申　奥[1], 陈衍真[1], 王淑娴[2*], 魏鉴腾[1,3*], 曾祥俊[4]

(1. 青岛农业大学特种食品研究院, 青岛　266109; 2. 山东省海洋科学研究院, 青岛　266104; 3. 青岛特种食品研究院, 青岛　266109; 4. 内蒙古大漠魂生物科技有限公司, 阿拉善盟　750300)

摘　要: 目的　运用高速剪切技术辅助提取肉苁蓉多糖, 深入探究其工艺参数的最优组合, 并评价提取多糖的体外抗氧化能力。**方法**　以阿拉善肉苁蓉为原料, 采用高速剪切辅助技术提取多糖。利用单因素及响应面实验优化提取工艺。通过测定多糖 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, DPPH)自由基、羟基自由基、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]阳离子自由基清除率及铁离子还原抗氧化能力(ferric reducing antioxidant power, FRAP)总抗氧化能力, 评价其体外抗氧化活性。**结果**　最佳提取工艺条件为: 料液比 1:30 (g:mL), 剪切转速 10000 r/min, 剪切时间 30 s, 剪切次数 3 次。在此优化条件下, 肉苁蓉多糖的实际平均得率为 2.47%±0.15%, 与预测值(2.32%)基本无差异。体外抗氧化实验结果表明, 肉苁蓉多糖对不同类型的自由基均具有较强的清除能力, 并且在特定的浓度区间内呈现出清晰的剂量-效应关系。**结论**　通过响应面法优化得到的高速剪切辅助提取肉苁蓉多糖的工艺, 具备稳定且可行的特点。所提取的肉苁蓉多糖展现出良好的体外抗氧化活性, 这为肉苁蓉多糖在功能食品以及医药领域的进一步开发和应用提供了有力的理论支撑。

关键词: 肉苁蓉; 多糖; 高速剪切辅助提取; 响应面法; 抗氧化活性
中图分类号: TS201.1　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)16–0089–11

Process optimization of high-speed shear-assisted extraction of *Cistanche deserticola* polysaccharides and study on its antioxidant activity

CHENG Lei-Na[1], SHEN Ao[1], CHEN Yan-Zhen[1], WANG Shu-Xian[2*], WEI Jian-Teng[1,3*], ZENG Xiang-Jun[4]

收稿日期: 2026-03-18
基金项目: 中央引导地方科技发展资金(黄河流域协同科技创新)项目(YDZX2024028); 内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2025YFHH0244); 2026 年青岛农业大学科技合作联合专项项目(2069999); 阿拉善盟科技计划项目(AMKJ2024-03, AMYY2021-02)
第一作者: 程雷娜(2002—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全。E-mail: 2693594791@qq.com
***通信作者:** 王淑娴(1982—), 女, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为水产动物病害防治与绿色渔药研发。E-mail: wangsx_2008@yeah.net
魏鉴腾(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品功能因子研究。E-mail: weijt@163.com

(1. *Special Food Research Institute*, *Qingdao Agricultural University*, *Qingdao* 266109, *China*; 2. *Marine Science Research Institute of Shandong Province*, *Qingdao* 266104, *China*; 3. *Qingdao Special Food Research Institute*, *Qingdao* 266109, *China*; 4. *Inner Mongolia Damohun Biotech Co*., *Ltd*., *Alashan* 750300, *China*)

ABSTRACT: Objective To assist the extraction of polysaccharides from *Cistanche deserticola* by high-speed shear technology, deeply investigate the optimal combination of process parameters, and evaluate the *in vitro* antioxidant capacity of the extracted polysaccharides. **Methods** Using *Cistanche deserticola* from Alxa as the raw material, a high-speed shear-assisted extraction technique was employed to extract polysaccharides. The extraction process was optimized using single-factor experiments and response surface methodology. The *in vitro* antioxidant activity of the polysaccharides was evaluated by measuring their scavenging rates against 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine (DPPH) radicals, hydroxyl radicals and 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) (ABTS) cationic radicals, as well as their total antioxidant capacity determined by the ferric reducing antioxidant power (FRAP) assay. **Results** The optimal extraction process conditions were as follows: a solid-liquid ratio of 1:30 (g:mL), a shearing speed of 10000 r/min, a shearing time of 30 s and a shearing frequency of 3 times. Under these optimized conditions, the actual average yield of *Cistanche deserticola* polysaccharides was 2.47%±0.15%, showing essentially no difference from the predicted value (2.32%). The results of *in vitro* antioxidant experiments indicated that *Cistanche deserticola* polysaccharides exhibited strong scavenging abilities against different types of free radicals and demonstrated a clear dose-effect relationship within specific concentration ranges. **Conclusion** The high-speed shearing-assist extraction process for *Cistanche deserticola* polysaccharides, optimize via response surface methodology, demonstrates both stability and feasibility. The extract polysaccharides exhibit notable *in vitro* antioxidant activity, providing a robust theoretical foundation for their further development and application in functional foods and pharmaceutical industries.

KEY WORDS: *Cistanche deserticola*; polysaccharides; high-speed shear-assisted extraction; response surface methodology; antioxidant activity

0 引 言

肉苁蓉(*Cistanche deserticola*)作为列当科肉苁蓉属的典型代表, 是一种具有独特生态适应性和重要药用价值的多年生寄生既是食品又是中药材的物质。这种珍稀植物在2023年11月被国家正式纳入“药食同源”目录, 其生长环境极为特殊, 主要寄生于梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)等强旱生植物的根部。主要分布于我国西北干旱地区, 这些区域气候干旱、降水稀少、土壤贫瘠且盐渍化程度较高, 生态系统脆弱而独特。历经长期的医学实践与研究, 发现其具备补肾阳、益精血、润肠通便等多种功效, 对人体健康有着多方面的益处。历代本草典籍如《本草拾遗》《本草汇言》等均对此有详尽记载[1−2]。中医临床常用于治疗生殖功能障碍、骨质疏松及老年性便秘等疾病。现代植物化学研究明确指出, 肉苁蓉中富含多种具有重要作用的活性成分[3]。其中, 肉苁蓉多糖因其多样的生物活性而备受关注, 已被证实具有抗氧化[4]、抗衰老、神经保护[5]、免疫调节及抗肿瘤等药理作用[6]。近年来, 随着肉苁蓉人工栽培技术的突破, 以内蒙古阿拉善为代表的产区已形成完整产业链, 实现了生态效益与经济效益的双赢[7]。

传统肉苁蓉多糖提取工艺方法很多, 王晓琴等[8]采用热回流提取法, 在最优工艺条件下获得 0.68%的多糖得率, 但该方法存在能耗高、提取效率低的局限。刘洋[9]运用石油醚回流提取法虽获得 12.40%的较高得率, 但面临有机溶剂残留及产品安全性隐患。赵岩[10]研究表明, 超声辅助提取可使荒漠肉苁蓉多糖得率从 3.25%提升至 3.42%, 管花肉苁蓉多糖得率从 2.58%提升至 2.71%, 但该技术设备投入较大, 且可能对多糖结构产生影响。因此, 探索高效、温和且安全的肉苁蓉多糖提取新方法具有重要的研究价值和应用前景。

高速剪切技术是一种利用高速旋转的剪切头对物料产生强烈剪切、分散和撞击作用的物理提取技术[11], 具有操作时间短、提取效率高、反应条件温和等优点, 目前已成功应用于姬松茸子实体多糖[12]、鹿茸菇子实体多糖[13]等天然产物的提取。芮文君等[14]采用高速剪切辅助水酶法提高了紫苏籽油的得率, 魏鉴腾等[15]以蕨麻为原料研究高速剪切辅助碱提取蕨麻多糖工艺, 均取得良好效果。目前, 高速剪切辅助提取技术在肉苁蓉多糖提取中尚未见系统研究。

本研究以肉苁蓉多糖得率为指标, 运用高速剪切辅助技术进行提取。先通过单因素实验, 对料液比、剪切转速、剪切时间以及剪切次数进行初步探索, 明确各因素的影响范围。随后, 运用 Box-Behnken 响应面法, 系统且深入地考察这些因素及其交互作用对多糖得率的影响, 优化提取工艺参数, 在完成工艺参数优化后, 对提取所得的肉

苁蓉多糖进行了体外抗氧化活性评价。本研究旨在为肉苁蓉多糖的高效提取提供一套科学、可靠且具有可操作性的技术方案, 并为其在功能食品与医药领域的深度开发和应用提供有力的理论依据与实践支持。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

肉苁蓉, 采自内蒙古自治区阿拉善盟, 采收后去除杂质、自然阴干, 粉碎后过 60 目标准筛, 密封置于干燥器中避光保存, 备用。

无水乙醇(分析纯, 天津市精细化工有限公司); 葡萄糖(分析纯, 天津市北辰方正试剂厂); 浓硫酸(纯度 98%, 四川西陇科学股份有限公司); 苯酚(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼[(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine), DPPH]自由基(纯度>97%, 东京化成工业株式会社); 羟自由基测定试剂盒、总抗氧化能力测定试剂盒、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS]阳离子自由基测定试剂盒(南京建成生物工程研究所)。

1.2　仪器与设备

AX224ZH 型电子分析天平(精度 0.0001 g, 美国奥豪斯国际贸易有限公司); D500 型高速剪切机(德国维根斯有限公司); 5810R 型高速冷冻离心机(德国艾本德股份有限公司); SpectraMax Plus 384 型全波长酶标仪(上海美谷分子仪器有限公司); YRE-201D 型旋转蒸发仪(巩义市予华仪器有限责任公司); UPH-III-10TNP 型优普系列超纯水机(四川优普超纯科技有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　肉苁蓉多糖提取的工艺流程

取肉苁蓉粉末烘干至恒重, 按设定料液比加超纯水, 经高速剪切后, 进行热回流提取; 取上清液浓缩, 加入 95%乙醇混匀, 4 ℃静置取沉淀, 无水乙醇洗涤并烘干得肉苁蓉粗多糖, 密封冷冻保存。

1.3.2　肉苁蓉多糖含量的测定

采用苯酚-硫酸法测定多糖含量[16–17]。将葡萄糖质量浓度设为横坐标(X, mg/mL)、吸光度设为纵坐标(Y), 在 490 nm 波长下完成标准曲线的拟合。

将粗多糖溶于超纯水制得待测液, 离心取上清, 用待测液代替葡萄糖测定吸光度并代入标准曲线计算多糖浓度, 结合稀释倍数与取样量, 计算粗多糖实际含量, 计算如公式(1)所示。

$$多糖含量/\%=(C\times V)/m\times 100\% \quad (1)$$

式中: C 为多糖质量浓度, g/mL; V 为多糖溶液体积, mL; m 为粗多糖质量, g。

1.3.3　肉苁蓉多糖得率的测定

按 1.3.2 项方法测定粗多糖中的多糖含量(质量分数, %)。肉苁蓉多糖得率计算如公式(2)所示。

$$多糖得率/\%=多糖含量\times M_0/M\times 100\% \quad (2)$$

式中: M_0 为粗多糖质量, g; M 为制取粗多糖称取的原料质量, g。

1.3.4　提取方法比较

传统热水回流法: 参照文献[18–19]方法并优化, 精准称量 10 g 肉苁蓉粉末, 依据料液比 1:30 (g:mL)的比例加入蒸馏水, 煮沸加热回流提取, 提取时长为 30 min。提取完成后, 将提取液进行离心分离操作, 随后对离心后的上清液采用减压浓缩的方式, 使其体积缩减至原体积的 1/10。接着, 向浓缩液中加入 3 倍体积的质量分数为 95%的乙醇溶液, 于 4 ℃低温环境中静置过夜, 进行离心操作以收集多糖沉淀, 用无水乙醇对沉淀进行洗涤处理后, 将其烘干, 最终获得肉苁蓉粗多糖。

高速剪切辅助回流法: 精准称取 10 g 肉苁蓉粉末, 按料液比 1:30 (g:mL)加入蒸馏水, 先以 10000 r/min 转速高速剪切 30 s, 后续同传统法, 100 ℃回流提取 30 min; 提取液经离心、浓缩、醇沉、洗涤、烘干处理, 制得肉苁蓉粗多糖, 对比 2 种方法的多糖提取效果。

1.3.5　最佳工艺条件的确定

(1)单因素实验

以肉苁蓉多糖得率为指标, 通过单因素实验逐一考察 4 个因素的影响。料液比实验在转速 10000 r/min、次数 2 次、时间 30 s 条件下进行; 转速实验在料液比 1:40 (g:mL)、时间 30 s、次数 2 次条件下进行; 时间实验在料液比 1:40 (g:mL)、次数 2 次、转速 10000 r/min 条件下进行; 次数实验在料液比 1:40 (g:mL)、转速 10000 r/min、时间 30 s 条件下进行。各因素及其水平设置见表 1。

表 1　单因素实验因素及水平

Table 1　Single-factor experimental factors and levels

因素	水平				
	1	2	3	4	5
A(料液比)(g:mL)	1:10	1:20	1:30	1:40	1:50
B(剪切转速)/(r/min)	10000	14500	19000	23500	27000
C(剪切时间)/s	10	20	30	40	50
D(剪切次数)/次	1	2	3	4	5

(2)肉苁蓉多糖提取工艺优化

采用 Design-Expert 13.0.1.0 软件设计 Box-Behnken 实验, 优化提取工艺。各因素均设置 3 个水平(表 2), 通过

回归分析与响应面优化, 确定最佳工艺参数。

表 2 Box-Behnken 实验设计
Table 2 Experimental design of Box-Behnken

水平	因素			
	A(料液比)(g:mL)	*B*(剪切转速)/(r/min)	*C*(剪切时间)/s	*D*(剪切次数)/次
–1	1:20	10000	10	2
0	1:30	14500	20	3
1	1:40	19000	30	4

1.3.6 肉苁蓉多糖的抗氧化活性

(1)肉苁蓉多糖对 DPPH 自由基清除能力

参照徐怀德等[20]的方法并优化调整, 测定肉苁蓉多糖的 DPPH 自由基清除能力。将 1 mL 不同浓度的肉苁蓉多糖水溶液与 4.8 mL 浓度为 0.1 mmol/L 的 DPPH 乙醇溶液充分混匀, 再加入 2.2 mL 蒸馏水。将混合液振摇混匀, 避光静置反应 30 min, 在 517 nm 波长下测定吸光度值, 依据公式(3)计算肉苁蓉多糖对 DPPH 自由基的清除率。

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{D_{样品} - D_{样参}}{D_{空白}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: 样品组吸光度值以 $D_{样品}$表示; 无水乙醇吸光度值以 $D_{样参}$表示; 空白组吸光度值以 $D_{空白}$表示。

(2)肉苁蓉多糖的总还原力

参考 Siddiq 等[21]的方法并略作修改, 采用 FRAP 法测定肉苁蓉多糖总还原力。采用 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 标准溶液在 593 nm 处测吸光度绘制标准曲线, 依据标准曲线计算对应 $FeSO_4$ 标准溶液浓度, 以此表征肉苁蓉多糖的总抗氧化能力。

(3)肉苁蓉多糖对羟自由基清除能力

称取肉苁蓉粗多糖, 用超纯水配成不同浓度的水溶液。按照试剂盒说明书测羟自由基清除率, 反应完成后, 在 550 nm 处测吸光值, 按公式(4)计算清除率。

$$\text{羟自由基清除率}/\% = \frac{A_{对照} - A_{测定}}{A_{对照} - A_{空白}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: 样品组吸光度值以 $A_{测定}$表示; 对照组吸光度值以 $A_{对照}$表示; 空白组吸光度值以 $A_{空白}$表示。

(4)肉苁蓉多糖对 ABTS 阳离子自由基清除能力

参考 Zhou 等[22]方法略做修改, 采用 ABTS 法测定。配制不同浓度多糖溶液, 按试剂盒说明书操作, 以去离子水为空白对照, 于 405 nm 波长处测定吸光度, 按公式(5)计算清除率。

$$\text{ABTS 阳离子自由基清除率}/\% = \frac{B_{对照} - B_{测定}}{B_{空白}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: 空白组吸光度值以 $B_{空白}$表示; 样品组吸光度值以 $B_{测定}$表示。

1.4 数据处理

实验数据采用 Office Excel 2019 软件整理并绘制相关图表; 响应面拟合、显著性分析及方差分析均借助 Design-Expert 13.0.1.0 软件完成, 所有实验均设置 3 组平行重复, 结果以平均值±标准偏差表示, 保障数据可靠性与统计有效性。

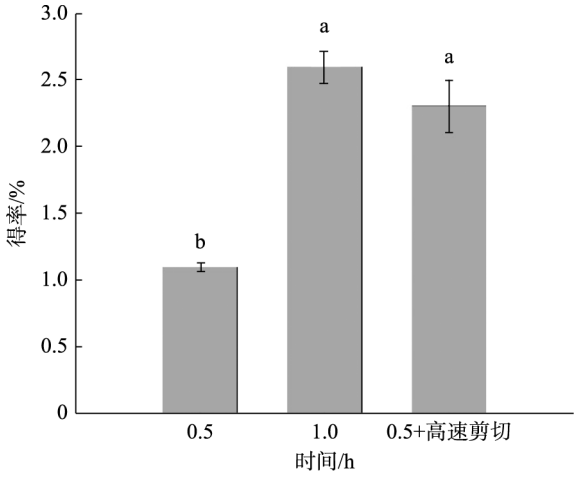
2 结果与分析

2.1 葡萄糖标准曲线

以葡萄糖标准品浓度为横坐标(X, mg/mL), 吸光度为纵坐标(Y)绘制葡萄糖标准曲线, 得到方程为 Y=5.7651X+0.1188, r^2=0.9972, 在 0~0.1 mg/mL 范围内线性关系良好。

2.2 提取方法比较

采用传统热水回流法与高速剪切辅助回流法提取肉苁蓉多糖, 测定并对比两种方法的肉苁蓉多糖得率, 结果如图 1 所示。传统提取法下肉苁蓉多糖得率为 1.10%, 高速剪切辅助提取法下肉苁蓉多糖得率达 2.31%, 相较传统方法提升显著(P<0.05), 表明高速剪切预处理可有效破碎肉苁蓉原料组织, 促进多糖溶出, 大幅提高肉苁蓉多糖提取效率。



注: 不同字母表示不同变量之间存在显著性差异(P<0.05), 图 2、4~7 同。

图 1 不同提取方法对肉苁蓉多糖得率的影响

Fig.1 Effects of different extraction methods on the yield of *Cistanche deserticola* polysaccharide

2.3 单因素实验结果

2.3.1 料液比对肉苁蓉多糖得率的影响

从图 2(A)可以看到料液比对肉苁蓉多糖得率产生的影响, 结果发现, 多糖得率呈现出先升高后降低的复杂变化趋势。进一步分析数据可知, 当料液比达到 1:30 (g:mL)

时, 多糖得率达到了整个实验过程中的最高值。当料液比较低时, 提取溶剂的量不够充足, 这就导致肉苁蓉原料无法与溶剂充分接触, 细胞内的多糖难以充分溶出, 最终使得多糖得率较低[23]; 当料液比超过 1:30 (g:mL)后, 原料中多糖基本完全溶出, 继续增大料液比, 提取液中杂质占比相对提升, 杂质与多糖产生相互作用, 干扰多糖的提取与分离纯化, 使得多糖得率呈缓慢下降态势[24]。综合考量提取效果与实验成本, 选定 1:20、1:30、1:40 (g:mL)作为响应面优化实验中料液比条件。

2.3.2　剪切转速对肉苁蓉多糖得率的影响

剪切转速对肉苁蓉多糖得率的影响结果如图 2(B)所示, 多糖得率随剪切转速升高整体呈上升趋势。剪切力对肉苁蓉细胞壁的机械破碎效果突出, 能高效促进胞内多糖溶出; 当转速超过 14500 r/min 后, 多糖得率增长速率放缓, 究其原因, 超高剪切力下肉苁蓉细胞结构已基本破碎完全, 多糖充分释放并溶解于提取液中, 继续提升转速, 细胞破碎程度趋于饱和, 多糖得率无明显大幅提升, 增长幅度显著降低[25]。结合实验结果与实际生产中的能耗、设备适配性等因素, 综合选定 10000、14500、19000 r/min 作为响应面优化实验中剪切转速条件。

2.3.3　剪切时间对肉苁蓉多糖得率的影响

由图 2(C)可知, 剪切时间直接影响肉苁蓉多糖得率, 二者呈先升后降的关联趋势。剪切时长处于 10~20 s 区间内, 多糖得率随时间延长线性攀升, 短时高强度剪切可快速破碎肉苁蓉细胞壁, 推动胞内多糖高效溶出; 当剪切时间突破 30 s, 多糖得率逐步回落, 主要是因为过长的机械剪切会破坏多糖分子结构, 引发大分子多糖降解, 反而降低提取得率[26]。结合实验数据与实操便捷性, 本研究确定最优剪切时间为 20 s, 选取 10、20、30 s 作为响应面优化的时间参数。

2.3.4　剪切次数对肉苁蓉多糖得率的影响

剪切次数对多糖得率的影响如图 2(D)所示, 整体呈先增后缓的变化态势。剪切次数由 1 次提升至 3 次时, 多糖得率稳步上涨, 当剪切次数超过 3 次, 得率增长趋于平缓, 甚至略有下滑, 多次间歇式剪切可逐层破除细胞壁屏障, 让多糖充分溶出, 提取效果持续优化, 过度反复剪切会产生持续机械应力, 致使已溶出的多糖链断裂降解, 难以进一步提升得率。因此选定最佳剪切次数为 3 次, 确定 2、3、4 次为响应面实验的次数水平。

2.4　响应面法优化肉苁蓉多糖提取工艺

2.4.1　响应面优化实验结果

在单因素实验结果基础上, 采用 4 因素 3 水平 Box-Behnken 设计响应面优化实验, 实验方案与实测多糖得率结果详见表 3。借助 Design-Expert 13.0.1.0 软件进行分析, 得到二次多项回归方程: Y=2.06+0.1222A–0.1279B+0.0903C–0.1190D+0.0533AB–0.1477AC–0.0250AD–0.0917BC–0.0137BD–0.1553CD–0.1911A^2–0.0780B^2–0.0490C^2–0.2646D^2。该方程可直观反映各提取因素及其交互作用对肉苁蓉多糖得率的影响, 为后续方差分析、工艺参数寻优提供数据支撑。

2.4.2　方差分析

对模型进行方差分析, 结果显示: 模型 P<0.0001, 达到极显著水平; 失拟项 P>0.05, 影响不显著, 表明模型无失拟因素, 实验误差管控到位, 拟合度优良, 可精准表征各因素与多糖得率的量化关系[27]。模型多元决定系数 r^2=0.9039, 说明模型拟合相关性优异, 实验数据可信度高。

结合表 4 方差分析结果可知, 一次项料液比(A)、剪切转速(B)、剪切次数(D)的 P<0.01, 对肉苁蓉多糖得率影响极显著; 一次项剪切时间(C)的 P<0.05, 影响显著; 交互项 AC、CD 的 P<0.05, 对多糖得率影响显著; 二次项 A^2、D^2 的 P<0.01, 对响应值作用极显著, 其余因素影响均不显著。

变异系数为 5.80%, 低于 10%, 进一步印证该模型精确度高、稳定性强, 实验数据可靠, 可用于肉苁蓉多糖提取工艺的优化预测[28]。

2.4.3　交互作用分析

根据二次方程分别构建任意两个实验因素间交互作用的三维响应面图及等高线图, 可直观反映各因素交互作用对肉苁蓉多糖得率的影响规律。分析结果表明, 等高线密度与响应曲面坡度呈正相关: 等高线越密集, 曲面越陡峭, 则对应因素的交互作用越显著[29–31]。如图 3 所示, 剪切时间与剪切次数的交互作用响应面呈现最为陡峭的坡度, 其等高线分布也最为密集, 这与方差分析中二者交互作用最为显著的结论具有高度一致性。

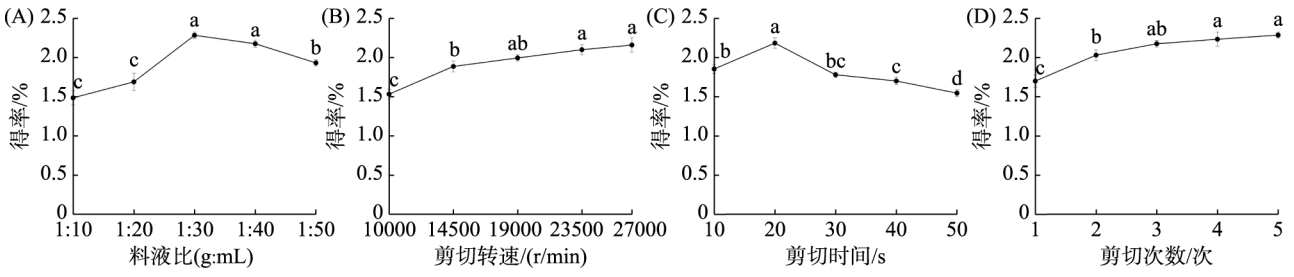


图 2　各因素对肉苁蓉多糖得率的影响

Fig.2　Effects of various factors on the yield of *Cistanche deserticola* polysaccharides

表 3 响应面实验设计及结果

Table 3 Design and results of response surface test

实验编号	*A*(料液比)(g:mL)	*B*(剪切转速)/(r/min)	*C*(剪切时间)/s	*D*(剪切次数)/次	多糖得率/%
1	–1	–1	0	0	1.78
2	1	–1	0	0	1.86
3	–1	1	0	0	1.55
4	1	1	0	0	1.83
5	0	0	–1	–1	1.59
6	0	0	1	–1	2.00
7	0	0	–1	1	1.73
8	0	0	1	1	1.52
9	–1	0	0	–1	1.55
10	1	0	0	–1	1.98
11	–1	0	0	1	1.38
12	1	0	0	1	1.70
13	0	–1	–1	0	1.95
14	0	1	–1	0	1.83
15	0	–1	1	0	2.32
16	0	1	1	0	1.82
17	–1	0	–1	0	1.45
18	1	0	–1	0	1.92
19	–1	0	1	0	2.01
20	1	0	1	0	1.89
21	0	–1	0	–1	2.03
22	0	1	0	–1	1.73
23	0	–1	0	1	1.73
24	0	1	0	1	1.38
25	0	0	0	0	1.95
26	0	0	0	0	1.99
27	0	0	0	0	2.23
28	0	0	0	0	2.01
29	0	0	0	0	2.12

2.4.4 最优工艺条件确定及验证实验结果

基于二次回归模型寻优计算，得到肉苁蓉多糖提取的理论最优工艺参数为：料液比 1: 28.25 (g:mL)、剪切转速 10000 r/min、剪切时间 30 s、剪切次数 2.52 次，该条件下模型预测多糖得率为 2.32%。结合实验操作可行性与实际生产便利性，对理论参数进行合理化调整，确定实际最优工艺为：料液比 1:30 (g:mL)、剪切转速 10000 r/min、剪切时间 30 s、剪切次数 3 次。在该优化工艺下进行 3 次平行验证实验，测得肉苁蓉多糖平均得率为 2.47%±0.15%，与理论预测值的绝对误差为 0.15%。结果表明，模型预测值与实际测定值吻合度高，验证了该响应面模型的可靠性及优化工艺的实用性，该工艺可用于肉苁蓉多糖的高效提取。

2.5 肉苁蓉多糖抗氧化性研究

2.5.1 DPPH 自由基的清除能力研究

DPPH 自由基的清除机制为抗氧化剂与自由基发生结合反应，致使溶液褪色、吸光度降低，基于该原理可知，抗氧化剂的还原能力与吸光度值呈负相关，吸光度越小，自由基清除效果越优异。从图 4 可看出，虽然肉苁蓉多糖的清除能力弱于 VC，但其清除效率随多糖浓度的升高而逐步增强，说明肉苁蓉多糖对 DPPH 自由基的清除作用表现出显著的浓度依赖特性[32]。随着多糖质量浓度持续升高，清除率增长幅度逐渐放缓，趋于平稳。该结果表明，肉苁蓉多糖具备良好的 DPPH 自由基清除能力。

2.5.2 总还原能力研究

通过吸光度换算 FRAP 值，FRAP 值与样品总还原能

表 4 方差分析

Table 4 Analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方差	*F*	*P*	显著性
模型	1.47	14	0.1048	9.41	<0.0001	**
A	0.1791	1	0.1791	16.07	0.0013	**
B	0.1964	1	0.1964	17.62	0.0009	**
C	0.0977	1	0.0977	8.77	0.0103	*
D	0.1699	1	0.1699	15.25	0.0016	**
AB	0.0113	1	0.0113	1.02	0.3301	不显著
AC	0.0873	1	0.0873	7.84	0.0142	*
AD	0.0025	1	0.0025	0.2244	0.6430	不显著
BC	0.0337	1	0.0337	3.02	0.1041	不显著
BD	0.0008	1	0.0008	0.0679	0.7983	不显著
CD	0.0964	1	0.0964	8.65	0.0107	*
A^2	0.2369	1	0.2369	21.26	0.0004	**
B^2	0.0395	1	0.0395	3.54	0.0808	不显著
C^2	0.0156	1	0.0156	1.40	0.2568	不显著
D^2	0.4542	1	0.4542	40.76	< 0.0001	**
残差	0.1560	14	0.0111			
失拟项	0.1035	10	0.0104	0.7888	0.6550	不显著
纯误差	0.0525	4	0.0131			
总离值	1.62	28				

注：*代表差异性显著(P<0.05)；**代表差异性极显著(P<0.01)。

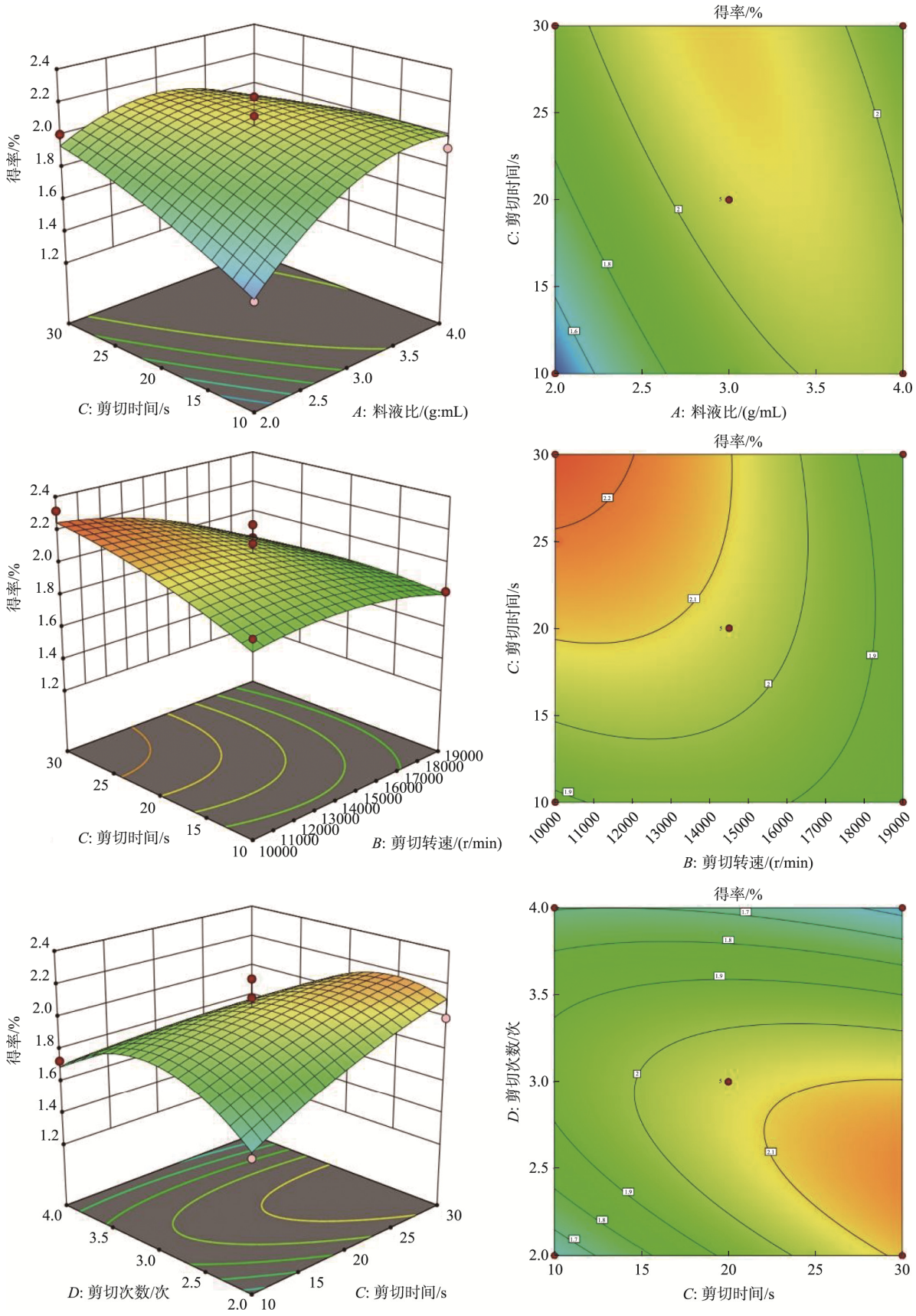
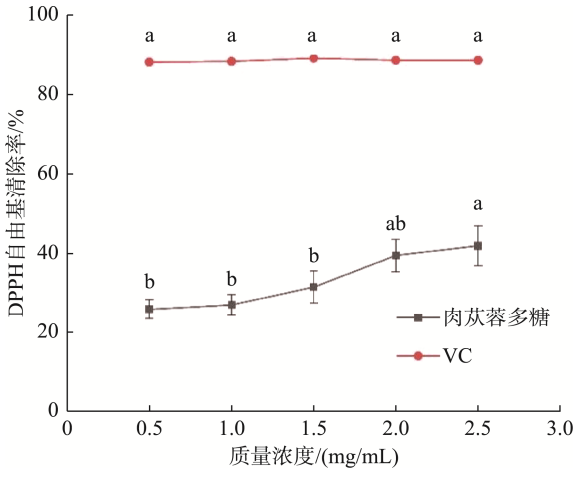


图 3　各因素间交互作用对多糖得率影响的响应面及等高线图谱

Fig.3　Response surface and contour plots of the interactions among factors on polysaccharide yield



注：维生素 C (vitamin C, VC)。

图 4 不同质量浓度多糖对 DPPH 自由基清除能力的影响

Fig.4 Effects polysaccharides of different mass concentrations on the free radical scavenging ability of DPPH

力呈正相关，数值越高则代表还原能力越强[33]。如图 5 所示，在 0~2.5 mg/mL 的质量浓度区间内，肉苁蓉多糖的总还原能力随多糖浓度的升高而持续增强，与 VC 对照相比其总还原能力较弱。研究结果证实，肉苁蓉多糖展现出良好的还原活性。在实验浓度范围内，多糖的还原能力会随着浓度的增加而稳步上升。

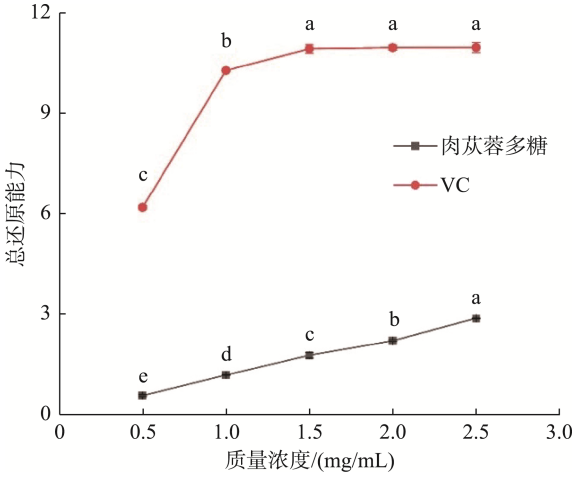


图 5 不同质量浓度多糖的总还原能力

Fig.5 Total reducing power of polysaccharides of different mass concentrations

2.5.3 羟自由基清除能力研究

如图 6 所示，肉苁蓉多糖在 0.1~0.5 mg/mL 浓度范围内展现出显著的羟自由基清除能力，且清除率与多糖浓度呈正相关，随质量浓度增加而持续上升，其增长速度与 VC 相当，表明肉苁蓉多糖具备良好的羟自由基清除作用，且与传统法提取的肉苁蓉多糖相比，其羟自由基清除能力更强[34]。因羟自由基具有极高的反应活性与强细胞膜穿透能力，易攻击生物大分子并造成细胞损伤坏死，因此对其清除能力的评价是衡量抗氧化性能的核心指标[35]。

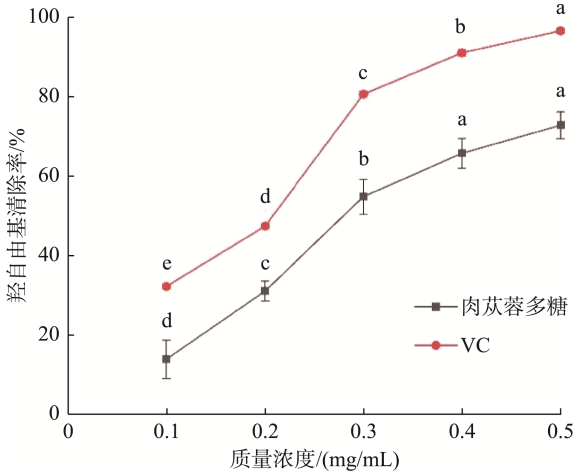


图 6 不同质量浓度多糖对羟自由基清除能力的影响

Fig.6 Effects polysaccharides of different mass concentrations on the free radical scavenging ability of hydroxyl radical

2.5.4 ABTS 阳离子自由基清除能力研究

由图 7 可知，在一定浓度范围内，肉苁蓉多糖对 ABTS 阳离子自由基的清除率随多糖质量浓度升高而提升，继续提升多糖浓度，清除效果趋于平缓，无明显大幅增长，在高浓度条件下，肉苁蓉多糖对 ABTS 阳离子自由基的清除能力接近 VC。高速剪切辅助制取的肉苁蓉多糖与传统水提法制取的肉苁蓉多糖对 ABTS 阳离子自由基的清除能力并无明显差异[36]。实验结果表明，肉苁蓉多糖可高效清除 ABTS 阳离子自由基，体外抗氧化活性突出，进一步印证了其优异的抗氧化性能。

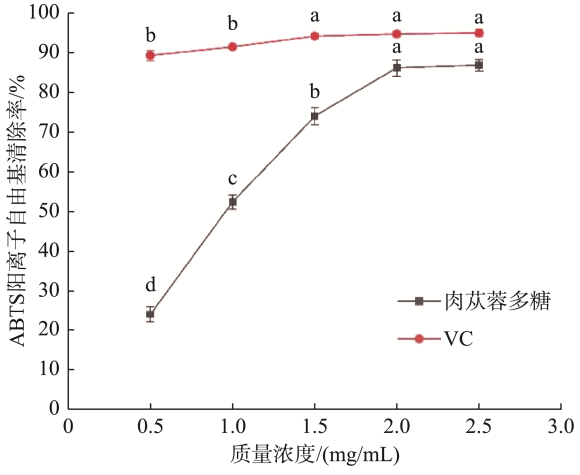


图 7 不同质量浓度多糖对 ABTS 阳离子自由基清除能力的影响

Fig.7 Effects polysaccharides of different mass concentrations on the free radical scavenging ability of ABTS cation

3 结　论

运用高速剪切辅助技术结合响应面法优化了肉苁蓉多糖的提取工艺, 在料液比 1:30 (g:mL), 剪切转速 10000 r/min, 剪切时间 30 s, 剪切次数 3 次的最佳条件下多糖得率达 2.47%±0.15%, 与理论预测值吻合良好, 工艺稳定可靠。但研究存在一定局限: 单因素实验仅考察了剪切速率、提取时间、料液比等有限参数, 未将温度、pH 等潜在影响因素纳入考量。同时, 抗氧化活性评价仅限于体外实验, 缺乏体内水平的验证, 多糖在复杂生理环境中的实际抗氧化效果尚不明确, 这也是当前多糖功能研究中普遍存在的难点。与先前研究相比, 传统热水浸提法提取肉苁蓉多糖的得率通常在 1.2%~1.8%之间, 而本研究采用高速剪切辅助技术后得率显著提高, 这与已有文献中超声、微波等辅助提取手段提升多糖得率的结论一致, 并且其抗氧化活性与传统热水浸提法提取的肉苁蓉多糖无显著差异, 但多糖得率提高, 说明高速剪切法在保证活性的前提下大幅提升了提取效率, 与已报道的各类植物多糖抗氧化效果相比, 肉苁蓉多糖表现出典型的天然植物多糖抗氧化特征, 体现出良好的抗氧化能力。

但本研究的不同之处在于将高速剪切与响应面法系统结合, 实现了多参数的协同优化, 而多数已有研究仅采用单一优化方法, 工艺精准度相对不足。高速剪切辅助提取工艺操作简便、耗时短、能耗低, 易于实现工业化放大生产, 所提取的肉苁蓉多糖表现出较强的体外抗氧化活性, 可作为天然抗氧化剂开发应用于功能性食品、保健品及化妆品等领域, 契合当前天然产物绿色开发的产业趋势。

后续研究可从开展体内抗氧化实验, 在动物模型中验证肉苁蓉多糖的实际功效; 结合结构表征手段, 阐明多糖的分子量、单糖组成及糖苷键类型与抗氧化活性之间的构效, 以拓展其综合开发利用价值。

参考文献

[1] 周刚, 高家敏, 曹进. 肉苁蓉在保健食品中的应用[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(3): 898–903.
Zhou Gang, Gao Jiamin, Cao Jin. Application of *Cistanche* in health food [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(3): 898–903.

[2] 杨建华, 麦吾菊丹•阿力甫, 居博伟, 等. 盐生肉苁蓉通便有效部位的提取工艺及药效学研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(15): 5069–5075.
Yang Jianhua, Maiwujudan Alifu, Ju Bowei, et al. Study on extraction technology and pharmacodynamics of laxation effective parts of *Cistanche salsa* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(15): 5069–5075.

[3] 王伟杰, 刘晨星, 曹艳, 等. 肉苁蓉多糖的生物活性研究现状与应用前景展望[J]. 食品工业, 2026, 47(7): 207–216.
Wang Weijie, Liu Chenxing, Cao Yan, et al. Current research status and application prospects of the biological activity of *Cistanche deserticola* polysaccharide [J]. The Food Industry, 2026, 47(7): 207–216.

[4] 张春生, 李冰, 王鲁豫, 等. 肉苁蓉多糖通过改善肠道菌群稳态产生抗衰老作用的研究[J]. 中华中医药学刊, 2025, 43(3): 92–95, 20–24.
Zhang Chunsheng, Li Bing, Wang Luyu, et al. Study on anti-aging effect of *Cistanche deserticola* polysaccharide by improving homeostasis of intestinal flora [J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2025, 43(3): 92–95, 20–24.

[5] Cai Runlan, Yang Meihua, Shi Yue, et al. Antifatigue activity of phenylethanoid-rich extract from *Cistanche deserticola* [J]. Phytotherapy Research, 2010, 24(2): 313–315.

[6] Zhang Xianxie, Liu Zuoxu, Li Zhihui, et al. Ferroptosis pathways: unveiling the neuroprotective power of cistache deserticola phenylethanoid glycosides [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 333: 118465.

[7] 屠鹏飞, 姜勇. 中药肉苁蓉的本草再考证[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(20): 5670–5679.
Tu Pengfei, Jiang Yong. Update classical literature research on Cistanches Herba [J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022, 47(20): 5670–5679.

[8] 王晓琴, 曹礼, 朱艳萍. 肉苁蓉多糖提取工艺及抑菌作用研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 15855–15856, 15878.
Wang Xiaoqin, Cao Li, Zhu Yanping. Study on the extraction technology and antimicrobial action of *Cistanche deserticola* polysaccharides [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(32): 15855–15856, 15878.

[9] 刘洋. 肉苁蓉、草苁蓉活性成分和指纹图谱研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013: 10.
Liu Yang. Study on the active constituent and fingerpirnt of *Cistanche deserticola* ma and *Boschniakia* rossicaa [D]. Changchun: Jilin University, 2013: 10.

[10] 赵岩. 肉苁蓉品质综合评价及其多糖的提取、纯化与结构鉴定[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2022: 10.
Zhao Yan. Comprehensive evaluation of *Cistanche* quality and extraction, purification and structural identification of its polysaccharide [D]. Ala'er: Tarim University, 2022: 10.

[11] Zhang Anqiang, Deng Jiaying, Liu Xiaoqing, et al. Structure and conformation of *α*-glucan extracted from *Agaricus blazei* Murill by high-speed shearing homogenization [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 113: 558–564.

[12] 刘晓庆, 秦春青, 孙培龙, 等. 姬松茸子实体多糖高速剪切提取及其抗氧化活性[J]. 食药用菌, 2017, 25(2): 113–119.
Liu Xiaoqing, Qin Chunqing, Sun Peilong, et al. Optimization of

polysaccharides extraction from *Agaricus blazei* Murill by high-speed shear technique and their antioxidant activities [J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2017, 25(2): 113–119.

[13] 秦春青. 鹿茸菇子实体多糖提取分离、结构鉴定及抗氧化研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019: 10.
Qin Chunqing. Study on the extraction, separation, structural identification and antioxidant activity of polysaccharides from *Lyophyllun decastes* Sing [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019: 10.

[14] 芮文君, 孙世琨, 傅雷, 等. 基于提高 α-亚麻酸得率的高速剪切辅助水酶法提取紫苏籽油的工艺优化[J]. 中国油脂, 2025, 50(5): 11–15.
Rui Wenjun, Sun Shikun, Fu Lei, et al. Optimization of extraction process for high α-linolenic acid *Perilla* seed oil using high speed shear assisted aqueous enzymatic method [J]. China Oils and Fats, 2025, 50(5): 11–15.

[15] 魏鉴腾, 申奥, 张丹阳, 等. 高速剪切辅助提取蕨麻多糖工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(23): 115–124.
Wei Jianteng, Shen Ao, Zhang Danyang, et al. Optimization of high-speed shear-assisted extraction process and study on antioxidant activity of *Potentilla anserina* L. polysaccharide [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(23): 115–124.

[16] 姚炳兴, 牛泱平, 李晋. 缘管浒苔多糖提取分离工艺的优化[J]. 中国海洋药物, 2010, 29(2): 31–35.
Yao Bingxing, Niu Yangping, Li Jin. Optimizing extraction and separation technologies of *Enteromorpha linza* polysaccharide [J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2010, 29(2): 31–35.

[17] 魏绍云, 齐慧玲, 王继伦, 等. 苯酚—硫酸法测定白及多糖[J]. 天津化工, 2000, 14(3): 35–36.
Wei Shaoyun, Qi Huiling, Wang Jilun, et al. Determination of polysaccharide in *Bletilla striata* by phenol-sulfuric acid method [J]. Tianjin Chemical Industry, 2000, 14(3): 35–36.

[18] 逄梦玉, 隋昕怡, 刘丹, 等. 桑黄多糖提取工艺优化、结构表征及抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(12): 48–57.
Pang Mengyu, Sui Xinyi, Liu Dan, et al. Optimization of extraction process, structural characterization and antioxidant activity of *Sanghuangporus sanghuang* polysaccharides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(12): 48–57.

[19] 王嘉, 杨雯, 王栋, 等. 肉苁蓉属多糖的提取及含量测定方法的研究进展[J]. 中南药学, 2019, 17(7): 1055–1059.
Wang Jia, Yang Wen, Wang Dong, et al. Research advance in extraction and content determination of polysaccharides from *Cistanche* [J]. Central South Pharmacy, 2019, 17(7): 1055–1059.

[20] 徐怀德, 秦盛华. 超声波辅助提取光皮木瓜多糖及其体外抗氧化性研究[J]. 食品科学, 2010, 31(10): 106–111.
Xu Huaide, Qin Shenghua. Ultrasonic-assisted extraction and *in vitro* antioxidant activity evaluation of polysaccharides from *Chaenomeles* sinensis (thouin) koehne [J]. Food Science, 2010, 31(10): 106–111.

[21] Siddiq M, Dolan K D, Perkins-Veazie P, et al. Effect of pectinolytic and cellulytic enzymes on the physical, chemical, and antioxidant properties of blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) juice [J]. LWT, 2018, 92: 127–132.

[22] Zhou Li, Xie Minhao, Yang Fu, et al. Antioxidant activity of high purity blueberry anthocyanins and the effects on human intestinal microbiota [J]. LWT, 2020, 117: 108621.

[23] 王涛, 刘雨博, 佟长青, 等. 缢蛏多糖提取工艺优化及生物活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(5): 1618–1626.
Wang Tao, Liu Yubo, Tong Changqing, et al. Study on extraction process optimization and bioactivity of *Sinonovacula constricta* polysaccharides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(5): 1618–1626.

[24] 丁铖, 黄小强, 王聪颖, 等. 响应面法优化黄秋葵多糖的提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2026, 47(3): 66–71.
Ding Cheng, Huang Xiaoqiang, Wang Congying, et al. Optimization of extraction process for *Abelmoschus esculentus* polysaccharides by response surface methodology and study of its antioxidant activity [J]. The Food Industry, 2026, 47(3): 66–71.

[25] 杜津昊, 刘建飞, 刘晓风, 等. 高速剪切技术辅助提取枸杞多糖工艺[J]. 食品工业, 2017, 38(3): 128–132.
Du Jinhao, Liu Jianfei, Liu Xiaofeng, et al. Extraction process of *Lycium barbarum* polysaccharide by high-speed shearing technique [J]. The Food Industry, 2017, 38(3): 128–132.

[26] Li Lin, Yan Jianan, Lai Bin, et al. Rheological properties of *Chia seed* gum extracted by high-speed shearing and its comparison with commercial polysaccharides [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108936.

[27] 是建华. 黑蒜多糖提取工艺优化及其抗疲劳作用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(21): 303–312.
Shi Jianhua. Optimization of the extraction process of black garlic polysaccharides and study on their anti-fatigue effects [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(21): 303–312.

[28] 潘佳慧, 骆淑媛, 阎隽. 响应面法优化桂花叶多糖的超声提取工艺[J]. 化学工程师, 2025, 39(5): 11–14, 59.
Pan Jiahui, Luo Shuyuan, Yan Jun. Optimization of ultrasonic extraction of polysaccharides from *Osmanthus fragrans* leaves by response surface methodology [J]. Chemical Engineer, 2025, 39(5): 11–14, 59.

[29] Wang Xueyan, Su Yuanyuan, Su Jianqing, et al. Optimization of enzyme-assisted aqueous extraction of polysaccharide from *Acanthopanax senticosus* and comparison of physicochemical properties and bioactivities of polysaccharides with different molecular weights [J]. Molecules, 2023, 28(18): 6585.

[30] 赵非, 牛莉娟, 刘宗哲, 等. 高效液相法测定若羌红枣多糖的单糖组成[J]. 食品科技, 2019, 44(11): 321–326.

Zhao Fei, Niu Lijuan, Liu Zongzhe, et al. Determination of monosaccharide composition in Ruoqiang jujube polysaccharide by high performance liquid chromatography [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(11): 321–326.

[31] Zhu Haolin, Liu Hui, Tang Keyong, et al. Optimization of dialdehyde soluble soybean polysaccharide: preparation by response surface methodology for cleaner leather tanning [J]. RSC Advances, 2022, 12(12): 7506–7515.

[32] 康海权, 陈亚琪, 陈秋平, 等. 油茶果壳多糖的抗氧化作用及单糖组成[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(4): 36–39.
Kang Haiquan, Chen Yaqi, Chen Qiuping, et al. Study on antioxidant activity and polysaccharides from the fruit sell of *Camellia oleifera* Abel [J]. Food and Fermentation Industries, 2010, 36(4): 36–39.

[33] 张景, 刘养山, 任洪飞, 等. 羊肚菌多糖的提取优化及抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(5): 317–324.
Zhang Jing, Liu Yangshan, Ren Hongfei, et al. Study on the extraction optimization and antioxidant activity of *Morchella esculenta* polysaccharides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(5): 317–324.

[34] 王国卫, 赵芳. 新疆肉苁蓉多糖清除活性氧自由基[J]. 光谱实验室, 2011, 28(3): 1545–1548.
Wang Guowei, Zhao Fang. Elimination active oxygen radicals of *Cistanche deserticola* (Y. C. Ma.) polysaccharid in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2011, 28(3): 1545–1548.

[35] 林润, 江雪儿, 傅嘉懿, 等. 两种单丛茶多糖的表征及体外抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(14): 234–241.
Lin Run, Jiang Xue'er, Fu Jiayi, et al. Characterization and *in vitro* antioxidant activity study of two polysaccharides from Dancong Tea [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(14): 234–241.

[36] 吕宁, 万鹏鹤, 毛明慧, 等. 肉苁蓉多糖提取工艺优化及其抗氧化、美白活性[J]. 香料香精化妆品, 2026(2): 78–84, 189.
Lv Ning, Wan Penghe, Mao Minghui, et al. Optimization of polysaccharide extraction process from *Cistanche tubulosa* and its antioxidant and whitening activities [J]. Flavour Fragrance Cosmetics, 2026(2): 78–84, 189.

(责任编辑: 蔡世佳　曹岱琳)