

山药皮残渣多糖结构表征及抗氧化活性测定

Characterization and antioxidant activity determination of polysaccharide from yam peel residue

杭书扬¹杨留枝^{1,2,3}史苗苗^{1,2,3}HANG Shu-yang¹ YANG Liu-zhi^{1,2,3} SHI Miao-miao^{1,2,3}闫溢哲^{1,2,3} 刘延奇^{1,2,3}YAN Yi-zhe^{1,2,3} LIU Yan-qi^{1,2,3}

(1. 郑州轻工业大学食品与生物工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 食品生产与安全河南省协同创新中心, 河南 郑州 450001; 3. 河南省冷链食品质量安全控制重点实验室, 河南 郑州 450001)

(1. College of Food and Biological Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450001, China; 2. Henan Collaborative Innovation Center of Food Production and Safety, Zhengzhou, Henan 450001, China; 3. Henan Key Laboratory of Cold Chain Food Quality and Safety Control, Zhengzhou, Henan 450001, China)

摘要:目的:充分开发山药皮的经济价值。方法:采用水提醇沉法对山药皮和经乙醇提取多酚、黄酮的山药皮残渣进行多糖提取,得山药皮多糖(P1)和山药皮残渣多糖(P2),并分析其结构特征和抗氧化活性。结果:P1、P2 得率相差不大,但 P2(33.5%)的多糖含量约为 P1(17.8%)的两倍;二者均为孔状结构,P2 较 P1 表面有着更密集的孔洞;P1 中主要的单糖为甘露糖、葡萄糖及半乳糖,而 P2 的为甘露糖;P1、P2 不仅存在微晶结构,还存在晶体和非晶结构共存的多晶系统;两种多糖样品具有相同的官能团且均未发现蛋白质;P1、P2 中均存在 3 个螺旋结构,其重均分子量分别为 37 153.52 和 3 467.37,此外,P2 的热稳定性不如 P1;在 0.2~1.0 mg/mL 质量浓度范围内,P1、P2 的抗氧化活性均随质量浓度的增加而增强,P2 较 P1 有着更好的抗氧化活性;P1、P2 对 DPPH 自由基清除率的 IC₅₀ 值分别为 0.964,0.586 mg/mL,对羟自由基清除能力的 IC₅₀ 值分别为 0.962,0.711 mg/mL。结论:经乙醇提取多酚、黄酮的山药皮残渣中仍含有丰富的多糖,且 P2 较 P1 有着更好的结构特性和抗氧化活性。

关键词:山药;残渣;多糖;结构特征;抗氧化性

Abstract: Objective: This study aimed to fully develop the

utilization value of yam bark. **Methods:** The extraction of polysaccharides from yam bark and the residue of polyphenols and flavonoids extracted by ethanol was carried out by water extraction and alcohol precipitation method. The polysaccharides of yam peel (P1) and yam peel residue (P2) were obtained. The structural characteristics and antioxidant activities of P1 and P2 were analyzed. **Results:** The yield of P1 and P2 were similar, but the polysaccharide content of P2 (33.5%) was about twice that of P1 (17.8%). Both P1 and P2 have loose and porous structures, and P2 has dense pores on its surface. Mannose, glucose, and galactose were the main monosaccharides in P1, while mannose was the main monosaccharide in P2. P1 and P2 not only have microcrystalline structures but also have polycrystalline system with crystal and amorphous structures. The two polysaccharide samples had the same functional groups and no protein was found in both the samples. Both P1 and P2 have three-helix helix structures, and their average molecular weight is 37 153.52 and 3 467.37, respectively. P2 is not as stable as P1. In the range of 0.2~1.0 mg/mL, and the antioxidant activities of P1 and P2 increased with their concentrations. P2 had better antioxidant activity than P1. The IC₅₀ values of the DPPH radical scavenging rate of P1 and P2 were 0.964 and 0.586 mg/mL, respectively, and the IC₅₀ values of hydroxyl radical scavenging ability were 0.962 and 0.711 mg/mL, respectively. **Conclusion:** After ethanol extraction of polyphenols and flavonoids, the residue of yam peel still contains rich polysaccharides. Moreover, P2 has better structural characteristics and antioxidant activity than P1.

基金项目:河南省自然科学基金(编号:222300420580);河南省科技攻关项目(编号:222102110337)

作者简介:杭书扬,男,郑州轻工业大学在读硕士研究生。

通信作者:刘延奇(1964—),男,郑州轻工业大学教授,博士。

E-mail: liuyanqi@zzuli.edu.cn

收稿日期:2022-06-27 **改回日期:**2022-11-04

Keywords: yam; residue; polysaccharides; structural characteristics; oxidation resistance

山药是薯蓣属的一种药食两用植物^[1],富含多糖、类黄酮、多酚、尿囊素和其他活性成分^[2]。在亚洲,尤其是日本和中国,山药被研磨成粉制成面条食用^[3],传统的食用过程中所产生的山药皮是其主要残留物,约占山药总重量的 10%~20%^[4]。已有研究表明,山药皮生物活性物质含量(尿囊素、黄酮、多酚等)均高于其果肉^[5],在保健食品开发利用方面具有巨大的潜力^[6]。

多糖是由单糖缩合聚合物组成,广泛存在于动物、植物和微生物中。近年来,有关山药中非淀粉多糖的提取、化学结构及生物活性的研究较多^[7],植物源的非淀粉多糖已成为一类重要的生物活性天然产物,在自由基清除剂中发挥重要作用,并逐渐成为一类新型的有效抗氧化剂^[8]。山药多糖是山药的主要活性成分,主要由甘露糖、木糖、阿拉伯糖、葡萄糖和半乳糖等单糖组成,是一种具有免疫活性的植物多糖^[9]。

目前,对山药多糖的研究主要集中于其果肉多糖,有关山药皮及其抗氧化活性的研究较少。研究拟以山药皮和经乙醇提取多酚、黄酮的山药皮残渣为原料,进行多糖提取,得山药皮多糖(P1)和山药皮残渣多糖(P2),同时对 P1 和 P2 的单糖组成、结构特征及抗氧化活性进行分析,以期研发新型天然抗氧化产品,增加山药皮经济效益提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜铁棍山药:市售;

葡萄糖标准品、无水乙醇、氯化钾、硝酸钠、叠氮化钠、抗坏血酸、DPPH、复合磷酸盐、铁氰化钾、三氯乙酸、氯化铁、硫酸亚铁、过氧化氢、水杨酸等:分析纯,天津市富宇精细化工有限公司。

1.2 仪器与设备

循环水式多用真空泵:SHB-Ⅲ型,郑州长城科工贸有限公司;

色差仪:CR400 型,日本美能达公司;

高速离心机:LG10-2.4A 型,北京医用离心机厂;

扫描电子显微镜:TESCAN MIRA4 型,日本 Rili 公司;

红外光谱仪:Bruker TENSOR27 型,德国布鲁克公司;

X-射线衍射仪:Bruker D8 型,德国布鲁克公司;

差式扫描量热仪:DSC Q20 型,美国 TA 公司;

综合热分析仪:TG/DTA-A 型,德国耐驰公司;

多角度激光散射凝胶渗透色谱:DAWNHELEOS II 型,美国怀雅特公司。

1.3 方法

1.3.1 提取工艺 山药皮和山药皮残渣磨粉,过 80 目筛

网,分别称取两种粉末 10 g,加入 200 mL 去离子水,磁力搅拌混匀,50 ℃ 萃取 3 h,过滤,重复 3 次,合并上清液并浓缩至一定体积。自然冷却后,加入 4 倍体积的无水乙醇,静置 24 h,离心,沉淀加少量去离子水溶解,冷冻干燥得粗多糖。

将两种粗多糖按 $m_{\text{粉末}}:V_{\text{水}}$ 为 1:10 (g/mL)溶于去离子水,采用 Sevage 法去除蛋白质 2 次($V_{\text{多糖溶液}}:V_{\text{氯仿}}:V_{\text{正丁醇}}$ 为 15:3:1)。将多糖溶液离心,收集上层水溶液,得到不含蛋白质的多糖溶液,透析,减压浓缩,加入无水乙醇沉淀 24 h,离心,沉淀于去离子水中复溶,冻干,得精制多糖 P1 和 P2^[10]。

1.3.2 多糖含量及颜色测定

(1) 多糖含量:采用苯酚硫酸法^[11]。

(2) 颜色:采用色差仪。

1.3.3 单糖组成 参考文献[12]。

1.3.4 扫描电镜观察(SEM) 用胶带粘取干燥的多糖均匀涂开,并吹去表面多余的样品粉末,然后在真空环境中进行喷金,加速电压 3.0 kV,选择合适的放大倍数进行拍摄^[13]。

1.3.5 X-射线衍射测试(XRD) 在工作电压 30 kV,电流 20 mA,衍射角(2θ)扫描范围 $10^{\circ}\sim 50^{\circ}$ 下,进行 XRD 图谱扫描^[14]。

1.3.6 紫外扫描测试(UV) 称取多糖样品 5 mg,加入 5 mL 去离子水配成 1 mg/mL 样品溶液,扫描范围 200~400 nm,去离子水作空白对照^[15]。

1.3.7 傅里叶红外光谱测试(FTIR) 参考文献[16],分辨率为 0.4 cm^{-1} ,光谱范围为 $400\sim 4\,000\text{ cm}^{-1}$ 。

1.3.8 刚果红试验 参考文献[17],使用紫外分光光度计扫描 400~700 nm 范围内的最大吸收波长(λ_{max})。

1.3.9 同步热重分析(TG) 根据文献[18],升温范围为 $50\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温速率 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,负载气体为 N_2 。

1.3.10 分子量测定 采用多角度激光散射凝胶渗透色谱法,将样品溶于去离子水中,配制成质量分数为 0.3% 的水溶液,流动相为 50 mmol/L NaNO_3 和 0.02% NaN_3 的混合溶液,待测样品及流动相经超声、抽滤($0.2\text{ }\mu\text{m}$ 抽滤膜)后进行分析测定^[19]。

1.3.11 抗氧化能力测定

(1) DPPH 自由基清除率:参考文献[20]并修改。取 2 mL 多糖溶液与 2 mL 0.1 mmol/L 的 DPPH-乙醇溶液混匀,37 ℃ 避光反应 30 min,以维生素 C 作阳性对照,测定 517 nm 处吸光度,按式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$C_1 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

C_1 ——DPPH 自由基清除率, %;

A_0 ——去离子水代替样品的吸光度;

A_1 ——样品溶液吸光度;

A_2 ——无水乙醇代替 DPPH 的吸光度。

(2) 羟自由基清除率:参考文献[21]并修改。向试管中分别加入 1 mL 不同浓度的多糖溶液、硫酸亚铁溶液(6 mmol/L)和过氧化氢溶液(6 mmol/L),混匀,静置 10 min,加入 1 mL 水杨酸,轻轻摇动并保持 30 min,测定 510 nm 处吸光度,并按式(2)计算羟自由基清除率。

$$C_2 = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

C_2 ——羟自由基清除率,%;

A_0 ——对照组(无样品)吸光度;

A_1 ——试验组(无水)吸光度;

A_2 ——空白组(不含水杨酸)吸光度。

(3) 还原力:参考文献[22]。

(4) 总抗氧化能力:参考文献[23]。

1.3.12 数据分析 各试验重复 3 次,采用 Excel 整理数据,IBM SPSS Statistics 22.0 软件程序 Duncan 检验法进行显著性分析($P < 0.05$),采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与讨论

2.1 多糖含量及颜色

经测定,P1、P2 得率分别为 $(2.6 \pm 0.2)\%$ 和 $(2.4 \pm 0.1)\%$,经苯酚硫酸法检测得 P2 的多糖含量 (33.5%) 约为 P1 (17.8%) 的两倍。经色差仪检测,P2 的 L^* (70.33) 值大于 P1 (64.09) 的,而其 b^* 值 (11.72) 小于 P1 (13.93) 的,说明 P2 的颜色比 P1 白,可能是因为山药皮残渣在提取黄酮、多酚过程中被乙醇脱去了部分颜色。

2.2 单糖组成

由表 1 可知,两种多糖均检测出 5 种单糖成分(阿拉伯糖、木糖、甘露糖、葡萄糖及半乳糖)。P1 中主要的单糖为甘露糖、葡萄糖及半乳糖,占比分别为 $(32.61 \pm 0.68)\%$, $(33.46 \pm 0.59)\%$, $(22.19 \pm 0.87)\%$,此外还含有少量的阿拉伯糖 $[(7.70 \pm 0.47)\%]$ 和木糖 $[(4.10 \pm 0.28)\%]$ 。而 P1 的单糖主要为甘露糖和葡萄糖 $[(13.80 \pm 0.52)\%]$,其中甘露糖含量最高,约占 P2 总单糖的 $(70.61 \pm 0.95)\%$,阿拉伯糖、木糖和半乳糖的含量相对较少,分别为 $(5.55 \pm 0.25)\%$, $(6.44 \pm 0.18)\%$, $(3.72 \pm$

$0.23)\%$ 。二者单糖成分差异很大,可能是提取山药皮多酚、黄酮时,提取溶液对 P2 的单糖组成有一定的影响,需后续进一步探究。

2.3 SEM 结果

由图 1 可知,P1、P2 均为疏松、多孔状结构,P2 表面有着密集细小的孔洞,可能是因为山药皮残渣在乙醇提取多酚、黄酮过程中,多糖与多酚之间作用力消失所造成的。多糖表观结构的不同可能造成其分子量差异^[24],P1、P2 表面样貌的差异也可能导致两种样品分子量的差异。

2.4 XRD 结果

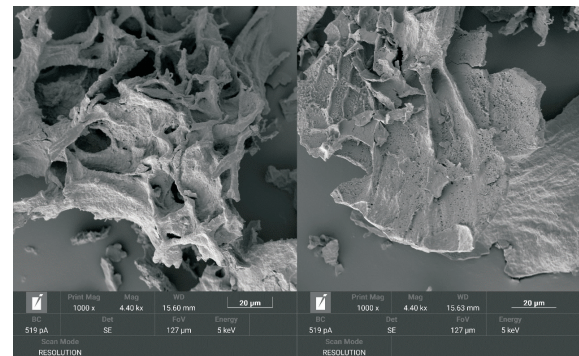
由图 2 可知,两种多糖在 15° , 20° , 32° 附近有较强的吸收峰,P2 和 P1 有着相同的峰型,但 P2 各吸收峰强度大于 P1,表明山药皮多糖中不仅存在微晶结构,还存在晶体和非晶结构共存的多晶系统。

2.5 紫外扫描结果

由图 3 可知,两种多糖在 260~280 nm 处均未检测到紫外吸收峰,说明多糖中不存在蛋白结构,表明经 Seavage 试剂处理后,两种多糖样品均不含蛋白质。

2.6 FT-IR 图谱分析

由图 4 可知,P2 峰型比 P1 的更加明确,特征官能团更为突出,进一步表明 P2 的多糖含量与品质较 P1 有一



(a) P1 (b) P2

图 1 扫描电子显微镜图

Figure 1 Scanning electron microscope images ($\times 1\,000$)

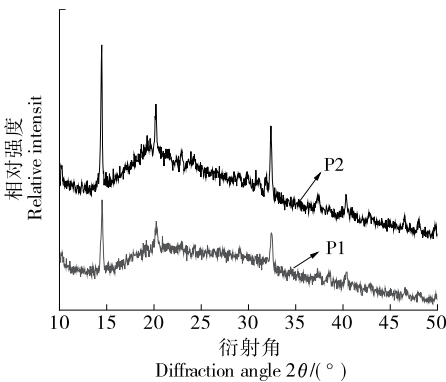


图 2 P1、P2 的 X 射线衍射图谱

Figure 2 X-ray diffraction patterns of P1 and P2

表 1 P1、P2 的单糖组成[†]

Table 1 Monosaccharide composition of P1 and P2

单糖	P1	P2
阿拉伯糖	7.70 ± 0.47^b	5.55 ± 0.25^b
木糖	4.10 ± 0.28^a	6.44 ± 0.18^b
甘露糖	32.61 ± 0.68^d	70.61 ± 0.95^d
葡萄糖	33.46 ± 0.59^e	13.80 ± 0.52^c
半乳糖	22.19 ± 0.87^c	3.72 ± 0.23^a

[†] 同列字母不同表示差异显著($P < 0.05$)。

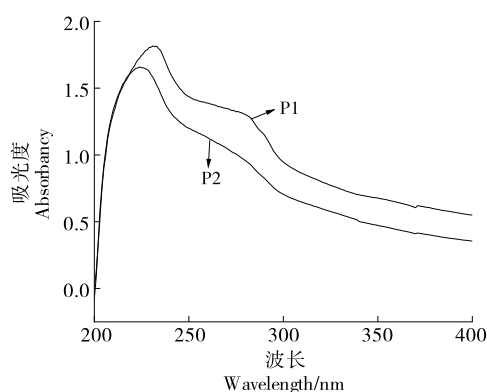


图 3 P1、P2 的紫外光谱图
Figure 3 Ultraviolet spectra of P1 and P2

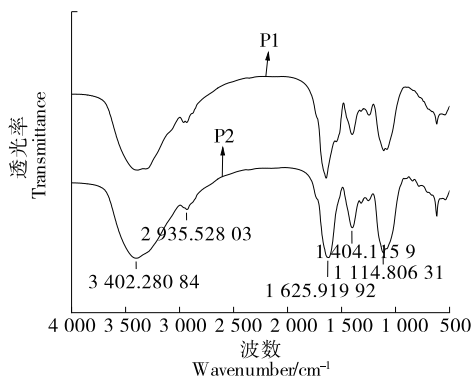


图 4 P1、P2 的红外光谱图
Figure 4 Infrared spectra of P1 and P2

定程度的提高。3 402 cm^{-1} 处有较宽、较强的谱带,该谱带归属于—OH 的伸缩振动;2 935 cm^{-1} 处弱峰属于 C—H 反对称拉伸振动;1 625 cm^{-1} 处出现不对称的拉伸峰,表明多糖中存在羧基,这与多糖中的水有关^[25];1 413 cm^{-1} 处为 C—H 剪切振动的特征吸收峰;1 200~1 000 cm^{-1} 的波段被指定为 C—O—C 键和糖苷桥^[26] 的价振动,1 154 cm^{-1} 处为 O—H 剪切振动峰值;1 024 cm^{-1} 处为 C—O—C 拉伸振动峰值^[27]。

2.7 刚果红试验结果

具有三螺旋结构的多糖在碱性条件下能与刚果红形成络合物,其最大吸收波长(λ_{max})随碱溶液浓度的增加而红移,分子间和分子内氢键断裂,并发生了从三螺旋到单螺旋的构象转变^[28]。由图 5 可知,与对照组相比,多糖溶液的 λ_{max} 红移,说明 P1、P2 均存在三螺旋结构。此外,随着 NaOH 浓度的增加,各多糖的 λ_{max} 下降。

2.8 TG 结果

由图 6 可知,两种多糖具有相似的失重曲线形态,其失重过程可分为 3 个阶段:① 30~200 $^{\circ}\text{C}$ 阶段,样品重量略有下降,可能是多糖失去了束缚水^[29];② 200~480 $^{\circ}\text{C}$ 阶段,多糖快速失重,其重量开始急剧下降,可能是由多糖的解聚和分解引起的^[30],多糖的大部分重量损失发生在该区域;③ 400~600 $^{\circ}\text{C}$ 阶段,由于多糖完全分解,样品

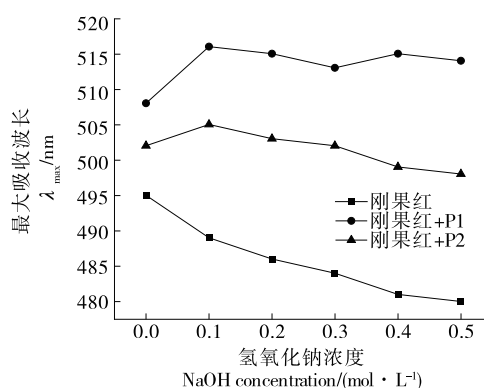


图 5 不同浓度 NaOH 下刚果红多糖混合物的最大吸收波长

Figure 5 Maximum absorption wavelength of Congo red polysaccharide mixture at different concentrations of NaOH

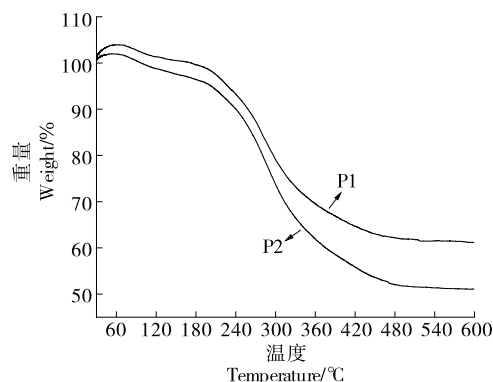


图 6 P1、P2 的 TG 图
Figure 6 TG diagrams of P1 and P2

的失重变得缓慢。P1、P2 最终重量分别降至其初始重量的 61.11%,51.04%,说明 P2 的热稳定性不如 P1。

2.9 分子量分析

多糖的分子量(M_w)是影响水溶液中多糖构型和形态的主要因素之一,并参与蛋白质—碳水化合物相互作用,影响其生物活性。由图 7 可知,多糖 P1、P2 分别在横坐标为 4.57,3.54 时出峰,其重均分子量分别为 37 153.52,3 467.37。

2.10 抗氧化试验

2.10.1 DPPH 自由基清除率 由图 8 可知,当样品质量浓度为 0.2~1.0 mg/mL 时,DPPH 自由基清除能力与多糖、维生素 C 质量浓度呈正相关,P2 各浓度下的清除率均显著强于 P1,但是 P1、P2 的清除率均显著低于维生素 C。P1、P2 和维生素 C 的 IC_{50} 值分别为 0.964,0.586,0.016 mg/mL ,DPPH 自由基清除率强弱顺序为维生素 C>P2>P1,说明多糖具有一定的 DPPH 自由基清除率,与林军等^[30] 的研究结论一致。

2.10.2 羟自由基清除率 由图 9 可知,当样品质量浓度为 0.2~1.0 mg/mL 时,P1、P2 和维生素 C 的羟自由基清

除能力随溶液质量浓度的增大而增强,与张秋红^[31]的研究结论一致。P1、P2 和维生素 C 的 IC_{50} 值分别为 0.962, 0.711, 0.450 mg/mL, 表明 P2 的羟自由基清除能力强于 P1, 但不如维生素 C。

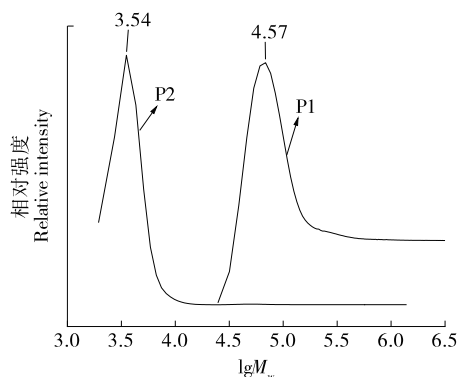
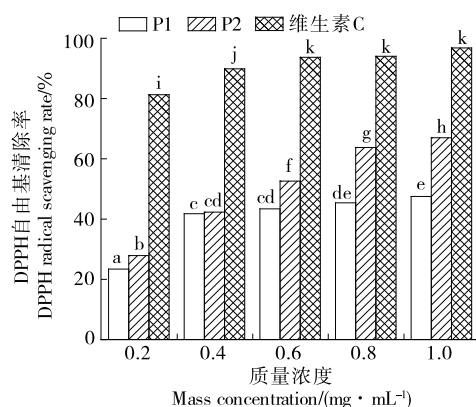


图 7 P1、P2 的分子量分布图

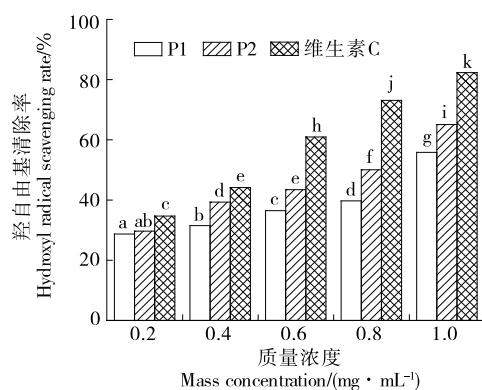
Figure 7 Molecular weight distribution of P1 and P2



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 8 P1、P2 和维生素 C 对 DPPH 自由基清除率的影响

Figure 8 Effects of P1, P2 and vitamin C on DPPH free radical scavenging rate

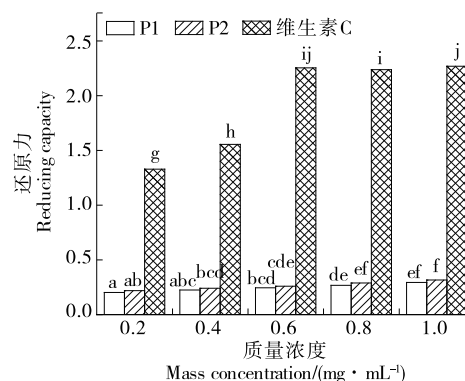


小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 9 P1、P2 和维生素 C 对羟自由基清除率的影响

Figure 9 Effects of P1, P2 and vitamin C on hydroxyl radical scavenging rate

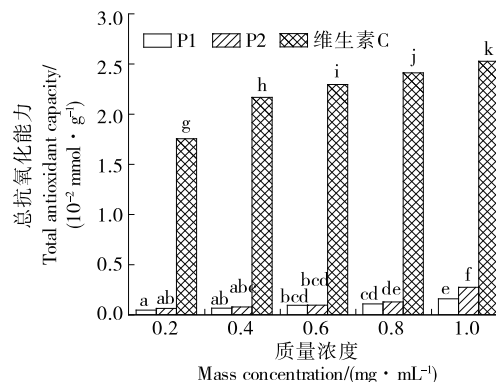
2.10.3 还原力与总抗氧化能力 由图 10 和图 11 可知, 两种多糖在各浓度水平下的还原力(抗氧化能力)均不如维生素 C, 在试验质量浓度范围内, 随着质量浓度的增加, 样品的还原力(抗氧化能力)随之显著增强, 当样品质量浓度为 1 mg/mL 时, P2 的还原力(抗氧化能力)显著强于 P1。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 10 P1、P2 和维生素 C 的还原力

Figure 10 Reducing capacity of P1, P2 and vitamin C



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 11 P1、P2 和维生素 C 的总抗氧化能力

Figure 11 Total antioxidant capacity of P1, P2 and vitamin C

3 结论

以山药皮和山药皮残渣为原料进行多糖提取, 并对其提取物的结构和抗氧化性进行分析。结果表明, 山药皮残渣中多糖提取得率与山药皮中相差不大, 且山药皮残渣多糖较山药皮多糖有着糖含量高、色泽亮度强、比表面积大、重均分子量小、抗氧化能力强等优势。虽然山药皮残渣多糖具有良好的抗氧化能力, 但是未能确定其发挥抗氧化活性成分的关键物质, 后续可通过分离纯化技术来进一步研究。

参考文献

[1] HUANG H, JIANG Q, CHEN Y, et al. Preparation, physico-chemical

- characterization and biological activities of two modified starches from yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) [J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 55: 244-253.
- [2] JU Y, XUE Y, HUANG J, et al. Antioxidant Chinese yam polysaccharides and its pro-proliferative effect on endometrial epithelial cells [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 66: 81-85.
- [3] LI Q M, LI Y, ZOU J H, et al. Influence of adding Chinese yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) flour on dough rheology, gluten structure, baking performance, and antioxidant properties of bread [J]. *Foods*, 2020, 9(3): 256.
- [4] CHEN J N, GAO Q, LIU C, et al. Comparison of volatile components in 11 Chinese yam (*Dioscorea* spp.) varieties[J]. *Food Bioscience*, 2020, 34: 100531.
- [5] KIM M, GU M J, LEE J G, et al. Quantitative analysis of bioactivephenanthrenes in *Dioscorea batatas* decne peel, a discarded biomass from postharvest processing [J]. *Antioxidants*, 2019, 8 (11): 541.
- [6] LUO D. Optimization of total polysaccharide extraction from *Dioscorea nipponica* Makino using response surface methodology and uniform design [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2012, 90 (1): 284-288.
- [7] WANG Y, YANG Z, WEI X. Antioxidant activities potential of tea polysaccharide fractions obtained by ultra filtration[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2012, 50(3): 558-564.
- [8] MA F, ZHANG Y, LIU N, et al. Rheological properties of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb. [J]. *Food Chemistry*, 2017, 227: 64-72.
- [9] CHENG Z, HU M, TAO J, et al. The protective effects of Chinese yam polysaccharide against obesity-induced insulin resistance[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 55: 238-247.
- [10] 许世浩, 刘宏炳, 何晨露, 等. 酒糟总氨基酸、总多酚、多糖含量测定及抗氧化活性研究[J]. *化学试剂*, 2022, 44(1): 32-38.
- XU S H, LIU H B, HE C L, et al. Determination of total amino acids, total polyphenols, polysaccharide content and antioxidant activity of Distiller's grains[J]. *Chemical Reagents*, 2022, 44(1): 32-38.
- [11] 苗晶因, 邱军强, 李海霞, 等. 一种黑木耳酸性多糖的分离纯化及其结构鉴定[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 1-8.
- MIAO J N, QIU J Q, LI H X, et al. Isolation, purification and identification of an acid polysaccharide of *auricularia auricula*[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(6): 1-8.
- [12] GAN J, HUANG Z, YU Q, et al. Microwave assisted extraction with three modifications on structural and functional properties of soluble dietary fibers from grapefruit peel[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105549.
- [13] MA Q, MA Z, WANG W, et al. The effects of enzymatic modification on the functional ingredient-Dietary fiber extracted from potato residue[J]. *LWT*, 2022, 153: 112511.
- [14] ABUDUWAILI A, NUERXIATI R, MUTAILIFU P, et al. Isolation, structural modification, characterization, and bioactivity of polysaccharides from *Folium Isatidis* [J]. *Industrial Crops and Products*, 2022, 176: 114319.
- [15] WANG K, LI M, WEN X, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of okra (*Abelmoschus esculentus* (L.) Moench) polysaccharides based on response surface methodology and antioxidant activity [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 114: 1 056-1 063.
- [16] ROZI P, ABUDUWAILI A, MA S, et al. Isolations, characterizations and bioactivities of polysaccharides from the seeds of three species *Glycyrrhiza* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 145: 364-371.
- [17] DU X, BAI X, GAO W, et al. Properties of soluble dietary fibre from defatted coconut flour obtained through subcritical water extraction[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2019, 54(4): 1 390-1 404.
- [18] JIA M, CHEN J, LIU X, et al. Structural characteristics and functional properties of soluble dietary fiber from defatted rice bran obtained through *Trichoderma viride* fermentation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 468-474.
- [19] XU J, XU L L, ZHOU Q W, et al. Enhanced in vitro antioxidant activity of polysaccharides from *Enteromorpha prolifera* by enzymatic degradation[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2016, 40 (3): 275-283.
- [20] CUI Y, LIU X, LI S, et al. Extraction, characterization and biological activity of sulfated polysaccharides from seaweed *Dictyopterisdivaricata* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 117: 256-263.
- [21] LIU Y, DU Y Q, WANG J H, et al. Structural analysis and antioxidant activities of polysaccharide isolated from *Jinjian* mushroom[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 64: 63-68.
- [22] WEI M X, WU Y M, CHEN D Z, et al. Changes of free radicals and digestive enzymes in saliva in cases with deficiency in syndrome[J]. *Journal of Biomedical Research*, 2010, 24(3): 250-255.
- [23] ZHANG T, YE J, XUE C, et al. Structural characteristics and bioactive properties of a novel polysaccharide from *Flammulina velutipes*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 197: 147-156.
- [24] 姚月华, 唐宁, 应照锐, 等. 红萍多糖结构特征、流变特性及抗氧化活性[J]. *食品与机械*, 2022, 38(3): 154-159, 172.
- YAO Y H, TANG N, YING X R, et al. Characterization, rheological study and antioxidant activities of polysaccharide from *Azolla*[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(3): 154-159, 172.
- [25] ZHAO M, YANG N, YANG B, et al. Structural characterization of water-soluble polysaccharides from *Opuntia monacantha* cladodes in relation to their anti-glycated activities [J]. *Food Chemistry*, 2007, 105(4): 1 480-1 486.
- [26] CHEN F, HUANG G, YANG Z, et al. Antioxidant activity of *Momordica charantia* polysaccharide and its derivatives [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 138: 673-680.

(下转第 206 页)

- [12] 林致通, 张东霞, 雷雯, 等. 基于模糊数学与感官质构分析建立鲜凉皮食用品质评价标准[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(7): 225-233.
- LIN Z T, ZHANG D X, LEI W, et al. Establish comprehensive quality standard of fresh Liangpi based on sensory evaluation combined with fuzzy mathematics [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(7): 225-233.
- [13] 贾庆超, 梁艳美. 模糊数学评价结合响应面法优化枸杞鸡枞菌复合饮料配方[J]. 中国酿造, 2021, 40(4): 115-121.
- JIA Q C, LIANG Y M. Optimization of *Lycium barbarum* and *Termitomyces albuminosus* compound beverage formula by fuzzy mathematics evaluation combined with response surface methodology[J]. China Brewing, 2021, 40(4): 115-121.
- [14] 王标明. 百香果的营养特性及栽培管理措施[J]. 中国果菜, 2020, 40(7): 111-113, 117.
- WANG B M. Nutritional characteristics and cultivation management measures of passion fruit[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(7): 111-113, 117.
- [15] 唐美玲, 段伟文, 段振华, 等. 超高压处理对百香果—火龙果复合饮料品质的影响及杀菌工艺优化[J]. 食品与机械, 2020, 36(2): 182-186, 236.
- TANG M L, DUAN W W, DUAN Z H, et al. Effect of ultra high pressure treatment on the quality of passion fruit-pitaya compound beverage and optimization of sterilization process [J]. Food & Machinery, 2020, 36(2): 182-186, 236.
- [16] 程宏桢, 蔡志鹏, 王静, 等. 百香果全果酒发酵工艺优化及体外抗氧化性比较分析[J]. 中国酿造, 2020, 39(4): 91-97.
- CHENG H Z, CAI Z P, WANG J, et al. Optimization of fermentation process for whole passion fruit wine and comparative analysis of antioxidant activity in vitro[J]. China Brewing, 2020, 39(4): 91-97.
- [17] 李佩佩, 颜向红, 王聪, 等. 不同发酵方式下枸杞饮料主要成分及其抗氧化活性[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 90-97.
- LI P P, XIE X H, WANG C, et al. Main components and antioxidant activities of *Lycium barbarum* L. beverages using two different fermentation processes [J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 90-97.
- [18] JULIA M C O, EVANDRO L S, KAÍQUE Y G L, et al. Physicochemical parameters, phytochemical profile and antioxidant properties of a new beverage formulated with Xique-Xique (*Pilosocereus gounellei*) cladode juice[J]. Foods, 2021, 10(9): 1-17.

(上接第 139 页)

- [22] 范三红, 胡雅楠, 何亚. 响应面法优化菊芋渣酶解制备抗氧化肽工艺[J]. 食品科学, 2015, 36(8): 49-53.
- FAN S H, HU Y N, HE Y. Optimization of enzymatic hydrolysis of jerusalem artichoke residue for preparing antioxidant peptides by response surface methodology [J]. Food Science, 2015, 36(8): 49-53.
- [23] 刘东伟, 袁玮琼, 柳梅, 等. 核桃粕蛋白抑菌肽的制备工艺及纯化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(2): 185-191.
- ZHANG D W, YU W Q, LIU M, et al. Preparation and isolation of antibacterial peptides from walnut dregs protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(2): 185-191.
- [24] 张维, 胡馨月, 赵行, 等. 响应面法优化紫贻贝鲜味肽酶法制备工艺[J]. 食品工业科技, 2021, 42(8): 206-214.
- ZHANG W, HU X Y, ZHAO X, et al. Response surface methodology for optimization of enzymatic preparation of umami peptides from *Mytilus edulis*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(8): 206-214.
- [25] 王安凤, 赵永强, 陈胜军, 等. 响应面法优化合浦珠母贝肉水解工艺[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(11): 165-171.
- WANG A F, ZHAO Y Q, CHEN S J, et al. Optimization of hydrolysis process of *Pinctada fucata* by response surface method [J]. Food and Fermentation Industries, 2017, 43(11): 165-171.
- [26] GUHA S, MAJUMDER K. Structural-features of food-derived bioactive peptides with anti-inflammatory activity: A brief review [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(1): e12531.
- [27] CHEN X, CHEN Y, DAI L, et al. MiR-96-5p alleviates inflammatory responses by targeting NAMPT and regulating the NF- κ B pathway in neonatal sepsis[J]. Bioscience Reports, 2020, 40(7): BSR20201267.

(上接第 158 页)

- [27] WANG Y, LI X, CHEN X, et al. Effect of stir-frying time during *Angelica Sinensis* Radix processing with wine on physicochemical, structure properties and bioactivities of polysaccharides[J]. Process Biochemistry, 2019, 81: 188-196.
- [28] SOUSSI N, BOUGHRIBA S, ABDELHEDI O, et al. Extraction, structural characterization, and thermal and biomedical properties of sulfated polysaccharides from razor clam *Solen marginatus*[J]. RSC Advances, 2019, 9(20): 11 538-11 551.
- [29] HAJJI M, HAMDI M, SELLIMI S, et al. Structural characterization, antioxidant and antibacterial activities of a novel polysaccharide from *Periploma laevigata* root barks [J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 206: 380-388.
- [30] 林军, 李高阳, 黄帆, 等. 分级醇沉紫薯多糖抗氧化活性与稳定性[J]. 食品与机械, 2022, 38(3): 189-196.
- LIN J, LI G Y, HUANG F, et al. Antioxidant and stability of polysaccharides from purple sweet potato by fractional alcohol precipitation[J]. Food & Machinery, 2022, 38(3): 189-196.
- [31] 张秋红. 超声细胞破碎仪辅助提取桑葚多糖及其抗氧化性分析[J]. 食品与机械, 2022, 38(6): 168-172.
- ZHANG Q H. Extraction of mulberry polysaccharide by ultrasonic cell crusher-assisting and its antioxidant activity analysis[J]. Food & Machinery, 2022, 38(6): 168-172.