



张敏,范丹娜,王文君,等.山蜡梅叶黄酮和多糖同步提取工艺优化及其体外抗氧化活性研究[J].江西农业大学学报,2025,47(4):1093-1106.

ZHANG M,FAN D N,WANG W J,et al.Optimization of synchronous extraction technology of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves and their *in vitro* antioxidant activity[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(4):1093-1106.

山蜡梅叶黄酮和多糖同步提取工艺优化及其体外抗氧化活性研究

张敏^{1,2},范丹娜^{1,2},王文君^{1,2},郭春兰³,胡文兵^{1,2},陈凌利^{1,2},陈慧^{1,2*}

(1.江西农业大学 食品科学与工程学院,江西 南昌 330045;2.江西省天然产物与功能食品重点实验室,江西 南昌 330045;3.江西农业大学 林学院,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】旨在探究山蜡梅叶黄酮和多糖的最佳同步提取工艺并评价其体外抗氧化活性,为山蜡梅叶资源的综合利用和抗氧化功能产品的开发提供理论依据。【方法】以山蜡梅叶为试验材料,其黄酮和多糖的总得率为评价指标,采用乙醇提取法通过单因素试验、正交试验优化山蜡梅叶黄酮和多糖的同步提取工艺,并利用柱层析法进一步同时分离纯化提取物中的黄酮和多糖组分。通过DPPH自由基、ABTS⁺自由基清除试验、FRAP试验评价提取物(粗提物)及纯化后产物(纯化物)的体外抗氧化能力。【结果】(1)山蜡梅叶黄酮和多糖的最佳同步提取工艺为:超声时间30 min,超声功率100 W,乙醇体积分数30%,超声温度50℃,该条件下山蜡梅叶黄酮和多糖总得率为10.70%,进一步分离纯化后其黄酮和多糖的质量分数分别提高了71.17%和47.26%。(2)在质量浓度0.1~0.6 mg/mL范围内,山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物对DPPH自由基的清除率分别为2.98~30.09%,5.69~48.28%;对ABTS⁺自由基的清除率分别为50.48~75.71%,48.99~89.05%;在质量浓度0.02~0.1 mg/mL范围内,山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物的FRAP值分别为0.022 0~0.340 3、0.032 0~0.343 9,均显著低于VC($P<0.01$)。【结论】本研究建立的同步提取工艺稳定、可行,且AB-8大孔树脂对山蜡梅叶中的黄酮和多糖组分具有显著的同时纯化效果,纯化前后的产物均具有一定抗氧化活性且纯化物的抗氧化活性更为突出。

关键词:山蜡梅叶;黄酮;多糖;同步提取;体外抗氧化活性

中图分类号:TS201.2 文献标志码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1000-2286(2025)04-1093-14

CSTR:32399.14.aauj.2025093



Optimization of synchronous extraction technology of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves and their *in vitro* antioxidant activity

ZHANG Min^{1,2}, FAN Danna^{1,2}, WANG Wenjun^{1,2}, GUO Chunlan³,
HU Wenbing^{1,2}, CHEN Lingli^{1,2}, CHEN Hui^{1,2*}

收稿日期:2025-04-16 修回日期:2025-04-30

基金项目:国家自然科学基金项目(82460646)和江西省自然科学基金项目(20224BAB216091)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (82460646) and Jiangxi Natural Science Foundation Project (20224 BAB 216091)

作者简介:张敏,硕士生,orcid.org/0009-0008-4148-3631,1467548199@qq.com; *通信作者:陈慧,讲师,博士,主要从事食品营养与安全研究,orcid.org/0000-0003-1897-6303,ch2568@jxau.edu.cn。

©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1.College of Food Science and Engineering ,Jiangxi Agricultural University ,Nanchang 330045 , China ;
2.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Natural Products and Functional Foods , Nanchang 330045 , China ;
3.College of Forestry ,Jiangxi Agricultural University ,Nanchang 330045, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the optimal synchronous extraction technology of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves and evaluate their *in vitro* antioxidant activity, providing a theoretical basis for the comprehensive utilization of *Chimonanthus nitens* leaves resources and the development of antioxidant functional products. [Method] Using *Chimonanthus nitens* leaves as test materials and the total yield of flavonoids and polysaccharides as the evaluation index, the synchronous extraction process of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* leaves was optimized by ethanol extraction method through single-factor tests and orthogonal tests. Additionally, the extract was further separated and purified by column chromatography to obtain flavonoids and polysaccharides. The antioxidant activities of the crude extract and purified product were evaluated by DPPH radical, ABTS⁺ radical scavenging tests, and FRAP assay. [Result] (1) The optimal synchronous extraction process for flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves was: ultrasonic time of 30 min, ultrasonic power of 100 W, ethanol volume fraction of 30%, and ultrasonic temperature of 50 °C. The total yield of flavonoids and polysaccharides was 10.70%. After further separation and purification, the contents of flavonoids and polysaccharides were increased by 71.17% and 47.26%, respectively. (2) Within the mass concentration range of 0.1–0.6 mg/mL, the scavenging rates of DPPH radicals by the crude extracts and purified products were 2.98–30.09% and 5.69–48.28%, respectively. The scavenging rates of ABTS⁺ radicals were 50.48–75.71% and 48.99–89.05%, respectively. Within the mass concentration range of 0.02–0.1 mg/mL, the FRAP values of both the crude extracts and purified products were 0.022 0–0.340 3 and 0.032 0–0.343 9, respectively, both were significantly lower than that of VC ($P<0.01$). Overall, the purified products had better radical scavenging effects than the crude extracts, but both demonstrated relatively weak ferric ion-reducing capacity. [Conclusion] The synchronous extraction process established in this study demonstrates robust stability and practicable. AB-8 macroporous resin exhibits significant simultaneous purification effects on both flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves. Both crude and purified products display measurable antioxidant activity, with the purified fractions showing markedly enhanced efficacy.

Keywords: *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves; flavonoids; polysaccharides; synchronous extraction; *in vitro* antioxidant activity

【研究意义】山蜡梅(*Chimonanthus nitens* Oliv.)是我国特有的蜡梅科蜡梅属常绿灌木,又称亮叶蜡梅,分布于我国安徽、浙江、江西、云南等省区^[1]。其叶具有清热解毒、防治感冒、止泻作用,也可用于上呼吸道疾病、手足口病、疱疹性咽峡炎等疾病,疗效确切,安全性高^[2]。丰富的生物活性与其化学组分密切相关,包括挥发油、香豆素、生物碱、黄酮、多糖等^[3–5]。这些活性成分不仅为山蜡梅叶的药用价值提供了坚实的物质基础,也为其进一步的开发利用提供了科学依据。深入研究山蜡梅叶活性成分的提取工艺,不仅有助于充分利用这一珍贵的自然资源,还能为开发新型抗氧化功能产品提供理论依据和技术支持,具有重要的科学意义和应用价值。【前人研究进展】山蜡梅叶中富含的黄酮成分已被证实具有抗氧化、护肝及调节肠道稳态等活性作用^[6];而山蜡梅叶多糖同样具有抗氧化活性,调节肠道菌群以及增强机体免疫力等作用^[7–8]。目前,对于山蜡梅叶黄酮或多糖提取的研究报道较多,主要针对超声时间、超声功率、超声温度、乙醇体积分数、料液比等影响因素对黄酮、多糖组分的提取进行工艺优化,其中超声时间和乙醇体积分数对山蜡梅叶总黄酮的得率具有显著性影响,而超声时间、超声功率及料液比可显著影响山蜡梅叶多糖的得率^[9–10]。其次,温度对山蜡梅叶黄酮和多糖同时提取得率具有重要的影响,植物多糖的提取较多采用热水浸提法^[12–13],而植物黄酮在高温条件下其氧化降解速率加快^[14–16]。因此,确定本研究中山蜡

梅叶黄酮和多糖同步提取需要探究的4个工艺参数为超声时间、超声功率、超声温度、乙醇体积分数。多项研究结果显示黄酮与多糖化合物在抗氧化活性上表现出协同效应,如异叶青兰黄酮与多糖混合物的清除效果优于其黄酮与多糖单独对羟基自由基和超氧阴离子的清除作用^[17],毛建草黄酮和多糖按一定比例复配后对ABTS⁺自由基和DPPH自由基具有协同清除作用^[18]。山蜡梅叶中的黄酮和多糖也具有潜在的抗氧化协同增强效应。

【本研究切入点】尽管前人在山蜡梅叶黄酮和多糖的提取及活性研究方面取得了一定成果,但仍存在一些局限性。前人研究多关注于单一活性成分的提取、分离和纯化,虽然提高了单一活性成分的纯度,但存在溶剂消耗大、提取效率低、资源浪费等问题。此外,山蜡梅多为野生资源,尚未实现人工种植的广泛推广,资源相对匮乏^[19]。在资源有限的情况下,如何提高资源利用率,实现资源的可持续利用是一个亟待解决的问题。与传统的单一组分提取方法相比,同步提取黄酮和多糖具有提高提取物的生物活性和发挥协同效应、减少溶剂的使用量、降低提取成本和能源消耗等优势。【拟解决的关键问题】本研究拟以山蜡梅叶黄酮和多糖为提取目标活性成分,采用超声辅助溶剂浸提法同步提取山蜡梅叶黄酮和多糖,以黄酮和多糖的总得率为评价指标,通过单因素试验、正交试验对同步提取工艺参数进行优化,之后采用柱层析法同时纯化山蜡梅叶黄酮和多糖,并对纯化前后的山蜡梅叶黄酮和多糖提取物进行体外抗氧化活性评价,从而为山蜡梅叶资源的综合利用和抗氧化功能产品的开发提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

山蜡梅叶购自江西省婺源县钟吕堂生物科技有限公司,于2022年7月份采自3年生山蜡梅树,采后立即干燥。

1.2 试验方法

1.2.1 样品前处理方法

将山蜡梅叶置于电热恒温鼓风干燥箱(上海跃进医疗器械有限公司)中60℃下干燥15 h,用粉碎机粉碎,过60目筛,备用。

1.2.2 芦丁标准曲线

根据参考文献^[20]的方法稍作修改,精确吸取0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2 mL的1 mg/mL芦丁标准溶液,分别置于6个10 mL容量瓶中,加5%的亚硝酸钠0.4 mL,放置6 min,再加10%的硝酸铝0.4 mL,放置6 min,最后加4%的氢氧化钠4 mL,用60%的乙醇定容至刻度,摇匀,放置15 min后用酶标仪(Molecular Devices美谷分子仪器有限公司)在510 nm处测定吸光度。以芦丁质量浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,建立线性回归方程。根据试验数据,得到回归方程: $Y=5.722\ 8X-0.006\ 5$, $R^2=0.998\ 8$ (图1)。

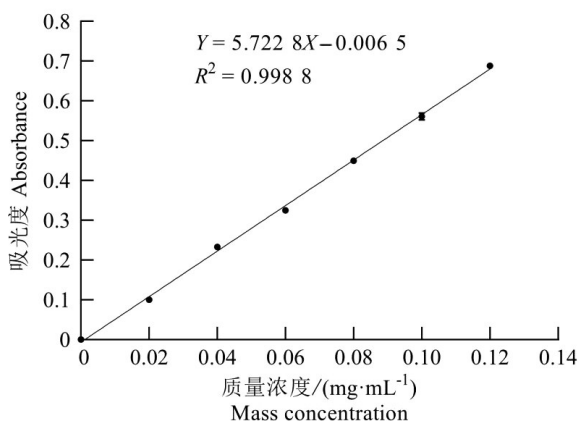


图1 芦丁标准曲线

Fig.1 Standard curve of rutin

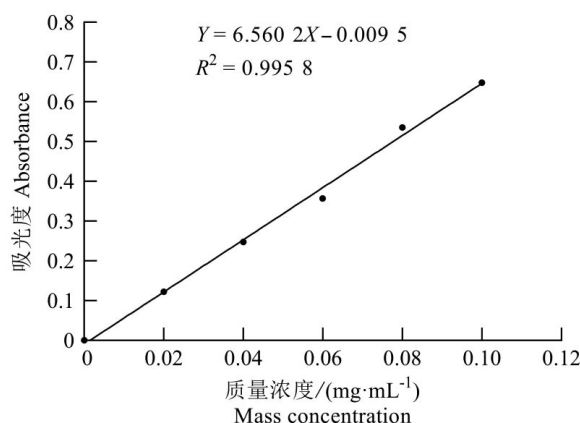


图2 葡萄糖标准曲线

Fig.2 Standard curve of glucose

1.2.3 葡萄糖标准曲线

根据参考文献[20]的方法稍作修改,精确吸取0,0.04,0.08,0.12,0.16,0.2 mL的0.1 mg/mL葡萄糖标准溶液,分别置于试管中,加蒸馏水0.2,0.16,0.12,0.08,0.04,0 mL,加5%重蒸苯酚溶液0.2 mL,摇匀后迅速加入浓硫酸1 mL,静置30 min,用酶标仪在490 nm波长处测吸光度。以葡萄糖标准品质量浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,建立线性回归方程。根据试验数据,得到回归方程: $Y=6.560\ 2X-0.009\ 5$, $R^2=0.995\ 8$ (图2)。

1.2.4 山蜡梅叶黄酮和多糖得率的测定

精确称取山蜡梅叶粉末1 g至50 mL离心管中,并加入一定量特定体积分数的乙醇溶液,在试验选定的超声功率和超声温度下,进行相应时间的超声(昆山市超声仪器有限公司),超声结束后,将所得的山蜡梅叶提取液以4 000 r/min的转速离心(上海安亭科学仪器厂)15 min,离心后的上清液转移至50 mL容量瓶中,用对应体积分数的乙醇溶液定容,摇匀。精确吸取滤液0.2 mL至10 mL容量瓶中,依据上述芦丁和葡萄糖标准曲线中的方法进行显色,测定相应吸光度,并根据所得的回归方程,计算样品中黄酮和多糖的得率。

$$\text{黄酮得率} = \frac{c_1 \times 10 \times 50}{0.2 \times m \times 1000} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{多糖得率} = \frac{c_2 \times 50}{0.2 \times m \times 1000} \times 100\% \quad (2)$$

式(1)、(2)中: c_1 为山蜡梅叶粉末经超声辅助乙醇提取后所得黄酮的质量浓度,mg/mL; c_2 为山蜡梅叶粉末经超声辅助乙醇提取后所得多糖的质量浓度,mg/mL; m 为山蜡梅叶粉末的质量,g。

1.2.5 单因素试验

称取1 g山蜡梅叶粉末于50 mL离心管中,加入40%、50%、60%、70%、80%的乙醇25 mL(即料液比1:25),分别在100,125,150,175,200 W的超声功率,30,40,50,60,70 °C下处理10,20,30,40,50 min,以4 000 r/min的转速离心15 min,上清液转移至50 mL容量瓶中,用60%乙醇定容。分别取滤液0.2 mL于10 mL容量瓶中,按照标准曲线中黄酮和多糖的显色方法显色,测定吸光度,计算黄酮和多糖的得率。

1.2.6 正交试验

为了综合考虑各因素相互作用对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率的影响,在单因素试验的基础上进行 $L_9(3^4)$ 正交试验,同时对试验结果进行方差分析,筛选最佳同步提取工艺条件。正交试验因素水平表如表1所示。

表1 正交试验因素水平表

Tab.1 Factor level table of orthogonal experiments

水平 Level	因素 Factors			
	A 超声时间/min	B 超声功率/W	C 超声温度/°C	D 乙醇体积分数/%
	Ultrasonic time	Ultrasonic power	Ultrasonic temperature	Ethanol volume fraction
1	20	100	50	30
2	30	125	60	40
3	40	150	70	50

1.2.7 山蜡梅叶粗提物中黄酮和多糖的纯化

参考谢青云等^[21]的方法略做修改。AB-8大孔吸附树脂(广州伟伯科技有限公司)用95%乙醇浸泡过夜使其充分溶胀,95%乙醇冲洗柱床,再用蒸馏水冲洗至无醇味。用5%盐酸冲洗柱床至溶液为酸性,浸泡2 h后用蒸馏水冲洗至中性。再用5%氢氧化钠溶液冲洗柱床至溶液为碱性,浸泡2 h后用蒸馏水冲洗至中性。采用山蜡梅叶黄酮和多糖最佳同步提取工艺提取,得到山蜡梅叶黄酮和多糖提取液。部分提取液旋蒸(北京桑翌试验仪器研究所)后冷冻干燥(宁波新芝生物科技股份有限公司)48 h得到山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物,剩余样液经过活化后的AB-8大孔树脂分离纯化后用30%乙醇洗脱,收集洗脱液,旋蒸浓缩后冷冻干燥48 h得到山蜡梅叶黄酮和多糖纯化物。

1.2.8 山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物中黄酮和多糖质量分数的测定

称取一定量冻干后的粗提物和纯化物,用30%乙醇配制成1 mg/mL的粗提物和纯化物溶液。吸取

0.2 mL至10 mL容量瓶中,依据上述芦丁和葡萄糖标准曲线中的方法进行显色,测定相应吸光度,并根据所得的回归方程,计算黄酮和多糖的实际质量浓度,再除以其理论质量浓度1 mg/mL,即得到黄酮和多糖的质量分数。

1.2.9 体外抗氧化试验

(1) DPPH 自由基清除能力测定。参考李震等^[22]的方法略作修改。移取0.1 mmol/L的DPPH-乙醇溶液1.0 mL,分别加入至含1.0 mL不同梯度质量浓度(0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6 mg/mL)的VC、山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物以及纯化样品溶液的试管中,避光反应30 min,作为试验组;移取DPPH-乙醇溶液1.0 mL,加入至含1.0 mL对应样品溶液的溶剂的试管中,作为空白组;移取无水乙醇1.0 mL,分别加入至含有1.0 mL不同梯度质量浓度的VC、山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物以及纯化样品溶液的试管中,作为对照组。各组均在517 nm波长处测定吸光度,每组进行3次平行试验。

$$\text{DPPH 自由基清除率} = [1 - (A_1 - A_2) / A_0] \times 100\% \quad (3)$$

式(3)中, A_0 为空白组的吸光度, A_1 为样品的吸光度, A_2 为对照组的吸光度。

(2) ABTS⁺自由基清除能力测定。参考王敬赫等^[20]的方法略作修改。以2.45 mmol/L的过硫酸钾溶液为溶剂配制7 mmol/L的ABTS母液,避光静置16 h后使用。去离子水稀释混合液使其在734 nm处吸光度为 0.70 ± 0.01 。移取0.03 mL不同梯度质量浓度(0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6 mg/mL)的VC、山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物以及纯化样品溶液至酶标板中,再加入0.17 mL ABTS工作液,避光反应10 min,作为试验组;移取0.03 mL不同梯度质量浓度的VC、山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物以及纯化样品溶液至酶标板中,加蒸馏水0.17 mL,混合均匀,作为对照组;移取0.03 mL对应样品溶液的溶剂至酶标板中,分别加入ABTS工作液0.17 mL,混合均匀,作为空白组。各组均在734 nm波长测吸光度,每组进行3次平行试验。

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率} = [1 - (A_1 - A_2) / A_0] \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中, A_0 为空白组的吸光度, A_1 为样品的吸光度, A_2 为对照组的吸光度。

(3) FRAP还原能力测定。参照王筱玥等^[23]和蔡春燕等^[24]的方法略作修改。将300 mmol/L的醋酸缓冲液、10 mmol/L的TPTZ溶液和20 mmol/L的FeCl₃溶液按照体积比10:1:1混合,于37 °C反应10 min,得到FRAP工作液。称取适量FeSO₄·7H₂O加超纯水制备成浓度为1.6 mmol/L的FeSO₄母液,稀释母液制备0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0,1.2,1.4,1.6 mmol/L系列浓度FeSO₄标准溶液。取0.1 mL不同浓度梯度的FeSO₄标准溶液加入3 mL FRAP工作液,37 °C反应10 min于593 nm处测定吸光度。以FeSO₄浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,建立线性回归方程,根据试验数据得到回归方程 $Y = 0.3288X + 0.728$, $R^2 = 0.9976$ 。取0.1 mL不同质量浓度梯度的山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物以及纯化样品,加入3 mL FRAP工作液,37 °C反应10 min,以VC为阳性对照,于593 nm测定吸光度,进行3次平行试验。

1.3 数据处理与统计分析

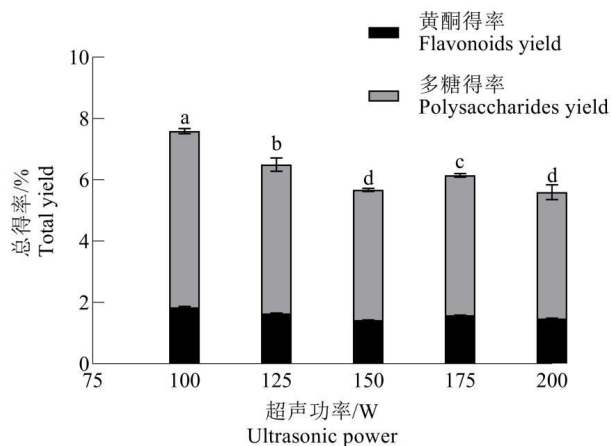
试验数据采用SPSS Statistics 24软件进行统计分析,各组间采用LSD法进行多重比较,各试验均重复3次,结果以平均值±标准差表示,以 $P < 0.05$ 为差异具有统计学意义。使用GraphPad Prism 9.5.1绘图软件绘制相关线形图及直方图。

2 结果与分析

2.1 超声功率、超声温度、乙醇体积分数、超声时间单因素试验结果分析

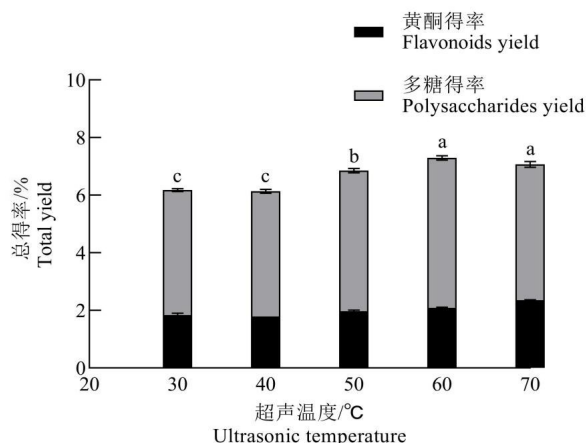
2.1.1 不同超声功率对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率的影响

由图3可知,山蜡梅叶黄酮和多糖得率随着超声功率的增加均呈现先下降后上升再下降的趋势。当超声功率为100~150 W时,总得率随超声功率的增加而降低;当超声功率为150~200 W时,总得率随超声功率的增加先升高后降低;其中超声功率为100 W时山蜡梅叶黄酮和多糖的总得率最高。总的来说,在较低超声功率下更有利于山蜡梅叶中黄酮和多糖组分的释放与溶解,超声功率过高会使超声波的空化作用产生高温高压,破坏黄酮和多糖结构,同时过高的超声功率会使溶剂温度迅速上升,溶剂发生挥发,导致黄酮和多糖不能充分溶于溶剂中,出现得率降低^[10,25]。因此确定最佳超声功率为100 W。



不同字母代表各水平具有显著性差异 ($P < 0.05$)。
The different letters represent significant differences at each level ($P < 0.05$).

图3 超声功率对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率的影响
Fig.3 The effect of ultrasonic power on the total yield of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves

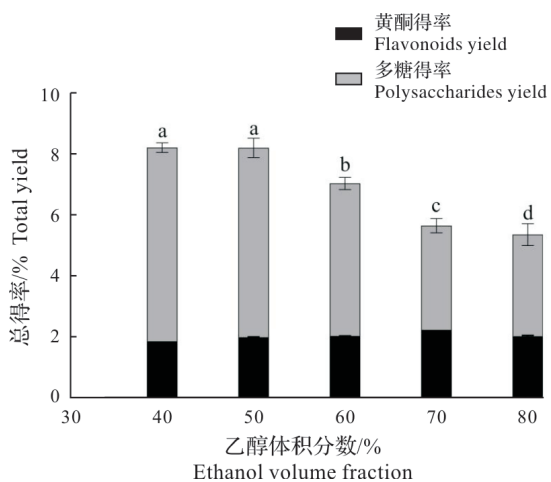


不同字母代表各水平具有显著性差异 ($P < 0.05$)。
The different letters represent significant differences at each level ($P < 0.05$).

图4 超声温度对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率的影响
Fig.4 The effect of ultrasonic temperature on the total yield of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves

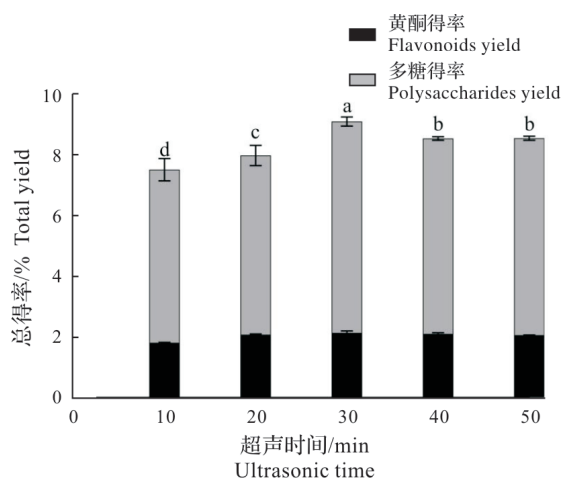
2.1.2 超声温度对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率的影响

由图4可知,山蜡梅叶黄酮得率随着超声温度的升高而增加,这是由于温度升高会加速分子运动,促进黄酮的溶出。山蜡梅叶多糖得率随着超声温度的升高呈现先增加后下降的趋势,在超声温度为60℃时多糖得率最高。随着提取温度的升高,液体介质的表面张力和黏度降低,使细胞内破坏程度增大,这促进了细胞内部物质溶出,从而使得多糖得率增加^[26];而过高的温度会使多糖的糖苷键断裂而发生降解,从而使得多糖得率降低。山蜡梅叶黄酮和多糖的总得率随着超声温度的升高呈现先上升后下降的趋势,超声温度为60℃时总得率达到最大值,与超声温度为70℃总得率相比无显著差异。因此确定最佳超声温度为60℃。



不同字母代表各水平具有显著性差异 ($P < 0.05$)。
The different letters represent significant differences at each level ($P < 0.05$).

图5 乙醇体积分数对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率的影响
Fig.5 The effect of ethanol volume fraction on the total yield of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves



不同字母代表各水平具有显著性差异 ($P < 0.05$)。
The different letters represent significant differences at each level ($P < 0.05$).

图6 超声时间对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率的影响
Fig.6 The effect of ultrasonic time on the total yield of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves

2.1.3 乙醇体积分数对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率影响

由图 5 可知,随着乙醇体积分数的升高山蜡梅叶黄酮得率先增加后降低,当乙醇体积分数为 70% 时,黄酮得率达到最大值。这是由于黄酮类化合物具有较高的极性,乙醇体积分数升高可使黄酮更好地溶出;但当乙醇体积分数超过 70% 后,黄酮类化合物达到饱和,同时一些亲脂性杂质成分的溶出量增加,这些成分与黄酮类化合物竞争性溶出,从而导致黄酮类化合物得率下降^[27]。山蜡梅叶多糖得率随着乙醇体积分数的升高而降低,且下降趋势较大。这是由于多糖属于极性成分,乙醇体积分数增大导致溶剂极性降低,不利于多糖的溶出。此外,山蜡梅叶中其他成分如醇溶性杂质、色素、亲脂性强的成分溶出量增加,这些成分与多糖及黄酮类物质竞争,同乙醇—水分子结合,从而引起总得率降低^[28]。乙醇体积分数为 50% 时的总得率高于乙醇体积分数为 40% 时的总得率,但 2 个处理之间并没有显著差异,因此确定最佳乙醇体积分数为 40%。

2.1.4 超声时间对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率影响

由图 6 可知,山蜡梅叶黄酮和多糖得率均随着超声时间的延长呈现先升高后下降的趋势,当超声时间为 30 min 时黄酮和多糖得率均达到最大值,此时山蜡梅叶黄酮和多糖的总得率也最高。在 30 min 之后,山蜡梅叶黄酮和多糖得率均有所下降,这是因为随着时间的延长,山蜡梅叶粉末与乙醇的接触时间增加,有利于黄酮和多糖的溶出,但时间过长会使溶剂严重挥发,间接导致料液比发生改变,进而使得黄酮和多糖的有效溶出减少,同时过长的提取时间会使黄酮和多糖类化合物被分解和破坏^[29-30],糖苷键和黄酮分子链断裂生成小分子物质,从而使得总得率降低。因此确定最佳超声时间为 30 min。

2.2 超声功率、超声温度、乙醇体积分数、超声时间正交试验结果分析

正交试验设计与结果如表 2 所示,由于 $R_c > R_b > R_A > R_d$, 因此试验中各因素对山蜡梅叶黄酮和多糖总得率的影响大小依次为:超声温度、乙醇体积分数、超声时间和超声功率。对正交试验结果进行方差分析,由表 3 结果可知超声温度、乙醇体积分数、超声时间以及超声功率分别对山蜡梅叶黄酮和多

表 2 超声功率、超声温度、乙醇体积分数、超声时间正交试验结果分析
Tab.2 Analysis of orthogonal test results of ultrasonic power,ultrasonic temperature,
ethanol volume fraction and ultrasonic time

因素水平 Factor levels					黄酮得率/% Flavonoid yield	多糖得率/% Polysaccharide yield	总得率/% Total yield
A 超声时间/min	B 超声功率/W	C 超声温度/℃	D 乙醇体积分数/%				
A Ultrasonic time	B Ultrasonic power	C Ultrasonic temperature	D Ethanol volume fraction				
1	1	1	1	1	1.928 4±0.011 0	7.503 6±0.002 7	9.432 0±0.013 7
2	1	2	2	2	1.412 7±0.048 2	5.446 7±0.607 7	6.859 4±0.559 4
3	1	3	3	3	1.895 0±0.037 4	6.915 8±0.330 1	8.810 8±0.292 7
4	2	1	2	3	1.875 6±0.008 8	6.105 0±0.342 2	7.980 6±0.333 4
5	2	2	3	1	2.084 6±0.009 4	7.279 7±0.367 8	9.364 3±0.358 4
6	2	3	1	2	2.058 8±0.013 4	7.216 8±0.128 0	9.275 6±0.141 4
7	3	1	3	2	1.577 6±0.027 5	6.197 4±0.125 3	7.775 0±0.152 8
8	3	2	1	3	2.065 2±0.112 6	6.911 0±0.574 0	8.976 2±0.461 4
9	3	3	2	1	1.560 2±0.006 8	6.731 9±0.161 7	8.292 1±0.168 5
K ₁	50.204 2	50.375 2	55.367 7	54.176 8			
K ₂	53.241 2	50.399 9	46.264 4	47.820 1			
K ₃	50.086 8	52.757 1	51.900 1	51.535 3			
k ₁	8.367 4	8.395 9	9.228 0	9.029 5			
k ₂	8.873 5	8.400 0	7.710 7	7.970 0			
k ₃	8.347 8	8.792 9	8.650 0	8.589 2			
R	0.525 7	0.397 0	1.517 2	1.059 5			

糖总得率的影响为:超声温度和乙醇体积分数对总得率的影响均具有极显著性差异($P<0.01$);超声时间对总得率的影响存在显著性差异($P<0.05$);超声功率对总得率的影响无显著差异($P>0.05$)。综合确定山蜡梅叶黄酮和多糖同步提取的最佳工艺参数为 $A_2B_1C_1D_1$,即超声时间 30 min,超声功率 100 W,超声温度 50 ℃,乙醇体积分数 30%。采用正交试验优化的最佳工艺对山蜡梅叶黄酮和多糖进行同步提取的验证试验,通过 3 次平行试验取平均值得到此条件下黄酮得率为 2.27%,多糖的得率为 8.43%,两者均达到了最大值,总得率为 10.7%,结果表明通过正交试验优化得到的山蜡梅叶黄酮和多糖同步提取的最佳工艺有助于同时提高黄酮和多糖的得率,从而使总得率达到最佳水平,该工艺稳定、可行。

表 3 超声功率、超声温度、乙醇体积分数、超声时间方差分析

Tab.3 Analysis of variance of ultrasonic power, ultrasonic temperature, ethanol volume fraction and ultrasonic time

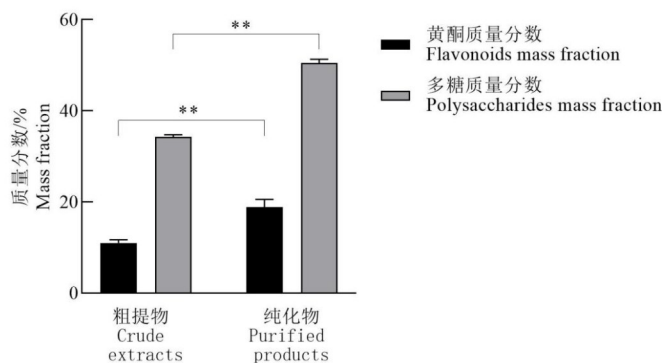
变异来源 Source of variation	平方和 Sum of squares	自由度 Freedom degree	均方 Mean square	F	显著性 Mean square
A 超声时间 A Ultrasonic time	1.066	2	0.533	5.197	0.032*
B 超声功率 B Ultrasonic power	0.624	2	0.312	3.042	0.098
C 超声温度 C Ultrasonic temperature	7.037	2	3.518	34.304	0.000**
D 乙醇体积分数 D Ethanol volume fraction	3.399	2	1.700	16.572	0.001**
误差 Error	0.923	9	0.103		
总计 Total	13.049	17			

“**”表示差异极显著($P<0.01$),“*”表示差异显著($P<0.05$)。

“**” represent significant at highly difference ($P<0.01$), “*” represent significant at difference ($P<0.01$).

2.3 山蜡梅叶黄酮和多糖纯化结果分析

通过测定山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物中黄酮、多糖的质量分数,以评价 AB-8 大孔树脂对山蜡梅叶黄酮和多糖的分离纯化效果(图 7)。山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物中黄酮质量分数为 11.03%,多糖质量分数为 34.28%;纯化物中黄酮质量分数为 18.88%,多糖质量分数为 50.48%。粗提物经分离纯化后,其黄酮和多糖质量分数分别提高了 71.2% 和 47.26%,且具有极显著性差异。因此,AB-8 大孔吸附树脂对山蜡梅叶中的黄酮和多糖具有良好的同时纯化效果。



“**”表示差异极显著($P<0.01$)。

“**” represent significant at highly difference ($P<0.01$).

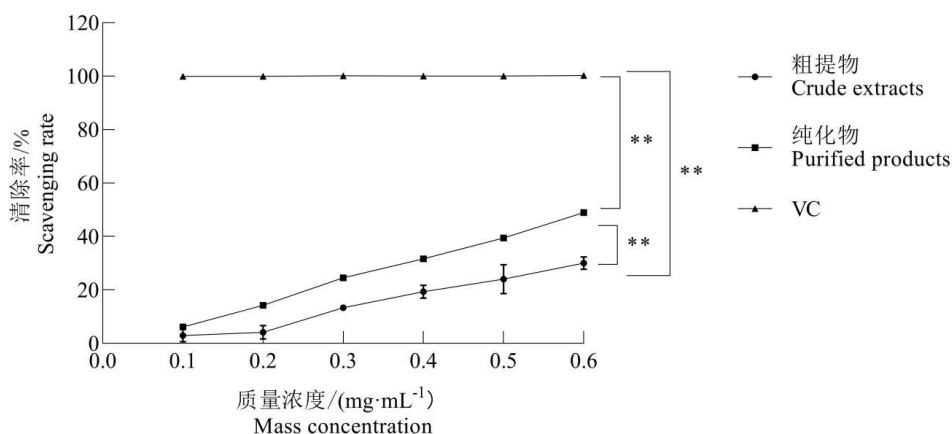
图 7 山蜡梅叶粗提物和纯化物中黄酮和多糖的质量分数

Fig. 7 Flavonoids and polysaccharides mass fraction in the crude extracts and purified products from *Chimonanthus nitens* Oliv leaves

2.4 山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物对体外抗氧化活性的影响

2.4.1 山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物对DPPH自由基清除能力的影响

DPPH自由基是一种含孤对单电子的自由基,其在乙醇溶液中呈深紫色,在517 nm处有特征吸收。山蜡梅叶中的黄酮和多糖具有酚羟基,能提供氧原子,与DPPH自由基中的孤电子配对,使溶液中单电子数减少,吸光度下降,溶液的颜色变浅或者消失。根据颜色的变化程度即可判断自由基清除程度^[10]。由图8可知,随着山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物质量浓度的增大,其清除DPPH自由基的能力增强;当质量浓度为0.1~0.6 mg/mL时,粗提物对DPPH自由基的清除率为2.98%~30.09%,纯化物对DPPH自由基的清除率为5.69%~48.28%;在质量浓度0.2~0.6 mg/mL,纯化物对DPPH自由基的清除效果显著优于粗提物($P<0.01$),两者对DPPH自由基的清除效果均显著低于阳性对照药物VC($P<0.01$)。以上结果表明山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物对DPPH自由基均具有良好的清除能力,具备一定的抗氧化活性。



“**”表示差异极显著($P<0.01$)。

“**” represent significant at highly difference ($P<0.01$).

图8 山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物对DPPH自由基清除能力的影响

Fig.8 The effect of crude extracts and purified products of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves on DPPH radical scavenging ability

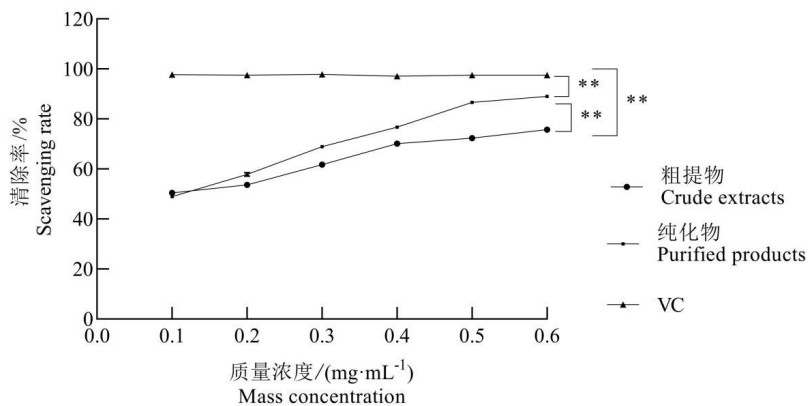
2.4.2 山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物对ABTS⁺自由基清除能力的影响

ABTS⁺被氧化后会形成稳定的ABTS⁺自由基,使溶液呈蓝绿色,在734 nm处有特征吸收。在其中加入抗氧化剂(如黄酮或VC等)后,ABTS⁺自由基数目减少,溶液的颜色变浅,吸光度下降,根据其下降的程度即可判断自由基清除程度^[31]。由图9可知,随着山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物质量浓度的增加,其对ABTS⁺自由基的清除能力逐渐增强;当质量浓度为0.1~0.6 mg/mL时,粗提物对ABTS⁺自由基的清除率为50.48%~75.71%,纯化物对ABTS⁺自由基的清除率为48.99%~89.05%;两者对ABTS⁺自由基的清除率均显著低于对照组VC($P<0.01$)。在质量浓度0.2~0.6 mg/mL,纯化物的ABTS⁺清除率显著高于粗提物($P<0.01$),这可能是由于纯化过程中去除了部分杂质,使得黄酮和多糖等有效成分的相对含量提高,活性成分之间的协同作用可能得到增强,进而更有效地发挥了清除自由基的作用。总体而言,山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物对ABTS⁺自由基均具有良好的清除效果,且在特定质量浓度下纯化物对ABTS⁺自由基的清除效果可与VC相近,表明山蜡梅叶黄酮和多糖纯化物具有较强的抗氧化能力。

2.4.3 山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物对FRAP铁还原抗氧化活性的影响

在酸性条件下,抗氧化物质可以还原Fe³⁺-TPTZ产生蓝色的Fe²⁺-TPTZ,在593 nm处有最大吸光值,样品的吸光值与样品还原能力成正比,可以作为一种测定物质抗氧化能力的方法。用FRAP值表示样品抗氧化性的强弱,即FRAP值在数值上等于样品与Fe³⁺-TPTZ反应后在593 nm处产生的吸光值所相当的标准FeSO₄溶液的浓度(mmol/L),且FRAP值与样品抗氧化活性呈正相关性^[24,32]。由图10可知,当质量浓

度为 0.02~0.10 mg/mL 时,随着山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物质质量浓度的增大,两者的 FRAP 值也随之增大,且相同质量浓度下粗提物与纯化物的 FRAP 值相当,两者 FRAP 值分别为 0.022 0~0.340 3、0.032 0~0.343 9;VC 的 FRAP 值随着质量浓度的增大而增大,在相同质量浓度范围内 VC 的 FRAP 值为 2.971 3~6.535 7。山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物的 FRAP 值均显著低于 VC ($P<0.01$)。综合以上结果可知山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物对 Fe^{3+} 的还原能力均较弱。

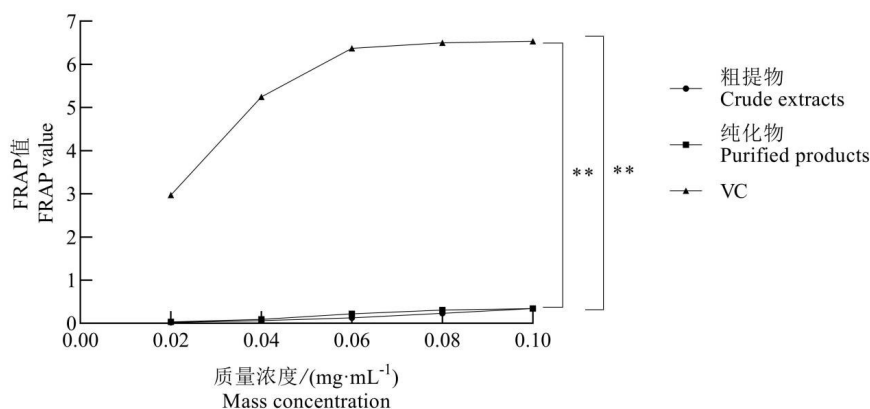


“**”表示差异极显著 ($P<0.01$)。

“**” represent significant at highly difference ($P<0.01$).

图 9 山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物对 ABTS^+ 自由基清除能力的影响

Fig.9 The effect of crude extracts and purified products of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves on ABTS^+ radical scavenging ability



“**”表示差异极显著 ($P<0.01$)。

“**” represent significant at highly difference ($P<0.01$).

图 10 山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物和纯化物对 FRAP 铁还原抗氧化活性的影响

Fig.10 The effect of crude extracts and purified products of flavonoids and polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves on iron-reducing antioxidant activity (FRAP assay)

3 讨论与结论

本研究通过单因素试验、正交试验设计得到山蜡梅叶黄酮和多糖同步提取优化工艺,采用最佳工艺条件提取获得山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物,并进一步利用柱层析法同时分离纯化山蜡梅叶中的黄酮和多糖。AB-8 大孔吸附树脂在植物黄酮和多糖的分离纯化中具有较广泛的应用以及优良的分离纯化效果。刘杰等^[33]比较了 5 种大孔树脂对玉米须总黄酮的静态吸附-解吸效果,发现 AB-8 大孔树脂具有较好的吸附解吸能力,而进一步优化纯化工艺参数后得到玉米须总黄酮的平均解吸率可达到 96.52%。杨波等^[34]研究表明 AB-8 大孔吸附树脂对玉竹多糖具有较好的分离纯化效果,且优于 D-101 大孔吸附树脂。此外,AB-8 大孔吸附树脂在分离纯化牛大力、五指毛桃、高粱泡叶总黄酮^[35-37]以及龙胆、肉苁蓉多糖等^[38-39]均表现出较好的纯化效果。因此,本研究采用 AB-8 大孔吸附树脂作为柱层析填料同时分离纯化

山蜡梅叶中的黄酮和多糖,获得了显著的同时分离纯化效果,纯化之后山蜡梅叶黄酮和多糖质量分数均有较大幅度的提升。

对通过最佳同步提取工艺获得的山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物以及 AB-8 大孔吸附树脂纯化后的山蜡梅叶黄酮和多糖纯化物进行体外抗氧化活性评价。粗提物与纯化物对 DPPH、ABTS⁺ 自由基均具有较好的清除能力且呈浓度依赖性,两者有一定的铁离子还原能力。山蜡梅叶中黄酮类成分主要包括芦丁、金丝桃苷、异槲皮苷、紫云英苷等黄酮醇苷类化合物以及柚皮素、槲皮素等黄酮醇类化合物^[6,40],其结构中富含羟基取代基,可与自由基发生加合反应、二聚反应,从而清除自由基^[41]。山蜡梅叶中多糖富含羟基、醛基、羧基等官能团^[8],可提供氢原子与自由基反应,从而阻止自由基的连锁反应。因此,黄酮和多糖含量越高,其功能基团越多,对自由基的清除作用越强,山蜡梅叶黄酮和多糖纯化物对自由基的清除能力优于粗提物。然而,山蜡梅叶黄酮和多糖纯化物及粗提物的还原能力相近且均较弱,可能主要受到山蜡梅叶中多糖的影响。多项研究表明从山蜡梅叶中提取分离纯化的多糖具备良好的自由基清除能力,但其还原活性较弱^[8-9],本研究结果与上述研究结果一致,原因可能与多糖的分子量大小、支链密集程度、键合类型等因素有关^[42]。总的来说,山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物均具有良好的体外抗氧化活性,且黄酮和多糖质量分数的提高有助于增强抗氧化活性。此外,本试验条件下制备的山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物中是否存在黄酮与多糖的协同抗氧化作用仍有待进一步研究。

本研究采用单因素试验、正交试验优化了山蜡梅叶中黄酮和多糖超声辅助溶剂浸提法的同步提取工艺,在超声时间 30 min,超声功率 100 W,超声温度 50 ℃,乙醇体积分数 30% 的提取工艺条件下山蜡梅叶黄酮和多糖平均总得率最高,为 10.70%。将通过最佳工艺获得的提取产物经 AB-8 大孔树脂分离纯化,发现其黄酮和多糖质量分数分别提高了 71.2% 和 47.26%,纯化效果极显著。通过对山蜡梅叶黄酮和多糖粗提物及纯化物 DPPH、ABTS⁺ 自由基的清除能力及 FRAP 铁还原抗氧化活性的研究,证实了两者均具有良好的抗氧化能力,且总体上纯化物的抗氧化活性高于粗提物。研究结果为山蜡梅叶资源的综合利用以及抗氧化功能产品的开发提供了理论依据与技术支持。

致谢:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2200420)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 Reference:

- [1] 李诒光,卢建中,陈杰,等.江西道地药材山蜡梅叶质量标准的研究[J].中草药,2010,41(5):836-838.
LI Y G, LU J Z, CHEN J, et al. Study on quality standards of genuine Jiangxi herbal medicine *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves[J]. Chinese traditional and herbal drugs, 2010, 41(5): 836-838.
- [2] 袁青青,张行,李媛,等.山蜡梅叶挥发油镇咳、平喘、祛痰、抗炎及免疫调节作用研究[J].亚太传统医药,2018,14(12):17-19.
YUAN Q Q, ZHANG H, LI Y, et al. Study on the antitussive, antiasthmatic, expectorant, antiinflammatory, and immunomodulatory effects of essential oil from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves[J]. Asia-Pacific traditional medicine, 2018, 14(12): 17-19.
- [3] 黄赞兴,舒任庚.山蜡梅叶化学成分研究[J].中药材,2017,40(12):2856-2858.
HUANG Z X, SHU R G. Chemical constituents from the leaves of *Chimonanthus nitens* [J]. Chinese medicinal materials, 2017, 40(12): 2856-2858.
- [4] 孙春红.山蜡梅叶化学成分及其乙酰胆碱酯酶抑制活性研究进展[D].南昌:江西师范大学,2015.
SUN C H. Study of chemical constituents and inhibitory activity on acetylcholinesterase of *Chimonanthus nitens* leaves[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2015.
- [5] 邹麦玲.山蜡梅叶颗粒的化学成分研究[D].南昌:南昌大学,2023.
ZOU M L. Study on the chemical constituents of *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves granules[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.
- [6] MENG W Y, ZHAO Z T, CHENG L L, et al. Total flavonoids from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves ameliorate HFD-Induced NAFLD by regulating the Gut - Liver axis in mice[J]. Foods, 2022, 11(14): 2169-2169.

- [7] YE X M, AN Q, CHEN S, et al. The structural characteristics, antioxidant and hepatoprotection activities of polysaccharides from *Chimonanthus nitens* Oliv. leaves[J]. International journal of biological macromolecules, 2020, 156: 1520-1529.
- [8] ZHANG Y, HAN Y, HE J, et al. Digestive properties and effects of *Chimonanthus nitens* Oliv polysaccharides on antioxidant effects in vitro and in immunocompromised mice[J]. International journal of biological macromolecules, 2021, 185: 306-316.
- [9] 盛丹丹, 李楠, 叶振南, 等. 黄金茶中总黄酮超声提取工艺[J]. 食品研究与开发, 2014, 25(12): 1-4.
- SHENG D D, LI N, YE Z N, et al. The extraction technology of total flavonoids from golden tea by ultrasonic method[J]. Food research and development, 2014, 25(12): 1-4.
- [10] 熊磊, 陈慧, 胡文兵, 等. 黄金茶多糖超声提取工艺及体外抗氧化研究[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(4): 801-809.
- XIONG L, CHEN H, HU W B, et al. A study on ultrasonic extraction technology for gold tea polysaccharide and its ecto antioxidant activity[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2017, 39(4): 801-809.
- [11] 王宁, 林小翠, 王文君. 响应面法优化黄金茶总黄酮提取工艺及对胰蛋白酶活性影响的研究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(3): 121-130.
- WANG N, LIN X C, WANG W J. Optimization of extraction process of total flavonoids from *Chimonanthus salicifolius* S. Y. Hu. leaves by response surface methodology and its effect on trypsin activity[J]. Modern food science and technology, 2018, 34(3): 121-130.
- [12] 李晓涵, 边文娟, 乔雪莹, 等. 响应面法优化赤灵芝多糖的提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 中国药理学杂志, 2025, 60(9): 949-955.
- LI X H, BIAN W J, QIAO X Y, et al. Optimization of polysaccharide extracted from Ganoderma using response surface methodology, and evaluation of antioxidant activity[J]. Chinese pharmaceutical journal, 2025, 60(9): 949-955.
- [13] 李青青, 陈晨, 曹艳亭, 等. 红芽芋多糖提取工艺优化及其抗氧化活性的研究[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(5): 1272-1282.
- LI Q Q, CHEN C, CAO Y T, et al. Optimum extraction process for the polysaccharides from red bud taro (*Colocasia esculenta* (L.) schott and its antioxidative activity in vitro[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(5): 1272-1282.
- [14] 刘亚青, 王天赐, 李顺玲, 等. 玉木耳多糖热水提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 菌物研究, (2025-03-28)[2025-04-16]. <https://doi.org/10.13341/j.jfr.2024.1766>.
- LIU Y Q, WANG T C, LI S L, et al. Optimization of the hot water extraction technology and antioxidant activity of polysaccharide from *Auricularia cornea* var. Li. [J]. Journal of fungal research, (2025-03-28)[2025-04-16]. <https://doi.org/10.13341/j.jfr.2024.1766>.
- [15] 谢庭辉, 季欣萌, 李琦, 等. 机械化学辅助提取青钱柳黄酮及其稳定性研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(4): 116-123.
- XIE T H, JI X M, LI Q, et al. Optimization of mechanochemical-assisted extraction of *Cyclocarya paliurus* flavonoids and its stability[J]. China food additives, 2024, 35(4): 116-123.
- [16] ZHOU H, FENG X Y, YAN Y, et al. Optimization of an ultrasonic-assisted aqueous two-phase extraction method for four flavonoids from *Lysionotus pauciflorus* [J]. Preparative biochemistry & biotechnology, 2021, 52(7): 770 - 782.
- [17] 朱晓庆, 连科迅, 王丹阳. 异叶青兰中黄酮和多糖协同抗氧化作用研究[J]. 当代畜牧, 2021(9): 40-44.
- ZHU X Q, LIAN K X, WANG D Y. Study on the synergistic antioxidant effect of flavonoids and polysaccharides from *dracocephalum heterophyllum* benth [J]. Contemporary animal husbandry, 2021(9): 40-44.
- [18] 李慧卿, 曹叶霞, 黄坊娇. DPPH·和ABTS·比较研究毛建草多酚、黄酮和多糖的抗氧化协同作用[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022, 42(3): 98-105.
- LI H Q, CAO Y X, HUANG F J. Comparative Study of DPPH· and ABTS· methods on the antioxidant synergistic effects of polyphenols, flavonoids and polysaccharides of *Dracocephalum rupestre* hance [J]. Journal of Shanxi agricultural university (natural science edition), 2022, 42(3): 98-105.
- [19] 王建, 汪涛涌, 俞群, 等. 赣东北山蜡梅野生资源分布与保护对策[J]. 农家参谋, 2020, (24): 45-47.
- WANG J, WANG T Y, YU Q, et al. Distribution and conservation strategies of wild *Chimonanthus nitens* resources in north-east Jiangxi [J]. Farmers consultant, 2020, (24): 45-47.
- [20] 王敬赫, 胡庆丰, 刘婕, 等. 银杏叶渣中多糖和黄酮的综合提取及其抗氧化活性研究[J]. 河南农业科学, 2023, 52(8): 171-180.
- WANG J H, HU Q F, LIU J, et al. Comprehensive extraction and antioxidant activity research of *Ginkgo biloba* leaf residue

- [J].Journal of Henan agricultural sciences,2023,52(8):171-180.
- [21] 谢青云,胥维昌,王远,等.大孔树脂同时分离纯化黄蜀葵花总黄酮和多糖工艺优化[J].离子交换与吸附,2023,39(1):36-49.
- XIE Q Y,XU W C,WANG Y,et al.Process optimization of simultaneous separation and purification of total flavonoids and polysaccharides from *Abelmoschus manihot* flowers with macroporous resin[J].Ion exchange and adsorption,2023,39(1):36-49.
- [22] 李震,李淑云,曾青,等.江西5种中蜂蜂蜜的理化性质及抗氧化活性研究[J].江西农业大学学报,2025,47(3):.
- LI Z,LI S Y,ZENG Q,et al.Study on physicochemical properties and antioxidant activities of five kinds of *Apis cerana cerana* honey from Jiangxi Province[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(3):.
- [23] 王筱玥,刘学,刘春环,等.金钗石斛多糖的酶解工艺优化及其抗氧化活性[J].精细化工,2025,4:837-848.
- WANG X Y,LIU X,LIU C H,et al.Process optimization of *Dendrobium nobile* polysaccharide on enzymatic hydrolysis and its antioxidant activity[J].Fine chemicals,2025,4:837-848.
- [24] 蔡春燕,陈鑫,刘绍姜,等.不同炮制阶段多花黄精内在质量及体外抗氧化作用比较研究[J].时珍国医国药,2022,33(11):2665-2669.
- CAI C Y,CHEN X,LIU S J,et al.Comparative study on the intrinsic quality and in vitro antioxidant effects of polygonatum cyrtoneura hua at different processing stages[J].Lishizhen medicine and materia medica research,2022,33(11):2665-2669.
- [25] 江飞凤,谭晓辉,胡鹏刚,等.超声-微波协同提取柚子皮多糖工艺优化及单糖组成、结构和抗氧化活性分析[J].食品与发酵工业,2021,47(2):196-204.
- JIANG F F,TAN X H,HU P G,et al.Optimization of ultrasonic-microwave extraction process of pomelo peel polysaccharide and analysis of monosaccharide composition, structure and antioxidant activity[J].Food and fermentation industries 2021,47(2):196-204.
- [26] 邓加聪,曾铸华,陈婕,等.牛肝菌多糖的提取及抗氧化性研究[J].中国酿造,2019,38(10):158-161.
- DENG J C,ZENG X H,CHEN J,et al.Extraction and antioxidant activity of polysaccharides from *Boletus* [J].China brewing,2019,38(10):158-161.
- [27] 刘春菊,王海鸥,唐明霞,等.微波-超声联合提取参数对黄秋葵多糖和黄酮得率的影响[J].江苏农业科学,2018,46(9):208-211.
- LIU C J,WANG H O,TANG M X,et al.Effects of microwave-ultrasonic combined extraction parameters on the yield of polysaccharides and flavonoids from okra [J].Jiangsu agricultural sciences,2018,46(9):208-211.
- [28] 谢婷,李智利,贺琼.苦丁茶中黄酮的提取及含量测定[J].食品研究与开发,2011,32(9):66-69.
- XIE T,LI Z L,HE Q.Extraction by ultrasonic-determination of flavonoids in Kuding tea by three wavelength spectrophotometry[J].Food research and development,2011,32(9):66-69.
- [29] SHANGGUAN Y C,NI J,JIANG L L,et al.Response surface methodology-optimized extraction of flavonoids from pomelo peels and isolation of naringin with antioxidant activities by Sephadex LH20 gel chromatography [J].Current research in food science,2023,7:100610.
- [30] 邵知扬.花生壳黄酮超声波辅助提取工艺优化研究[J].食品安全导刊,2025,(6):92-96.
- SHAO Z Y.Optimization of ultrasonic assisted extraction process for flavonoids from peanut shells [J].Food safety guide,2025,(6):92-96.
- [31] 黄政皖,唐毓萍,彭振刚.麦角硫因与7种抗氧化剂组合的抗氧化作用[J].香料香精化妆品,2025,(1):109-114.
- HUANG Z W,TANG Y P,PENG Z G.Combined antioxidant effect of ergothioneine with seven antioxidants [J].Flavour fragrance cosmetics,2025,(1):109-114.
- [32] 何洪鑫,孙风霞,王赫,等.四棱豆叶总酚提取工艺优化及抗氧化能力研究[J].天津科技大学学报,2025,40(2):29-36.
- HE H X,SUN F X,WANG H,et al.Optimization of extraction process and antioxidant activity of total phenols from winged bean leave [J].Journal of Tianjin university of science & technology,2025,40(2):29-36.
- [33] 刘杰,梁亚蓝,李浩楠,等.玉米须中总黄酮的大孔树脂纯化工艺优化[J].粮食与油脂,2022,35(3):76-80.
- LIU J,LIANG Y L,LI H N,et al.Optimization of macroporous resin purification process for total flavonoids in corn silk [J].Cereals & oils,2022,35(3):76-80.

- [34] 杨波,韩凤波,杨波.AB-8和D-101大孔吸附树脂分离纯化玉竹多糖[J].食品研究与开发,2014,35(23):67-70.
YANG B, HAN F B, YANG B.Isolation & purification of polysaccharide from *Polygonatum odoratum* by AB-8 and D-101 macroporous adsorption resins[J].Food research and development, 2014, 35(23):67-70.
- [35] 黄慧学,胡宇婷,刘丽花,等.牛大力总黄酮纯化工艺及抗氧化活性研究[J].广西中医药,2025,48(1):62-65.
HUANG H X, HU Y T, LIU L H, et al.Study on purification process and antioxidant activity of total flavone of *Nanhaia speciosa*[J].Guangxi traditional chinese medicine, 2025, 48(1):62-65.
- [36] 田孟斌,吴静澜,韩伟,等.高粱泡叶总黄酮的提取纯化及抗氧化活性研究[J].中国民族民间医药,2025,34(3):52-60.
TIAN M B, WU J L, HAN W, et al.Extraction, purification and antioxidant activity of total flavonoids from *Rubus lambertianus* Ser leaves[J].Chinese journal of ethnomedicine and ethnopharmacy, 2025, 34(3):52-60.
- [37] 唐蓉,龚舒,刘天开,等.五指毛桃黄酮提取纯化及抑制HepG2增殖活性[J/OL].精细化工, (2025-03-17)[2025-04-17].<https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20240933>.
TANG R, GONG S, LIU T K, et al.Extraction, purification and inhibition activity on HepG2 proliferation of *Ficus hirta vahl* flavonoids[J/OL].Fine chemicals, (2025-03-17)[2025-04-17].<https://doi.org/10.13550/j.jxhg.20240933>.
- [38] 宫江宁,云成悦,杨义菊.AB-8大孔吸附树脂纯化龙胆多糖的工艺优化[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2018,36(2):39-43.
GONG J N, YUN C Y, YANG Y J.Optimization of refinement of polysaccharide from *Gentiana scabra Bunge* through macroporous adsorption resin AB-8[J].Journal of Guizhou normal university (natural sciences), 2018, 36(2):39-43.
- [39] 肖星辉,高海霞,李鸿辉,等.荒漠肉苁蓉多糖提取及纯化工艺优化[J].中国中药杂志,2019,44(3):475-481.
XIAO X H, GAO H X, LI H H, et al.Process optimization for extraction and purification of polysaccharides from *Cistanche deserticola*[J].China journal of Chinese materia medica, 2019, 44(3):475-481.
- [40] 毛菊华,潘俊杰,陈张金,等.基于UHPLC-MS/MS的食凉茶2种基原植物不同部位中26个成分的含量对比分析[J].中国现代应用药学,2024,41(4):489-495.
MAO J H, PAN J J, CHEN Z J, et al.Determination and comparison of 26 components in different parts of two base plants of shiliang tea based on UHPLC-MS/MS[J].Chinese journal of modern applied pharmacy, 2024, 41(4):489-495.
- [41] 谢虹.黄酮类化合物的RAF抗氧化机制[D].广州:广州中医药大学,2019.
XIE H.The radical adduct formation mechanism of flavonoids[D].Guangzhou:Guangzhou university of chinese medicine, 2019.
- [42] 单政欣.天然植物多糖分子量对其抗氧化活性的影响分析[J].中国食品工业,2025(2):131-133.
SHAN Z X.Analysis of the effect of molecular weight of natural plant polysaccharides on their antioxidant activity[J].China food industry, 2025(2):131-133.

(责任编辑:刘俊峰)