

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2024.80975

忍冬不同器官多糖提取工艺优化 及抗氧化活性研究

张晓霞^{1,2} 李 晋^{1,2} 娄丽芳^{1,2}

(1. 郑州铁路职业技术学院, 河南 郑州 451460; 2. 河南省铁路食品安全管理工程技术研究中心, 河南 郑州 451460)

摘要: [目的] 开发忍冬药食两用资源, 提高忍冬多糖得率, 确定忍冬不同器官的抗氧化活性, 减少天然药物资源浪费。[方法] 以忍冬不同器官为原料、多糖得率为考察指标, 结合响应面法对多糖提取参数进行优化, 确定最佳工艺; 测定不同器官忍冬提取物的体外抗氧化活性并结合计量学方法进行分析。[结果] 提取忍冬多糖的最佳工艺为料液比 1:25 (g/mL), 超声温度 80 °C, 超声时间 60 min, 超声功率 190 W, 该条件下多糖得率达 7.01%。抗氧化结果显示, 忍冬不同器官均具有抗氧化作用, 其强弱为忍冬叶≈金银花>忍冬藤>银花子; 聚类分析结果显示, 忍冬叶和金银花归为一类, 可作为忍冬多糖提取的优选资源。[结论] 超声辅助法提取忍冬多糖得率高且不同器官提取物能保持高效的抗氧化能力。

关键词: 忍冬; 粗多糖; 忍冬叶; 金银花; 忍冬藤; 银花子; 抗氧化活性

Optimization of *Lonicera japonica* polysaccharide extraction process and antioxidant activity of polysaccharide extracts from different organs

ZHANG Xiaoxia^{1,2} LI Jin^{1,2} LOU Lifang^{1,2}

(1. Zhengzhou Railway Vocational & Technical College, Zhengzhou, Henan 451460, China; 2. Henan Railway Food Safety Management Engineering Technology Research Center, Zhengzhou, Henan 451460, China)

Abstract: [Objective] To develop the medicinal and food resources of *Lonicera japonica*, improve the yield of polysaccharides, determine the antioxidant activity of different organs, and reduce the waste of natural Chinese medicine resources. [Methods] Different organs of *L. japonica* are utilized as raw materials, with polysaccharide yield as the primary investigation index. The response surface method is used to determine the optimal extraction process. The *in vitro* antioxidant activity of different organs is assessed and analyzed by metrological methods. [Results] The optimal extraction conditions are as follows: solid-liquid ratio of 1:25 (g/mL), ultrasonic temperature of 80 °C, ultrasonic time of 60 min, ultrasonic power of 190 W. Under these conditions, the polysaccharide yield is as high as 7.01%. The antioxidant activity results demonstrate that different organs of *L. japonica* exhibit antioxidant effect, with the strength ranking as: leaves≈flowers>vines>fruits. Cluster analysis shows that *L. japonica* leaves and flowers are classified into one category, making them preferred resources for extracting *L. japonica* polysaccharides. [Conclusion] The ultrasound-assisted method for extracting *L. japonica* polysaccharides achieves high yield, and the extracts from different organs maintain high antioxidant capacity.

Keywords: *Lonicera japonica*; polysaccharide; *Lonicera japonica* leaf; *Lonicera japonica* flower; *Lonicera japonica* vine; *Lonicera japonica* fruit; antioxidant activity

忍冬的干燥花蕾或待初开的花、叶、茎枝和果实分别为药材被药典收录, 本草考证发现花、叶、茎枝及果实均称为金银花、忍冬叶、忍冬藤和银花子, 金银花和忍冬藤可入药^[1]。忍冬营养价值丰富, 产量高, 为药食同源产品,

基金项目: 河南省科技攻关计划项目 (编号: 222102310359); 河南省高校科研项目 (编号: 2022KY003)

通信作者: 张晓霞 (1980—), 女, 郑州铁路职业技术学院副教授, 硕士。E-mail: zhangxiaoxia@zzrvtc.edu.cn

收稿日期: 2024-09-21 改回日期: 2025-09-30

引用格式: 张晓霞, 李晋, 娄丽芳. 忍冬不同器官多糖提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(10): 150-156.

Citation: ZHANG Xiaoxia, LI Jin, LOU Lifang. Optimization of *Lonicera japonica* polysaccharide extraction process and antioxidant activity of polysaccharide extracts from different organs[J]. Food & Machinery, 2025, 41(10): 150-156.

尤其在抗菌、抗氧化方面具有独特的临床优势和可观的治疗疗效^[2]。但在现代应用中其叶、果实多被废弃,造成资源严重浪费。作为临床大宗药材,不同部位忍冬在医药食品的使用价值需深入研究开发。

忍冬多糖成分含量高、活性强,广泛应用于食品工业和医用产品等领域^[3-4]。植物多糖的常见提取方法有水提醇沉法、浸提法等^[5],但实际操作中耗时久、用量大、资源浪费。合适的提取方法会有效提高多糖得率,超声波辅助提取具有操作简单、提取率高、成本可控等优点,多应用于大规模生产^[6]。响应面优化法既能精准预测提取工艺,又可实现多变量生产验证,被广泛应用^[7]。体外抗氧化活性评价可直观便捷检测生物活性,真实准确反映出被测物的总抗氧化能力^[8-9]。现已有关于金银花多糖的相关研究,但对于资源更广的忍冬叶、藤、果实研究相对较少,且存在提取工艺不明确,得率不显著,缺乏提取物抗氧化性研究等问题。研究拟以金银花、忍冬叶、忍冬藤和银花子为材料,结合响应面法获得多糖最佳超声提取工艺;以提取出的忍冬不同部位多糖为材料进行抗氧化试验,结合计量学方法验证其生物活性和实用性,以期为非药用资源合理利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

金银花、忍冬藤及非药用部位忍冬果实(银花子)、忍冬叶:河南省道地药材忍冬种植基地;

浓硫酸、无水乙醇、苯酚:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

无水葡萄糖标准品:上海源叶生物科技有限公司;

酶标仪: SpectraMax250 型,美国 Molecular Devices Corporation 公司;

数控超声波机: KQ-500DE 型,昆山市超声仪器有限公司;

电热恒温干燥箱: DHG-9077A 型,上海精宏实验设备有限公司;

分析天平: BT25S 型,赛多利斯科技仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 多糖提取工艺流程

不同器官忍冬粉碎过筛(60 目)→混合→80℃超声提取→滤液→除蛋白→冷冻干燥(-25℃,5 Pa)→粗多糖^[10]

1.2.2 多糖标准曲线绘制 称量干燥恒重葡萄糖,蒸馏水定容得 0.1 g/mL 的葡萄糖标准溶液。精确吸取标准溶液 0, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 mL, 加入 5% 苯酚溶液 1.0 mL 和浓硫酸溶液 5.0 mL, 用蒸馏水定容至 10 mL 容量瓶, 摇匀, 40℃水浴 15 min, 室温静置冷却。在 480 nm 处重复测定取平均值, 绘制葡萄糖标准曲线 $Y=4.6174X+0.0005$, $R^2=0.9989$ 。

1.2.3 多糖得率测定 取 1.2.1 项提取物与蒸馏水配制成

0.1 g/mL 的忍冬多糖样品溶液。精密取 2.0 mL 多糖样品溶液, 加入 5% 苯酚 1.0 mL 和浓硫酸 5.0 mL, 蒸馏水定容至 10 mL 容量瓶, 摇匀, 40℃水浴 15 min, 取出室温静置冷却, 重复平行($N=3$)。在 480 nm 处测定其吸光度值并取平均值。蒸馏水做空白, 通过吸光度值计算得率。

1.2.4 单因素考察

(1) 料液比对多糖得率的影响: 称取 10.00 g 忍冬样品混合粉末, 与蒸馏水按料液比 1:15, 1:20, 1:25, 1:30, 1:35 (g/mL) 配制, 按照超声温度 80℃、超声功率 190 W、超声时间 60 min 条件下提取抽滤, 滤液按 1.2.2 项处理测定多糖得率。

(2) 超声时间对多糖得率的影响: 称取 10.00 g 忍冬样品混合粉末, 按照超声温度 80℃、超声功率 190 W、料液比 1:20 (g/mL), 分别在 20, 40, 60, 80, 100 min 下进行超声辅助提取, 抽滤, 滤液按 1.2.2 项处理测定多糖得率。

(3) 超声温度对多糖得率的影响: 称取 10.00 g 忍冬样品混合粉末, 按照超声时间 60 min、超声功率 190 W、料液比 1:20 (g/mL), 分别在 20, 40, 60, 80, 100℃下进行超声辅助提取, 抽滤, 滤液按 1.2.2 项处理测定多糖得率。

(4) 超声功率对多糖得率的影响: 称取 10.00 g 忍冬样品混合粉末, 按照超声时间 60 min、超声温度 80℃、料液比 1:20 (g/mL), 分别在 130, 150, 170, 190, 210 W 下进行超声辅助提取, 抽滤, 滤液按 1.2.2 项处理测定多糖得率。

1.2.5 响应面试验设计 根据单因素试验结果, 基于 Box-Behnken 中心组合试验设计原理设计四因素三水平试验, 以忍冬多糖得率为响应值优化提取工艺。

1.2.6 抗氧化试验

(1) DPPH 自由基清除能力: 根据文献[11]的方法制备 DPPH 标准溶液和对照品溶液。按 1.2.1 项制备不同质量浓度的不同器官忍冬溶液, 室温下与 DPPH 溶液混匀避光反应 30 min, 测吸光度值(517 nm)。按式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$Y = \left(1 - \frac{A_{\text{样}} - A_{\text{空白}}}{A_{\text{对照}}} \right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y ——DPPH 自由基清除率, %;

$A_{\text{样}}$ ——样品溶液与 DPPH 标准溶液的混合溶液吸光值;

$A_{\text{空白}}$ ——样品溶液与乙醇的混合溶液吸光值;

$A_{\text{对照}}$ ——DPPH 标准溶液与乙醇的混合溶液吸光值。

(2) ABTS 自由基清除能力: 取 7 mmol/L ABTS⁺溶液和 135 mmol/L 过硫酸钾溶液于蒸馏水定容混合至 100 mL, 室温避光静置 12 h, 得到 ABTS 自由基储备液。取适量储备液与蒸馏水制备 ABTS 自由基工作液。按 1.2.1 项方法制备不同质量浓度的不同部位忍冬溶液与自由基工作溶液置于酶标板中, 混匀反应至动态平衡, 于

734 nm 处测定其吸光度值。按式(2)计算 ABTS 自由基清除率。

$$B = \left(1 - \frac{A_{\text{样}} - A_{\text{空白}}}{A_{\text{对照}}} \right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

B ——ABTS 自由基清除率, %;

$A_{\text{样}}$ ——样品溶液与 ABTS 标准溶液的混合溶液吸光值;

$A_{\text{空白}}$ ——样品溶液与乙醇的混合溶液吸光值;

$A_{\text{对照}}$ ——ABTS 标准溶液与乙醇的混合溶液吸光值。

(3) FRAP 还原能力: 根据文献[12]。

1.3 数据处理

平行试验 3 次。采用 SPSS 19.0 软件进行数据分析; 采用 Design Expert 8.0 软件对响应数值进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 料液比对忍冬多糖得率的影响 随着提取溶剂的增加, 多糖得率总体呈先增加后下降的趋势(图 1)。料液比在 1:15~1:25 (g/mL) 时多糖得率逐渐升高, 料液比超过 1:30 (g/mL) 时多糖得率骤然下降, 这是因为随着提取溶剂增多与样品接触面积扩大, 溶剂渗入植物细胞内部, 多糖成分在细胞内外产生适度浓度差随之析出。综合单因素试验结果, 遵循绿色有效提取原则, 料液比控制在 1:20~1:30 (g/mL) 为宜。

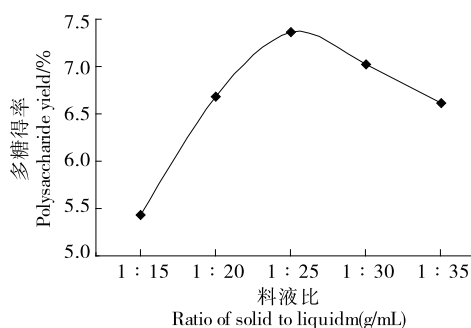


图 1 料液比对忍冬多糖得率的影响

Figure 1 Effect of solid-liquid ratio on *L. japonica* polysaccharide yield

2.1.2 超声温度对忍冬多糖得率的影响 由图 2 可知, 随着超声温度升高, 忍冬多糖得率先增大后降低。当超声温度为 20~80 °C 时, 多糖得率随超声温度上升呈递进增加。这是因为随着超声温度升高, 溶剂渗入植物细胞膜速度加快, 促使成分快速析出。而超声温度超过 80 °C 后其得率下降, 可能是因为长时间高温环境下多糖分子结构被破坏从而使多糖含量变少^[10]。综合单因素试验结果, 遵循绿色有效提取原则, 超声温度控制在 60~100 °C 为宜。

2.1.3 超声时间对忍冬多糖得率的影响 随着超声时间

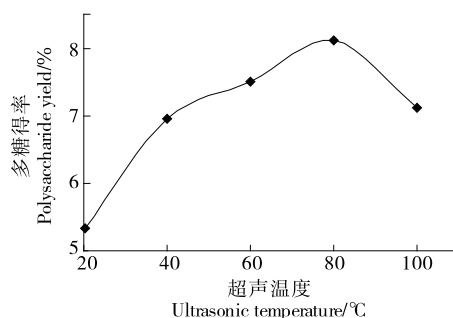


图 2 超声温度对忍冬多糖得率的影响

Figure 2 Effect of extraction temperature on *L. japonica* polysaccharide yield

延长, 多糖得率呈先增加后减少的趋势(图 3), 超声时间 60 min 时多糖得率达到最高峰。但因为超声波长时间空化作用, 导致细胞内部产生气泡将样品粉末包裹, 阻碍成分溢出。同时长时间的超声环境, 会让提取温度升高, 在较高温度下, 多糖成分结构易被破坏, 导致提取率逐渐下降。综合单因素试验结果, 遵循绿色安全提取原则, 超声时间控制在 40~80 min 为宜。

2.1.4 超声功率对忍冬多糖得率的影响 超声功率为 130~190 W 时, 多糖得率随超声功率升高逐步增加, 当超声功率 > 190 W 时, 多糖得率逐渐下降(图 4)。这是因为

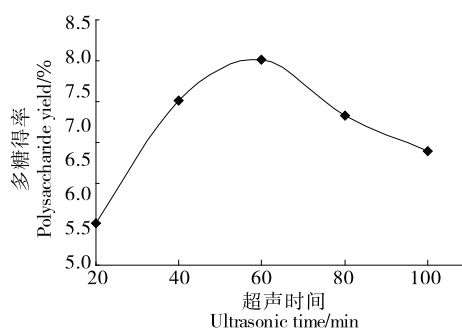


图 3 超声时间对忍冬多糖得率的影响

Figure 3 Effect of extraction time on *L. japonica* polysaccharide yield

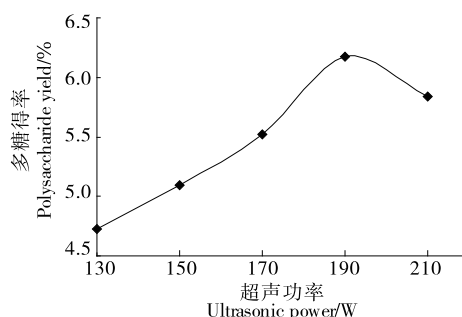


图 4 超声功率对忍冬多糖得率的影响

Figure 4 Effect of extraction power on *L. japonica* polysaccharide yield

超声波在细胞内部产生机械剪切作用,破坏细胞内壁利于多糖成分易于溶出,但超声功率过高会使多糖结构被破坏造成含量减少。综合试验结果,遵循绿色有效提取原则,超声功率控制在170~210 W为宜。

2.2 响应面试验

2.2.1 模型建立与分析 响应面法优化忍冬多糖得率试验因素水平见表1,试验结果见表2。使用Design Expert 8.0软件对试验数据进行多元回归拟合,得到响应面回归方程:

表1 因素水平编码表

Table 1 Factor level coding

水平	A 料液比 (g/mL)	B 超声温 度/℃	C 超声时 间/min	D 超声功 率/W
-1	1:20	60	40	170
0	1:25	80	60	190
1	1:30	100	80	210

表2 响应面试验方案及试验结果

Table 2 Scheme and results of response surface analysis

试验号	A	B	C	D	多糖得率/%
1	-1	-1	0	0	4.19
2	-1	0	-1	0	4.29
3	-1	0	0	1	4.49
4	-1	0	0	-1	4.18
5	-1	0	1	0	4.29
6	-1	1	0	0	3.94
7	0	-1	-1	0	4.77
8	0	0	0	0	7.03
9	0	0	0	0	6.90
10	0	0	-1	1	4.79
11	0	0	1	-1	4.75
12	0	0	0	0	6.64
13	0	1	0	-1	4.78
14	0	-1	0	-1	4.97
15	0	-1	0	1	4.91
16	0	0	1	1	5.49
17	0	-1	1	0	4.59
18	0	0	0	0	7.18
19	0	1	0	1	4.83
20	0	1	1	0	5.83
21	0	0	-1	-1	4.89
22	0	0	0	0	7.00
23	0	1	-1	0	3.54
24	1	0	1	0	5.12
25	1	1	0	0	4.90
26	1	-1	0	0	5.32
27	1	0	-1	0	5.19

$$Y=7.95+0.50A-0.077B+0.22C+0.087D-0.042AB-0.018AC-0.050AD+0.62BC+0.030BD+0.21CD-1.67A^2-1.69B^2-1.57C^2-1.40D^2. \quad (3)$$

由表3可知,拟合度显著($P<0.01$);失拟项不显著($P>0.05$),表示可用该模型预测忍冬多糖的超声提取率;模型相关系数 $R^2=0.9806$,校正后决定系数 $R^2_{Adj}=0.9612$,表明试验值与预测值间有较好的一致性;变异系数 $C.V.\%=0.9022(<1)$ 较低,表示模型的置信度较高;比较各项 F 值可知,各因素对忍冬多糖提取率的影响依次为料液比>超声时间>超声功率>超声温度。

表3 回归模型方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	47.275 6	14	3.376 8	50.516 2	<0.000 1	**
A	3.020 0	1	3.020 0	45.178 7	<0.000 1	**
B	0.070 5	1	0.070 5	1.055 2	0.321 7	
C	0.563 3	1	0.563 3	8.427 3	0.011 6	*
D	0.090 1	1	0.090 1	1.348 4	0.265 0	
AB	0.007 2	1	0.007 2	0.108 1	0.747 2	
AC	0.001 2	1	0.001 2	0.018 3	0.894 2	
AD	0.010 0	1	0.010 0	0.149 6	0.704 7	
BC	1.525 2	1	1.525 2	22.816 9	0.000 3	**
BD	0.003 6	1	0.003 6	0.053 9	0.819 8	
CD	0.176 4	1	0.176 4	2.638 9	0.126 6	
A ²	17.991 0	1	17.991 0	269.139 3	<0.000 1	**
B ²	18.590 1	1	18.590 1	278.100 9	<0.000 1	**
C ²	15.997 0	1	15.997 0	239.310 1	<0.000 1	**
D ²	12.630 4	1	12.630 4	188.946 6	<0.000 1	**
残差	0.935 9	14	0.066 8			
失拟项	0.775 5	10	0.077 5	1.933 8	0.274 7	不显著
纯误差	0.160 4	4	0.040 1			
总和	48.211 4	28				

2.2.2 交互作用分析 由图5~图10可知,料液比、超声温度、超声时间、超声功率对忍冬多糖得率的响应曲面图均开口向下且坡度较陡;各等高线图近似椭圆且等高线密集,说明各因素之间交互作用显著,与方差分析结果一致。

2.2.3 回归模型验证 通过回归模型分析预测提取工艺为:料液比1:25.75(g/mL),超声温度79.77℃,超声时间61.36 min,超声功率190.67 W,此条件下模型预测多糖得率为6.99%。鉴于实际操作和工业生产调整为料液比1:25(g/mL),超声温度80℃,超声时间60 min,超声功率为190 W。以该条件重复3次验证实验测得多糖得率为7.01%,与预测值接近,说明构建的模型具有较高的可靠性,可用于生产实践。

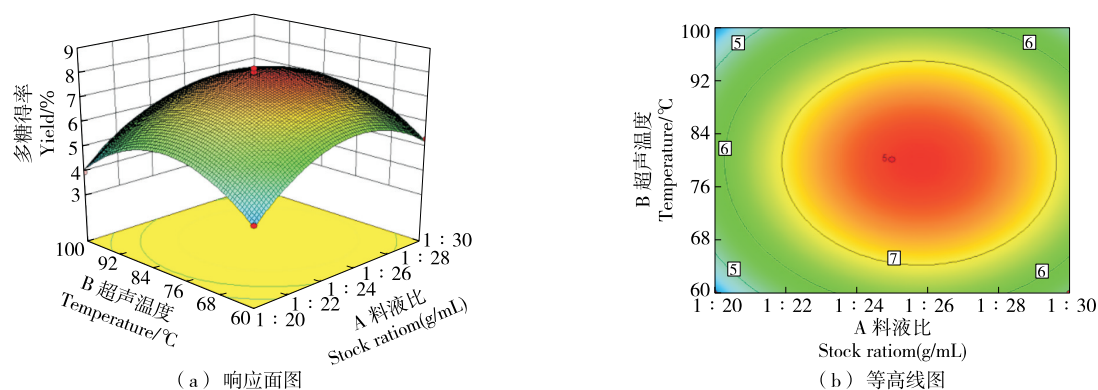


图5 超声温度与料液比对忍冬多糖得率影响的响应面图和等高线图

Figure 5 Response surface and contour plots for the effect of ultrasonic temperature and solid-liquid ratio on polysaccharide yield

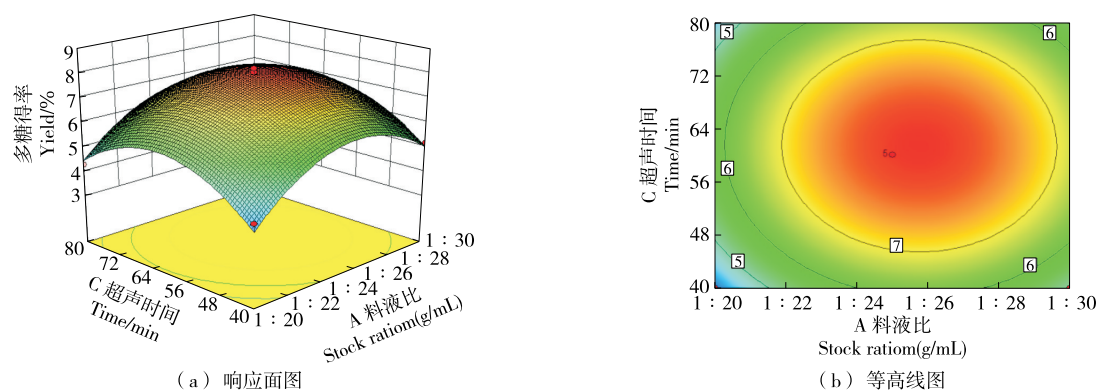


图6 超声时间与料液比对忍冬多糖得率影响的响应面图和等高线图

Figure 6 Response surface and contour plots for the effect of ultrasonic time and solid-liquid ratio on polysaccharide yield

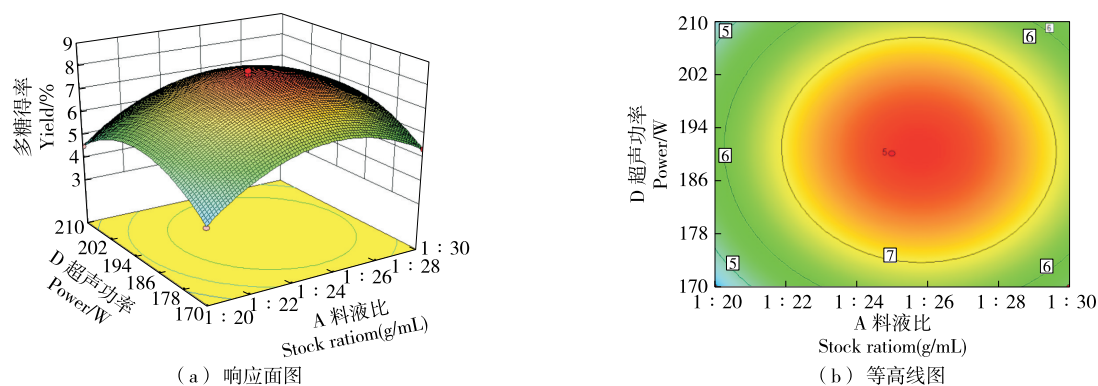


图7 超声功率与料液比对忍冬多糖得率影响的响应面图和等高线图

Figure 7 Response surface and contour plots of the effect for ultrasonic power and solid-liquid ratio on polysaccharide yield

2.3 忍冬多糖抗氧化评价

2.3.1 清除 DPPH 自由基能力 由图 11 可知,忍冬不同部位多糖的 DPPH 自由基清除能力为金银花>忍冬叶>忍冬藤>银花子。当样品质量浓度<0.60 mg/mL 时,忍冬样品对 DPPH 自由基清除率随着浓度的增大而增加,呈现剂量效应关系。当样品质量浓度为 0.80 mg/mL 时,不同部位忍冬多糖对 DPPH 自由基的清除率均达到 79.23%

以上,显示出较好的 DPPH 自由基清除能力。

2.3.2 清除 ABTS 自由基能力 由图 12 可知,在 0~0.6 mg/mL 范围内,随质量浓度增大,忍冬样品对 ABTS 自由基的清除率也随之升高,呈现一定的浓度依赖性;当质量浓度为 0.8 mg/mL 时,银花子、忍冬藤、忍冬叶和金银花多糖对 ABTS 自由基的清除能力趋于平稳,清除率分别为 63.93%,75.23%,81.25%,88.78%。

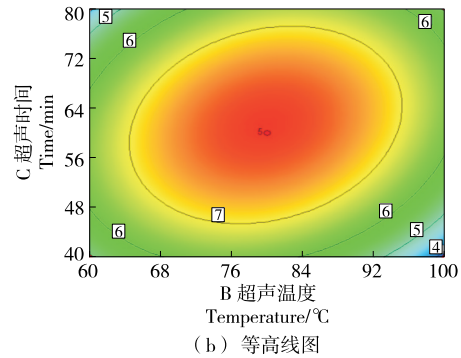
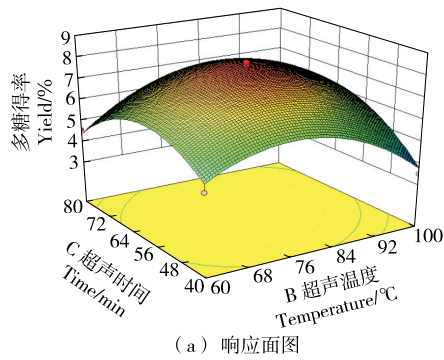


图8 超声时间与超声温度对忍冬多糖得率影响的响应面图和等高线图

Figure 8 Response surface and contour plots for the effect of ultrasonic time and temperature on polysaccharide yield

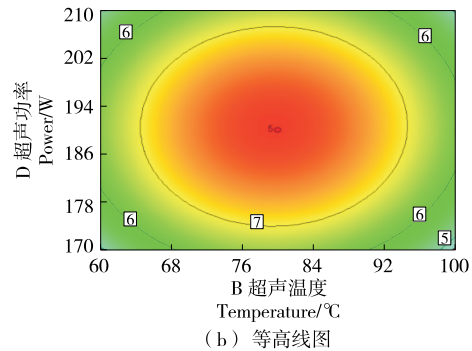
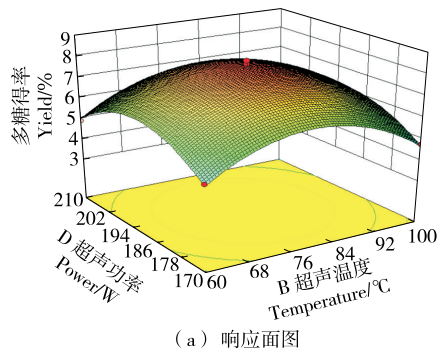


图9 超声功率与超声温度对忍冬多糖得率影响的响应面图和等高线图

Figure 9 Response surface and contour plots for the effect of ultrasonic power and temperature on polysaccharide yield

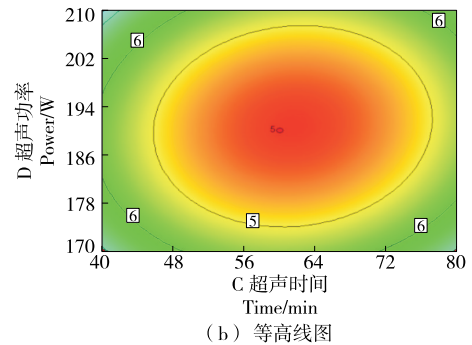
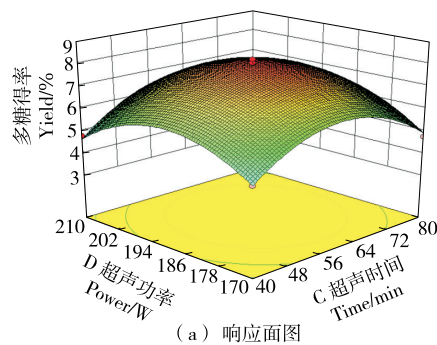


图10 超声功率与超声时间对忍冬多糖得率影响的响应面图和等高线图

Figure 10 Response surface and contour plots for the effect of ultrasonic power and time on polysaccharide yield

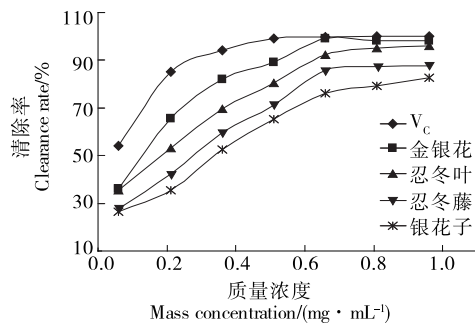


图11 忍冬不同部位多糖对DPPH自由基的清除能力

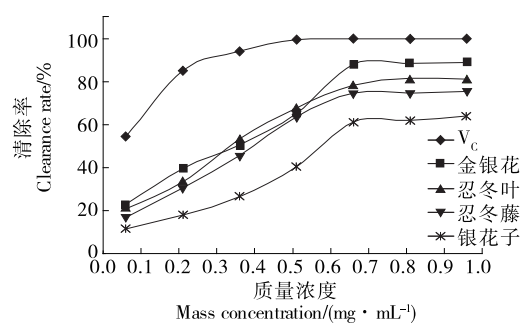
Figure 11 DPPH free radical scavenging capacity of *L. japonica* polysaccharides from different organs

图12 忍冬不同部位多糖对ABTS自由基的清除能力

Figure 12 ABTS free radical scavenging capacity of *L. japonica* polysaccharides from different organs

2.3.3 FRAP 还原能力 由图 13 可知,相同质量浓度下,不同部位忍冬多糖吸光度值分别为金银花>忍冬叶>忍冬藤>银花子,与清除 DPPH 自由基能力的结果一致。此外,在质量浓度为 0.8 mg/mL 时,各部位多糖的吸光值均高于 1.0。

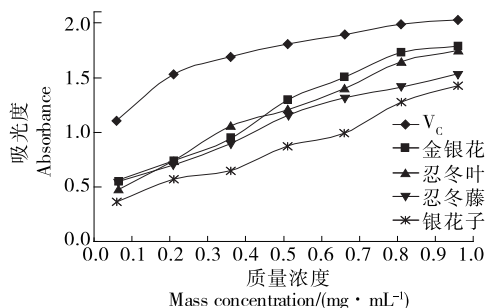


图 13 忍冬不同部位多糖的 FRAP 还原能力

Figure 13 FRAP reduction capacity of *L. japonica* polysaccharides from different organs

2.3.4 系统聚类分析 以忍冬不同部位多糖的清除 DPPH 自由基能力和清除 ABTS 自由基能力为变量,采用组间联接法进行聚类分析。结果显示,当 Euclidean 距离为 15 时,样品被分为两大组,金银花与忍冬叶为一组,忍冬藤与银花子为一组;当 Euclidean 距离为 5 时,金银花样品和忍冬叶样品仍为一类,表明金银花和忍冬叶的抗氧化活性较为相近,这与抗氧化试验结果保持一致。

3 结论

忍冬多糖的最佳提取工艺为料液比 1:25 (g/mL),超声温度 80 °C,超声时间 60 min,超声功率 190 W,不同部位忍冬均有一定的抗氧化活性,且叶、藤是花产量的数十倍,其生药资源丰富,从抗氧化角度分析其可作为金银花互替物料资源。忍冬全株在提取物制备、药食同源产品开发等领域,均有一定的综合利用价值和产品开发潜能。该研究仅开展体外抗氧化试验,后续将结合体内药代动力试验研究其药理作用机制,并持续进行多方面、多维度、全链条探讨,为忍冬绿色产品综合开发提供基础数据。

参考文献

- [1] 刘天亮,董诚明,高启国,等.以忍冬为例浅论古籍考证思路及考证拾遗[J].中草药,2021,52(7): 2 163-2 177.
LIU T L, DONG C M, GAO Q G, et al. Brief discussion on textual research ideas of ancient books and textual collection of predecessors: a case study of *Lonicera japonica*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2021, 52(7): 2 163-2 177.
- [2] XIA Y C, PENG J, LIN F W, et al. *Lonicerae japonicae* caulis: a review of its research progress of active metabolites and pharmacological effects[J]. Frontiers in Pharmacology, 2023, 14 (12): 283.
- [3] YANG X P, YU A Q, HU W J, et al. Extraction, purification, structural characteristics, health benefits, and application of the

polysaccharides from *Lonicera japonica* Thunb.: a review[J]. Molecules, 2023, 28(12): 315-319.

- [4] ZHANG R Q, LI Y Q, GUAN F Q, et al. A homogalacturonan-rich pectic polysaccharide isolated from *Lonicera japonica* Thunb. modulates galectin-4-mediated bioactivity and anti-hepatocellular carcinoma activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 302: 140618.
- [5] 李翠丽,王炜,张英,等.中药多糖提取、分离纯化方法的研究进展[J].中国药房,2016,27(19): 2 700-2 703.
LI C L, WANG W, ZHANG Y, et al. Research progress on extraction, separation and purification methods of traditional Chinese medicine polysaccharides[J]. China Pharmacy, 2016, 27 (19): 2 700-2 703.
- [6] YANG T, ZHANG H, BIAN Y, et al. Ultrasonic-assisted plasma-activated water extraction of polysaccharide from *Hemerocallis citrina* Baroni: structural characterization and antioxidant mechanism in vitro[J]. Food Chemistry, 2024, 465(2): 142049.
- [7] WANG Z M, WU S S, WANG J Y, et al. Optimization of polysaccharide extraction from *Polygonatum cyrtoneura* Hua by freeze-thaw method using response surface methodology[J]. Molecules, 2024, 29(20): 4 879.
- [8] 李根悦,王昱丹,杨凯丽,等.大力参炮制工艺优化及抗氧化活性分析[J].食品与机械,2024,40(12): 146-153.
LI G Y, WANG Y D, YANG K L, et al. Optimization of processing technology of *Dali ginseng* and analysis on its anti-oxidation activity[J]. Food & Machinery, 2024, 40(12): 146-153.
- [9] 贾雪丽,祖姆热提·艾孜则,毕永贤,等.两种体外评价抗氧化活性方法影响因素分析:DPPH 和 ABTS[J].日用化学工业(中英文),2024,54(7): 866-872.
JIA X L, ZU MU RE TI A Z Z, BI Y X, et al. Influence factors analysis of two methods for evaluating antioxidant activity in vitro: DPPH and ABTS assays[J]. China Surfactant Detergent & Cosmetics, 2024, 54(7): 866-872.
- [10] 宋佳敏,王鸿飞,孙朦,等.响应面法优化金蝉花多糖提取工艺及抗氧化活性分析[J].食品科学,2018,39(4): 275-281.
SONG J M, WANG H F, SUN M, et al. Optimization of extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Cordyceps cicadae* by response surface methodology[J]. Food Science, 2018, 39(4): 275-281.
- [11] 刘沁荣,杜紫薇,李佳珍,等.星点—响应面法优化丹参产地加工一体化工艺[J].时珍国医国药,2022,33(2): 373-377.
LIU Q R, DU Z W, LI J Z, et al. Optimization of producing area processing technology of *Salvia miltiorrhiza* by response surface method[J]. Journal of Li-shizhen Traditional Chinese Medicine, 2022, 33(2): 373-377.
- [12] 曾慧婷,宿树兰,沙秀秀,等.丹参茎叶提取物抗氧化活性物质基础与量效关系研究[J].中草药,2017,48(22): 4 688-4 694.
ZENG H T, SU S L, SHA X X, et al. Study on chemical constituents and dose-effect correlation of anti-oxidative activities among extracts of stems and leaves of *Salvia miltiorrhiza*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2017, 48 (22): 4 688-4 694.