

黄果茄中绿原酸超声辅助提取工艺优化及抗氧化活性

郭蒙¹, 郭纯¹, 蒋青¹, 高林晓^{1,2*}

1. 黔南民族师范学院化学化工学院, 贵州都匀 558000; 2. 贵州省普通高校民族药用植物资源开发工程研究中心, 贵州都匀 558000

摘要: 以黄果茄 (*Solanum xanthocarpum*) 果实为试材, 采用超声波辅助乙醇提取法, 对绿原酸的提取工艺进行研究。通过调整乙醇水溶液体积浓度、液体与物料的比值、超声时间、超声温度等 4 组单因素实验的数值及结果, 优化出拟定的绿原酸提取工艺参数, 即乙醇溶液浓度、液料比值、超声时间、超声温度分别为 65%、50 mL/g、40 min、60 °C。在上述单因素优化结果基础上, 进一步通过 Box-Behnken 响应面法优化得到最终的二次多项数学模型。研究表明, 提取工艺参数为 64.7% 的乙醇浓度、55.8 mL/g 的液料比值、56.0 °C 下超声 40.5 min, 黄果茄绿原酸提取率最佳, 为 6.81%。黄果茄果中的提取物具有较好的抗氧化能力, 相应的 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 和 2,2-连氮基-双-(3-乙基苯并二氢噻唑啉-6-磺酸) [2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS] 自由基清除能力的 IC₅₀ 分别为 55.7 mg/L 和 20.1 mg/L。

关键词: 黄果茄; 绿原酸; 超声波辅助提取工艺; 工艺优化; 抗氧化活性

中图分类号: R284 文献标识码: A

Ultrasound-assisted Extraction Process Optimization of Chlorogenic Acid from *Solanum xanthocarpum* Fruits and Its Antioxidant Activity

GUO Meng¹, GUO Chun¹, JIANG Qing¹, GAO Linxiao^{1,2*}

1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Qiannan Normal University for Nationalities, Duyun, Guizhou 558000, China; 2. Guizhou Province College Research Center of Ethnical Medicinal Plant Resources Exploitation Engineering, Duyun, Guizhou 558000, China

Abstract: *Solanum xanthocarpum* fruits are used as the test material, and the extraction process of chlorogenic acid is studied in detail by using the ultrasonic-assisted ethanol extraction test method. Values of four group parameters for the volume solubility of ethanol aqueous solution, ratio of liquid to the material, ultrasonic time, ultrasonic temperature were adjusted, and then the proposed extraction process parameters of chlorogenic acid from single-factor experiments and the corresponding results were optimized. The optimized parameters were ethanol concentration 65%, ratio of liquid to material 50 mL/g, ultrasonic temperature 60 °C and ultrasonic time 40 min. On the basis of the above single factor optimization results, the final quadratic multiphase mathematical model was obtained further by optimization from the Box-Behnken response surface method. The extraction process parameters were ethanol concentration 64.7%, liquid-to-solid ratio 55.8 mL/g, and ultrasonic temperature 56.0 °C for 40.5 min, and the optimal extraction rate of chlorogenic acid was 6.81%. The extract of *S. xanthocarpum* fruits had good antioxidant capacity to DPPH and ABTS free radical scavenging with IC₅₀ values of 55.7 mg/L and 20.1 mg/L, respectively.

Keywords: *Solanum xanthocarpum*; chlorogenic acid; ultrasound-assisted extraction process; process optimization; antioxidant activity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.04.020

收稿日期 2022-07-05; 修回日期 2022-09-07

基金项目 贵州省教育厅项目 (黔教合 KY 字[2018]440); 国家级大学生创新创业训练项目 (No. 202110670005); 贵州省普通高校民族药用植物资源开发工程研究中心开放基金 (黔教合 KY 字[2014]227)。

作者简介 郭蒙 (1979—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 药物分析与质量控制。*通信作者 (Corresponding author): 高林晓 (GAO Linxiao), E-mail: glxiao266@163.com。

黄果茄系茄科茄属直立草本植物,在我国星散分布于贵州、四川、台湾等地,而国外也可见于其他热带亚洲、大洋洲以及非洲等地^[1]。一直以来,中外科研人员对黄果茄的研究非常重视,近年的研究主要集中在成分、药理等方面,展现出一定的经济开发价值。XU 等^[2]从黄果茄果中分离出 2 个具有 16,17-仲胆甾烷骨架的甾体皂苷,而刁克鹏等^[3]从其果中分离出黄酮(6 个)、酰胺(4 个)、香豆素(2 个)等 12 个单体,其中 5-羟基-8-甲氧基-6,7-亚甲二氧基黄酮为未见报道的化合物。CHAUDHARY 等^[4]用高效薄层色谱法(high-performance lamina liquid chromatography, HPTLC)分别对黄果茄根、茎、果中的茄定碱和薯蓣皂苷元同时进行定量分析,以帮助草药的质量控制。李学玲等^[5]研究发现,用气质联用分析鉴定出黄果茄果的挥发性物质 22 种,其中醛酮类、脂类为主要成分,分别为 51.03%、32.70%,而在最优化条件下,总黄酮提取率可达 4.35%,并对清除 DPPH·、·OH 均展现出较好的效果^[6],此外,SHIVNATH 等^[7]发现黄果茄果醇提取物可通过促进软骨细胞生存和增殖来改善骨关节炎。USMAN 等^[8]研究发现咖啡酸、咖啡酸甲酯、东莨菪碱、七叶苷等次生代谢物具有抗糖尿病、抗衰老等性能。GUPTA 等^[9]发现,黄果茄果中分离出的槲皮素能够提供更好的肝脏防御作用,从而可预防肝毒性。NATARAJAN 等^[10]报道,黄果茄的甲醇提取物能够治疗微生物伤口感染,并有成为抗菌剂的潜力,尤其对科氏葡萄球菌菌株更有效。CHOUDHARY 等^[11]和 REDDY 等^[12]分别发现黄果茄全株的水和脂提取物具有免疫抑制、抗癌等的特性。ZAMAN 等^[13]利用黄果茄果样品颗粒作为吸附剂直接从水溶液中去除亚甲蓝,吸附能力可达到 0.051 mmol/g。此外,李学玲等^[14]用水提法优化了黄果茄果中绿原酸的提取工艺,提取率为 0.28%。

绿原酸广泛存在于双子叶植物中药材或食物中^[15],具有抗氧化、抗菌等药理作用^[16-17],目前仍需要拓宽绿原酸的新来源^[18-19]。绿原酸的化学提取主要有水提、醇提、酶提等方法,尤其超声辅助醇提法的绿原酸具有更加稳定、收率高和溶剂易回收等特性^[20],本研究拟用超声辅助醇提取黄果茄中绿原酸。此外,高效的单因素实验仅能得出较粗略的参数范围,而正交试验设计并不能明确回归方程,因此,通过响应面法建模,以期

得到更加准确的工艺条件^[21],为其今后的工业开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 材料与试剂 成熟的黄果茄果实采自贵州都匀。

绿原酸标准品(纯度 $\geq 98\%$),维生素 C 标准品(Vc,纯度 $\geq 98\%$,合肥博美生物科技有限公司),1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH,纯度 $\geq 98\%$),2,2-连氮基-双-(3-乙基苯并二氢噻唑啉-6-磺酸)(ABTS,纯度 $\geq 99\%$,合肥巴斯夫生物科技有限公司),过硫酸钾(分析纯,北京化工厂有限责任公司);无水乙醇(分析纯,成都金山化学试剂有限公司)。

1.1.2 仪器与设备 T6 新世纪紫外可见分光光度计购于北京普析通用仪器有限公司;AR224CN 电子天平购于奥豪斯仪器公司;KH2200DE 数控超声波清洗器购于昆山禾创超声仪器公司;80-1 电动离心机购于金坛市城东新瑞仪器厂。

1.2 方法

1.2.1 绿原酸标准曲线制作 称取绿原酸标准品 0.0010 g,适量乙醇溶解后,转移至 100 mL 容量瓶定容,得到浓度为 0.1 mg/mL 溶液。准确移取 0.20、0.50、1.00、1.50、2.00、2.50、3.00 mL 的标准溶液分别于 7 个容量瓶(10 mL)中,纯乙醇定容,静置 15 min。纯乙醇作空白对照,在波长为 328 nm 下分别测吸光度 A 值^[19, 22]。以绿原酸样品浓度 C 与吸光度 A 绘制标准曲线图,得到二者关系: $A=48.1297C-0.0107$ ($R^2=0.9941$)。

1.2.2 黄果茄果绿原酸提取流程 常规流程如下:样品 \rightarrow 自然晾晒 \rightarrow 烘箱烘干 \rightarrow 粉碎、过筛 \rightarrow 超声乙醇提取 \rightarrow 离心 \rightarrow 绿原酸醇提液。

将干燥的黄果茄果粉碎成末,过孔径 40 目筛,得样品粉末。称 0.25 g 粉末置于具塞比色管中,后以拟定工艺参数提取(定 100 W 超声功率),自然冷却至室温,离心,取上清液,即为样品醇提液。

1.2.3 黄果茄果绿原酸的测定 取超声后的样品醇提液 0.5 mL,用纯乙醇定容至 10 mL,静置 15 min,在波长为 328 nm 下测吸光度,代入上述回归方程,进一步计算,即可得到绿原酸提取率。

1.2.4 单因素实验设计 单因素实验工艺参数设计见表 1。

表 1 单因素实验设计

Tab. 1 Design of one-factor experimentals

编号 No.	α 乙醇浓度 α Ethanol concentration/%	β 液料比 β Soild-liquid ratio/(mL·g ⁻¹)	γ 时间 γ Ultrasonic time/min	δ 温度 δ Temperature/°C
1	20、35、50、65、80、95	30	30	30
2	65	10、20、30、40、50、60	30	30
3	65	50	15、30、45、60、75、90	30
4	65	50	60	20、30、40、50、60、70

1.2.5 Box-Behnken 响应面实验设计 据上述实验结果,设计 Box-Behnken 响应面实验,见表 2。

表 2 Box-Behnken 实验因素与水平

Tab. 2 Factors and levels of Box-Behnken experimentals

因素 Factor	水平 Level		
	-1	0	1
α /%	60	65	70
β /(mL·g ⁻¹)	40	50	60
γ /min	50	60	70
δ /°C	30	40	50

1.2.6 DPPH 自由基清除能力 最佳工艺条件下黄果茄醇提物和 Vc 用无水乙醇配制不同浓度的待测液,并用无水乙醇配制 0.20 mmol/L DPPH 溶液^[23]。取 2 mL DPPH 溶液与 2 mL 无水乙醇或不同浓度的 2 mL 待测液避光混合,37 °C 水浴保持 30 min,517 nm 处测吸光度,分别记为 A_1 和 A_2 。DPPH 清除率计算公式:

$$\text{DPPH 清除率} = (A_1 - A_2) / A_2 \times 100\%$$

1.2.7 ABTS 自由基清除能力 分别取相同体积的 7.4×10^{-3} mol/L ABTS 水溶液和 2.6×10^{-3} mol/L 过硫酸钾水溶液混合,避光反应 12 h,备用^[24]。使用前用无水乙醇稀释,使其在 734 nm 下吸光度为 0.70 ± 0.02 。取 3.6 mL ABTS 溶液与 0.4 mL 无水乙醇或不同浓度的 0.4 mL 待测物液混合,37 °C 水浴保持 6 min,734 nm 处分别测吸光度,分别记为 A'_0 和 A'_1 。DPPH 清除率计算公式:

$$\text{ABTS 清除率} = (A'_1 - A'_2) / A'_2 \times 100\%。$$

1.3 数据处理

所有试验均重复 2 次,试验数据以平均值 \pm 标准差表示。采用 Design expert V8 软件进行响应面设计和分析,采用 Excel 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素实验

2.1.1 乙醇浓度对黄果茄绿原酸得率的影响 图 1 结果表明,乙醇浓度低于 35% 时,提取的绿原酸量增加幅度相对较小,最终稳定在 1.79% 左右。这表明,水含量较多时不利于目标产物绿原酸的提取。随着乙醇浓度逐渐增加到 65%,绿原酸提取率迅速增加到最大值 3.50%。因此,后续实验将拟定乙醇浓度在 65%。但是,乙醇浓度继续增加,反而会抑制绿原酸提取,原因可能是溶剂的低极性会致使强亲脂性等物质的溶出减少^[25]。

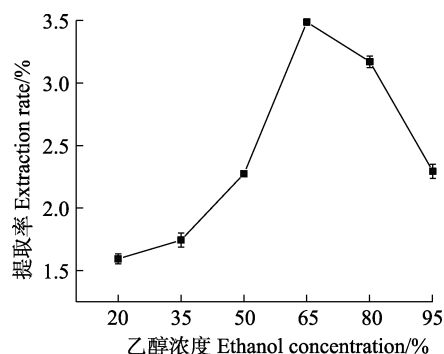


图 1 乙醇浓度对黄果茄绿原酸提取率的影响

Fig. 1 Effect of ethanol concentration on extraction rate of chlorogenic acid in *S. xanthocarpum* fruits

2.1.2 液料比对黄果茄绿原酸得率的影响 图 2 结果显示,绿原酸提取率随着液料比的增加呈逐渐增大的趋势,并在 50 mL/g 附近得到最佳值(约 4.57%),与液料比为 10 mL/g 时的绿原酸提取率相比,提取率值增加了约 2 倍。而在液料比 60 mL/g 附近的目标物提取率略微降低,其原因可能是液料比过大导致黄果茄醇提取物增加了一些难溶物,为了后续实验节省成本等原因,后续实验选取液料比的最适宜值为 50 mL/g^[18]。

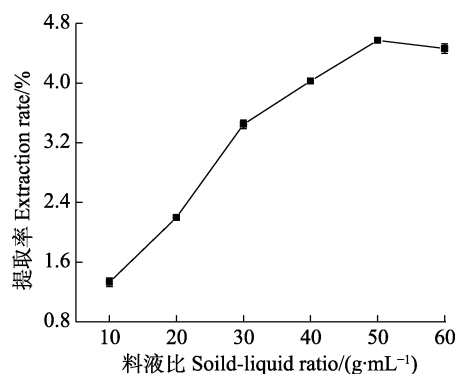


图 2 液料比对黄果茄绿原酸提取率的影响

Fig. 2 Effect of liquid-to-solid ratio on extraction rate of chlorogenic acid in *S. xanthocarpum* fruits

2.1.3 超声时间对黄果茄绿原酸得率的影响 由图 3 可知, 提取时间较短或较长均不利于黄果茄绿原酸的提取, 最适合的时间值为 60 min。提取时间较短时, 绿原酸显然不能够充分溶出, 而提取时间较长时, 样品中可能会溶出更多的非目标物, 影响到目标物的稳定。最终选定最佳时间为 60 min^[20]。

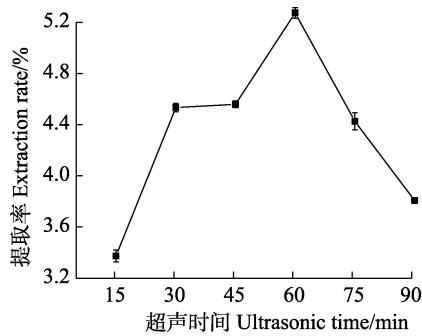


图 3 超声时间对黄果茄绿原酸提取率的影响

Fig. 3 Effect of ultrasonic time on extraction rate of chlorogenic acid in *S. xanthocarpum* fruits

2.1.4 超声温度对黄果茄绿原酸得率的影响 由图 4 可知, 较低的超声温度不能够保证足够多的黄果茄绿原酸克服其周围的环境阻力而溶出^[26], 从而导致绿原酸提取率相对较低, 而较高的温度也会抑制绿原酸提取。温度适当时, 传质扩散系数的增加会明显增加提取效率, 在 40 °C 时可以得到最优化的提取率值。

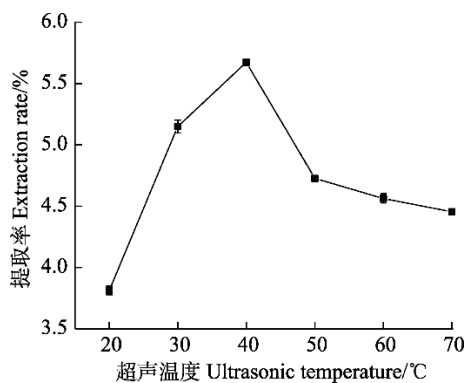


图 4 超声温度对黄果茄绿原酸提取率的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonic temperature on extraction rate of chlorogenic acid in *S. xanthocarpum* fruits

2.2 响应面分析实验

以黄果茄绿原酸的提取率为评价指标, Box-Behnken 实验结果及分析见表 3、表 4, 而由 Design Expert V11 可以得到二次多元回归方程:

$$Y = -225.05 + 4.93\alpha + 1.15\beta + 0.75\gamma + 0.94\delta - 3.75 \times 10^{-3}\alpha^2 - 2.50 \times 10^{-4}\alpha\gamma + 1.30 \times 10^{-3}\alpha\delta - 5.08 \times 10^{-3}\beta\gamma - 1.75 \times 10^{-4}\beta\delta - 5.25 \times 10^{-4}\gamma\delta - 0.04\alpha^2 - 5.56 \times 10^{-3}\beta^2 - 4.09 \times 10^{-3}\gamma^2 - 0.01\delta^2$$
, R^2 为 0.9967。

$\beta + 2.50 \times 10^{-4}\alpha\gamma + 1.30 \times 10^{-3}\alpha\delta - 5.08 \times 10^{-3}\beta\gamma - 1.75 \times 10^{-4}\beta\delta - 5.25 \times 10^{-4}\gamma\delta - 0.04\alpha^2 - 5.56 \times 10^{-3}\beta^2 - 4.09 \times 10^{-3}\gamma^2 - 0.01\delta^2$, R^2 为 0.9967。

由表 4 可知, F 值为 303.35, $P < 0.0001$, 说明本实验模型达到了极显著水平; 失拟项 P 为 0.1115 > 0.05 , 说明此项不显著。因此, 选择实验模型成功, 其预测性好、误差较小, 可进行进一步的操作。一次项 β 、 δ 和二次项 α^2 、 β^2 、 γ^2 、 δ^2 及交互项 $\alpha\beta$ 、 $\beta\gamma$ 等 8 项对响应值影响极显著, 而其他项均不显著。由比较 F 值可知, 响应增加的顺序为: 乙醇浓度 $<$ 超声时间 $<$ 超声温度 $<$ 液料比。

黄果茄中绿原酸提取率的响应面和交互作用见图 5。交互项 $\alpha\beta$ 、 $\beta\delta$ 等 2 项呈现出椭圆形, 响应面坡度较陡, 交互作用大, 但其他 4 项的响应面图坡度较缓, 交互作用不显著。

表 3 Box-Behnken 试验结果与分析

Tab. 3 Results and analysis of Box-Behnken experiments

编号 No.	α	β	γ	δ	提取率 Extraction rate/%
1	-1	-1	0	0	4.51
2	1	-1	0	0	4.93
3	-1	1	0	0	5.82
4	1	1	0	0	5.49
5	0	0	-1	-1	4.84
6	0	0	1	-1	5.01
7	0	0	-1	1	5.17
8	0	0	1	1	5.13
9	-1	0	0	-1	4.51
10	1	0	0	-1	4.42
11	-1	0	0	1	4.53
12	1	0	0	1	4.70
13	0	-1	-1	0	4.86
14	0	1	-1	0	6.67
15	0	-1	1	0	5.79
16	0	1	1	0	5.57
17	-1	0	-1	0	5.42
18	1	0	-1	0	5.40
19	-1	0	1	0	5.23
20	1	0	1	0	5.26
21	0	-1	0	-1	4.29
22	0	1	0	-1	5.19
23	0	-1	0	1	4.61
24	0	1	0	1	5.44
25	0	0	0	0	6.64
26	0	0	0	0	6.72
27	0	0	0	0	6.68
28	0	0	0	0	6.69
29	0	0	0	0	6.63

表4 方差分析
Tab. 4 Analysis of variance for regression model

项目 Item	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value	显著性 Significance
模型	16.86	14	1.20	303.35	<0.0001	**
α	2.70×10^{-3}	1	2.70×10^{-3}	0.68	0.4233	
β	2.24	1	2.24	565.49	<0.0001	**
γ	0.011	1	0.01	2.87	0.1121	
δ	0.15	1	0.15	36.58	<0.0001	**
$\alpha\beta$	0.14	1	0.14	35.43	<0.0001	**
$\alpha\gamma$	6.25×10^{-4}	1	6.25×10^{-4}	0.16	0.6975	
$\alpha\delta$	0.017	1	0.017	4.26	0.0581	
$\beta\gamma$	1.03	1	1.03	259.54	<0.0001	**
$\beta\delta$	1.23×10^{-3}	1	1.23×10^{-3}	0.31	0.5873	
$\gamma\delta$	0.01	1	0.01	2.78	0.1178	
α^2	5.55	1	5.55	1397.44	<0.0001	**
β^2	2.01	1	2.01	505.17	<0.0001	**
γ^2	1.08	1	1.08	272.69	<0.0001	**
δ^2	9.69	1	9.69	2441.20	<0.0001	**
残差	0.56	14	3.97×10^{-3}			
失拟项	0.05	10	5.01×10^{-3}	3.66	0.1115	
纯误差	5.48×10^{-3}	4	1.73×10^{-3}			
总和	16.91	28				
$R^2=0.9967$			$R_{adj}^2=0.9977$			

注: *表示差异显著 ($P<0.05$); **表示差异极显著 ($P<0.01$)。

Note: * indicates significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference ($P<0.01$).

2.3 优化与验证试验

通过响应面方程得到最佳工艺参数(64.7%乙醇浓度、55.8 mL/g 液料比、56.0 °C 超声 40.5 min)下目标产物的提取率为 6.81%。考虑到实际工业生产的可操作性,将最优化条件适当调整为 65%乙醇、60 mL/g 液料比、55 °C 下超声 40 min,则黄果茄绿原酸得率的 3 次平均值为 6.83%。此值与理论值非常接近,表明选择的响应面条件稳定可行。

2.4 提取物体外抗氧化能力

2.4.1 DPPH 自由基清除能力 如图 6 所示,与 Vc 溶液的 DPPH 清除率不同,提取液的 DPPH 清除率在 10~60 mg/L 范围内随着浓度增加而增大,呈现出明显的线性关系,且二者的 IC_{50} 值分别为 18.4、55.7 mg/L。提取液中绿原酸等的酚羟基可提供质子,因此对清除 DPPH 有一定的效果。

2.4.2 ABTS 自由基清除能力 如图 7 所示,在 5~30 mg/L 测试范围内,提取液的 ABTS 清除率与其浓度线性相关性强,在提取液为 30 mg/L 时,提取液的 ABTS 清除率达到最大值,为 65.5%。

Vc 溶液和提取液的 IC_{50} 值分别为 6.5、20.1 mg/L,因此 Vc 溶液的清除率在测试范围内更好一些。

3 讨论

植物内次生代谢产物的绿原酸主要来源于金银花花蕾、杜仲叶、咖啡豆等,其提取物不仅可用于日用化工和医药等行业^[27],还可作为新型饲料添加剂用于畜禽生产^[28]。用水、乙醇或二者混合物等作为溶剂可以促进植物中绿原酸的提取,尤其添加醇水混合物提取物中的绿原酸与其天然状态更接近,但仅添加水作溶剂,其高沸点会致使提取物杂质较多,不利于后续的纯化^[15]。超声、微波和二者协同辅助作用均有利于目标物的提取,但考虑到微波参与时,高介电常数的水更有利于微波吸收,而超声辅助能够显著地克服萃取时间较长、回收率较低等缺点^[29]。此外,蒲公英叶和野菊花等作为绿原酸的新来源,提取率分别为 3.92%和 2.86%,尤其梔果中绿原酸提取率可高达 5.68%^[19, 30]。因此,本研究将超声辅助醇提法应用到黄果茄中绿原酸的提取中,单因素实

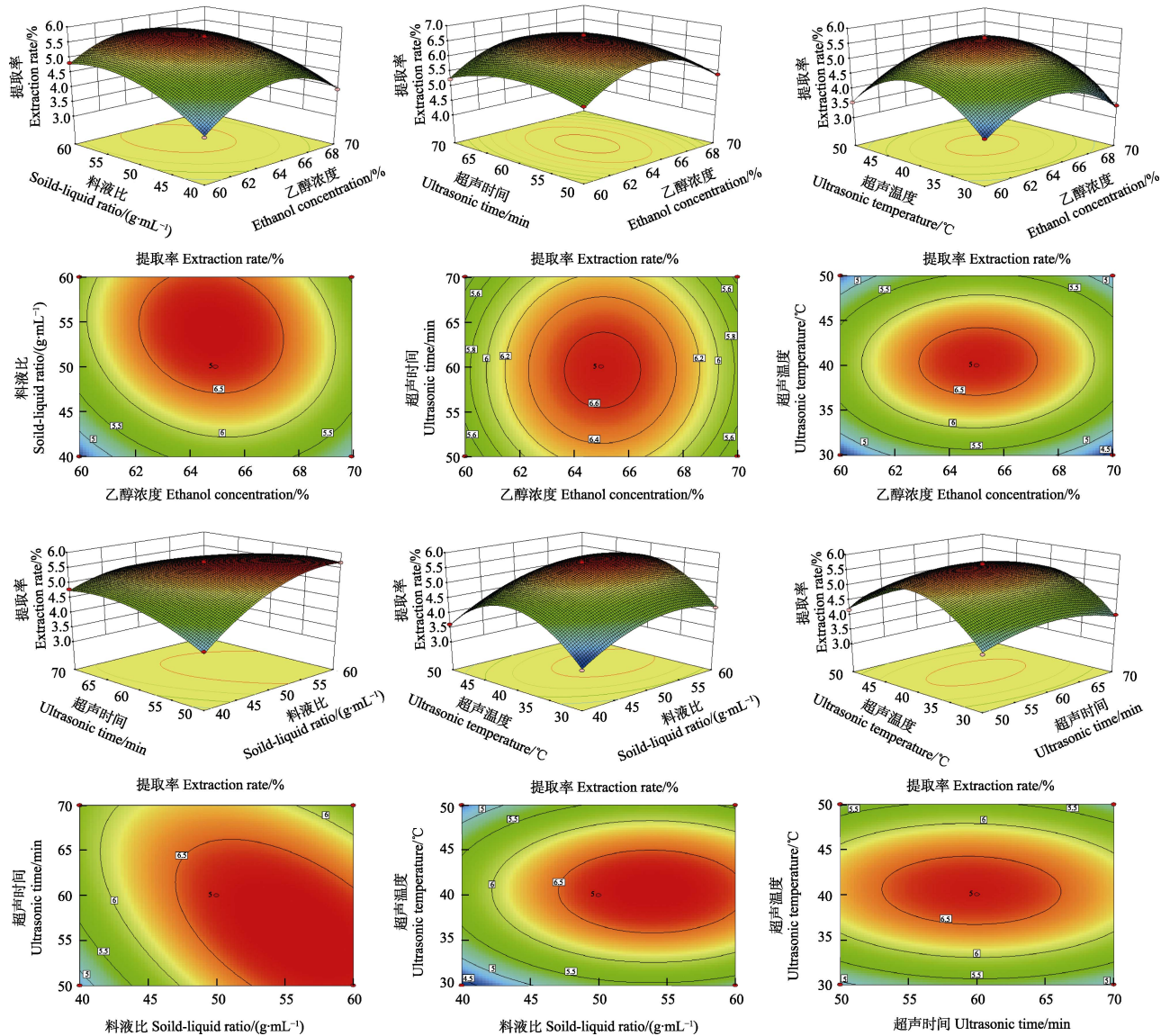


图 5 交互作用对绿原酸提取率的影响

Fig. 5 Effect of interaction on extraction rate of chlorogenic acid

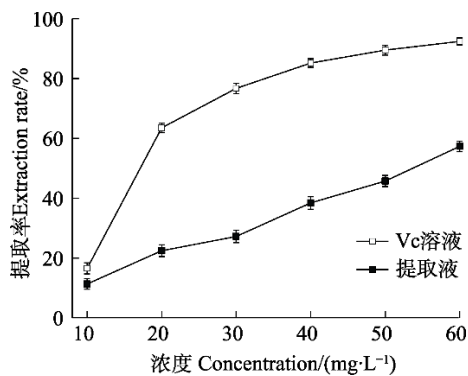


图 6 DPPH 清除作用

Fig. 6 Scavenging effect on DPPH

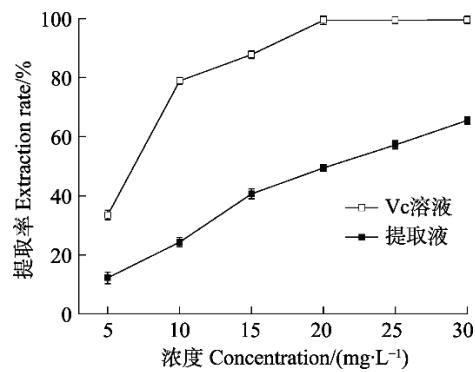


图 7 ABTS 清除作用

Fig. 7 Scavenging effect on ABTS

验确定液料比等因素对提取率的影响，还用响应面法建立二次回归模型，得到最佳工艺条件，后

修正的条件为 65%乙醇浓度、60 mL/g 液料比、55 °C下超声 40 min，绿原酸产率可达到 6.83%。

在亚健康状况下, 人体细胞代谢产生的自由基可能会导致身体机能下降。植物粗提物中成分较为复杂, 为了初步判断其组分或类型等对自由基清除能力的影响, 本研究选用了 DPPH 和 ABTS 等 2 种抗氧化体系来进一步评价黄果茄果醇提物的抗氧化性能^[31]。黄果茄果醇提物显然具有较好的抗氧化活性, 其最佳工艺条件下提取液的 DPPH 和 ABTS 自由基清除能力的 IC₅₀ 分别为 55.7、20.1 mg/L。该实验可为探索黄果茄中绿原酸的药理作用等应用提供依据, 还可为实现黄果茄中绿原酸作为药用、保健品、畜禽生产等提供借鉴。

参考文献

- [1] 李文新, 黄雪英, 祁超, 刘实, OSAMU K, KUCHHI U. 黄果茄果实杀螺成分的分离和结构解析[J]. 农药, 2007, 46(9): 591-593.
LI W X, HUANG X Y, QI C, LIU S, OSAMU K, KUCHHI U. The molluscicidal component isolation and structure determination of *Solanum xanthocarpum*[J]. Agrochemicals, 2007, 46(9): 591-593. (in Chinese)
- [2] XU Z P, LIU Y, LI X M, WANG S Y, JIANG P, PAN J, JIANG Y K, KUANG H X, YANG B Y. Xanthosaponins A and B, two unusual steroidal saponins with an unprecedented 16,17-*seco*-cholestane skeleton from *Solanum xanthocarpum* and their cytotoxic activities[J]. New Journal of Chemistry, 2022, 46(4): 1815-1820.
- [3] 刁克鹏, 李伟, 向康林, 赵琳, 戴胜军. 黄果茄中 1 个新的黄酮类化合物[J]. 中草药, 2020, 51(15): 3845-3849.
DIAO K P, LI W, XIANG K L, ZHAO L, DAI S J. A new flavonoid isolated from fruits of *Solanum virginianum*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(15): 3845-3849. (in Chinese)
- [4] CHAUDHARY M K, MISRA A, SRIVASTAVA S. Phytochemical analysis and simultaneous quantification of solasodine and diosgenin content in different parts of *Solanum xanthocarpum* Schrad. & Wendl. by a validated high-performance thin-layer chromatography method[J]. Journal of Planar Chromatography, 2021, 34(1): 95-102.
- [5] 李学玲, 张碧程, 李茜. 顶空固相微萃取-气质联用分析黄果茄果实的挥发性成分[J]. 云南化工, 2020, 47(5): 65-68.
LI X L, ZHANG B C, LI X. Volatile components analysis from fruit of *Solanum Xanthocarpum* using HS-SPME-GCMS[J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(5): 65-68. (in Chinese)
- [6] 李学玲, 许苑南, 龙佳敏, 张建强, 陈梅. 黄果茄总黄酮的提取工艺优化与体外抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(23): 143-149.
LI X L, XU Y N, LONG J M, ZHANF J Q, CHEN M. Study on optimization of extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from *Solanum virginianum*[J]. Food Research and Development, 2020, 41(23): 143-149. (in Chinese)
- [7] SHIVNATH N, SIDDIQUI S, RAWAT V, KHAN M S, ARSHADA M. *Solanum xanthocarpum* fruit extract promotes chondrocyte proliferation *in vitro* and protects cartilage damage in collagenase induced osteoarthritic rats[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2021, 274(11): 1-12.
- [8] USMAN H, ULLAH M A, JAN H, SIDDIQUAH A, DROUET S, ANJUM S, GIGLIOLI-GUVIARC'H N, HANO C, ABBAS B H. Interactive effects of wide-spectrum monochromatic lights on phytochemical production, antioxidant and biological activities of *Solanum xanthocarpum* callus cultures[J]. Molecules, 2020, 25(9): 1-25.
- [9] GUPTA R K, SWAIN S R, SAHOO J, CHAUDHARY S, SARA U S. Comparative antioxidant and hepatoprotective potential quercetin and corycavidine from *Hedyotis corymbosa* (L.) Lam. and *Solanum xanthocarpum* Schrad & Wendl.[J]. Indian Journal of Experimental Biology, 2021, 58(11): 776-784.
- [10] NATARAJAN P, SORIMUTHU A, MURUGANANTHAM S, MARIMUTHU M. Antibacterial activity of extracts of *Solanum xanthocarpum*, *Aegle marmelos* and *Capparis spinosa* against antibiotic-resistant *Staphylococcus cohnii*[J]. International Journal of Pharmaceutical Investigation, 2020, 10(4): 559-563.
- [11] CHOUDHARY P K, KHANDELWAL V, GUPTA S, CHAUBEY K K, SINGH S V, GOEL A, BHATIA A K. Immunosuppressive and anti-cancer potential of aqueous extract of *Solanum Xanthocarpum*[J]. Indian Journal of Traditional Knowledge, 2019, 18(3): 451-457.
- [12] REDDY M N, BHATT M. Inhibition of metastasis and suppression of pERK1/2 and pFAK expression by *Solanum xanthocarpum* crude extracts in human lung cancer cell line A549 *in vitro*[J]. Indian Journal of Natural Products and Resources, 2021, 12(1): 34-42.
- [13] ZAMAN M I, KHAN S U, SHAHNAZ A, NIAZ A, KHAN S, MUHAMMAD N, KHAN M, SHAH K H. *Solanum xanthocarpum* plant as a potential low cost adsorbent for the removal of methylene blue from aqueous solutions[J]. Environmental Progress and Sustainable Energy, 2016, 38(S1): 166-175.
- [14] 李学玲, 李茜, 徐怀生, 张建强. 响应面法优化黄果茄中绿原酸的提取工艺[J]. 普洱学院学报, 2021, 37(6): 15-20.
LI X L, LI X, XU H S, ZHANG J Q. Optimization of extrac-

- tion technology of chlorogenic acid from *Solanum xanthocarpum* by response surface methodology[J]. Journal of Pu'er University, 2021, 37(6): 15-20. (in Chinese)
- [15] 张艳, 严晓波, 姚秋萍, 卫亚丽. 绿原酸的提取分离及其在食品中的应用[J]. 现代食品, 2021, 7(17): 19-22.
ZHANG Y, YAN X B, YAO Q P, WEI Y L. Extraction and separation of chlorogenic acid and its application in food[J]. Modern Food, 2021, 7(17): 19-22. (in Chinese)
- [16] 樊荣, 羿国娟, 鲁兰, 曾铭, 周杨杨, 程强. 绿原酸及其13种体内主要代谢物的体外抗菌作用研究[J]. 中草药, 2020, 51(24): 6239-6245.
FAN R, YI G J, LU L, ZENG M, ZHOU Y Y, CHENG Q. Antimicrobial activities of chlorogenic acid and 13 main metabolites *in vitro*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(24): 6239-6245. (in Chinese)
- [17] 胡玲玲, 胡扬, 宋辉, 孙向明, 綦崢, 宗政, 汲晨锋, 徐蓓蕾, 薛屹, 刘博男. 绿原酸在肝微粒体和肠道菌群中的体外代谢研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(20): 8198-8206.
HU L L, HU Y, SONG H, SUN X M, QI Z, ZONG Z, JI C F, XU B L, XUE Y, LIU B N. *In vitro* research on metabolism of chlorogenic acid in liver microsomes and intestinal flora[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(20): 8198-8206. (in Chinese)
- [18] 王娜, 李小云, 余秋颖, 宁灿灿, 李正邦, 李军伟, 任红涛. 响应面法优化花生红衣绿原酸微波超声提取工艺[J]. 花生学报, 2021, 50(4): 36-42.
WANG N, LI X Y, YU Q Y, NING C C, LI Z B, LI J W, REN H T. Optimization on microwave-ultrasonic extraction of chlorogenic acid from peanut skin using response surface method[J]. Journal of Peanut Science, 2021, 50(4): 36-42. (in Chinese)
- [19] 刘霞, 方小军, 彭敏娟. 酶法辅助聚乙二醇-200 提取野菊花中绿原酸的工艺及数学模型分析[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(5): 131-137.
LIU X, FANG X J, PENG M J. Optimization and mathematical model analysis on extraction of chlorogenic acid from *Chrysanthemum indicum* by enzyme-assisted polyethylene glycol-200[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(5): 131-137. (in Chinese)
- [20] 吴红艳, 彭呈军, 邓后勤. 响应面法优化超声辅助提取杜仲叶中的绿原酸[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(6): 112-117.
WU H Y, PENG C J, DENG H Q. Optimization of ultrasound-assisted extraction of chlorogenic acid from *Eucommia ulmoides* leaves by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2020, 41(6): 112-117. (in Chinese)
- [21] 付调坤, 周伟, 廖良坤, 付琼, 李积华. 响应面法优化香水莲花甾醇的超声提取工艺[J]. 热带作物学, 2020, 41(12): 2541-2547.
FU T K, ZHOU W, LIAO L K, FU Q, LI J H. Optimization of ultrasonic extraction technology of *Nymphaea Hybrid* sterols by response surface method[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2020, 41(12): 2541-2547. (in Chinese)
- [22] 李华生, 周振华, 龙鸣. 响应面法优化金银花中绿原酸与总黄酮加压提取工艺[J]. 食品科技, 2020, 45(5): 215-220.
LI H S, ZHOU Z H, LONG M. Optimization of pressure extraction process of chlorogenic acid and total flavonoids from honeysuckle by response surface methodology[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(5): 215-220. (in Chinese)
- [23] 王翔, 彭胜, 彭密军. 杜仲叶总多酚超声波-微波辅助提取及其抗氧化活性研究[J]. 林产化学与工业, 2018, 38(5): 85-92.
WANG X, PENG S, PENG M J. Extraction of total polyphenols from *Eucommia ulmoides* Oliver leaves assisted by ultrasound-microwave and their antioxidant activity[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2018, 38(5): 85-92. (in Chinese)
- [24] THAIPONG K, BOONPRAKOB U, CROSBY K, CISNEROS-ZEVALLOS L, BYRNE D H. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP, and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19(6/7): 669-675.
- [25] 岳新迪, 姜敏, 徐传远. 响应面法优化提取金银木果实绿原酸[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(8): 101-105.
YUE X D, JIANG M, XU C Y. Optimization of extraction of chlorogenic acid from the fruits of *Lonicera maackii* (Rupr.) Maxim. by response surface methodology[J]. Cereals and Oils, 2021, 34(8): 101-105. (in Chinese)
- [26] 林春松, 黄青云, 张雪芹, 刘鸿洲, 陈淳, 徐凤侠. 苦丁茶中绿原酸及其异构体的提取变化分析[J]. 亚热带植物科学, 2021, 50(3): 163-169.
LIN C S, HUANG Q Y, ZHANG X Q, LIU H Z, CHEN C, XU S X. Variations of chlorogenic acid isomers in the solvent extraction from Kudingcha (*Ilex kaushue*)[J]. Subtropical Plant Science, 2021, 50(3): 163-169. (in Chinese)
- [27] 王庆华, 杜婷婷, 张智慧, 季鸣, 胡海宇, 陈晓光. 绿原酸的药理作用及机制研究进展[J]. 药理学, 2020, 55(10): 2273-2280.
WANG Q H, DU T T, ZHANG Z H, JI M, HU H Y, CHEN X G. Advances in research on the pharmacological effects and mechanism of action of chlorogenic acid[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2020, 55(10): 2273-2280. (in Chinese)
- [28] 万凡, 侯扶江, 伊宝, 张宏福. 绿原酸的生理功能及其在畜禽生产中的应用[J]. 动物营养学报, 2021, 33(5):

- 2416-2427.
- WAN F, HOU F J, YI B, ZHANG H F. Physiological functions of chlorogenic acid and its application in livestock and poultry production[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2021, 33(5): 2416-2427. (in Chinese)
- [29] 张豫丹, 许自成, 李俊领, 段旺军, 马晓寒, 贾玮. 绿原酸的提取及其抑菌作用研究进展[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(2): 113-120.
- ZHANG Y D, XU Z C, LI J L, DUAN W J, MA X H, JIA W. Research progress on extraction and antibacterial effects of chlorogenic acid[J]. Storage and Process, 2022, 22(2): 113-120. (in Chinese)
- [30] 易梦媛, 邓爱华, 刘凤英, 王云, 谢鹏, 卢俊明, 王志. 响应面法优化栀子中绿原酸的提取工艺[J]. 农产品加工, 2019, 18(5): 26-29.
- YI M Y, DENG A H, LIU F Y, WANG Y, XIE P, LU J M, WANG Z. Optimization of extraction process of chlorogenic acid from *Gardenia jasminoides* Ellis by response surface methodology[J]. Farm Products Processing, 2019, 18(5): 26-29. (in Chinese)
- [31] 郁峰, 王志宏, 张光耀, 杜志云, 彭密军. 天然低共熔溶剂提取杜仲叶绿原酸及其抗氧化活性[J]. 林产化学与工业, 2022, 42(1): 101-109.
- YU F, WANG Z H, ZHANG G Y, DU Z Y, PENG M J. Extraction of chlorogenic acid from *Eucommia ulmoides* leaves by natural deep eutectic solvent and its antioxidant activity[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2022, 42(1): 101-109. (in Chinese)