

赵浩彤, 祁愉欢, 唐兆成, 等. 海南野生桑黄多糖的提取优化及其抗氧化活性[J]. 江苏农业科学, 2025, 53(22): 213-219.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.22.029

海南野生桑黄多糖的提取优化及其抗氧化活性

赵浩彤¹, 祁愉欢², 唐兆成³, 戚维聪³, 张保龙³

(1. 江苏大学食品与生物工程学院, 江苏镇江 212013; 2. 沈阳农业大学食品学院, 辽宁沈阳 110866;

3. 江苏省农业科学院种质资源与生物技术研究所, 江苏南京 210014)

摘要:以海南省五指山野生桑黄子实体为原料,旨在通过科学手段优化其多糖成分的热水浸提工艺,并深入评估该多糖的体外抗氧化活性,以期天然抗氧化剂的开发提供坚实的理论支撑。研究过程中,采用单因素试验与响应面分析法相结合的方式,系统探究提取温度(85、90、95 ℃)、提取时间(1.5、2.0、2.5 h)及料液比(1:10、1:20、1:30)(g:mL)这3个核心参数对多糖得率的具体影响,并采用 ABTS⁺ 自由基清除法、羟自由基清除法以及铁离子还原能力法测定其抗氧化活性。结果表明,最佳提取工艺条件为温度 85 ℃、时间 2 h、料液比 1 g:20 mL,在此条件下,多糖的实际得率高达 0.71%,与模型预测值高度一致,充分验证了优化工艺的准确性。进一步分析显示,所得多糖总糖含量为 44.76%、还原糖含量为 13.30%。尤为重要的是,体外抗氧化试验揭示,桑黄多糖对 ABTS⁺ 自由基和羟自由基的清除能力展现出显著的浓度依赖性,最高清除率分别达 93.29% 和 69.71%,接近阳性对照(维生素 C)的效果;同时,其在 10 mg/mL 浓度时的铁离子还原力也达到了 6.20 mmol/L。综上所述,本研究优化了海南省五指山野生桑黄多糖的提取工艺,明确其显著的体外抗氧化活性,为后续产业化开发奠定了基础。

关键词:桑黄;多糖;热水浸提;提取工艺;抗氧化活性

中图分类号:TS201.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)22-0213-07

桑黄(*Phellinus linteus*)作为珍稀的药用真菌,广泛分布于亚洲、欧洲和北美洲的森林中^[1],海南

桑黄是海南热带森林中的珍贵药用真菌,野生桑黄主要分布于保亭、五指山等地。桑黄自古以来就被视为一种具有多种药用价值的真菌,其生物活性主要源于多糖、多酚、黄酮和三萜类等成分^[2-5]。桑黄多糖是其核心功能成分,具有显著的免疫调节、抗肿瘤、抗氧化及抗炎活性^[6-9]。近年来,现代科学技术的发展促进了对桑黄多糖药理作用与化学成分深入研究,引发了广泛的科研关注。

收稿日期:2025-08-27

基金项目:国家自然科学基金(编号:32172047)。

作者简介:赵浩彤(2000—),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事功能性食品研究。E-mail:zht406406@163.com。

通信作者:张保龙,博士,研究员,主要从事作物分子育种研究。E-mail:zhl2248@hotmail.com。

[5] 黄其椿,李果果,陈东奎,等. 广西沃柑产业发展现状与对策建议[J]. 中国南方果树,2020,49(5):135-141,149.

[6] 习建龙,谢上海,李航,等. 赣南脐橙果实品质现状及分布特征分析[J]. 中国南方果树,2024,53(1):9-13.

[7] 袁洁,区善汉,邓荫伟. 柑橘果实品质改善影响因素及品质提升主要技术研究进展[J]. 南方园艺,2022,33(4):71-74.

[8] 沈德绪. 果树育种[M]. 北京:中国农业出版社,1984:25-30.

[9] 黄其椿,汪妮娜,黄燕晓,等. 广西沃柑果实横径生长动态及模型构建[J]. 果树学报,2024,41(4):764-776.

[10] 张社南,贺申魁,梅正敏,等. 沃柑的叶果比及其对产量与果实品质的影响[J]. 南方园艺,2020,31(6):17-21.

[11] 苏亮亮,曹洪波,冯妍,等. ‘深州蜜桃’园土壤养分与果实品质相关性[J]. 经济林研究,2024,42(2):249-256.

[12] 王季姣,潘越,王世伟,等. 土壤养分与北冰红山葡萄果实品质间的典型相关性分析[J]. 新疆农业科学,2024,61(2):

355-364.

[13] 侯永侠,车畅,温璇,等. 草莓果实品质及其与土壤养分的相关性分析[J]. 沈阳农业大学学报,2024,55(2):153-162.

[14] 刘志宗,王晟,陈亚俊,等. 褚橙果实品质指标与土壤养分状况关联分析[J]. 中国土壤与肥料,2023(7):182-190.

[15] 郑锡良,孙鹏,戚行江,等. 杨梅果实品质指标与土壤肥力因子的相关性分析[J]. 浙江农业科学,2024,65(9):2112-2118.

[16] 李祥,任燕燕,金晶,等. 野生刺梨果实品质特征及营养成分与生长土壤关系分析[J]. 安徽农学通报,2024,30(20):28-32.

[17] 孙鹏,郑锡良,梁森苗,等. 影响不同杨梅品种果实品质形成的土壤因子差异分析[J]. 浙江农业科学,2024,65(8):1826-1832.

[18] 李跃琼,方吉祥,白华飞,等. 优化施肥对沃柑品质和产量的影响[J]. 云南农业,2024(4):75-77.

多糖的生物学活性与其提取工艺密切相关。目前,常用的桑黄多糖提取方法包括水提法、微波辅助提取法、酶解法等^[10-12]。其中,热水浸提法操作简单、成本低廉,但提取效率较低;醇提法提取效率较高,但溶剂残留问题不容忽视;酶解法则能够提高提取效率,但酶的选择和使用条件较为复杂。传统热水浸提法因操作简便、成本低而被广泛应用,且水作为溶剂具有生物相容性高、环境友好等特点,能够最大限度地维持多糖的结构^[13]。研究表明,提取温度、提取时间及料液比等参数会显著影响多糖得率^[14]。响应面法通过建立多因素交互作用模型,可优化提取条件,已在灵芝、灰树花等食用菌多糖提取中成功应用^[15]。然而,针对海南野生桑黄多糖的响应面工艺优化尚未系统研究,尤其缺乏地域性菌株的特性分析。

在生物活性方面,桑黄多糖的抗氧化能力是其核心功能之一。自由基氧化损伤是衰老、癌症及代谢性疾病的重要诱因,而天然多糖因其安全性与清除自由基能力,成为合成抗氧化剂的理想替代品^[16]。现有研究证实,桑黄多糖可通过激活超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)等抗氧化酶系,有效清除1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、2,2'-联氮-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(ABTS⁺)及羟自由基($\cdot\text{OH}$)^[17]。然而,海南野生桑黄多糖的抗氧化能力尚未明确。

本研究以海南野生桑黄为原料,采用热水浸提法结合响应面优化技术,系统探究提取温度、时间及料液比对多糖得率的影响规律;对其总糖、还原糖含量及体外抗氧化活性(ABTS⁺自由基、羟自由基清除率及FRAP还原力)进行系统研究,旨在为热带药用真菌资源产业化过程中的高效开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

野生桑黄子实体采自海南省保亭县五指山区。3,5-二硝基水杨酸(DNS)、三氯乙酸、酒石酸钾钠购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司;抗坏血酸(维生素C,VC)、羟自由基清除能力检测试剂盒和ABTS⁺法总抗氧化能力检测试剂盒均购自生工生物工程(上海)股份有限公司;铁离子还原能力试剂盒购自北京艾普希隆生物科技有限公司;所有有机溶剂均为国产分析纯。

1.2 试验方法

1.2.1 桑黄多糖的提取流程 试验于2025年2—7月在江苏省农业科学院休闲所内进行。准确称取干燥处理后的桑黄子实体粉末,热水水浴浸提。4层纱布过滤后,在40℃条件下将提取液浓缩,加入终浓度80%乙醇,4℃过夜醇沉。醇沉液离心(6000 r/min,45 min),沉淀复溶于水,加入终浓度4%三氯乙酸溶液,4℃下静置6 h,随即离心(12000 r/min,30 min)弃上清,沉淀过夜醇沉后冷冻干燥,得到桑黄多糖。

1.2.2 单因素试验 以桑黄多糖得率为指标,探究提取温度、提取时间和料液比对桑黄多糖得率的影响。桑黄多糖得率按下列公式计算:

$$\text{多糖提取得率} = m/M \times 100\%$$

式中: m 为桑黄多糖重,g; M 为桑黄子实体粉末重,g。

1.2.2.1 提取温度对桑黄多糖得率的影响 固定桑黄子实体粉末10 g,提取时间2 h,料液比1:20(g:mL),考察提取温度75、80、85、90、95℃对桑黄多糖得率的影响。

1.2.2.2 提取时间对桑黄多糖得率的影响 固定桑黄子实体粉末10 g,提取温度85℃,料液比1:20(g:mL),考察提取时间1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 h对桑黄多糖得率的影响。

1.2.2.3 料液比对桑黄多糖得率的影响 固定桑黄子实体粉末10 g,提取时间2 h,考察料液比1:10、1:20、1:30、1:40、1:50(g:mL)对桑黄多糖得率的影响。

1.2.3 响应面试验设计 在单因素试验基础上,利用Design-Expert 11.0软件,以桑黄多糖得率(Y)为响应指标,选取提取温度(A)、提取时间(B)和料液比(C)作为考察因素,为优化热水浸提法提取桑黄多糖的工艺条件,设计了响应面试验。各因素具体水平见表1。

表1 响应面设计因素与水平

水平	因素		
	A:提取温度(℃)	B:提取时间(h)	C:料液比(g:mL)
-1	80	1.5	1:10
0	85	2.0	1:20
1	90	2.5	1:30

1.2.4 碳水化合物含量测定 总糖含量采用苯酚硫酸法^[18]进行测定。还原糖含量采用DNS法^[19]进行测定。以葡萄糖浓度和吸光度分别为横坐标与

纵坐标,绘制标准曲线。

1.2.5 桑黄多糖体外抗氧化活性研究

1.2.5.1 ABTS⁺ 自由基清除能力测定 桑黄多糖对 ABTS⁺ 自由基清除率的测定参考李瑞雪等的方法^[20],利用 ABTS⁺ 总抗氧化能力检测试剂盒进行:在 96 孔板中分别加入 10 μL 浓度为 1、2、4、6、8、10 mg/mL 的多糖溶液以及 190 μL ABTS⁺ 工作液,充分混匀后室温避光反应 20 min,使用酶标仪在 734 nm 波长处测定吸光度。同时设置等浓度的维生素 C 溶液作为阳性对照,ABTS⁺ 自由基清除率按下列公式计算:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率} = \frac{D_1 - D_2}{D_1} \times 100\%。$$

式中: D_1 为空白组的吸光度; D_2 为样品溶液的吸光度。

1.2.5.2 羟自由基清除能力的测定 桑黄多糖对羟自由基清除率的测定参考 Tang 等的方法^[21],利用羟自由基清除能力检测试剂盒进行:在 1.5 mL 离心管中分别加入 0.15 mL 浓度为 1、2、4、6、8、10 mg/mL 的多糖溶液,加入 0.75 mL 工作液后,用 ddH₂O 将反应体系补足至 1.5 mL。经涡旋振荡混合均匀后将反应体系置于 37 °C 恒温水浴孵育 1 h。随后在室温条件下以 10 000 r/min 离心 10 min,收集上清液并于 536 nm 波长处测定吸光度。试验设置等浓度维生素 C 作为阳性对照,羟自由基清除率依据下式计算:

$$\text{羟自由基清除率} = \frac{D_2 - D_3}{D_1 - D_3} \times 100\%。$$

式中: D_1 为空白组的吸光度; D_2 为样品溶液的吸光度; D_3 为对照组的吸光度。

1.2.5.3 铁离子还原能力(FRAP)的测定 桑黄多糖对铁离子还原能力的测定参考刘养山等的方法^[22],利用铁离子还原能力试剂盒进行:在 1.5 mL 离心管中分别加入 20 μL 浓度为 1、2、4、6、8、10 mg/mL 的多糖溶液,随后加入 680 μL 显色液,用 ddH₂O 补足至 800 μL。充分混匀后室温孵育 10 min,于 590 nm 波长处测定吸光度。同时设置等浓度的维生素 C 作为阳性对照,根据铁离子标准曲线计算其还原力。

1.3 数据处理

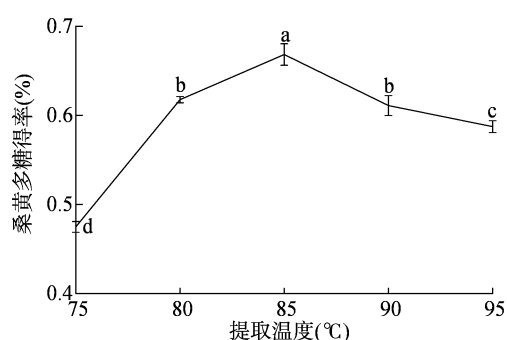
每组试验均设置 3 个平行,试验数据以均值 ± 标准偏差表示;数据整理与图表绘制在 Excel 2016 及 Origin 2021 软件上完成。响应面分析通过

Design - Expert 11.0 进行,运用 SPSS 27.0 软件对数据进行显著性检验及进一步的方差分析。

2 结果与分析

2.1 提取工艺的单因素结果

2.1.1 提取温度对桑黄多糖得率的影响 由图 1 可见,提取温度在 75 ~ 85 °C 时多糖得率随温度上升而增加,85 °C 时多糖得率达到最大值,85 ~ 95 °C 范围内多糖得率呈逐渐下降趋势。这可能是由于过高温度促使多糖发生降解反应^[23],进而造成含量减少与得率下降。因此确定 85 °C 为最佳提取温度。



柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

图 2、图 3 同

图 1 提取温度对桑黄多糖得率的影响

2.1.2 提取时间对桑黄多糖得率的影响 由图 2 可见,当提取时间在 1 ~ 2 h 时,多糖的提取率随着提取时间的延长而逐渐增加,并在 2 h 时达到最高值 0.58%。然而,当提取时间超过 2 h 后,提取率开始缓慢下降。这可能是因为在 2 h 左右,多糖的溶出已经基本达到平衡状态^[24],继续延长提取时间不仅不会显著提高多糖的提取率,反而可能导致杂质的溶出增加或生产效率的降低。因此确定 2 h 为最佳的提取时间。

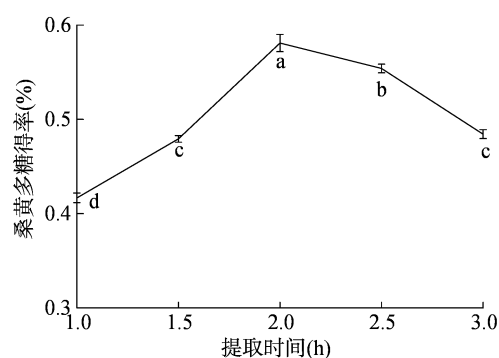


图 2 提取时间对桑黄多糖得率的影响

2.1.3 料液比对桑黄多糖得率的影响 由图 3 可见,得率在料液比为 1 g : 20 mL 时达到峰值,超过

该比例后(1 g : 20 mL ~ 1 g : 50 mL)呈持续下降趋势。分析认为,溶剂体积过大可能导致多糖分子扩散阻力增加,进而降低溶出效率^[25]。因此确定 1 g : 20 mL 为最佳料液比。

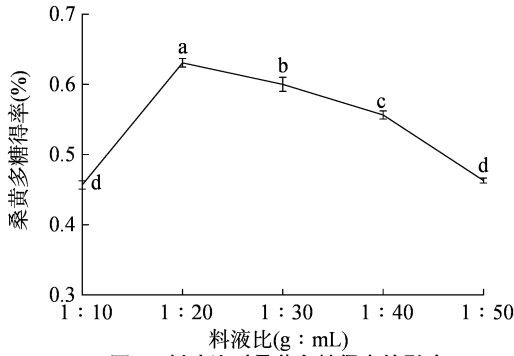


图3 料液比对桑黄多糖得率的影响

2.2 响应面试验设计与结果

2.2.1 响应面优化及方差分析 基于单因素试验结果筛选的关键变量,依据 Box - Behnken 设计(BBD)原理构建三因素三水平的响应面模型。各因素水平采用等间距编码: -1、0、+1,试验设计矩阵及响应值详见表 2,回归模型方差分析结果见表 3。

表 2 响应面试验设计与结果

组号	水平			多糖得率 (%)
	提取温度 A	提取时间 B	料液比 C	
1	-1	-1	0	0.44
2	1	-1	0	0.41
3	-1	1	0	0.42
4	1	1	0	0.42
5	-1	0	-1	0.52
6	1	0	-1	0.51
7	-1	0	1	0.53
8	1	0	1	0.52
9	0	-1	-1	0.45
10	0	1	-1	0.44
11	0	-1	1	0.43
12	0	1	1	0.46
13	0	0	0	0.69
14	0	0	0	0.67
15	0	0	0	0.68
16	0	0	0	0.68
17	0	0	0	0.69

由表 2 可知,通过对试验数据进行多元回归分析,得到多元回归方程:

$$Y = 0.6820 - 0.0063A + 0.0013B + 0.0025C +$$

$$0.0075AB + 0.0100BC - 0.0923A^2 - 0.1673B^2 - 0.0698C^2。$$

由表 3 可知, $P < 0.0001$ 表明回归模型具有高度显著性,能够很好地解释响应变量的变化;失拟的 P 值为 0.5413,大于 0.05,表明失拟不显著,进一步验证了模型的拟合效果; $R^2 = 0.9976$,说明模型对数据的拟合程度非常高,大部分的变异都可以通过模型中的自变量来解释; $R^2_{Adj} = 0.9946$,说明该模型能够解释 99.46% 的响应值变化,具有良好的准确性;由显著性结果可知, A^2 、 B^2 、 C^2 均极显著($P < 0.0001$), BC 项显著($P < 0.05$)。根据对 F 值的分析可知,3 个因素对多糖得率的影响由大到小为 A (提取温度) $> C$ (料液比) $> B$ (提取时间)。

表 3 方差分析

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
回归模型	0.1919	9	0.0213	328.03	<0.0001
A:提取温度	0.0003	1	0.0003	4.81	0.0644
B:提取时间	0.0000	1	0.0000	0.19	0.6742
C:料液比	0.0001	1	0.0001	0.77	0.4095
AB	0.0002	1	0.0002	3.46	0.1051
AC	0.0000	1	0.0000	0.00	1.0000
BC	0.0004	1	0.0004	6.15	0.0422
A^2	0.0358	1	0.0358	551.26	<0.0001
B^2	0.1178	1	0.1178	1811.99	<0.0001
C^2	0.0205	1	0.0205	315.15	<0.0001
残差	0.0005	7	0.0001		
失拟	0.0002	3	0.0001	0.83	0.5413
纯误差	0.0003	4	0.0001		
总误差	0.1924	16			

各因素交互作用对桑黄多糖得率的影响如图 4 所示,响应曲面的曲率变化及等高线的形态直观反映了因素间的交互效应:当曲面越陡峭、等高线就越趋近椭圆形,这意味着交互效应越显著^[26]。分析显示, BC 的交互效应显著, AB 交互效应次之, AC 的交互效应则是最弱的,与方差分析结论一致。

2.2.2 最佳提取工艺的验证试验 响应面预测的最优工艺条件为提取温度 84.83 °C、提取时间 2.01 h、料液比 1 g : 20.18 mL,预测多糖得率为 0.68%。结合生产实际,调整提取温度 85 °C、提取时间 2 h、料液比 1 g : 20 mL,实际提取得率达 0.71%,与模型预测值的结果高度吻合。

2.3 桑黄多糖的总糖含量

葡萄糖标准曲线如图 5 所示。由图 5 可知,标准葡萄糖线性回归方程为 $y = 11.9980x - 0.0244$,

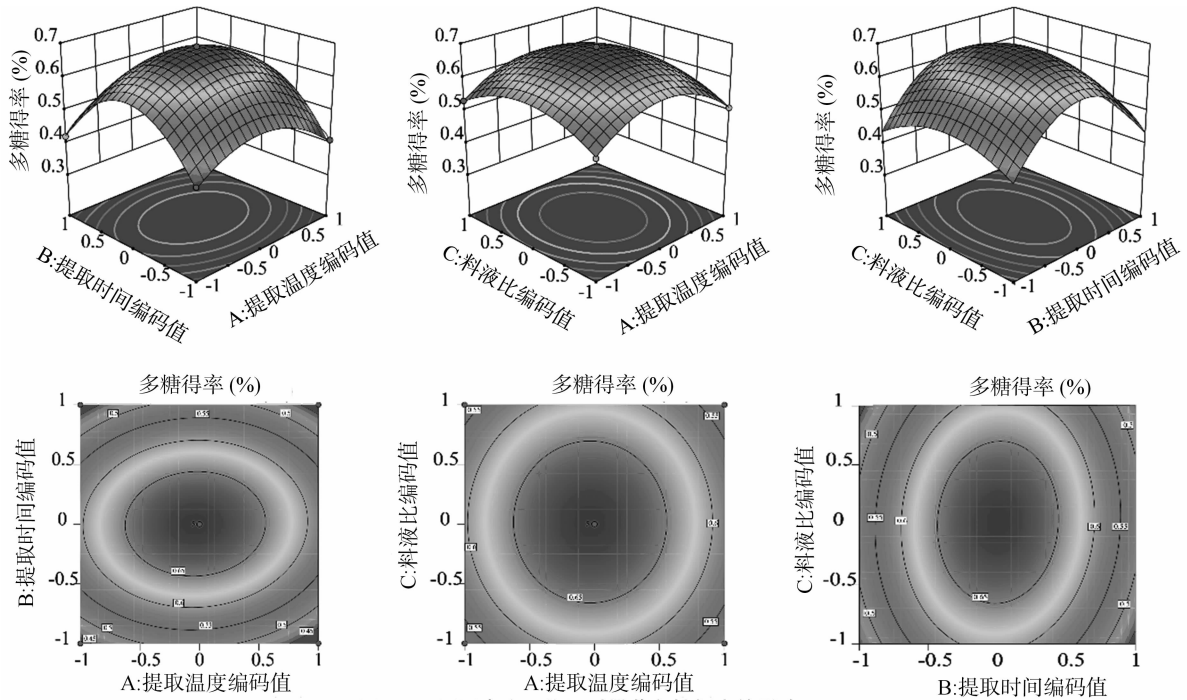


图4 不同因素交互作用对桑黄多糖得率的影响

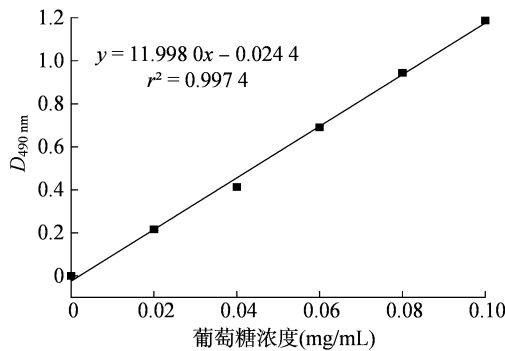


图5 葡萄糖标准曲线

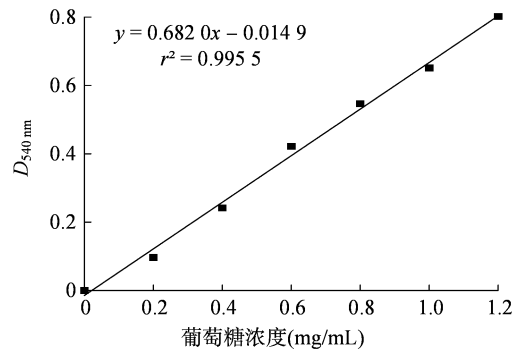


图6 还原糖标准曲线

$r^2 = 0.997 4$,线性关系良好。根据回归方程计算得到桑黄多糖样品总糖含量为 44.76%。

2.4 桑黄多糖的还原糖含量

还原糖标准曲线如图 6 所示。还原糖标准线性回归方程为 $y = 0.682 0x - 0.014 9$, $r^2 = 0.995 5$,线性关系良好。根据回归方程计算得到桑黄多糖样品还原糖含量为 13.30%。

2.5 桑黄多糖抗氧化活性分析

2.5.1 桑黄多糖对 ABTS⁺ 自由基的清除作用

ABTS⁺法是通过过硫酸钾氧化 ABTS 生成蓝绿色自由基 ABTS⁺,在抗氧化剂存在下该自由基被还原,通过测定 734 nm 波长处的吸光度变化来评估抗氧化能力^[27]。ABTS⁺法是一种广泛采用的间接检测方法,常用于测定植物或中草药抽提液的抗氧化能力^[28]。图 7 中展示了桑黄多糖对 ABTS⁺ 自由基清除率随多

糖浓度变化的趋势,并与维生素 C 的清除效果进行了对比。桑黄多糖对 ABTS⁺ 自由基的清除效能随其浓度升高而显著增强,二者呈现显著正相关性。在多糖浓度从 1 mg/mL 增加到 4 mg/mL 时,清除率急剧上升至 84.71%。随着多糖浓度不断增加,清除率趋于稳定,当浓度达到 10 mg/mL 时清除能力达到峰值,达到 93.29%。与之相比,维生素 C 在其浓度范围内对 ABTS⁺ 自由基的清除能力均维持在 95% 左右,显示出其较强的清除效果。总体而言,桑黄粗多糖对 ABTS⁺ 自由基的清除率随多糖浓度的增加而提升,并在高浓度下表现出接近维生素 C 的清除效果,有较好的清除 ABTS⁺ 自由基的作用。

2.5.2 桑黄多糖对羟自由基的清除作用

羟自由基作为机体代谢过程生成的高活性氧组分,具有一定的细胞毒性。该自由基可介导生物大分子的氧

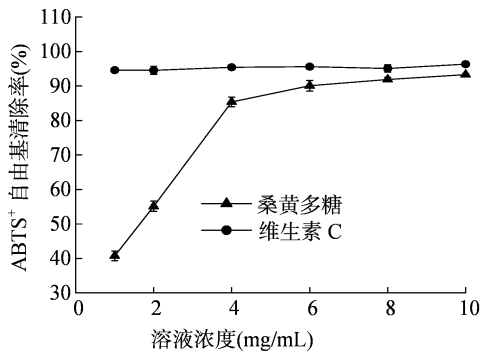


图7 桑黄多糖的 ABTS⁺ 自由基清除能力

化损伤过程,进而导致细胞坏死等一系列反应^[29]。因此,评估样本清除羟自由基的能力是衡量其抗氧化活性的关键指标。图 8 展示了桑黄多糖和维生素 C 在不同浓度下对羟自由基清除率的影响。羟自由基清除率随多糖浓度升高显著提高,表明浓度与清除率之间存在正相关关系。在浓度为 0 ~ 2 mg/mL 的初始阶段,桑黄多糖的清除率相对较低,从 9.16% 缓慢增长至约 17.60%。随着浓度达到 4 mg/mL,桑黄多糖的清除率显著上升,达到 41.70%。当浓度不断升高,桑黄多糖的羟自由基清除能力也随之不断升高,在浓度为 10 mg/mL 时达到最大,为 69.71%。尽管在整个浓度范围内,桑黄多糖的清除率总体低于维生素 C 的清除率,但在高浓度下仍表现出显著的清除能力,表明其在高浓度下具有较强的羟自由基清除能力。

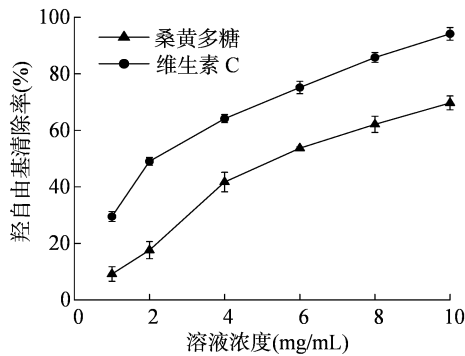


图8 桑黄多糖的羟自由基清除能力

2.5.3 桑黄多糖铁离子 (FRAP) 总还原力测定

在铁离子还原能力测定中,样品所含的抗氧化组分将 Fe³⁺ - 三吡啶三吡嗪 (Fe³⁺ - TPTZ) 转化为在 590 nm 波长处具有吸光特性的蓝色 Fe³⁺ - TPTZ 络合物^[30]。测定样品吸光度,样品的还原能力与其吸光度成正比。由图 9 可见,当多糖浓度从 0 mg/mL 逐渐增加至 10 mg/mL 时,桑黄多糖的铁离子还原力呈现为一种缓慢而稳定的上升趋势,在浓度为

10 mg/mL 时,还原力达到 6.20 mmol/L。相比之下,维生素 C 的铁离子还原力在相同浓度范围内表现出更为显著的变化。在浓度为 1 mg/mL 时,维生素 C 的还原力为 3.22 mmol/L,随着浓度的增加,还原力迅速上升,在浓度为 2 mg/mL 时,还原力达到 9.85 mmol/L,此后还原力增加趋于平缓,稳定在 12 mmol/L 左右。综合来看,桑黄多糖的铁离子还原力随着多糖浓度的增加呈现出一种缓慢而稳定的上升趋势,而维生素 C 的还原力则表现出更为显著的变化。

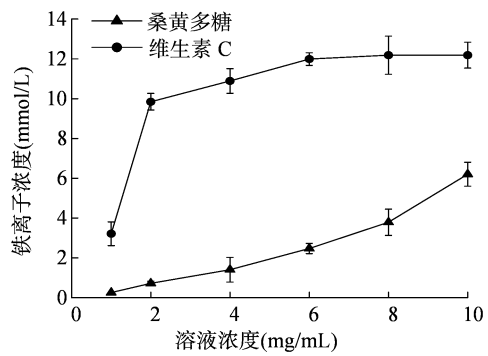


图9 桑黄多糖总还原能力检测

3 结论

本研究通过单因素试验结合响应面分析法优化了海南野生桑黄多糖的热水浸提工艺,确定最优条件为提取温度 85 ℃、提取时间 2 h、料液比 1 g : 20 mL,多糖得率达 0.71%。对提取所得多糖的初步理化分析表明,其总糖含量为 44.76%,还原糖含量为 13.30%,表明以高分子量多糖为主,伴有少量糖苷链降解。体外抗氧化试验证实,桑黄多糖具有显著的自由基清除能力。ABTS⁺ 清除率随浓度增加呈线性增强趋势,在 10 mg/mL 时达 93.29%,接近阳性对照 (维生素 C) 的效果。羟自由基清除率也随浓度增加,最高达 69.71%。此外,多糖的铁离子还原能力 (FRAP) 在 10 mg/mL 时达 6.20 mmol/L,充分展现了海南野生桑黄多糖作为天然抗氧化剂的巨大潜力。本研究系统优化了海南野生桑黄多糖的提取工艺,初步揭示其作为天然抗氧化剂的潜力,为其资源化利用提供了技术依据。然而,本研究仍存在一定的局限性,首先研究对桑黄多糖的基本理化性质进行了分析,但未深入探讨多糖结构特征,后续可对其分子量、单糖组成、糖苷键类型进行鉴定分析,从而系统揭示其结构特征;其次,本研究仅评估了桑黄多糖的体外抗氧化

能力,未来可通过细胞模型和体内动物试验验证其潜在的抗肿瘤、降血糖、免疫调节等活性,为海南野生桑黄在功能性食品和药物开发等领域提供重要的科学数据支撑。

参考文献:

- [1] 于艳杰,王芳芳,马红红,等. 桑黄生物活性成分及药理作用研究进展[J]. 特种经济动植物,2022,25(10):94-99.
- [2] Bai X X, Feng Z A, Peng S, et al. Chitosan - modified *Phellinus igniarius* polysaccharide PLGA nanoparticles ameliorated inflammatory bowel disease[J]. Biomaterials Advances,2022,139:213002.
- [3] 万茜淋,吴新民,杨雪,等. 桑黄孔菌属的化学成分及药理作用研究进展[J]. 菌物研究,2022,20(1):65-71.
- [4] 荣丹,唐梦瑜,么越,等. 桑黄活性物质提取分离及药理作用研究进展[J]. 中国食用菌,2022,41(6):1-6.
- [5] 张洋洋,吕国英,方立林,等. 桑黄主要活性物质的提取方法及药理活性研究进展[J]. 食用菌,2021,29(5):404-408.
- [6] Wang Y Q, Mao J B, Zhou M Q, et al. Polysaccharide from *Phellinus igniarius* activates TLR4 - mediated signaling pathways in macrophages and shows immune adjuvant activity in mice [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 157 - 166.
- [7] Yu K, Tan Z, Xin Y. Systematic evaluation of the anti - tumor effect of *Phellinus linteus* polysaccharide in thyroid carcinoma *in vitro* [J]. Molecular Biology Reports, 2022, 49(4): 2785 - 2793.
- [8] Yan J K, Wang Y Y, Ma H L, et al. Ultrasonic effects on the degradation kinetics, preliminary characterization and antioxidant activities of polysaccharides from *Phellinus linteus* mycelia [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 29: 251 - 257.
- [9] Luo L J, Wang Y X, Zhang S, et al. Preparation and characterization of selenium - rich polysaccharide from *Phellinus igniarius* and its effects on wound healing [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 264: 117982.
- [10] Cheng L Z, Wang Y F, He X X, et al. Preparation, structural characterization and bioactivities of Se - containing polysaccharide: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 82 - 92.
- [11] 于秋菊. 桑黄多糖提取、分离、结构解析及药理作用研究进展[J]. 山东化工, 2022, 51(13): 68 - 69, 72.
- [12] 周慧吉, 马海乐, 郭丹钊, 等. 不同提取方法对桑黄胞内多糖理化性质的影响[J]. 食用菌学报, 2015, 22(1): 47 - 50.
- [13] 许谦. 桑黄菌丝多糖的提取及多糖成分分析[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(18): 4405 - 4407, 4410.
- [14] 袁海华, 吴田, 敖新宇. 诺丽果多糖的提取工艺优化及组成分析[J]. 中药材, 2020, 43(6): 1441 - 1444.
- [15] Zheng S Z, Zhang W R, Liu S R. Optimization of ultrasonic - assisted extraction of polysaccharides and triterpenoids from the medicinal mushroom *Ganoderma lucidum* and evaluation of their *in vitro* antioxidant capacities [J]. PLoS One, 2020, 15(12): e0244749.
- [16] Wang Z B, Pei J J, Ma H L, et al. Effect of extraction media on preliminary characterizations and antioxidant activities of *Phellinus linteus* polysaccharides [J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 109: 49 - 55.
- [17] Shin M R, Lee J H, Lee J A, et al. Immunomodulatory and anti - inflammatory effects of *Phellinus linteus* mycelium [J]. BMC Complementary Medicine and Therapies, 2021, 21(1): 269.
- [18] DuBois M, Gilles K A, Hamilton J K, et al. Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Analytical Chemistry, 1956, 28(3): 350 - 356.
- [19] Miller G L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar [J]. Analytical Chemistry, 1959, 31(3): 426 - 428.
- [20] 李瑞雪, 王钰婷, 夏家凤, 等. 桑叶总黄酮提取工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. 北方蚕业, 2017, 38(4): 4 - 11.
- [21] Tang Q L, Huang G L, Zhao F Y, et al. The antioxidant activities of six (1 \rightarrow 3) - β - d - glucan derivatives prepared from yeast cell wall [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 98: 216 - 221.
- [22] 刘养山, 张景, 任洪飞, 等. 冠县灵芝多糖的分离纯化、结构表征及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 81 - 89.
- [23] 赵欣蕾, 刘宁, 夏其乐, 等. 酶解超声波联合提取桑椹多糖及其抗氧化能力和降血糖活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 292 - 301.
- [24] 宋婉钰, 戴静, 冯进, 等. 白首乌甾萜复合酶法提取工艺优化及保肝活性分析[J]. 食品与机械, 2023, 39(7): 172 - 179, 201.
- [25] 柴美灵, 李娜, 乔宏萍, 等. Box - Behnken 法优化甘草多糖提取工艺及其体外抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(23): 192 - 200.
- [26] Wang Z M, Wu S S, Wang J Y, et al. Optimization of polysaccharide extraction from *Polygonatum cyrtoneuma* Hua by freeze - thaw method using response surface methodology [J]. Molecules, 2024, 29(20): 4879.
- [27] Fakhfakh J, Athmouni K, Mallek - Fakhfakh H, et al. Polysaccharide from *Lycium arabicum*: structural features, *in vitro* antioxidant activities and protective effect against oxidative damage in human erythrocytes [J]. Chemistry & Biodiversity, 2020, 17(12): e2000614.
- [28] Kut K, Stefaniuk I, Bartosz G, et al. Formation of a purple product upon the reaction of ABTS radicals with proteins [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(10): 8912.
- [29] Fan Y P, Zhang Y H, Shi K Y, et al. Identification of a group of bisbenzylisoquinoline (BBIQ) compounds as ferroptosis inhibitors [J]. Cell Death & Disease, 2022, 13(11): 1000.
- [30] Guerreiro B M, Silva J C, Lima J C, et al. Antioxidant potential of the bio - based fucose - rich polysaccharide FucoPol supports its use in oxidative stress - inducing systems [J]. Polymers, 2021, 13(18): 3020.