

binding and ionic strength[J]. *J Pharm Sci*, 2021, 110(7): 2661-2668.

[14] 董雪, 李兆丰, 顾正彪, 等. 环糊精包合三丁酸甘油酯的分子机制研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 105-112.

[15] Terekhova I V, Chibunova E S, Kumeev R S, et al. Cyclodextrin-benzoic acid binding in salt solutions: effects of biologically relevant anions[J]. *Carbohydr Polym*, 2014, 110: 472-479.

[16] 徐亚萍, 杨博文, 潘仁波, 等. 二氢槲皮素与环糊精相互作用及其包合物的制备[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(7): 33-39.

[17] 陶琳, 李卓远, 沈雯, 等. 温经汤多成分挥发油 β -环糊精及其衍生物包合物的制备、表征及包合行为研究[J/OL]. 南京中医药大学学报, 2025(4): 513-521 (2025-04-14) [2025-05-16]. <https://doi.org/10.14148/j.issn.1672-0482.2025.0513>.

[18] Shin D, Lee J W, Woo Y, et al. Role of salts in phase transformation of clathrate hydrates under brine environments[J]. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2018, 6(4): 5003-5010.

[19] Assaf K I, Ural M S, Pan F F, et al. Water structure recovery in chaotropic anion recognition: High-affinity binding of dodecaborate clusters to γ -cyclodextrin[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2015, 54(23): 6852-6856.

[20] 陈爱菊. 香豆素类抗癌药物与环糊精及生物大分子的相互作用[D]. 聊城: 聊城大学, 2014.

[21] Naseem B, Arif I, Jamal M A. Kosmotropic and chaotropic behavior of hydrated ions in aqueous solutions in terms of expansibility and compressibility parameters[J]. *Arabian J Chem*, 2021, 14(11): 103405.

白花丹总黄酮纤维素酶辅助超声提取工艺优化及其抗氧化活性评价

高小露¹, 程文德¹, 文月元¹, 幸尚平¹, 施承¹, 朱丹^{1,2}, 许亚楠^{1,2*}

(1. 广西医科大学药学院, 广西南宁 530021; 2. 广西生物活性分子研究与评价重点实验室, 广西南宁 530021)

摘要: 目的 优化白花丹总黄酮纤维素酶辅助超声提取工艺, 并评价其抗氧化活性。方法 在单因素试验基础上, 以提取时间、液料比、纤维素酶添加量、提取温度、超声功率为影响因素, 总黄酮提取率为评价指标, 响应面法优化提取工艺。再测定提取物对DPPH、ABTS、OH自由基的清除率。结果 最佳条件为液料比34:1, 纤维素酶添加量3%, 提取温度51℃, 提取时间38 min, 超声功率400 W, 总黄酮提取率为(33.411±0.97)%。3种自由基IC₅₀值分别为0.130、0.042、3.29 mg/mL。结论 该方法合理可靠, 可用于纤维素酶辅助超声提取抗氧化活性较强的白花丹总黄酮。

关键词: 白花丹; 总黄酮; 纤维素酶; 超声提取工艺; 抗氧化活性; 响应面法

中图分类号: R284.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-1528(2025)11-3580-06

doi:10.3969/j.issn.1001-1528.2025.11.007

Optimization of cellulase-assisted ultrasound extraction process for total flavonoids from *Plumbago zeylanica* and evaluation of their anti-oxidant activity

GAO Xiao-lu¹, CHENG Wen-de¹, WEN Yue-yuan¹, XING Shang-ping¹, SHI Cheng¹, ZHU Dan^{1,2}, XU Ya-nan^{1,2*}

(1. School of Pharmacy, Guangxi Medical University, Nanning 530021, China; 2. Guangxi Key Laboratory for Research and Evaluation of Bioactive Molecules, Nanning 530021, China)

ABSTRACT: AIM To optimize the cellulase-assisted ultrasound extraction process for total flavonoids from

收稿日期: 2025-01-19

基金项目: 广西自然科学基金项目(2023GXNSFBA026208, 2025GXNSFAA069843); 大学生创新创业训练项目(S202310598115, S202410598142, S202410598148); 广西科技重大专项(桂科AA22096021); 广西四新研究与实践项目(XNK202414)

作者简介: 高小露(2003—), 女, 研究方向为药用植物活性成分提取。E-mail: 2960729137@qq.com

*通信作者: 许亚楠(1987—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为药用植物活性成分开发与利用。E-mail: kedaxuyanan@163.com

Plumbago zeylanica L., and to evaluate their anti-oxidant activity. **METHODS** With extraction time, liquid-solid ratio, cellulase addition amount, extraction temperature and ultrasonic power as influencing factors, extraction rate of total flavonoids as an evaluation index, the extraction process was optimized by response surface method on the basis of single factor test. Subsequently, The scavenging rates of extract on DPPH, ABTS and OH free radicals were determined. **RESULTS** The optimal conditions were determined to be 34 : 1 for liquid-solid ratio, 3% for cellulase addition amount, 51 °C for extraction temperature, 38 min for extraction time, and 400 W for ultrasonic power, the extraction rate of total flavonoids was (33.411±0.97)%. The IC₅₀ values of three free radicals were 0.13, 0.042, 3.29 mg/mL, respectively. **CONCLUSION** This reasonable and reliable method can be used for the cellulase-assisted ultrasound extraction of total flavonoids from *P. zeylanica* with strong anti-oxidant activity.

KEY WORDS: *Plumbago zeylanica* L.; total flavonoids; cellulase; ultrasound extraction process; anti-oxidant activity; response surface method

白花丹 *Plumbago zeylanica* L. 为白花丹属多年生亚灌木状草本植物, 以根、全草及叶入药, 是壮医、瑶医等我国民族医学常用药材, 具有祛风止痛、散瘀消肿功效^[1-2], 其化学成分主要有黄酮类、萘醌类、有机酸类、生物碱类等, 具有抗氧化、抗过敏、抗炎等药理活性^[3]。其中, 黄酮类化合物有着抗衰老、免疫调节、抗癌等生物活性, 应用价值广泛^[4]。

响应面法具有实验次数少、直观、高效便捷、参数全面可预测等优势^[5]。目前, 提取白花丹总黄酮的方法为微波提取^[6], 但尚未涉及酶辅助超声提取。因此, 本实验优化白花丹总黄酮纤维素酶辅助超声提取工艺, 并通过测定 DPPH、ABTS、OH 自由基清除率来评价其抗氧化活性, 以期为开发利用该类成分提供理论依据。

1 材料

1.1 试剂与药材 芦丁对照品(上海源叶生物科技有限公司); 纤维素酶(上海麦克林生化科技有限公司); *L*(+)-抗坏血酸(天津市科密欧化学试剂有限公司); DPPH(福州飞净生物科技有限公司); ABTS(成都博瑞特化学技术有限公司)。白花丹购于广西玉林市药材市场, 经广西医科大学中药学教研室朱丹教授鉴定为正品, 干燥粉碎, 过80目筛, 密封保存。

1.2 仪器 X-7型紫外可见分光光度计(上海元析仪器有限公司); KQ-500DB型数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); Synergy H1型酶标仪(美国伯腾仪器有限公司); XS205DU型电子天平(上海梅特勒-托利多仪器有限公司)。

2 方法与结果

2.1 总黄酮含量测定

2.1.1 对照品溶液制备 称取芦丁对照品0.1 g,

60%乙醇溶解并定容于100 mL棕色量瓶中, 即得1.0 mg/mL的芦丁标准液。

2.1.2 供试品溶液制备 称取药材粉末0.50 g, 按不同液料比加入60%乙醇, 再加入适量纤维素酶, 在不同功率、温度、时间下超声提取, 粗提液过滤, 离心, 即得。

2.1.3 方法学考察 参照李清俊^[7]报道的方法, 以吸光度为纵坐标(A), 对照品质量浓度为横坐标(X)进行回归, 得方程为 $A=0.9485X+0.0011$ ($r=0.9992$), 在0~1 mg/mL范围内线性关系良好。另外, 精密度RSD为0.02%, 重复性RSD为0.87%, 20 min内稳定性RSD为1.24%, 并且平均加样回收率为96.97%, RSD为0.35%, 均满足分析要求。

2.1.4 测定方法 吸取提取液适量, 置于10 mL量瓶中, 采用 $\text{NaNO}_2\text{-Al}(\text{NO}_3)_3\text{-NaOH}$ 法测定吸光度, 计算提取率, 公式为总黄酮提取率 $=\frac{C\times V\times n}{m\times 1000}\times 100\%$, 其中C为总黄酮质量浓度, V为提取液体积, n为稀释倍数, m为药材质量。

2.2 单因素试验

2.2.1 液料比 参照王令智^[8]报道的方法, 分别考察料液比20:1、30:1、40:1、50:1、60:1对总黄酮提取率的影响, 平行3次, 结果见图1。由此可知, 液料比在20:1~60:1范围内时总黄酮提取率先升高后降低, 其原因可能是溶剂用量过少时限制了该类成分充分溶解, 溶质与溶剂之间接触不充分, 从而影响了提取效果^[9], 而随着溶剂用量增加药材与其接触更充分, 提取率也相应升高; 液料比为30:1时总黄酮提取率达到最大值, 但继续升高前者时会导致杂质溶出量增加, 该类成分提取率反而降低。因此, 料液比确定在30:1左右。

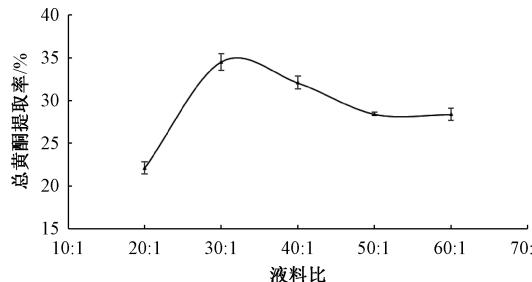


图1 液料比对白花丹总黄酮提取率的影响

Fig. 1 Effect of liquid-solid ratio on extraction rate of total flavonoids from *P. zeylanica*

2.2.2 纤维素酶添加量 参考孙晓玲^[10]报道的方法, 分别考察纤维素酶添加量 1.0%、2.0%、3.0%、4.0%、5.0% 对总黄酮提取率的影响, 平行3次, 结果见图2。由此可知, 纤维素酶添加量在1%~5%范围内时总黄酮提取率先升高后降低, 其原因可能是随着其添加量增加酶与底物接触几率变大, 可通过破坏植物细胞壁来促进胞内物质溶出, 从而促进该类成分溶出^[11], 但前者过大时药材表面被覆盖, 阻碍该类成分溶出, 同时溶液黏度增加会影响传质过程, 使其向溶剂中的扩散受到影响, 导致提取率反而降低。因此, 纤维素酶添加量确定在3%左右。

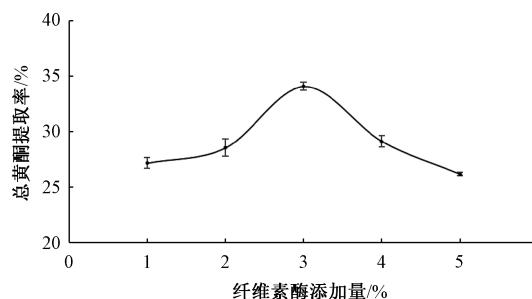


图2 纤维素酶添加量对白花丹总黄酮提取率的影响

Fig. 2 Effect of cellulase addition amount on extraction rate of total flavonoids from *P. zeylanica*

2.2.3 提取温度 参考覃建兵^[12]报道的方法, 分别考察提取温度30、40、50、60、70℃对总黄酮提取率的影响, 平行3次, 结果见图3。由此可知, 提取温度在30~50℃范围内时溶液黏度下降, 分子运动加快, 扩散性增强, 有利于总黄酮溶出^[13], 为50℃时达到最大值, 但温度过高时可能会使该类成分发生分解、氧化等反应, 导致其含量降低, 还可引起溶剂快速蒸发, 减少液料有效接触时间, 导致提取率反而降低。因此, 提取温度确定在50℃左右。

2.2.4 提取时间 参考龙弟梅^[14]报道的方法, 分

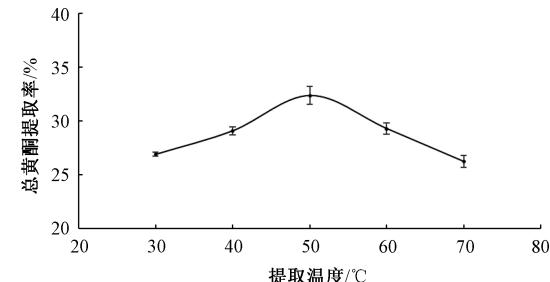


图3 提取温度对白花丹总黄酮提取率的影响

Fig. 3 Effect of extraction temperature on extraction rate of total flavonoids from *P. zeylanica*

别考察提取时间20、30、40、50、60 min对总黄酮提取率的影响, 平行3次, 结果见图4。由此可知, 提取时间在20~40 min范围内时总黄酮提取率逐渐升高, 但超过40 min后非目标成分溶出量也会有所增加^[15], 导致该类成分提取率反而降低。因此, 提取时间确定在40 min左右。

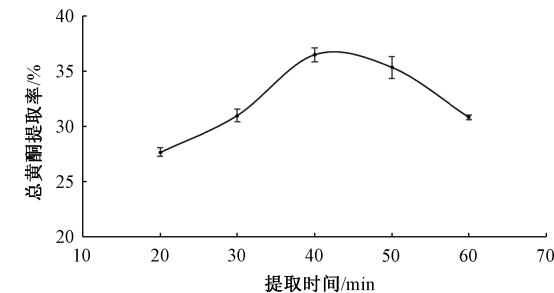


图4 提取时间对白花丹总黄酮提取率的影响

Fig. 4 Effect of extraction time on extraction rate of total flavonoids from *P. zeylanica*

2.2.5 超声功率 参照王欣雨^[16]报道的方法, 分别考察超声功率300、350、400、450、500 W对总黄酮提取率的影响, 平行3次, 结果见图5。由此可知, 当超声功率在300~500 W范围内时总黄酮提取率先升高后降低, 其原因可能是超声机械振动会加速溶剂渗透, 促进细胞壁破裂^[17], 有助于该类成分溶出。当超声功率为400 W时, 达到最大值, 但继续增加会导致局部温度过高, 引起该类成分发生热降解或氧化反应, 导致其提取率反而降低。因此, 提取功率确定在400 W左右。

2.3 响应面法 在单因素试验基础上, 选择液料比(*A*)、纤维素酶添加量(*B*)、提取时间(*C*)、提取温度(*D*)作为影响因素, 总黄酮提取率(*Y*)作为评价指标, 因素水平见表1, 结果见表2。

通过Design Expert 10.0.8软件对表2数据进行拟合, 得方程为 $Y = 33.08 + 2.75A - 0.032B +$

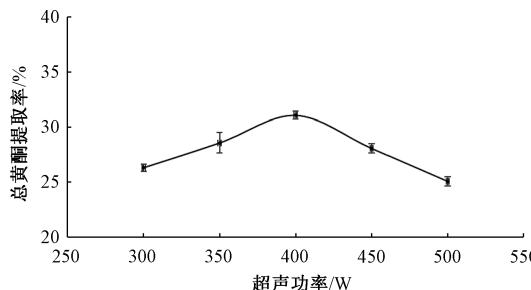


图5 超声功率对白花丹总黄酮提取率的影响

Fig. 5 Effect of ultrasound power on extraction rate of total flavonoids from *P. zeylanica*

表1 响应面法因素水平

Tab. 1 Factors and levels for response surface method

水平	A 液料比	因素		
		B 纤维素酶添加量/%	C 提取温度/℃	D 提取时间/min
-1	20 : 1	2	40	30
0	30 : 1	3	50	40
1	40 : 1	4	60	50

表2 响应面法设计与结果

Tab. 2 Design and results for response surface method

试验号	A 液料比	B 纤维素酶添加量/%	C 提取温度/℃	D 提取时间/min	Y 总黄酮提取率/%
1	20 : 1	2	50	40	24.23
2	40 : 1	2	50	40	27.34
3	20 : 1	4	50	40	20.96
4	40 : 1	4	50	40	28.62
5	30 : 1	3	40	30	27.06
6	30 : 1	3	60	30	29.62
7	30 : 1	3	40	50	27.68
8	30 : 1	3	60	50	28.64
9	20 : 1	3	50	30	20.79
10	40 : 1	3	50	30	31.01
11	20 : 1	3	50	50	26.39
12	40 : 1	3	50	50	26.64
13	30 : 1	2	40	40	26.55
14	30 : 1	4	40	40	24.75
15	30 : 1	2	60	40	26.89
16	30 : 1	4	60	40	26.47
17	20 : 1	3	40	40	21.43
18	40 : 1	3	40	40	28.23
19	20 : 1	3	60	40	24.36
20	40 : 1	3	60	40	29.27
21	30 : 1	2	50	30	24.42
22	30 : 1	4	50	30	28.36
23	30 : 1	2	50	50	27.59
24	30 : 1	4	50	50	27.48
25	30 : 1	3	50	40	33.77
26	30 : 1	3	50	40	34.14
27	30 : 1	3	50	40	33.60
28	30 : 1	3	50	40	31.76
29	30 : 1	3	50	40	32.14

0.80C+0.26D+1.14AB-0.47AC-2.49AD+0.34BC-1.01BD-0.40CD-4.33 A²-3.78 B²-2.87C²-2.28D²，方差分析见表3。由此可知， $R^2 = 0.9619$ ， $R_{Adj}^2 = 0.9238$ ， $CV = 3.54\%$ ，失拟项 $P > 0.05$ ，表明模型与实际情况拟合程度良好，可反映真实值；各因素影响程度依次为 $A > C > D > B$ 。

表3 方差分析结果

Tab. 3 Results for analysis of variance

来源	离均差平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	337.26	14	24.09	25.23	<0.0001
A	90.48	1	90.48	94.76	<0.0001
B	0.012	1	0.012	0.013	0.9122
C	7.6	1	7.6	7.96	0.0136
D	0.83	1	0.83	0.87	0.3663
AB	5.18	1	5.18	5.42	0.0354
AC	0.89	1	0.89	0.94	0.3499
AD	24.85	1	24.85	26.03	0.0002
BC	0.48	1	0.48	0.5	0.4917
BD	4.1	1	4.1	4.29	0.0572
CD	0.64	1	0.64	0.67	0.4267
A^2	121.69	1	121.69	127.46	<0.0001
B^2	92.81	1	92.81	97.21	<0.0001
C^2	53.48	1	53.48	56.02	<0.0001
D^2	33.72	1	33.72	35.32	<0.0001
残差	13.37	14	0.95	—	—
失拟项	8.87	10	0.89	0.79	0.6548
纯误差	4.5	4	1.12	—	—
总和	350.62	28	—	—	—

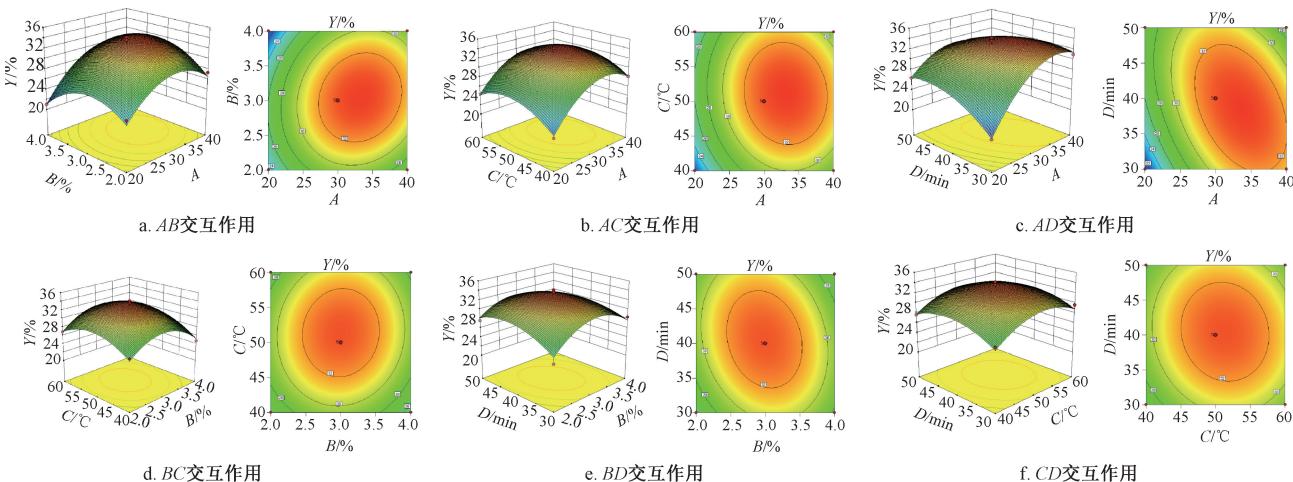
响应面分析见图6。由此可知，液料比与提取时间的三维曲面较倾斜，表明两者对总黄酮提取率影响较大；纤维素酶添加量与提取温度、提取温度与提取时间的等高线稀疏并接近圆形，表明其交互作用较弱，与方差分析一致。

最终确定，最优工艺为液料比 33.710 : 1，纤维素酶添加量 3.080%，提取温度 51.242 ℃，提取时间 38.265 min，总黄酮提取率为 33.617%。考虑到实际可操作性，将其修正为液料比 34 : 1，纤维素酶添加量 3%，超声温度 51 ℃，提取时间 38 min。

2.4 验证试验 按“2.3”项下优化工艺平行进行3批试验，测得总黄酮平均提取率为 33.411%，与预测值 33.617% 仅相差 0.206%，可知该工艺稳定可行，具有实际意义。

2.5 抗氧化活性评价

2.5.1 对 DPPH 自由基的清除能力 参照文献[18]报道的方法，将提取物分别制成 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mg/mL 溶液，各取 2 mL，与等量的 0.1 mg/mL DPPH 溶液混匀，避光，静置



注: 各小图左边为三维曲面图, 右边为等高线图。A、B、C、D、Y 分别为液料比、纤维素酶添加量、提取温度、提取时间、总黄酮提取率。

图 6 各因素响应面图

Fig. 6 Response surface plots for various factors

30 min, 吸取 200 μ L 至 96 孔板中, 在 517 nm 波长处测定吸光度, 重复 3 次, 以维生素 C 为阳性对照, 计算 DPPH 自由基清除率, 公式为清除率 = $\{1 - [(A_1 - A_2) / A_0]\} \times 100\%$, 其中 A_0 为无水乙醇+DPPH 溶液吸光度, A_1 为样品+DPPH 溶液吸光度, A_2 为样品+无水乙醇吸光度, 结果见图 7。由此可知, 提取物质量浓度在 0.1~0.6 mg/mL 范围内与 DPPH 自由基清除能力呈正相关, IC_{50} 值为 0.13 mg/mL。

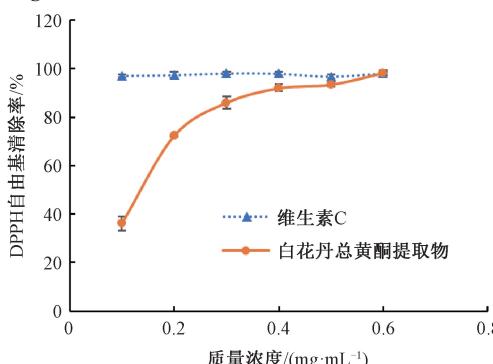


图 7 白花丹总黄酮提取物对 DPPH 自由基的清除能力

Fig. 7 Scavenging capacity of total flavonoids from *P. zeylanica* on DPPH free radicals

2.5.2 对 ABTS 自由基的清除能力 参照文献 [19] 报道的方法, 将提取物分别制成 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30 mg/mL 溶液, 各取 40 μ L, 与 160 μ L ABTS 溶液混合, 室温暗处反应 6 min, 置于 96 孔板中, 在 734 nm 波长处测定吸光度, 重复 3 次, 以维生素 C 为阳性对照, 计算 ABTS 自由基清除率, 公式为清除率 = $\{1 -$

$[(A_1 - A_2) / A_0]\} \times 100\%$, 其中 A_0 、 A_2 分别为无水乙醇代替样品、ABTS 溶液的吸光度, A_1 为样品+ABTS 溶液吸光度, 结果见图 8。由此可知, 总黄酮质量浓度在 0.05~0.15 mg/mL 范围内时对 ABTS 自由基的清除能力逐渐提高, 然后趋于稳定, 为 0.3 mg/mL 时与阳性对照接近, 达 $(95.86 \pm 1.47)\%$, IC_{50} 值为 0.042 mg/mL。

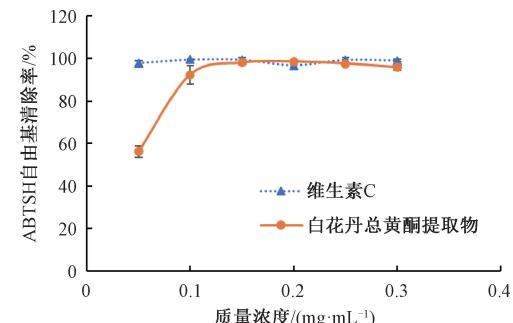


图 8 白花丹总黄酮提取物对 ABTS 自由基的清除能力

Fig. 8 Scavenging capacity of total flavonoids from *P. zeylanica* on ABTS free radicals

2.5.3 对 OH 自由基的清除能力 参照文献 [20] 报道的方法, 将提取物分别制成 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mg/mL 溶液, 各取 2 mL, 加入 6 mmol/L 硫酸亚铁、水杨酸乙醇、过氧化氢各 1 mL, 混匀, 35 $^{\circ}$ C 水浴 30 min, 吸取 200 μ L 至 96 孔板中, 在 510 nm 波长处测定吸光度, 重复 3 次, 以维生素 C 为阳性对照, 计算 OH 自由基清除率, 公式为清除率 = $\{1 - [(A_1 - A_2) / A_0]\} \times 100\%$, 其中 A_0 、 A_2 分别为无水乙醇代替样品、过氧化氢溶液的吸光度, A_1 为样品+硫酸亚铁+水杨酸乙醇+

过氧化氢溶液吸光度,结果见图9。由此可知,随着总黄酮质量浓度增加OH自由基清除率缓慢升高,但弱于维生素C, IC_{50} 值为3.29 mg/mL。

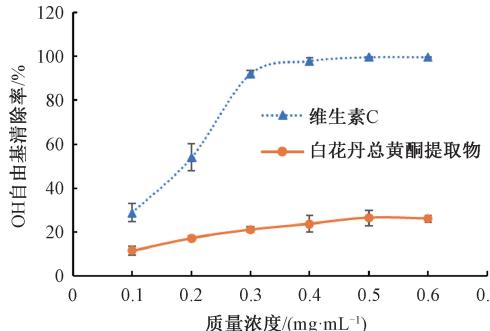


图9 白花丹总黄酮提取物对OH自由基的清除能力

Fig. 9 Scavenging capacity of total flavonoids from *P. zeylanica* on OH free radicals

3 讨论与结论

酶提取是利用纤维素酶对植物细胞壁中的纤维素进行降解,从而促进黄酮类化合物溶出,其温和高效的特点有助于保持目标成分的结构完整性^[21];超声提取是利用声波引发高速强烈的空化效应与搅拌作用,破坏植物细胞结构,从而促进黄酮类化合物溶出,提高其得率^[22]。本实验在单因素试验基础上,采用响应面法优化白花丹总黄酮纤维素酶辅助超声提取工艺,发现优化后该类成分提取率明显升高,可为该药材深度开发提供重要参考。

抗氧化活性实验结果表明,白花丹总黄酮对DPPH、ABTS自由基均表现出较强的清除能力。随着现代社会对健康产品需求的日益增长,白花丹总黄酮作为一种安全有效的天然抗氧化成分,有望在医药、食品等领域得到广泛应用。今后,可着重评估白花丹总黄酮实际生物利用率、代谢路径及其对人体健康的长期影响。

参考文献:

[1] 中国科学院《中国植物志》编辑委员会. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[2] 国家中医药管理局《中华本草》编委会. 中华本草 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1999.

[3] 唐晓光, 王超, 马晓驰, 等. 白花丹地上部分的化学成分研究 [J]. 中药材, 2016, 39(7): 1541-1544.

[4] 钟旭为, 尹茹琪, 江名. 三种广西不同地区绿茶中总黄酮的提取及其抗氧化活性研究 [J]. 中国酿造, 2024, 43(5): 180-184.

[5] 黄秀红, 刘丽辰, 阮怿航, 等. 响应面优化低共熔溶剂提取乌龙茶多糖的研究 [J]. 食品研究与开发, 2020, 41(11): 96-103.

[6] 朱伟伟. 微波辅助提取白花丹中黄酮的最佳工艺研究 [J]. 河池学院学报, 2013, 33(2): 7-11.

[7] 李清筱. 纤维素酶辅助提取马齿苋总黄酮工艺优化及抑菌分析研究 [J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(4): 131-139.

[8] 王令智, 陈平, 郭振华, 等. 超声波-酶协同提取女贞子总黄酮工艺及其抗氧化活性研究 [J]. 饲料研究, 2023, 46(23): 96-101.

[9] 杨全, 周毅生, 李嘉俊, 等. 纤维素酶-乙醇协同提取龙须藤总黄酮的工艺研究 [J]. 广东药科大学学报, 2017, 33(1): 28-32.

[10] 孙晓玲. 纤维素酶-乙醇结合法提取生姜总黄酮的工艺研究 [J]. 中国调味品, 2018, 43(11): 113-117; 125.

[11] 邢颖, 刘芳. 超声波和纤维素酶法提取核桃分心木中的黄酮、多酚及其抗氧化活性分析 [J]. 粮食与油脂, 2020, 33(11): 111-115.

[12] 覃建兵, 张鸿杰, 柳忠玉, 等. 纤维素酶提取车前草黄酮工艺条件研究 [J/OL]. 长江大学学报(自然科学版): 1-5 (2023-05-29) [2025-08-22]. <https://doi.org/10.16772/j.cnki.1673-1409.20230525.001>.

[13] 姜鹏程, 陆晔晗, 常芮宁, 等. 当归藤总黄酮超声提取工艺优化 [J]. 中成药, 2023, 45(12): 4081-4085.

[14] 龙弟梅, 张月琴, 叶文峰, 等. 超声波辅助酶法提取山香圆叶中总黄酮的工艺优化 [J]. 当代化工研究, 2023(23): 148-150.

[15] 孙立权, 滕茂浩, 丛勇, 等. 响应面法优化柴胡药渣中柴胡皂苷提取工艺 [J]. 北京理工大学学报, 2023, 43(5): 540-548.

[16] 王欣雨, 张梓晗, 李振. 苦参总黄酮超声提取工艺优化研究 [J]. 山东化工, 2023, 52(14): 9-12.

[17] 陈芳, 温艳, 姜小帆. 响应面法优化超声辅助提取灵芝黄酮工艺研究 [J]. 湖北农业科学, 2022, 61(14): 113-118.

[18] 侯敏娜, 侯少平, 张尉婷, 等. 超声辅助低共熔溶剂法提取太白贝母总黄酮及其抗氧化活性研究 [J]. 化学与生物工程, 2024, 41(6): 37-43.

[19] 陈静文, 汪传宝, 奚香渝, 等. 红面草总黄酮提取工艺优化及美白活性研究 [J]. 中国野生植物资源, 2024, 43(4): 22-30.

[20] 李兆慧, 师砚首, 喻晓雁, 等. 三叶青黄酮的提取工艺优化及抗氧化活性分析 [J]. 中南药学, 2023, 21(8): 2035-2040.

[21] Tian Z, Oda Y, Zhang Y, et al. Use of a new enzyme extraction system to improve the sensitivity of SOS/umu test and application to environmental samples [J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2015, 94(3): 370-375.

[22] 贾一凡, 孟哲, 宋亚娟, 等. 超声波技术在食品检测中的应用 [J]. 食品安全导刊, 2022(29): 162-164.