

辣木籽粗多糖的分级提取及抗氧化活性

李玲玲¹, 徐妍然¹, 牛延菲^{1,2}, 金春秀¹, 胡玲华¹, 吴春华¹

(1. 西南林业大学 材料与化学工程学院, 昆明 650224; 2. 云南省药物研究所, 昆明 650111)

摘要:为了更好地开发与利用辣木籽,以辣木籽为原料,研究了不同体积分数乙醇(20%、40%、60%、80%)分级醇沉得到的辣木籽粗多糖(P₂₀、P₄₀、P₆₀、P₈₀)的单糖组成差异以及抗氧化活性,并采用紫外可见光谱(UV-Vis)和傅里叶红外光谱(FT-IR)对纯化后的辣木籽多糖结构进行表征。结果表明:4种辣木籽粗多糖的主要成分均为鼠李糖(Rha)、半乳糖(Gal)和葡萄糖(Glc),其中粗多糖P₈₀中单糖总含量最高(84.09 μg/mg);在4种辣木籽粗多糖中,P₂₀(1 mg/mL)对DPPH自由基和超氧阴离子自由基清除率均最高,分别为50.24%、34.54%,P₄₀(1 mg/mL)对羟自由基清除率最高,为76.92%,P₈₀的总还原力最强;通过UV-Vis和FT-IR表征可知,不同体积分数乙醇能够对辣木籽粗多糖进行分级醇沉。综上,采用不同体积分数乙醇进行醇沉的辣木籽粗多糖有不同的抗氧化活性,需要根据具体应用有针对性地提取。

关键词:辣木籽;多糖;分级醇沉;抗氧化活性

中图分类号:TS229; TQ281

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2024)07-0124-06

Graded extraction and antioxidant activity of crude polysaccharides from *Moringa oleifera* seeds

LI Lingling¹, XU Yanran¹, NIU Yanfei^{1,2}, JIN Chunxiu¹,
HU Linghua¹, WU Chunhua¹

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Yunnan Institute of Materia Medica, Kunming 650111, China)

Abstract: In order to better develop and utilise *Moringa oleifera* seeds, the differences in the composition of key monosaccharides as well as antioxidant activity of crude polysaccharides (P₂₀, P₄₀, P₆₀, P₈₀) from *Moringa oleifera* seeds obtained by graded alcohol precipitation with different volume fraction of ethanol (20%, 40%, 60%, 80%) were investigated, and the structure of purified polysaccharides of *Moringa oleifera* seeds was characterized using ultraviolet-visible spectroscopy (UV-Vis) and Fourier transform-infrared spectroscopy (FT-IR). The results showed that the main components of the four crude polysaccharides were rhamnose (Rha), galactose (Gal) and glucose (Glc), among which the crude polysaccharide P₈₀ had the highest content of total monosaccharides (84.09 μg/mg); among the four crude polysaccharides of *Moringa oleifera* seeds, P₂₀ (1 mg/mL) had the highest scavenging rate of DPPH radicals and superoxide anion radicals, with 50.24% and 34.54%, respectively, P₄₀ (1 mg/mL) had the highest scavenging rate of hydroxyl radicals (76.92%), and P₈₀ had the strongest total reducing power; it was

收稿日期:2023-03-24;修回日期:2024-03-24

基金项目:国家重点研发计划“中医药现代化研究”(2017YFC1702506)

作者简介:李玲玲(1999),女,硕士研究生,研究方向为天然植物资源的利用与改性(E-mail)2545910473@qq.com。

通信作者:吴春华,教授,博士(E-mail)kmwuchunhua@163.com。

known that different volume fraction of ethanol were able to carry out graded alcohol precipitation of crude polysaccharides from *Moringa oleifera* seeds by UV-Vis and FT-IR. In summary, crude polysaccharides extracted with different volume fraction of ethanol have different antioxidant activities and need to be extracted

according to specific applications.

Key words: *Moringa oleifera* seed; polysaccharide; grading alcohol precipitation; antioxidant activity

辣木(*Moringa oleifera* Lam.)属辣木科辣木属,是一种热带落叶乔木,原产于非洲和印度,每年每株约产5 kg辣木籽^[1-2]。辣木为药用植物^[3],其根、茎、叶、果、皮、种子等常被用来治疗各种疾病,例如:辣木叶中的黄酮具有降血糖的作用^[4];低温压榨辣木籽油的挥发性成分具有消炎能力^[2];辣木籽提取物能够降血脂^[5]等。近年来,辣木在我国云南、福建、广东、台湾等地得到了广泛的引种栽培,辣木籽作为辣木资源的一种,富含多酚、黄酮、多糖、蛋白质、油脂等,具有抗氧化^[6]、抗菌^[7]、抗癌^[8]等生物活性,有很高的研究价值和良好的应用前景。

多糖为一种重要的天然大分子,是许多传统中药的有效成分之一,具有抗氧化、延缓衰老等功能^[9-11]。辣木籽多糖具有多种生物活性和药理作用,如免疫调节、抗氧化、抗炎等^[12-13],是一种非常有前途的天然药物资源。但现有研究主要集中在辣木籽蛋白^[14-15]及其油脂^[16-17]的应用方面。

提取工艺对多糖的性质影响较大。目前植物多糖的提取方法主要包括热水浸提法^[18]、酸提取法^[19]、碱提取法^[20]、酶提取法^[21]等。目前最常用且便捷的是热水浸提法,董成国^[22]采用乙醇辅助热水浸提法提取辣木籽多糖,并考察了料液比、提取温度、提取时间对多糖提取率的影响,但是并没有讨论不同体积分数乙醇的影响。余芳等^[23]采用溶剂提取法提取辣木籽多糖,并对提取工艺进行优化,得到最佳乙醇体积分数为70%。郑韵英等^[24]以80%乙醇为提取溶剂,采用内部沸腾法提取辣木籽粗多糖。在大部分多糖提取方式中均使用了乙醇醇沉^[25],但目前并没有对采用不同体积分数乙醇进行分级提取的详细研究,不同体积分数乙醇提取物间存在的差异也尚未明晰。本研究以辣木籽为原料,采用不同体积分数乙醇分级醇沉得到不同的辣木籽粗多糖,对其单糖组成和含量进行测定,并对不同体积分数乙醇醇沉得到的粗多糖进行抗氧化活性评价,以期辣木籽多糖在药物利用、临床研究和工业发展上的应用提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

辣木籽,购自云南省红河州元阳县南沙基地。

无水乙醇、石油醚、硫酸亚铁、L-抗坏血酸、水杨酸、焦性没食子酸、盐酸、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、Tris-盐酸缓冲液、磷酸二氢钠、十二水合磷酸氢二钠、铁氰化钾、三氯乙酸、三氯化铁、过氧化氢、三氟乙酸(色谱纯)、甲醇、氢氧化钠(色谱纯)、醋酸钠、木糖(Xyl)、岩藻糖(Fuc)、鼠李糖(Rha)、半乳糖(Gal)、阿拉伯糖(Ara)、葡萄糖(Glc)、甘露糖(Man)、果糖(Fru)、核糖(Rib)、半乳糖醛酸(Gal-UA)、甘露糖醛酸(Man-UA)、葡萄糖醛酸(Glc-UA)、古罗糖醛酸(Gul-UA),除标注外所有试剂均为分析纯。

1.1.2 仪器与设备

SHZ-D(III)循环水式真空泵、CL-200磁力搅拌器,巩义市予华仪器有限责任公司;DHG-9240A电热恒温鼓风干燥箱,上海跃进医疗器械有限公司;TDL-5-A低速大容量离心机,上海安亭科学仪器厂;DFY-500摇摆式高速中药粉碎机,温岭市林大机械有限公司;RV8旋转蒸发器,艾卡仪器设备有限公司;HH-S2冷冻干燥机,上海比昂仪器制造有限公司;Reacti-thermo氮气吹扫仪、ICS5000离子色谱、Nicolet Avtar360傅里叶变换红外光谱仪,美国赛默飞公司;WFJ7200紫外-可见分光光度计,尤尼柯仪器有限公司;HH-S2电子恒温水浴锅,金坛市大地自动化仪器厂;Scout SE-SE202F电子天平,奥豪斯仪器(常州)有限公司;XH-T旋涡混合器,金坛市白塔新宝仪器厂。

1.2 实验方法

1.2.1 辣木籽粗多糖的分离与分级醇沉

将辣木籽进行晾晒后采用高速中药粉碎机粉碎,在室温下风干8 h得到辣木籽粉。称取辣木籽粉100 g,以料液比1:7加入石油醚,在60℃下脱脂6 h,自然风干后得到脱脂辣木籽粉;取脱脂辣木籽粉,以料液比1:10加入蒸馏水,在80℃下浸提2 h,抽滤除去辣木籽渣,用10%三氯乙酸调节滤液pH至3.0,静置24 h使辣木籽蛋白沉淀,于3 500 r/min转速下离心15 min,弃去下层沉淀,得到脱蛋白的辣木籽多糖溶液;分别采用不同体积分数乙醇(20%、40%、60%、80%)进行分级沉淀,观察到清晰分层后离心、冷冻干燥^[13, 18]后得到4种辣木籽粗多糖,

分别命名为 P_{20} 、 P_{40} 、 P_{60} 和 P_{80} 。

1.2.2 辣木籽粗多糖中单糖组成的测定

1.2.2.1 标准曲线的绘制

分别准确称取所需单糖标准品 (Xyl、Fuc、Rha、Gal、Ara、Glc、Man、Fru、Rib、Gal-UA、Man-UA、Glc-UA、Gul-UA), 加蒸馏水配成 10 mg/mL 的标准溶液母液单标, 然后取适量标准品母液单标混合配制成系列质量浓度梯度的标准品混标^[26], 进高效液相色谱仪检测, 并绘制各单糖的标准曲线, 拟合得到标准曲线方程。

色谱条件: Dionex™ CarboPac™ PA20 色谱柱 (150 mm × 3.0 mm, 10 μm); 进样量 5 μL; 流动相 A (H₂O), 流动相 B (0.1 mol/L NaOH), 流动相 C (0.1 mol/L NaOH, 0.2 mol/L 醋酸钠, 体积比 1:1); 流速 0.5 mL/min; 柱温 30 °C; 梯度洗脱程序为 0 min A、B、C 相体积比 95:5:0, 26 min A、B、C 相体积比 85:5:10, 42 min A、B、C 相体积比 85:5:10, 42.1 min A、B、C 相体积比 60:0:40, 52 min A、B、C 相体积比 60:40:0, 52.1 min A、B、C 相体积比 95:5:0, 60 min A、B、C 相体积比 95:5:0。

1.2.2.2 样品测定

称取适量辣木籽粗多糖样品, 加入 1 mL 2 mol/L 三氟乙酸溶液, 121 °C 加热 2 h; 通氮气, 吹干; 加入甲醇清洗, 吹干, 甲醇重复清洗 2~3 次后加入无菌水溶解, 转入色谱瓶中按 1.2.2.1 色谱条件进行测定^[26]。根据公式(1)计算辣木籽粗多糖中各单糖的含量。

$$Y = \frac{c \times V \times f}{m} \quad (1)$$

式中: Y 为辣木籽粗多糖中各单糖的含量, μg/mg; c 为代入标准曲线方程计算的单糖质量浓度, μg/mL; V 为样品提取液体积, mL; f 为稀释因子; m 为样品总质量, mg。

1.2.3 抗氧化活性的测定

1.2.3.1 DPPH 自由基清除能力

取 3 mL 1 mg/mL 的粗多糖样品溶液与 5 mL DPPH-乙醇溶液 (0.1 mmol/L) 充分混合, 室温、避光条件下反应 30 min, 在 517 nm 处测定其吸光度 (A_1), 同时测定 3 mL 粗多糖样品溶液和 5 mL 乙醇的吸光度 (A_2), 3 mL 乙醇和 5 mL DPPH-乙醇溶液的吸光度 (A_0), 以 1 mg/mL L -抗坏血酸作为对照, 平行实验 3 次, 根据公式(2)计算 DPPH 自由基清除率 (Y)^[27]。

$$Y = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (2)$$

1.2.3.2 超氧阴离子自由基清除能力

将 Tris-HCl 缓冲液 (0.05 mol/L, pH 8.2) 置于

25 °C 水浴锅中 0.5 h; 取 2.0 mL 粗多糖样品溶液 (1 mg/mL)、4.5 mL Tris-HCl 缓冲液、0.4 mL 邻苯三酚溶液 (25 mmol/L), 混合均匀后在 25 °C 下反应 4 min; 添加两滴 8 mol/L 盐酸、15 mL 去离子水, 在波长 320 nm 处测定吸光度 (A_1), 同时测定不添加邻苯三酚溶液的吸光度 (A_2), 以及不添加辣木籽粗多糖样品溶液的吸光度 (A_0), 以 1 mg/mL L -抗坏血酸作为对照, 平行实验 3 次, 根据公式(3)计算超氧阴离子自由基清除率 (X)^[27]。

$$X = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

1.2.3.3 羟自由基清除能力

向试管中加入 FeSO₄ (9 mmol/L) 水杨酸溶液 (9 mmol/L, 50% 乙醇)、粗多糖样品溶液 (1 mg/mL) 和 H₂O₂ (0.03%) 各 1 mL, 于 37 °C 水浴锅中反应 1 h, 冷却至室温, 在波长 510 nm 处测定吸光度 (A_1), 用 1 mL 50% 乙醇溶液代替水杨酸溶液测定吸光度 (A_2), 用 1 mL 去离子水代替辣木籽粗多糖溶液测定吸光度 (A_0), 以 1 mg/mL L -抗坏血酸为对照, 平行实验 3 次, 根据公式(4)计算羟自由基清除率 (W)^[27]。

$$W = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\% \quad (4)$$

1.2.3.4 总还原力

取 1 mL 粗多糖样品溶液 (5 mg/mL), 依次加入 1 mL 磷酸缓冲液 (0.2 mol/L, pH 6.6)、1 mL 铁氰化钾溶液 (1%), 混合后置于 50 °C 的水浴锅中反应 20 min, 冷却至室温, 加入 1 mL 的三氯乙酸溶液 (10%), 放置 10 min, 加 1 mL 蒸馏水、0.2 mL 三氯化铁溶液 (0.1%), 混合均匀后反应 10 min, 在波长 700 nm 下测定吸光度, 以 5 mg/mL L -抗坏血酸作为对照^[11], 吸光度代表总还原力, 平行实验 3 次。

1.2.4 辣木籽粗多糖的纯化

采用 Sevage 法除蛋白^[13], 步骤如下: 配制辣木籽粗多糖溶液 (10 mg/mL), 按体积比 3:1 加入 Sevage 试剂 (氯仿与正丁醇体积比 4:1), 剧烈振荡 0.5 h, 溶液出现明显分层后除去蛋白层, 放入透析袋 (截留分子量 8 000 Da) 中, 用蒸馏水搅拌透析 36 h, 收集透析液, 浓缩干燥后得到脱蛋白纯化的辣木籽多糖^[28]。

1.2.5 纯化辣木籽多糖的表征

1.2.5.1 紫外光谱 (UV-Vis) 测定

精确称取纯化的辣木籽多糖 0.015 g, 配制成 0.15 mg/mL 的多糖溶液, 在波长 200~800 nm 范围内进行 UV-Vis 测定。

1.2.5.2 傅里叶红外光谱(FT-IR)测定

采用KBr压片法^[29],在分辨率 4 cm^{-1} ,扫描次数32次,波长范围 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 条件下进行FT-IR测定。

1.2.6 数据处理

用Office 2016、Origin 2021以及Chromeleon软

件对实验数据进行处理。

2 结果与分析

2.1 辣木籽粗多糖的单糖组成

对4种辣木籽粗多糖进行单糖组成分析,结果如表1所示。

表1 辣木籽粗多糖中单糖组成及含量

粗多糖	Fuc	Ara	Rha	Gal	Glc	Xyl	Man	Fru	Rib	Gal-UA	Gul-UA	Glc-UA	Man-UA	总含量
P ₂₀	0.17	0.68	32.68	5.64	24.16	1.11	1.46	-	1.55	-	-	0.46	-	67.91
P ₄₀	0.53	5.44	22.57	24.53	22.37	2.25	3.99	-	1.24	-	-	0.30	-	83.22
P ₆₀	-	1.86	20.37	5.04	15.96	-	-	-	-	-	-	0.62	-	43.85
P ₈₀	0.18	-	39.28	5.92	34.64	1.40	1.49	-	1.18	-	-	-	-	84.09

由表1可知,P₂₀中单糖总含量为67.91 $\mu\text{g}/\text{mg}$,P₈₀、P₄₀的单糖总含量较高,分别为84.09 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 和83.22 $\mu\text{g}/\text{mg}$,P₆₀中单糖总含量最低,为43.85 $\mu\text{g}/\text{mg}$ 。4种辣木籽粗多糖的主要成分均为Rha、Gal、Glc。Rha占比在P₂₀中最高,为48.12%,在P₄₀中最低,为27.12%,在P₆₀、P₈₀中分别为46.45%、46.71%。Gal占比在P₄₀中最高,为29.48%,在P₂₀、P₆₀、P₈₀中分别为8.31%、11.49%、7.04%,差距不大。Glc在P₈₀占比最高,为41.19%,在P₂₀、P₆₀中分别为35.58%、36.40%,在P₄₀中最低,为26.88%。

2.2 辣木籽粗多糖的抗氧化活性

2.2.1 DPPH 自由基清除能力

辣木籽粗多糖对DPPH自由基的清除率如图1所示。

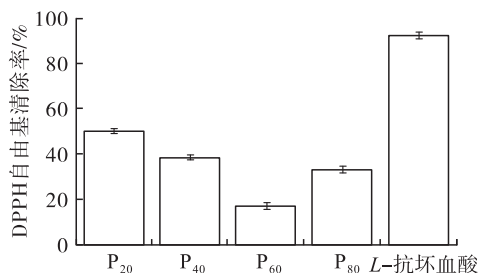


图1 辣木籽粗多糖对DPPH自由基的清除率

由图1可知,4种辣木籽粗多糖对DPPH自由基的清除能力均低于L-抗坏血酸。P₂₀的DPPH自由基清除能力最强,清除率达到50.24%;P₆₀的清除DPPH自由基效果最差,清除率为17.23%。不同体积分数乙醇沉淀的粗多糖抗氧化活性不同,可能是由于各粗多糖的理化性质、单糖含量及组成不同引起的^[11]。P₆₀单糖总含量最低可能是其DPPH自由基清除效果最差的原因,P₄₀、P₈₀的单糖总含量相似,因此其DPPH自由基清除率差距不大,P₂₀中鼠李糖和葡萄糖占比较高可能是其DPPH自由基清除效果较

好的原因。

2.2.2 超氧阴离子自由基清除能力

辣木籽粗多糖对超氧阴离子自由基的清除率如图2所示。

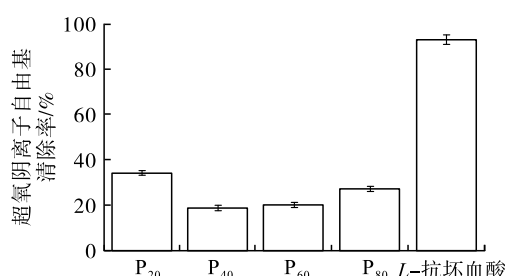


图2 辣木籽粗多糖对超氧阴离子自由基的清除率

由图2可知:4种辣木籽粗多糖中,P₂₀对超氧阴离子自由基的清除率最高,为34.54%;P₄₀、P₆₀、P₈₀对超氧阴离子自由基的清除率分别为19.09%、20.43%、27.42%;4种辣木籽粗多糖对超氧阴离子自由基的清除率均明显低于L-抗坏血酸的(93.28%)。

2.2.3 羟自由基清除能力

辣木籽粗多糖对羟自由基的清除率如图3所示。

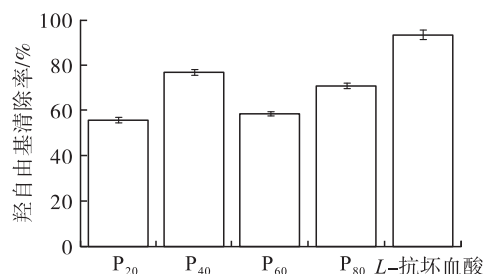


图3 辣木籽粗多糖对羟自由基的清除率

由图3可知:4种辣木籽粗多糖中P₄₀对羟自由基的清除效果最明显,清除率达到76.92%,占L-抗坏血酸羟自由基清除率的82.27%;P₂₀对羟自由基的清除效果最差,清除率为55.84%。多糖的相对分子质量、分子缠绕程度、多糖分子上羟基与胺基

的数量都可能是造成4种粗多糖羟自由基清除能力不同的因素。

2.2.4 总还原力

辣木籽粗多糖的总还原力如图4所示。

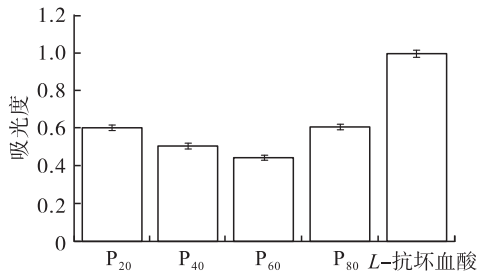


图4 辣木籽粗多糖的总还原力

由图4可知,4种辣木籽粗多糖中P₈₀的总还原力最强,吸光度为0.608,其次为P₂₀(0.604)。倪力军等^[30]在对黄芪等中药材多糖的体外抗氧化研究中发现,多糖的抗氧化活性与木糖和葡萄糖含量密切相关,且随着单糖含量的增加而提高。本研究中P₈₀的单糖总含量最高,其葡萄糖含量也最高,P₂₀的葡萄糖含量次之,而P₆₀中可能因未检测到木糖导致其总还原力较弱。

2.3 纯化辣木籽多糖的结构表征

2.3.1 UV-Vis 分析

4种纯化辣木籽多糖的UV-Vis谱图如图5所示。

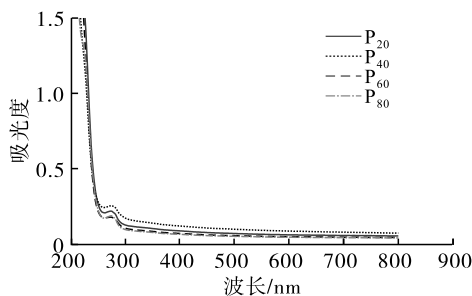


图5 4种纯化辣木籽多糖的UV-Vis谱图

由图5可知,4种纯化辣木籽多糖的吸收曲线轮廓基本一致,表明它们具有相似的结构,4种多糖在260~280 nm处有明显的吸收峰,280 nm处为蛋白质的吸收峰^[22],说明辣木籽多糖经初步提纯后仍含有一定量的蛋白质。同时,4种多糖的UV-Vis曲线存在略微的强度差异,这是每种样品的单糖含量不同而导致的,说明分级醇沉是成功的。

2.3.2 FT-IR 分析

4种纯化辣木籽多糖的FT-IR谱图如图6所示。

由图6可知,4种纯化辣木籽多糖的FT-IR曲线轮廓基本一致。在3426 cm⁻¹处,由多糖以及乙醇分子中O—H伸缩振动引起的强吸收峰,由于分

子间的羟基反应,导致氢键的产生,使吸收峰变宽;在3305 cm⁻¹附近由多糖、蛋白质的O—H和N—H伸缩振动引起的吸收峰;亚甲基C—H伸缩振动导致2937 cm⁻¹处产生吸收峰,为多糖物质的特征吸收峰^[31];在1660 cm⁻¹处的吸收峰可能是C=C的非伸缩振动引起^[32],为肽键上酰胺羰基吸收峰,在1541 cm⁻¹处的吸收峰为蛋白质酰胺Ⅱ带特征吸收峰^[33],说明使用Sevage法除蛋白效果并不理想,纯化多糖中还存在一定含量的蛋白质,与UV-Vis分析结果相印证;1132 cm⁻¹左右为葡萄糖环中C—O—C的特征吸收峰^[31];600、482 cm⁻¹左右为饱和C—H的弯曲振动引起的吸收峰。

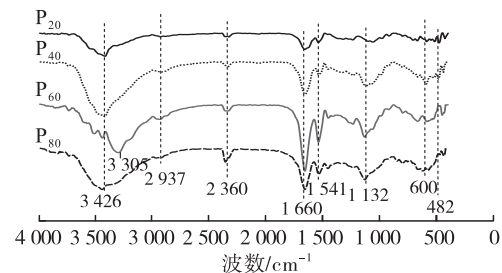


图6 4种纯化辣木籽多糖的FT-IR谱图

3 结论

采用4种不同体积分数的乙醇对辣木籽热水浸提液进行分级醇沉得到4种辣木籽粗多糖,测定其单糖组成及体外抗氧化活性,并采用UV-Vis和FT-IR对纯化后的辣木籽多糖(采用Sevage法除蛋白提纯)结构进行表征。结果表明:4种辣木籽粗多糖的主要成分均为Rha、Gal和Glc,但各粗多糖的单糖总含量不同;4种辣木籽粗多糖的抗氧化活性均低于L-抗坏血酸,P₂₀(1 mg/mL)对DPPH自由基清除率在50%以上,对超氧阴离子自由基清除率最高,为34.54%,P₄₀对羟自由基清除率最高,为76.92%,P₈₀的总还原力最强;UV-Vis和FT-IR结构表征表明分级醇沉成功。综上,不同体积分数乙醇醇沉的辣木籽粗多糖有不同的抗氧化活性,需要根据具体应用有针对性地提取。

参考文献:

- [1] CHEN X, LI Z, SMITH S A, et al. Optimization of supercritical CO₂ extraction of *Moringa oleifera* seed oil using response surface methodological approach and its antioxidant activity[J/OL]. *Front Nutr*, 2021, 8: 829146 [2023-03-24]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.829146>.
- [2] GHARSALLAH K, REZIG L, B'CHIR F, et al. Composition and characterization of cold pressed *Moringa oleifera* seed oil [J]. *J Oleo Sci*, 2022, 71(9): 1263-1273.
- [3] LALAS S, GORTZI O, ATHANASIADIS V, et al. Determination of antimicrobial activity and resistance to oxidation of *Moringa peregrina* seed oil [J]. *Molecules*,

- 2012, 17(3): 2330–2334.
- [4] 陈瑞娇, 朱必凤, 王玉珍, 等. 辣木叶总黄酮的提取及其降血糖作用[J]. 食品与生物技术学报, 2007, 26(4): 42–45.
- [5] LIAO M, SUN C, LI R, et al. Amelioration action of gastrodigenin rhamno – pyranoside from *Moringa* seeds on non – alcoholic fatty liver disease [J/OL]. Food Chem, 2022, 379: 132087 [2023 – 03 – 24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132087>.
- [6] 刘华勇, 赵强忠, 马彩霞, 等. 加工条件对辣木籽肽抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 35–39.
- [7] GOVARDHAN SINGH R S, NEGI P S, RADHA C. Phenolic composition, antioxidant and antimicrobial activities of free and bound phenolic extracts of *Moringa oleifera* seed flour [J]. J Funct Foods, 2013, 5(4): 1883–1891.
- [8] SHARAFELDIN M. Evaluation of developmental toxicity and anti – angiogenic potential of essential oils from *Moringa oleifera* and *Moringa peregrina* seeds in zebrafish (*Danio rerio*) model[J]. S Afr N J Bot, 2019, 129: 229–237.
- [9] YUE F, ZHANG J, XU J, et al. Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol – sulfuric acid method [J/OL]. Front Nutr, 2022, 9: 963318 [2023 – 03 – 24]. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.963318>.
- [10] LIU Y, SUN Y, HUANG G. Preparation and antioxidant activities of important traditional plant polysaccharides [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 111: 780–786.
- [11] 吴雅清, 冷小鹏. 多糖体外抗氧化作用及其影响因素[J]. 广州化工, 2018, 46(4): 4–9, 16.
- [12] 虎彪真, 陶宁萍, 许长华. 基于食药价值的辣木籽研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(15): 302–309.
- [13] 彭瑶. 辣木籽多糖的分离纯化、结构表征及抗炎机制的研究[D]. 广州: 广州大学, 2022.
- [14] KUMAR M, SELVASEKARAN P, KAPOOR S, et al. *Moringa oleifera* Lam. seed proteins: Extraction, preparation of protein hydrolysates, bioactivities, functional food properties, and industrial application [J/OL]. Food Hydrocolloid, 2022, 131: 107791 [2023 – 03 – 24]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107791>.
- [15] ADERINOLA T A, FAGBEMI T N, ENUJIUGHA V N, et al. Amino acid composition and antioxidant properties of *Moringa oleifera* seed protein isolate and enzymatic hydrolysates [J/OL]. Heliyon, 2018, 4(10): e00877 [2023 – 03 – 24]. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00877>.
- [16] OGUNSINA B S, RADHA C, GOVARDHAN SINGH R S. Physicochemical and functional properties of full – fat and defatted *Moringa oleifera* kernel flour [J]. Int J Food Sci Tech, 2010, 45(11): 2433–2439.
- [17] 宋贤娟, 黄志远, 许波, 等. 辣木籽油的提取及其中神经酸的纯化工艺研究[J]. 中国油脂, 2023, 48(12): 26–30, 44.
- [18] CHEN F, HUANG G. Extraction and antioxidant activities of cushaw polysaccharide [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 120(Pt B): 1646–1649.
- [19] LU J, YOU L, LIN Z, et al. The antioxidant capacity of polysaccharide from *Laminaria japonica* by citric acid extraction [J]. Int J Food Sci Tech, 2013, 48(7): 1352–1358.
- [20] WANG P, CHEN D, JIANG D, et al. Alkali extraction and *in vitro* antioxidant activity of *Monascus mycelium* polysaccharides [J]. J Food Sci Tech, 2014, 51(7): 1251–1259.
- [21] ZHU Y, LI Q, MAO G, et al. Optimization of enzyme – assisted extraction and characterization of polysaccharides from *Hericium erinaceus* [J]. Carbohydr Polym, 2014, 101: 606–613.
- [22] 董成国. 辣木籽水溶性多糖的分离纯化、结构表征及其抗氧化活性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [23] 余芳, 杨爱萍, 石雪萍, 等. 辣木籽营养成分测定及多糖提取工艺[J]. 食品工业, 2020, 41(11): 82–85.
- [24] 郑韵英, 胡汉娇, 周滢, 等. 辣木籽多糖的提取工艺研究[J]. 广州化工, 2021, 49(18): 48–51.
- [25] LIU L, SHANG Q, LIU F, et al. Polysaccharides from the leaves of *Lonicera japonica* [J]. Chem Nat Compd, 2016, 52(2): 288–289.
- [26] ZHU M, HUANG R, WEN P, et al. Structural characterization and immunological activity of pectin polysaccharide from kiwano (*Cucumis metuliferus*) peels [J/OL]. Carbohydr Polym, 2021, 254: 117371 [2023 – 03 – 24]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117371>.
- [27] 胡玲华, 牛延菲, 田瑞丰, 等. 辣木籽多糖的内部沸腾法提取及抗氧化活性[J]. 中国油脂, 2022, 47(11): 147–152.
- [28] 钱朋智, 张梅娟, 郭宏文, 等. 甜菜渣功能糖的制备及单糖组成分析[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(11): 199–206.
- [29] CHEN F, HUANG G. Antioxidant activity of polysaccharides from different sources of ginseng [J]. Int J Biol Macromol, 2019, 125: 906–908.
- [30] 倪力军, 王媛媛, 何婉瑛, 等. 8种多糖的单糖组成、活性及其相关性分析[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(4): 326–330.
- [31] CHEN S, HUANG H, HUANG G. Extraction, derivatization and antioxidant activity of cucumber polysaccharide [J]. Int J Biol Macromol, 2019, 140: 1047–1053.
- [32] BAGHERI A, ABU – DANSO E, IQBAL J, et al. Modified biochar from *Moringa* seed powder for the removal of diclofenac from aqueous solution [J]. Environ Sci Pollut Res, 2020, 27(7): 7318–7327.
- [33] 王夏辉. 聚氨酯/角蛋白纳米纤维的制备及性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.