

响应面法对薰衣草内生真菌胞外多糖的最佳提取工艺及体外抗氧化活性研究

宋雪红, 智晓哲, 玛依拉·吐尔地别克, 秦瑞坪, 范学海, 张雪梅, 赛德艾合买提·吾拉木^{*}
伊犁师范大学, 新疆 伊宁 835000
DOI:10.61369/MRP.2025110041

摘 要 : 为优化薰衣草内生真菌胞外多糖的提取条件, 同时指明其是否具有抗氧化活性, 本研究以薰衣草内生真菌菌株为试验材料, 利用单因素和响应面法确定提取薰衣草内生真菌胞外多糖的最佳工艺条件, 并对其抗氧化活性进行测定。结果表明: 提取薰衣草内生真菌胞外多糖的最佳工艺条件: 醇沉时间 18.03 h、乙醇浓度 95.33%、pH5.95; 薰衣草内生真菌胞外多糖对 DPPH 自由基、ABTS 自由基和羟基自由基均有清除效能, 对 DPPH 自由基清除率最高为 68.4%, 对 ABTS 最高清除率为 81.8%, 对羟基自由基最高清除率为 38.6%。

关 键 词 : 薰衣草; 内生真菌; 胞外多糖; 响应面法; 抗氧化活性

Study on Optimization of Extraction Process of Extracellular Polysaccharides from Lavender Endophytic Fungi by Response Surface Methodology and Its Antioxidant Activity

Song Xuehong, Zhi Xiaozhe, Maira · Tuerdibieke, Qin Ruiping, Fan Xuehai, Zhang Xuemei, Said Aihamiti · Wulamu^{*}
Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000

Abstract : In order to optimize the extraction conditions of exopoly took enps from endophytic fungi of lavender and indicate whether it has antioxidant activity, this studydophytic fungi strains of lavender as experimental materials, and used single factor and response surface methods to determine the optimal extraction conditions of exopolyps from endophytic fungi of lavender, and measured its antioxidant activity. The results showed that the optimal extraction conditions were as follows: alcohol precipitation time 18.03 h, ethanol concentration 95.33%, ph5.95, and exopolysaccharides of endophytic fungi of lavender had scavenging effects on DPPH free radicals, ABTS free radicals and hydroxyl free radicals,the highest scavenging rate for DPPH free radicals was 68.4%, for ABTS was 81.8%, and for hydroxyl radicals was 38.6%.

Keywords : lavender; endophytic fungi; exopoly saccharide; response surface method; antioxidant activity

薰衣草 (*Lavandula angustifolia* Mill) 是一种具有独特香味的草本植物, 不仅具有观赏价值, 还广泛应用于食品、保健品、护肤品和医药等领域^[1], 其根部分布着内生真菌 (Endophytic fungi)^[2], 内生真菌是指一段或全部生命周期存在于植物组织、器官内, 而不使其表现明显病症的一类微生物^[3,4]。研究表明, 内生真菌会产生胞外多糖^[5], 多糖的作用多种多样, You 等^[6-8]的研究结果表明, 香菇多糖具有抗癌、抗肿瘤、调节免疫力、治疗糖尿病等作用; 陶爱恩等^[9]研究三七多糖结构及功能发现, 三七多糖具有抗氧化、抗衰老、促进骨生长等作用; 刘学贵等^[10]对紫花苜蓿根部多糖的结构表征及其体外活性进行研究发现, 苜蓿根多糖 (DAPS-1) 具有抗氧化活性.; 药理学研究表明, 薰衣草的提取物也具有抗氧化、抗炎和抑制中枢神经系统等功能^[11], 其抗氧化作用可以通过捕获和中和自由

课题信息:

2021年度伊犁师范大学微生物资源保护与开发重点实验室开放课题, 项目名称: 薰衣草内生菌多糖的分离纯化以及抗氧化活性研究, 项目编号: YLUKLM202101。

作者简介:

宋雪红 (2001.07—), 女, 土家族, 贵州铜仁人, 本科学历, 伊犁师范大学, 生命科学与技术学院, 2024级硕士研究生;

智晓哲 (2003.03—), 男, 汉族, 山东菏泽人, 本科学历, 伊犁师范大学, 生命科学与技术学院, 学生;

玛依拉·吐尔地别克 (1990.07—), 女, 哈萨克族, 新疆伊宁人, 硕士学历, 伊犁师范大学, 生命科学与技术学院, 专任讲师, 植物内生菌分离鉴定及其活性成分研究的教学和科研工作。课题: 主持校级课题结题3项;

秦瑞坪 (1990.08—), 女, 汉族, 甘肃武威人, 硕士学历, 伊犁师范大学, 生命科学与技术学院, 专任讲师, 主要从事分子细胞生物学的教学和科研工作。课题: 主持校级课题结题4项;

范学海 (1989.01—), 男, 汉族, 安徽铜陵人, 硕士学历, 伊犁师范大学, 生命科学与技术学院, 专任讲师, 主要从事多肽药物合成与分析的教学和科研工作;

张雪梅 (1984.08—), 女, 汉族, 新疆伊宁人, 硕士学历, 伊犁师范大学, 生命科学与技术学院, 专任讲师, 主要从事食品科学的教学和科研工作。课题: 主持校级课题结题2项;

赛德艾合买提·吾拉木, 男, 维吾尔族, 新疆伊宁人, 博士学历, 东北师范大学, 伊犁师范大学生物科学与技术学院就职, 高级实验师 (副高), 硕士生导师, 主要从事糖类结构与功能研究, 课题: 主持和解题自治区级, 洲级和校级项目4相, 参与国自然项目一项。

基, 实现阻止或减缓氧化过程对人体造成伤害^[12-14], 有望成为一种天然抗氧化剂^[15]。

目前, 关于薰衣草的研究主要集中在薰衣草的生态特性^[16-18]、化学成分^[19,20]及其药理作用^[21,22]等方面, 而对薰衣草内生真菌胞外多糖提取工艺条件的优化及抗氧化活性研究更是鲜有报道。基于此, 本实验以伊犁哈萨克自治州薰衣草种植基地的薰衣草内生真菌菌株为研究对象, 通过设置不同的醇沉时间、乙醇浓度和 pH, 从而确定薰衣草内生真菌胞外多糖的最佳提取条件, 同时测定了薰衣草内生真菌胞外多糖的抗氧化活性, 以期为进一步研究薰衣草内生真菌胞外多糖提供理论参考。

一、材料和方法

(一) 实验材料

1. 植物样本与试验菌株

本实验所用样本采集于新疆维吾尔自治区伊犁哈萨克自治州薰衣草种植基地, 选择其中长势优良的薰衣草, 装入密封袋中带回实验室, 并将其保存于 -80℃ 超低温冰箱。对薰衣草根部表面进行消毒, 用无菌刀将其切成一定大小组织块并接种到 PDA 固体培养基上进行培养, 一段时间后将菌落旁的菌丝接种到新鲜培养基上, 如此反复从而得到纯的薰衣草根部内生真菌, 该种内生真菌是具有抗菌活性的内生真菌 YDZ-8, 即哈茨木霉菌^[2]。

2. 主要试剂与培养基

无水乙醇、Vc (维生素 C)、DPPH (1,1-二苯基-2-三硝基苯肼) (2,2'-联氮-双-2-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)、ABTS、水杨酸、过氧化氢; PDA 培养基、PDB 培养基。

(二) 实验方法

1. 发酵液的制备

将接种培养薰衣草根部内生真菌的 PDA 培养基取出, 倒出锥形瓶中粘稠、絮状物质, 留下发酵液, 把发酵液倒入清洗干净的锅中, 用电磁炉加热浓缩至其原有体积的 1/3, 置于冰箱冷藏待用。

2. 多糖提取单因素试验

醇沉时间试验: 取五个干净小烧杯分别向其中加入 10 mL 浓缩液, 并添加 90 mL 无水乙醇, 使混合液中乙醇浓度达到 90%, 用 1 mol/L 的 HCl 水溶液和 1 mol/L 的 NaOH 水溶液调节各烧杯中混合液的 pH 至 6.0, 放于 4℃ 冰箱冷藏进行醇沉试验, 时间分别为 16、17、18、19 和 20 h, 然后 5000 rpm 离心 20 min。除去上清液, 取出沉淀物干燥至恒重。计算多糖产量, 并根据最高多糖产量选择最佳醇沉时间;

乙醇浓度试验: 取五个干净小烧杯分别向其中加入 10 mL 浓缩液, 并添加无水乙醇, 使混合液中乙醇浓度最终分别达到 80%、85%、90%、95% 和 100%, 利用 1 mol/L 的 HCl 水溶液和 1 mol/L 的 NaOH 水溶液调节各烧杯中混合液的 pH 至 6.0。乙醇醇沉时间为上述试验的最佳时间, 然后 5000 rpm 离心 20 min。除去上清液, 取出沉淀物干燥至恒重。计算多糖产量, 选取多糖产量最高的乙醇浓度作为最佳浓度;

pH 试验: 取五个干净小烧杯分别向其中加入 10 mL 浓缩液, 用 1 mol/L HCl 水溶液和 1 mol/L NaOH 水溶液调节浓缩溶液的 pH

值分别至 4、5、6、7 和 8, 醇沉时间和乙醇浓度为上述试验的最佳时间和浓度。其他步骤与乙醇浓度试验相同。选取多糖产量最高的 pH 为最佳 pH^[23]。以上三组试验均重复测试 3 次。

多糖产量计算公式: 多糖产量 = m/v (m: 多糖质量、v: 浓缩液体积)

3. 响应面法优化试验

基于单因素实验, 我们使用 Box-Behnken 中心组合的试验设计原理, 使用 3 因素 3 水平响应面分析方法, 通过分析醇沉时间 (A)、乙醇浓度 (B) 和 pH (C) 三个因素并以薰衣草胞外多糖产量 (Y) 作响应值, 确定提取薰衣草胞外多糖提取的最佳工艺 (表 1)。

表 1 三因素三水平试验设计表

水平 Level	醇沉时间 A (h)	乙醇浓度 B (%)	pH C
-1	17	90	5
0	18	95	6
1	19	100	7

4. 抗氧化能力的测定

薰衣草多糖对 DPPH 自由基清除能力的测定: 分别取质量浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的多糖溶液 2.0 mL, 与 2 mL 的 0.01 mmol/L 的 DPPH-乙醇溶液混合, 室温避光反应 30 min, 然后在 517 nm 处测量吸光度值^[24-26]。

薰衣草多糖对 ABTS 自由基清除能力的测定: 分别取多糖质量浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的多糖溶液 1.0 mL, 与 3 mL 的 ABTS 溶液混合, 室温反应 10 min, 在 730 nm 处测量吸光度值^[27-29]。

薰衣草多糖对羟基自由基清除能力的测定: 分别取多糖质量浓度为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL 的多糖溶液 1.4 mL, 与 1.2 mL 水杨酸-乙醇和 1 mL 过氧化氢混合, 温室反应 15 min, 然后在 510 nm 处测量吸光度值。以上每个试验重复三次, 使用 Vc 作为阳性对照。

二、结果与分析

(一) 单因素试验结果

1. 醇沉时间对薰衣草胞外多糖产量的影响

由图 1 可知, 伴随着醇沉时间的增加, 薰衣草内生真菌胞外多糖的产量是先增加后减少, 醇沉时间为 18 h 时产量最高, 为 0.0934 g/mL。

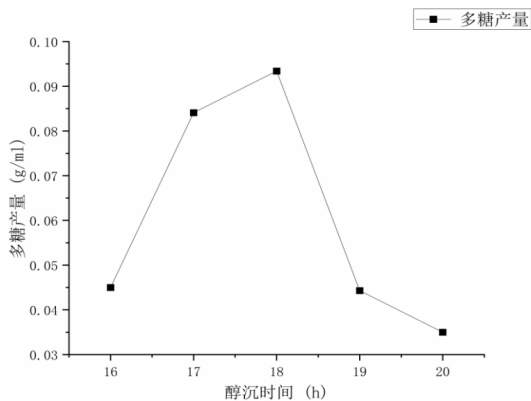


图1 醇沉时间对胞外多糖产量的影响

Figure.1 Influence of alcohol precipitation time on exopolysaccharide yield

2.乙醇浓度对薰衣草胞外多糖产量的影响

由图2可知，伴随着乙醇浓度的增大，薰衣草胞外多糖的产量趋于先增加后减少，并在乙醇浓度为95%时，胞外多糖产量达到最大值，为0.0587 g/mL。

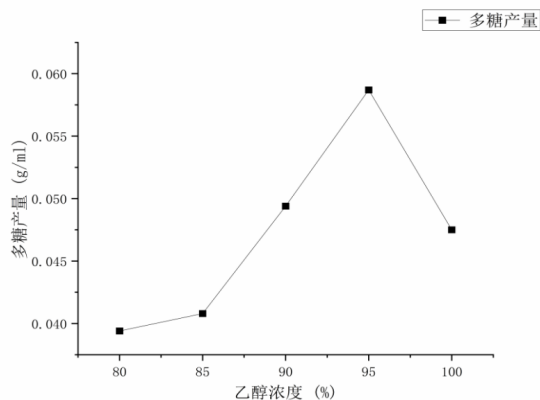


图2乙醇浓度对胞外多糖产量的影响

Figure .2 Effect of ethanol concentration on exopolysaccharide yield.

3.pH对薰衣草胞外多糖产量的影响

图3显示，薰衣草胞外多糖的产量随 pH 值的增加呈现出先增大后减小的趋势。当 pH 值为6.0时，薰衣草胞外多糖的产量最大，为0.0457 g/mL。

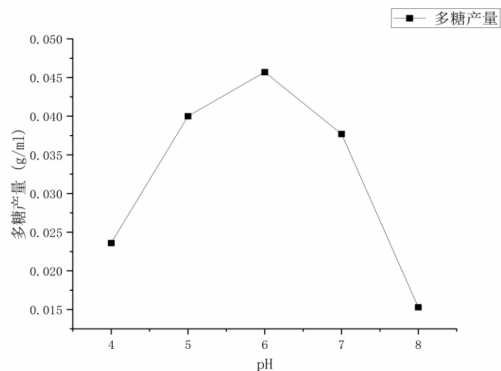


图3 PH对胞外多糖产量的影响

Figure. 3 Effect of PH on exopolysaccharide yield

(二) 回归模型建立及方差分析

本实验使用 Design-Expert 软件以三因素三水平为响应面分析方法，深度分析了三种单因素两两之间的相互作用对于薰衣草内生真菌胞外多糖的产量影响。每次试验进行三次重复，计算平均值以确保数据准确性（表2）。利用响应面软件分析表2中17组试验的薰衣草内生真菌胞外多糖产量，得到回归分析统计表（表3）。表3结果表明，乙醇浓度对薰衣草内生真菌胞外多糖产量影响显著（ $P < 0.05$ ）。模型 P 值小于 0.05，可信度水平大于 95.0%。由 F 值可知三种因素对薰衣草胞外多糖产量的影响能力依次为：乙醇浓度 > 醇沉时间 > pH。

表2设计和实验结果

Std	Run	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Response 1
		A:醇沉时间 h	B:乙醇浓度 %	C:pH	多糖产量 g/ml
1	2	17	90	6	0.0299
2	19	19	90	6	0.03
3	1	17	100	6	0.031
4	10	19	100	6	0.0337
5	14	17	95	5	0.0296
6	18	19	95	5	0.0328
7	12	17	95	7	0.032
8	6	19	95	7	0.0294
9	13	18	90	5	0.0319
10	8	18	100	5	0.0365
11	15	18	90	7	0.0335
12	17	18	100	7	0.0313
13	9	18	95	6	0.0469
14	4	18	95	6	0.0479
15	5	18	95	6	0.0489
16	7	18	95	6	0.0492
17	11	18	95	6	0.05

表3 回归分析结果

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value
Model	10.40	9	1.16	101.60	<0.0001
A- 醇沉时间	0.0145	1	0.0145	1.27	0.2967
B- 乙醇浓度	0.0648	1	0.0648	5.70	0.0483
C-pH	0.0265	1	0.0265	2.33	0.1710
AB	0.0169	1	0.0169	1.49	0.2622
AC	0.0841	1	0.0841	7.40	0.0298
BC	0.1156	1	0.1156	10.17	0.0153
A ²	4.12	1	4.12	362.26	<0.0001
B ²	2.39	1	2.39	210.56	<0.0001
C ²	2.52	1	2.52	221.88	<0.0001
Residual	0.0792	7	0.0114		
Lack of Fit	0.0217	3	0.0072	0.4999	0.7023
Pure Error	0.0579	4	0.0145		
Cor Total	10.48	16			
R ² =0.9924 Adjusted R ² =0.9826 Predicted R ² =0.9582					

(三) 响应面结果分析

由图4、图5、图6可以分别得到醇沉时间、乙醇浓度和 pH 三

种单因素对薰衣草内生真菌胞外多糖产量的影响能力。每个响应面表示两个不同的单因素之间的交互作用。

由图4可知,当醇沉时间一定时,伴随着乙醇浓度的加大,薰衣草内生真菌胞外多糖的产量先不断地增加,达到最大值后迅速减少。同时,薰衣草胞外多糖的产量在乙醇浓度一定时,将随醇沉时间的增加而逐渐增大,但随后开始下降。

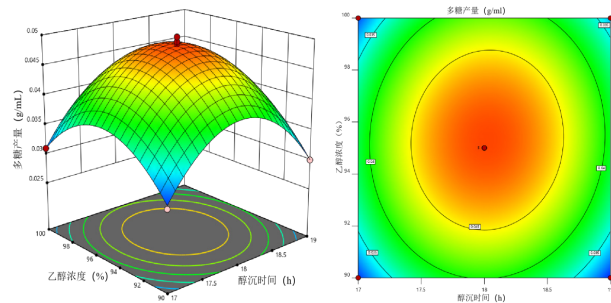


图4 醇沉时间和乙醇浓度对多糖得率影响的响应面图

Figure 4 Response surface graph of the effects of alcohol precipitation time and ethanol concentration on polysaccharide yield

图5结果表明,薰衣草内生真菌胞外多糖的产量在一定 pH 条件下,随醇沉时间的增加先呈上升趋势,达到最大值后开始下降。当醇沉时间一定时,薰衣草胞外多糖的产量会随着 pH 的增加而逐渐上升,但到达一定值后,逐渐开始下降。

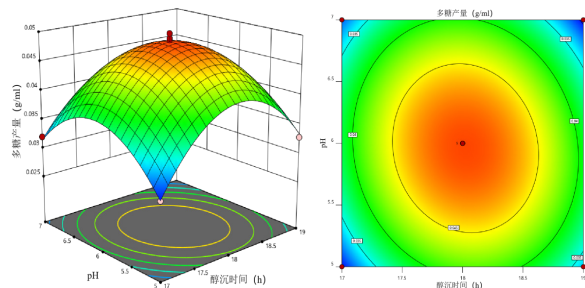


图5 醇沉时间和 pH 对多糖得率影响的响应面图

Figure 5 Response surface graph of the effects of alcohol precipitation time and pH on polysaccharide yield

图6表明,一定的乙醇浓度条件下,薰衣草内生真菌胞外多糖的产量伴随着 pH 值的增大而逐渐增加,然后在达到最高点后快速降低。同时,薰衣草胞外多糖的产量在一定 pH 条件下随乙醇浓度的增大先增加,然后缓慢减少。

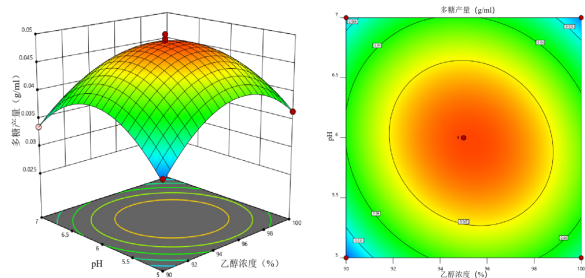


图6 乙醇浓度和 pH 对多糖得率影响的响应面图

Figure 6 Response surface graph of the effects of ethanol concentration and pH on polysaccharide yield

经过 Design-Expert 软件中 Box-Behnken 的设计分析,得

到提取薰衣草内生真菌胞外多糖的最佳条件:醇沉时间为 18.03 h,乙醇浓度为 95.33%,pH 为 5.95。此时薰衣草菌株胞外多糖预测值为 0.0486g/mL。

(四) 抗氧化能力的测定

1. 薰衣草胞外多糖对 DPPH 自由基清除能力的测定

由图7可知,薰衣草胞外多糖具有 DPPH 自由基清除的能力;同时随着质量浓度增高,DPPH 自由基清除率也相应增强,表明薰衣草胞外多糖对 DPPH 自由基清除能力呈现出良好的剂量依赖性,在质量浓度为 1.0 mg/mL 时,薰衣草胞外多糖的 DPPH 清除率达到 72.8%。

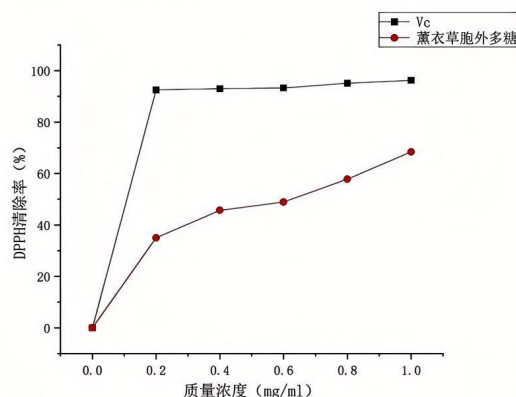


图7 Vc和薰衣草胞外多糖的 DPPH 自由基清除能力

Figure 7 DPPH radical scavenging ability of Vc and lavender extracellular polysaccharides

2. 薰衣草胞外多糖对 ABTS 自由基清除能力的测定

由图8所示,薰衣草胞外多糖具有清除 ABTS 自由基的能力;当多糖质量浓度增加时,其对 ABTS 自由基清除率也会增加,表现出一定的剂量依赖性。当浓度为 1.0 mg/mL 时,ABTS 自由基的去除率与 Vc 接近。

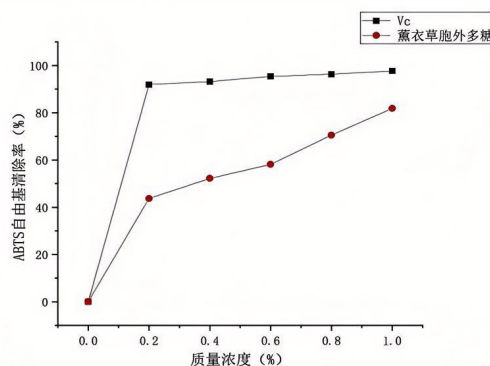


图8 Vc和薰衣草胞外多糖的 ABTS 自由基清除能力

Figure 8 ABTS radical scavenging ability of Vc and lavender extracellular polysaccharides

3. 薰衣草胞外多糖对羟基自由基清除能力的测定

由图9可知,薰衣草胞外多糖对羟基自由基具有一定的清除能力,但清除效果不明显;薰衣草胞外多糖的羟基自由基清除率和质量浓度呈线性依赖关系,在相同的浓度下,Vc 的羟基自由基清除率高于薰衣草胞外多糖,在质量浓度为 1.0 mg/mL 时,薰衣草胞外多糖的羟基自由基清除率为 42.63%。

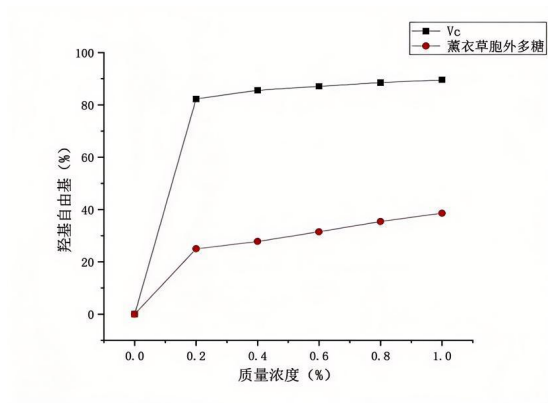


图9 Vc和薰衣草胞外多糖的羟自由基清除能力

Figure 9: Hydroxyl radical scavenging ability of Vc and lavender extracellular polysaccharides

(五) 薰衣草胞外多糖红外结构表征

取2.00 mg的薰衣草内生真菌胞外多糖研磨成粉末状并进行压片处理,用红外光谱仪进行扫描。如图10所示,薰衣草胞外多糖样品在511、596、866、1070、1260、1413、1507、1661、1877、2232、2349、2462、2906、3002、3403、3791 cm^{-1} 均有特征吸收。3791 cm^{-1} 附近的谱带是糖类O-H伸缩振动吸收峰,2906、3403 cm^{-1} 附近的吸收峰是C-H伸缩振动峰,2232 cm^{-1} 处是C≡C伸缩振动吸收峰,1661、1877 cm^{-1} 处峰是C=O是伸缩振动吸收峰,1507 cm^{-1} 处峰是C=C伸缩振动吸收峰,1413 cm^{-1} 处峰是C-H的弯曲振动吸收峰,511、596、866 cm^{-1} 处峰是C-H弯曲吸收峰。

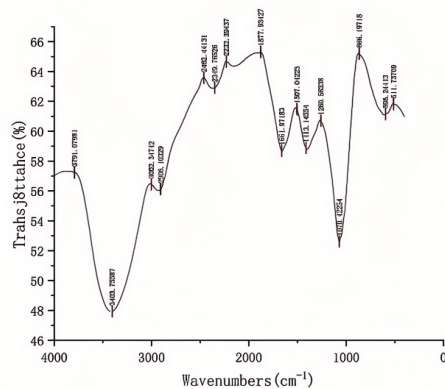


图10 薰衣草胞外多糖红外线图

Figure 10. Infrared diagram of lavender exopolyps

三、讨论

本研究发现随着醇沉时间、乙醇浓度和pH的增加,多糖提取量均呈现先上升后下降的趋势。当醇沉时间在16.00~17.78 h区域时,多糖提取量随着醇沉时间的增加而升高,这是因为适当的延长醇沉时间能够使析出的多糖充分沉淀^[30],但当醇沉时间>17.78 h,多糖提取量反而减少,这可能是醇沉时间过长破坏了多糖结构,致使部分多糖失活^[31,32],且醇沉时间过长也会引起多糖在溶液中再溶解,降低多糖得率^[30]。另外,乙醇浓度过高会破坏多糖结构,导致多糖提取量下降^[33,34],也有研究表明,这可能是由于乙醇浓度过高,挥发能力增强,溶液极性减小,小分子极性或非极性物质被竞争性的溶出所致^[35]。此外,pH过高或过低会引起多糖糖苷键的断裂,从而使多糖发生降解,导致多糖得率降低^[36]。

四、结论

通过单因素和Box-Behnken响应面试验得出醇沉时间18.03 h、乙醇浓度95.33%、pH5.95是提取薰衣草内生真菌胞外多糖的最佳条件,并且随醇沉时间、乙醇浓度和pH的增加均呈现先上升后下降的趋势。本研究还发现薰衣草内生真菌胞外多糖具有较强的抗氧化活性,可以消除DPPH、ABTS和羟基自由基,随着多糖质量浓度的增加其抗氧化活性也随之提升,对DPPH自由基清除率最高为68.4%,对ABTS最高清除率为81.8%,对羟基自由基最高清除率为38.6%。

参考文献

- [1]陈雪静,吾尔恩·阿合别尔迪,木古丽·木哈西,等.不同种植年限薰衣草根际土壤真菌群落结构的演变[J].微生物学杂志,2024,44(02):33-41.
- [2]陈天意,努兰·拜都拉,玛依拉·吐尔德别克,等.薰衣草内生真菌YDZ-8抗菌活性及菌种鉴定[J].吉首大学学报(自然科学版),2023,44(02):47-51.DOI:10.13438/j.cnki.jdzk.2023.02.007.
- [3]Talea S, Siddiqui B S, Majid A K, et al. Bioactive natural products from endophytic fungus *Aspergillus nidulans* associated with *Nyctanthes arbor-tristis* Linn[J]. Records of Natural Products, 2021, 15(6): 608-612.
- [4]崔晋龙,郭顺星,肖培根.内生菌与植物的互作关系及对药用植物的影响[J].药学报,2017,52(2):214-221.
- [5]刘雯雯,刘晓凤,沈爱军,等.冬季油樟产黄酮内生真菌的分离鉴定及其抗氧化和挥发性成分分析[J].中国抗生素杂志,2024,49(06):650-661.DOI:10.13461/j.cnki.cja.007701.

- [6] You J, Wu Q, Li Y, et al. Lentinan induces apoptosis of mouse hepatocellular carcinoma cells through the EGR1/PTEN/AKT signaling axis[J]. *Oncology Reports*, 2023, 50(1): 1–12.
- [7] Liang J, Zhang M, Li X, et al. Structure and immunomodulatory activity of Lentinus edodes polysaccharides modified by probiotic fermentation[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2024, 13(1): 421–433.
- [8] Wu T, Cai Z, Niu F, et al. Lentinan confers protection against type 1 diabetes by inducing regulatory T cell in spontaneous non-obese diabetic mice[J]. *Nutrition & Diabetes*, 2023, 13(1): 4.
- [9] 陶爱恩, 方霄, 张玲声, 等. 三七多糖结构及功能应用研究进展 [J]. *中国食品添加剂*, 2024, 35(09): 243–256. DOI: 10.19804/j.issn1006-2513.2024.9.030.
- [10] 刘学贵, 刘娟, 许佳宁, 等. 紫花苜蓿根部多糖的结构表征及其体外活性研究 [J]. *当代化工*, 2023, 52(03): 527–532. DOI: 10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2023.03.010.
- [11] CLAUDIO C, FRANCESCA F, FABIO D, et al. Chemical profile, in vitro biological activity and comparison of essential oils from fresh and dried flowers of *Lavandula angustifolia* L[J]. *Molecules*, 2021, 26(17): 5317–5328.
- [12] 肖帆, 熊海燕. 常见抗氧化剂的应用研究及其安全性评估 [J]. *现代食品*, 2024, 30(06): 130–134. DOI: 10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2024.6.043.
- [13] 董滢, 周庆安, 任建存等. 抗氧化剂在动物生产中的应用 [J]. *现代畜牧科技*, 2024, (01): 77–80. DOI: 10.19369/j.cnki.2095-9737.2024.01.022
- [14] 史文灏, 张立新, 高品一, 等. 植物抗氧化活性成分研究进展 [J]. *广州化工*, 2024, 52(10): 7–10.
- [15] 赵居芳. 污泥-薰衣草生物炭及绿色合成材料对亚甲基蓝吸附性能研究 [D]. 伊犁师范大学, 2022. DOI: 10.27808/d.cnki.gylsf.2022.000107.
- [16] 张玉婷, 卜培娇, 陈佳毅, 等. 高温胁迫下薰衣草形态生理指标变化及应对措施研究的进展分析 [J]. *林业科技情报*, 2021, 53(01): 1–3.
- [17] 郝映星. 干旱胁迫对法国薰衣草种子萌发及幼芽生长的影响 [J]. *山西林业科技*, 2023, 52(S1): 5–7. DOI: 10.19989/j.cnki.1007-726X.2023S102.
- [18] 唐式敏, 冉昇, 朱玲, 等. 不同品种薰衣草抗寒性评价 [J]. *中国野生植物资源*, 2023, 42(07): 8–15.
- [19] 陈莘雨, 陈新梅. 薰衣草化学成分与药理作用研究进展 [J]. *中华中医药杂志*, 2022, 37(03): 1600–1604.
- [20] 陈斌, 周谦, 钱骅, 等. 伊犁杂花薰衣草叶化学成分研究 [J]. *中国野生植物资源*, 2018, 37(05): 8–9+29.
- [21] 陈萍, 刘兵, 符继红. 新疆薰衣草精油抗氧化活性成分的组效关系研究 [J]. *中国药房*, 2021, 32(12): 1460–1465.
- [22] 郭凤娇, 刘菲, 王倩, 等. 薰衣草精油与透明质酸钠联合使用护肤作用研究 [J]. *日用化学品科学*, 2024, 47(07): 15–22.
- [23] 乔艳明, 陈文强, 解修超, 等. 响应面法优化香菇胞外多糖提取工艺 [J]. *食用菌学报*, 2015, 22(03): 69–73. DOI: 10.16488/j.cnki.1005-9873.2015.03.015.
- [24] 马莉, 季爱兵, 曾胤, 等. 蘑菇多糖生物活性及提取研究进展 [J/OL]. *热带农业科学*, 1–8[2024-08-27]. <http://cnki.xntsg.top/kcms/detail/46.1038.S.20240826.1831.012.html>.
- [25] 赫丁轩, 吕雪艳, 熊柏惠, 等. 猫爪草固态发酵工艺优化及抗氧化活性研究 [J]. *中国酿造*, 2024, 43(08): 262–268.
- [26] Zhang J, Wang C, Li Q, et al. Polysaccharides from *Radix Peucedani*: Extraction, Structural Characterization and Antioxidant Activity[J]. *Molecules*, 2023, 28(23): 1–12.
- [27] Dandan G, Hong C, Haixing L, et al. Extraction, structural characterization, and antioxidant activity of polysaccharides derived from *Arctium lappa* L.[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10:1149137–1149137.
- [28] JiZe P X, Fu P Y, Li Y C, et al. Extraction, characterization and intestinal anti-inflammatory and anti-oxidative activities of polysaccharide from stems and leaves of *Chuanminshen violaceum* M. L. Sheh & R. H. Shan.[J]. *Journal of ethnopharmacology*, 2024, 332:118357–118357.
- [29] Tian J, Zhang Z, Shang Y, et al. Extraction, structure and antioxidant activity of the polysaccharides from morels (*Morchella* spp.): A review.[J]. *International journal of biological macromolecules*, 2024, 264(Pt 2): 130656–130656.
- [30] 许瀛引. 紫花脸蘑液体发酵和多糖纯化、结构解析及生物活性的研究 [D]. 中国农业大学, 2017. DOI: 10.27628/d.cnki.gzndu.2017.000003.
- [31] 谢苗. 灵芝多糖的提取分离、结构表征及抗氧化活性研究 [D]. 聊城大学, 2021. DOI: 10.27214/d.cnki.glcsu.2021.000290.
- [32] 李顺峰, 刘丽娜, 王安建, 等. 分级醇沉香菇柄多糖及其抗氧化活性研究 [J]. *包装与食品机械*, 2020, 38(04): 10–15.
- [33] 韩鹏飞, 马明昊, 迟乃玉, 等. 戴氏虫草多糖的提取工艺优化和抗氧化活性研究 [J]. *中国食品添加剂*, 2023, 34(04): 150–157. DOI: 10.19804/j.issn1006-2513.2023.04.018.
- [34] 张雅涵. 具鞘微鞘藻室内培养及产胞外多糖条件的优化 [D]. 兰州理工大学, 2014.
- [35] 郑清, 陈宝印, 杨磊, 等. 响应面法优化同步提取黑蒜中多酚与黄酮的工艺及抗氧化活性的测定 [J]. *中国调味品*, 2021, 46(05): 69–76.
- [36] 吴昊, 司月阳, 王珊珊, 等. 响应面法优化红菇多糖的提取工艺研究 [J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(09): 90–94.