DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260209003
引用格式: 谭子悦, 徐媛媛, 汤舒婧, 等. 阳江山药非淀粉多糖制备及其抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 19–28.
Tan Ziyue, Xu Yuanyuan, Tang Shujing, et al. Study on the extraction and antioxidant activity of non-starch polysaccharides from Yangjiang *Dioscorea opposita* Thunb. [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 19–28. (in Chinese with English abstract).

阳江山药非淀粉多糖制备及其抗氧化活性研究

谭子悦[1], 徐媛媛[1], 汤舒婧[1], 徐晓飞[1,2*]

(1. 广东海洋大学食品科学与工程学院, 阳江 529500; 2. 广东海洋大学阳江研究院, 阳江 529500)

摘 要: 目的 通过超声辅助水提法制备阳江山药非淀粉多糖, 并探究其抗氧化活性。**方法** 采用热水浸提法和超声辅助-热水浸提法结合糖化酶制备山药非淀粉多糖(分别命名为 CYP-H 和 CYP-U), 化学法分析两种非淀粉多糖的总糖、糖醛酸和蛋白质含量; 采用体积排阻色谱-多角度激光光散射技术、红外光谱、离子色谱等分析它们的分子量分布、红外吸收和单糖组成等结构特征, 并通过 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)自由基、羟基自由基、2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)[2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS]阳离子自由基、Fe^{3+}化学模型以及 2,2'-偶氮二(2-脒基丙烷)二盐酸盐[2,2'-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride, AAPH]诱导的斑马鱼氧化应激模型, 比较两种多糖的抗氧化活性。**结果** CYP-H 和 CYP-U 的得率分别为 17.72%和 19.53%, 其总糖、糖醛酸、蛋白质含量分别为 77.56%、19.51%、2.29%和 82.56%、20.67%、4.46%, 重均分子量分别为 5.263 kDa 和 6.645 kDa, 两者具有典型多糖的红外吸收光谱特征; 单糖组成分析显示, CYP-H 和 CYP-U 均含阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和甘露糖, 其摩尔比 CYP-H 为 1.0:6.8:93.5:11.1, CYP-U 为 1.0:4.8:185.2:13.1, 说明两种非淀粉多糖的化学组成和分子结构存在差异。在 2~10 mg/mL 范围内, 两种非淀粉多糖均可清除 DPPH 自由基、羟基自由基、ABTS 阳离子自由基以及还原 Fe^{3+}离子, 但 CYP-H 和 CYP-U 对不同自由基的清除能力呈现差异性。此外, CYP-H 和 CYP-U 均能降低 AAPH 诱导氧化应激斑马鱼模型体内的活性氧(reactive oxygen species, ROS)和丙二醛(malondialdehyde, MDA)水平、提高超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性并呈现出良好的量效关系, 且 CYP-U 的抗氧化效果优于 CYP-H。**结论** 超声波辅助可提高阳江山药非淀粉多糖的得率, 并可增强其体内抗氧化活性。研究结果为阳江山药在抗氧化功能食品中的应用提供了实验依据。

关键词: 山药; 非淀粉多糖; 超声波辅助提取; 氧化应激; 斑马鱼
中图分类号: TS201.2 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0019–10

收稿日期: 2026-02-09
基金项目: 广东省 2022 省科技专项资金("大专项+任务清单")项目(SDZX2022036); 广东海洋大学创新创业训练计划项目(S202510566081)
第一作者: 谭子悦(2004—), 男, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: 2452917357@qq.com
***通信作者:** 徐晓飞(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为功能食品。E-mail: xfxufe@gdou.edu.cn

Study on the extraction and antioxidant activity of non-starch polysaccharides from Yangjiang *Dioscorea opposita* Thunb.

TAN Zi-Yue[1], XU Yuan-Yuan[1], TANG Shu-Jing[1], XU Xiao-Fei[1,2*]

(1. *College of Food Science and Engineering*, *Guangdong Ocean University*, *Yangjiang* 529500, *China*; 2. *Yangjiang Institute of Guangdong Ocean University*, *Yangjiang* 529500, *China*)

ABSTRACT: Objective To prepare non-starch polysaccharides from Yangshan *Dioscorea opposita* Thunb. by ultrasonic-assisted water extraction, and investigate their antioxidant activities. **Methods** Hot-water extraction and ultrasonic-assisted hot-water extraction combined with glucoamylase were adopted to obtain *Dioscorea opposita* Thunb. non-starch polysaccharides, designated as CYP-H and CYP-U, respectively. The content of total sugar, uronic acid and protein of the 2 kinds of polysaccharides were determined by chemical assays. Size-exclusion chromatography coupled with multi-angle laser light scattering, Fourier-transform infrared spectroscopy and ion chromatography were used to characterize their structural features including molecular-weight distribution, infrared absorption and monosaccharide composition. The antioxidant activities of the 2 kinds of polysaccharides were compared via multiple chemical models including 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) radical, hydroxyl radical, 2,2'-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate) (ABTS) cation radical and Fe^{3+} reduction assay, as well as the zebrafish oxidative-stress model induced by 2,2'-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride (AAPH). **Results** The yields of CYP-H and CYP-U were 17.72% and 19.53%, respectively, with the total sugar, uronic acid and protein content of 77.56%, 19.51%, 2.29%, and 82.56%, 20.67%, 4.46%, respectively. Their weight-average molecular weights were 5.263 kDa and 6.645 kDa, respectively, and both exhibited typical infrared absorption spectra characteristics of polysaccharides. Ion chromatography analysis revealed that both CYP-H and CYP-U contained arabinose, galactose, glucose and mannose. The molar ratios were 1.0:6.8:93.5:11.1 for CYP-H and 1.0:4.8:185.2:13.1 for CYP-U. These results demonstrated the differences in the chemical composition and molecular structural characteristics of the 2 kinds of non-starch polysaccharides. Moreover, within the range of 2–10 mg/mL, both polysaccharides exhibited scavenging activity against DPPH radicals, hydroxyl radicals and $ABTS^{+}$ radicals, as well as Fe^{3+} reduction capacity. However, CYP-H and CYP-U exhibited differences in their ability to scavenge different free radicals. Moreover, both CYP-H and CYP-U reduced reactive oxygen species (ROS) and malondialdehyde (MDA) levels while enhancing superoxide dismutase (SOD) activities in the AAPH-induced oxidative stress zebrafish model, with CYP-U demonstrating superior efficacy compared to CYP-H and exhibiting a favorable dose-response relationship. **Conclusion** Ultrasonic assistance enhances the yield of non-starch polysaccharides from Yangjiang *Dioscorea opposita* Thunb. and modestly increases their antioxidant activity *in vivo*. These findings provide scientific support for the applications of Yangjiang *Dioscorea opposita* Thunb. in functional foods with antioxidant potential.

KEY WORDS: *Dioscorea opposita* Thunb.; non-starch polysaccharides; ultrasound-assisted extraction; oxidative stress; zebrafish

0 引 言

山药(*Dioscorea opposita* Thunb.), 又名淮山药、山芋、薯蓣, 是薯蓣科植物薯蓣的干燥根茎[1], 作为经济农作物广泛种植于热带与亚热带地区[2]。我国是山药重要的原产地之一, 有超过 55 个栽培变种在东北、华北、华中、西南等地区大规模种[3]。作为重要的食物能量来源, 山药富含淀粉(占其干物质的 75%~84%)、氨基酸、脂肪酸、维生素及矿物质元素等营养物质[4–5], 还含有多糖、多酚类、皂苷、尿囊素、黏液蛋白等多种活性成分[5]。据报道, 山药中多糖含量占干物质 7.4%~13.5%, 多酚含量约为 0.08%~0.11%[6]。山药作为我国传统的药食同源食物之一, 其药食两用价值在我国《本草纲目》等典籍中均有记载[7]。现代药理研究也发现, 山药中的活性成分使其具抗氧化、抗炎、胃肠道保护、肠道菌群调节、心脏疾病治疗、降血糖、抗肿瘤以及雌激素样效应[3]。

山药生长适应能力强, 形成了丰富的山药品种资源。不同种植地区和不同品种的山药中营养成分含量差异明显[8–9]。比如, 比较从湖北利川、广西桂林、湖南邵阳、贵州安顺和福建漳州出产的 9 种南方地区山药, 直链淀粉含量最低为 4.83%(利川山药)、最高为 28.70%(桂林山药)[10]; 沙质土壤中生长的山药块茎多糖总量占干物质的 36.55%; 黄土生

长占 27.54%, 连作沙质土壤生长占 24.55%[11]。除大量淀粉外, 山药还含有较为丰富的非淀粉多糖, 非淀粉多糖是山药中最主要的活性成分, 其结构复杂、种类多样, 分子量从数千到几百万道尔顿不等, 具有多种生物活性包括免疫调节、降血糖、降血脂、抗氧化、胃肠保护、抗疲劳以及益生元效应[12−14], 是重要的食品功能性成分。山药非淀粉多糖结构受提取方法的影响, 常用的提取方法包括冷水、温水或热水提取、研磨提取、酶辅助提取、深共熔溶剂提取、超声波辅助提取、超滤辅助提取等[12−14]。广东阳江地区种植山药已有二十余年历史, 该市所辖陂面镇被省农业厅评为淮山种植专业镇, 所产山药入选全国名特优新农产品目录[15]。然而, 目前陂面山药产业长期以鲜品初级供应为主, 产品价格受气候、产量与市场供需关系影响剧烈波动, 产业可持续发展面临瓶颈。尽管深加工是高值化利用和化解市场风险的有效途径, 但有关阳江陂面山药中关键活性成分——非淀粉多糖的研究却鲜有报道, 这严重制约了其精深加工技术的研发与应用。

氧化应激是许多慢性非传染性疾病(神经退行性疾病、糖尿病、心血管疾病、癌症等)发生发展的核心驱动力, 抗氧化成为慢性疾病防治的重要策略[16]。从天然可食资源中挖掘安全、高效的抗氧化活性成分, 是当前食品科学与健康领域的研究热点[17]。山药因其优异的生物活性与广泛的种植基础, 在健康保健领域展现出巨大潜力[18]。为探究阳江陂面山药非淀粉多糖的含量及生物活性, 推动其精深加工产业发展, 本研究通过热水浸提法和超声辅助-热水提取法分别制备阳江山药非淀粉多糖, 检测其化学组成、结构特征和体内外抗氧化活性, 以期为阳江山药在防治氧化应激相关食品中的深加工开发提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

新鲜山药, 购自广东省阳江市陂面镇; 野生型 AB 系斑马鱼, 30 d 鱼龄(南京尧顺禹生物科技有限公司)。

咔唑(纯度为 96%)、*D*-半乳糖醛酸(纯度≥98%)、刚果红(纯度≥97%)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH, 纯度≥98%)、2,2-连氮双-(3-乙基苯并二氢噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2’-azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS] (纯度 99%)、羟自由基清除率检测试剂盒、糖化酶(100000 U/g)(上海源叶生物科技有限公司); 溴化钾(色谱纯)、无水乙醇、硝酸钠(分析纯)、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、铁氰化钾、三氯乙酸(纯度≥99%)(国药集团化学试剂有限公司); 2,4,6-三吡啶基三嗪(2,4,6-tripyridyltriazine, TPTZ)溶液(10 mmol/L, 飞净生物科技有限公司); 快速 Lowry 法蛋白试剂盒(上海荔达生物科技有限公司); 丙二醛(malondialdehyde, MDA)检测试剂盒、总超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性检测试剂盒(上海碧云天生物技术股份有限公司); 三氟乙酸(色谱纯)、甲醇(分析纯)(上海安谱实验科技股份有限公司); 2,2’-偶氮二异丁基脒二盐酸盐[2,2’-azobis(2-amidinopropane) dihydrochloride, AAPH](分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司); *L*(+)-抗坏血酸(vitamin C, VC)(分析纯, 广东光华科技股份有限公司); 氢氧化钠(色谱纯)、乙酸钠(分析纯)、岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖、核糖、半乳糖醛酸、葡萄糖醛酸、甘露糖醛酸、古罗糖醛酸(纯度≥99%)(美国 Sigma-Aldrich 公司)。

1.2　仪器与设备

ESJ30-5A 电子天平(精度 0.00001 g, 沈阳神宇龙腾天平有限公司); XHRE-2000A 旋转蒸发仪(上海霄汉实业发展有限公司); DHG-9240A 电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司); BJ330A 中药粉碎机(德清拜杰电器有限公司); DF-101S 集热式恒温磁力搅拌器(巩义市予华仪器有限责任公司; TU-1901 紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); JY96-IIN 超声波细胞粉碎机(宁波新芝生物科技股份有限公司); LGJ-10C 真空冷冻干燥机(上海博登生物科技有限公司); OPTILAB T-rex 示差检测器、DAWN HELEOS-II激光光散射检测器(美国 Wyatt 公司); Ohpak SB-805 HQ 凝胶色谱柱(300 mm×8 mm, 13 μm)、OHpak SB-803 HQ 凝胶色谱柱(300 mm×8.0 mm, 6 μm)(日本 Shodex 公司); UltiMate3000 高效液相色谱仪、Reacti-thermo 氮气吹扫仪、ICS5000 离子色谱仪、Nicolet iS50 傅立叶变换红外光谱仪、Dionex™ CarboPac™ PA20 液相色谱柱(150 mm×3.0 mm, 6.5 μm)(美国 Thermo Fisher Scientific 公司); SpectraMax 多功能酶标仪(美谷分子仪器上海有限公司); H1850R 高速冷冻离心机、L550 低速大容量离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　山药非淀粉多糖的制备

(1)原料预处理

将新鲜山药洗净去皮、切片(厚度为 2~3 mm), 60 ℃烘箱中干燥 24 h 后粉碎过 100 目筛, 装洁净塑料袋于干燥器中保存。

(2)热水浸提山药非淀粉多糖

根据文献[19]所述方法, 称取一定量山药粉, 按照料液比 1:25 (g:mL)加入纯化水, 于 100 ℃条件下水浴 1 h, 过程不断搅拌使淀粉充分糊化, 冷却后按照山药粉质量的 3%加入糖化酶于 50 ℃下充分酶解(期间用碘液检测淀粉是否完全酶解完全), 随后将样液转移至 100 ℃下搅拌浸提 1.5 h, 然后离心(4000 *g*、20 min), 收集上清液用旋转蒸发仪在 50 ℃、–0.89 MPa 下浓缩至原体积的 1/3, 随后加入 4 倍

体积无水乙醇, 4 ℃静置过夜、离心(4000 *g*、20 min)弃上清液, 将沉淀加入超纯水复溶后, 装入 3500 Da 孔径透析袋于纯化水透析 3 d, 期间每 12 h 换水一次, 最后冻干得热水浸提山药非淀粉粗多糖(命名为 CYP-H)。粗多糖得率式(1)计算:

$$w/\%=\frac{n}{m}\times 100\% \quad (1)$$

式中: w 为山药粗多糖的得率, %; n 为冻干后粗多糖的质量, g; m 为山药粉的质量, g。

(3)超声辅助提取山药非淀粉多糖提取工艺

按照 1.3.1(2)步骤处理至山药酶解完成, 于 100 ℃条件下灭酶 10 min, 参照文献[20]条件将样液于 70 ℃、270 W 下超声提取 1.5 h, 样液离心(4000 *g*、20 min), 收集上清液按照上述步骤进行醇沉、透析、冻干, 得超声提取山药非淀粉粗多糖(命名为 CYP-U)。

1.3.2 总糖、蛋白质和糖醛酸含量检测

采用碘-碘化钾方法鉴别 2 种山药非淀粉多糖未显示蓝色[21], 说明不含淀粉。将粗多糖溶解于蒸馏水, 配置质量浓度为 1 mg/mL, 分别采用苯酚硫酸法[22]、快速 Lowry 法蛋白质含量测定试剂盒以及硫酸咔唑法[23]检测样品总糖、蛋白质以及糖醛酸的含量, 实验重复 2 次。

1.3.3 粗多糖分子质量及分子量分布测定

尺寸排阻色谱联合多角度激光散射(size exclusion chromatography-multi-angle light scattering, SEC-MALS)技术可以精确测量大分子物质的绝对分子质量和分子大小, 无需分子量对照品[24]。将粗多糖样品溶解于 0.1 mol/L 硝酸钠溶液(含 0.02% NaN_3), 最终质量浓度为 1 mg/mL, 过 0.45 μm 水系滤膜后注入高效液相凝胶色谱-示差-多角度激光光散射系统: SB-805 HQ 凝胶色谱柱 SB-803 HQ 凝胶色谱柱串联, 配备示差检测器和激光光散射检测器, 流动相(0.02% NaN_3, 0.1 mol/L 硝酸钠)流速 0.6 mL/min, 柱温 45 ℃, 进样量为 100 μL, 检测时间 75 min。多糖分子由大到小从色谱柱中流出, 示差检测器检测流出组分浓度, 多角度激光光散射仪检测分子的光散射信息, 计算获得流出组分的绝对分子量。

1.3.4 单糖组成测定

根据文献[25]所述方法, 称取约 2 mg 粗多糖样品于色谱瓶, 加入 1 mL 2 mol/L 三氟乙酸溶液于 121 ℃加热 2 h, 然后通氮气、吹干, 加入甲醇清洗后再吹干(重复甲醇清洗 2~3 次), 然后加入超纯水溶解, 转入色谱瓶中上样离子色谱仪分析(进样量 5 μL)。色谱条件: Dionex™ CarboPac™ PA20 液相色谱柱(150 mm×3.0 mm, 10 μm); 流动相 A (H_2O), 流动相 B (0.1 mol/L 氢氧化钠), 流动相 C (0.1 mol/L 氢氧化钠, 0.2 mol/L 乙酸钠), 流速 0.5 mL/min; 柱温 30 ℃; 洗脱梯度: 0 min A/B/C 相(95:5:0, *V*:*V*:*V*), 26 min A/B/C 相(75:5:20, *V*:*V*:*V*), 42 min A/B/C 相(75: 5: 20, *V*: *V*: *V*), 42.1 min A/B/C 相(60:0:40, *V*:*V*:*V*), 52 min A/B/C 相(60:40:40, *V*:*V*:*V*), 52.1 min A/B/C 相(95:5:0, *V*:*V*:*V*), 60 min A/B/C 相(95:5:0, *V*:*V*:*V*)。13 种单糖对照品分别以 0.5、1.0、5.0、10.0、20.0、30.0 μg/mL 配制混标, 同法检测建立峰面积-浓度标准曲线。离子色谱图利用软件 Chromeleon(版本 7.2.10)处理, 单糖依据保留时间定性、峰面积定量。

1.3.5 傅里叶变换红外光谱扫描

称取适量干燥的粗多糖样品和溴化钾粉末, 研磨均匀后制成片状, 用红外光谱仪在 400~4000 cm^{-1} 的条件下平均扫描 128 次, 分辨率为 4 cm^{-1}, 生成红外光谱图, OMNIC 软件(版本 8.2)用于光谱分析。

1.3.6 粗多糖体外抗氧化活性测定

(1) DPPH 自由基清除能力测定

根据文献[20]所述方法, 将 2 mL 不同质量浓度的多糖样液(0、2、4、6、8、10 mg/mL)与 2 mL DPPH 乙醇溶液(0.1 mmol/L)充分混合, 在室温黑暗中反应 30 min, 迅速移取 200 μL 至 96 孔板, 每个样品质量浓度设置 3 个复孔, 在 517 nm 下测吸光值。重复 2 次, 以 VC 作为阳性对照, 样品的 DPPH 自由基清除率按式(2)计算:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\%=(1-\frac{A_1-A_2}{A_0})\times 100\% \quad (2)$$

式中: A_0 为空白对照组吸光度值; A_1 为样品组吸光度值; A_2 为样品对照组吸光度值。

(2) $ABTS^+$自由基清除能力测定

根据文献[26]所述方法制得 ABTS 工作液。将 0.2 mL 不同浓度粗多糖样液与 1.2 mL ABTS 工作液充分混合, 在室温黑暗中反应 10 min, 移取 200 μL 至 96 孔板, 每个样品浓度设置 3 个复孔, 在 734 nm 处测量吸光值。重复 2 次, 以 VC 作为阳性对照, 样品的 $ABTS^+$自由基清除率按式(3)计算:

$$ABTS^+\text{自由基清除率}/\%=(1-\frac{B_1-B_2}{B_0})\times 100\% \quad (3)$$

式中: B_0 为空白对照组吸光度值; B_1 为样品组吸光度值; B_2 为样品对照组吸光度值。

(3)羟基自由基清除能力测定

不同浓度粗多糖样液的羟自由基清除能力按照试剂盒操作说明书检测, 以 VC 作为阳性对照。

(4)铁离子还原力测定

根据文献[27]所述方法, 取 1 mL 粗多糖样液至 15 mL 离心管中, 依次加入 2.5 mL 磷酸盐缓冲溶液(pH=6.60, 2 mol/L)和 2.5 mL 1%铁氰化钾溶液, 充分混合后于 50 ℃下水浴 20 min, 再加入 2.5 mL 10%三氯乙酸溶液, 离心(5000 *g*、10 min), 取 2.5 mL 上清液, 依次加入 0.5 mL 0.1%三氯化铁和 2.5 mL 蒸馏水, 于室温下反应 10 min, 移取 200 μL 至 96 孔板, 每个样品浓度设置 3 个复孔, 在 700 nm 处测量吸光值。重复 2 次, 以 VC 作为阳性对照, 样品铁离子还原力按式(4)计算:

$$\text{铁离子还原力}=D_1-D_0 \quad (4)$$

式中: D_0 为空白对照组吸光度值; D_1 为样品组吸光度值。

(5)总抗氧化能力测定

根据文献[27]所述方法制得总抗氧化能力(ferric reducing ability of plasma, FRAP)工作液。分别量取 25、50、100、200、400、800 μmol/L 的硫酸亚铁溶液于 10 mL 试管中, 加入 FRAP 工作液 3 mL, 于 37 ℃孵育 10 min, 在 595 nm 处测量吸光值。以硫酸亚铁浓度作为横坐标(*X*, μmol/L), 吸光值作为纵坐标(*Y*), 绘制浓度-吸光度标准曲线。根据同样的方法, 将不同质量浓度的粗多糖样液(0、2、4、6、8、10 mg/mL)与 FRAP 工作液反应, 测定吸光值, 依据标准曲线计算粗多糖相当于硫酸亚铁浓度的抗氧化能力。

1.3.7　山药多糖体内抗氧化活性研究

(1)斑马鱼饲养

参照文献[28]所述方法, 将提前曝气 1 d 的自来水转移至斑马鱼养殖系统, 保持水温为(28±1) ℃, 光照时长为 14 h, 黑暗 10 h, 每日按照每条斑马鱼喂食 3 mg, 早晚固定时间(9:00 和 19:00)各喂 1 次, 喂养 10 min 后清除残余饲料和排泄物。

(2) AAPH 诱导氧化应激浓度及粗多糖浓度确定

将斑马鱼分别置于 15、20、25、30 mmol/L AAPH 溶液中, 记录放置时间和观察斑马鱼的死亡情况, 确定 AAPH 的诱导浓度为 25 mmol/L, 每天诱导时间为 30 min。粗多糖浓度筛选: 将斑马鱼分别置于不同质量浓度粗多糖溶液中(6、8、10、12 mg/mL), 以斑马鱼头部是否出现红色充血作为耐受判断依据[28], 确定样品溶液的最大耐受质量浓度为 8 mg/mL, 每天处理时间为 120 min。

(3)粗多糖对氧化应激斑马鱼模型处理

将粗多糖 8 mg/mL 设定为高剂量组、2 mg/mL 设定为低剂量组, 分别将斑马鱼随机分 CYP-U(低剂量组、高剂量组)、CYP-H(低剂量组、高剂量组)、空白对照组、模型对照组, 每组 20 条。空白对照组用斑马鱼养殖系统水处理, 其余组在每天 9:00 喂食完后打捞至 25 mmol/L AAPH 溶液中处理 30 min 后转移至相应浓度样品溶液中处理 120 min, 以上处理完毕后将斑马鱼转移回养殖系统中, 实验持续时间 7 d。

(4)指标检测

实验结束后, 将各组斑马鱼匀浆后按照试剂盒说明书分别测定 ROS 清除率、SOD 活力和 MDA 浓度, 其中, ROS 清除率以模型对照组光密度(optical density, OD)值为 100%, 样品组 OD 值降低程度计算得出[29]。

1.4　数据处理

检测数值以平均值±标准偏差表示, 采用 Origin(版本 2021b)做图、SPSS(版本 22)单因素方差分析对多组间数据进行统计分析, $P<0.05$ 表示差异显著。

2　结果与分析

2.1　山药非淀粉粗多糖化学组成

山药粉经酶解、提取、醇沉、透析以及冻干后, 所得产物外观呈白色, CYP-H 得率为 17.72%, CYP-U 为 19.53%, 表明超声辅助能提高多糖提取率, 原因是超声波产生的空化效应导致植物细胞壁破裂并强化了传质过程, 释放出更多的胞壁和胞内成分, 从而提高了多糖的得率[30–31]。王晓敏等[32]采用超声波辅助、60 ℃水浴提取淮山药多糖, 提取率可达 15.2%, 与本研究结果较为接近。CYP-H 的总糖、糖醛酸、蛋白含量分别为 77.56%±3.46%、19.51%±3.71%和 2.29%±1.59%, 而 CYP-U 的含量分别为 82.56%±4.18%、20.67%±2.33%和 4.46%±0.92%, 表明两种提取方法所得非淀粉多糖的化学组成上存在差异。有研究对比双螺杆挤压膨化对山药非淀粉多糖得率和组成的影响发现, 挤压膨化处理可提高多糖得率、总糖和糖醛酸含量[33]。因此, 不同提取工艺不仅影响多糖的提取效率, 还对其结构完整性及组成产生影响, 其原因是不同提取强度造成糖苷键断裂程度和多糖从细胞壁基质中释放程度不同[12,14]。

2.2　分子质量分布和单糖组成

采用 SEC-MALS 法对 CYP-H 和 CYP-U 的分子量分布进行检测, 如图 1 所示, 示差信号显示 CYP-H 有 2 个峰(保留时间 31.0~33.5 min)、CYP-U 有 3 个峰(保留时间 28.5~33.5 min), 其中保留时间为 33.5 min 峰为溶剂峰, 说明两种多糖的分子量分布存在差异。根据多角度激光光散射仪信号计算得出两个多糖的分子量信息见表 1, CYP-H 的重均分子量为 5.263 kDa, CYP-U 的重均分子量为 6.645 kDa, CYP-U 的平均分子量高于 CYP-H, 但 CYP-U 的分子量分布范围稍广(分散指数大)。有报道采用 SEC-MALS 法测得文成糯山药多糖重均分子量为 145.693 kDa[34]; 而分别采用过热水提取、酸提取、高压热水提取以及酶辅助提取得到的山药多糖的平均分子质量分别为 514.7、153.9、318.2、36.9 kDa[35]。由此提示, CYP-H 和 CYP-U 的分子量差异是由提取方法的不同所导致。

两种粗多糖的红外光谱图如图 2(a)所示, 在 3200~3500 cm^{-1} 处有明显宽峰, 由羟基 O-H 的伸缩振动引起, 在 2930 cm^{-1} 和 2940 cm^{-1} 的特征峰是 C-H 的伸缩振动信号[36]; 在 1610~1650 cm^{-1} 范围有明显特征峰是 C=O 伸缩振动信号, 表明分子中含有糖醛酸[37], 与化学成分分析的实验结果相同; 此外, CYP-U 和 CYP-H 在 1200~1000 cm^{-1} 处均出现的多个典型吸收峰源于碳水化合物分子中 C-O、C-C 键的伸缩振动以及 C-O-H 的角振动[38], 因此 CYP-U 和 CYP-H 具有典型的多糖分子红外吸收特征。

通过比对标准品的保留时间和峰面积-浓度标准曲线, 如图 2(b)~(d)所示, CYP-H 由阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和甘露糖组成, 其摩尔比为 1.0:6.8:93.5:11.1; CYP-U 也由阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和甘露糖组成, 其摩尔比则为 1.0:4.8:185.2:13.1, 2 种非淀粉多糖均含 4 种单糖且以葡萄糖为主, 但单糖组成比例不同。然而, 单糖组成分析中未鉴定到糖醛酸, 与化学成分分析结果不符, 其原因可能是所用酸水解条件不足, 导致与糖醛酸链接的糖苷键未被水

解[39]。研究报道，浙江文成糯山药多糖由岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖和葡萄糖醛酸组成，且甘露糖含量较高[34]；河南铁棍山药多糖的单糖组成为甘露糖、鼠李糖、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖和阿拉伯糖，且葡萄糖比例高[40]；湖北佛手山药多糖含有阿拉伯糖、果糖、葡萄糖、甘露糖和半乳糖等单糖[41]；有报道利用纤维素酶法辅助提取温县焦作铁棍山药多糖由阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、甘露糖和半乳糖醛酸组成[42]。这些不同实验室的研究结果提示山药多糖的单糖组成和比例受山药产地、品种和提取方法的影响[43]。鉴于多糖中糖醛酸影响糖苷键水解的难易程度[44]，后续需进一步优化阳江山药多糖的糖苷键水解条件，鉴定所含糖醛酸的种类和比例。

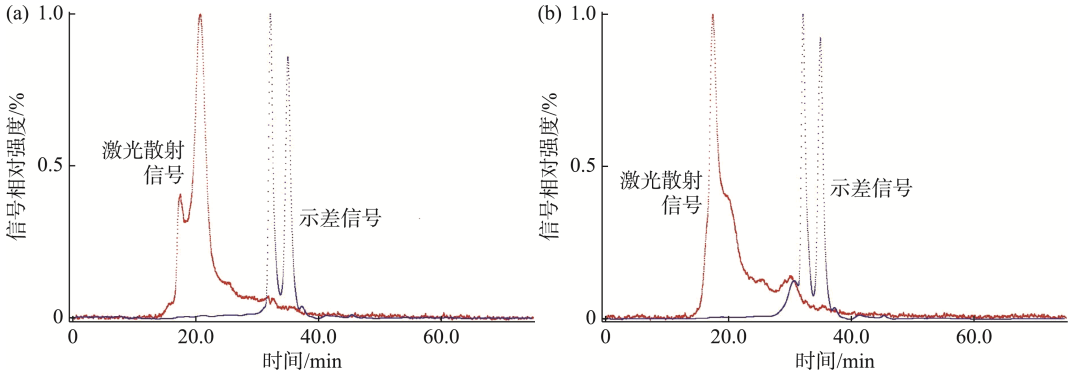


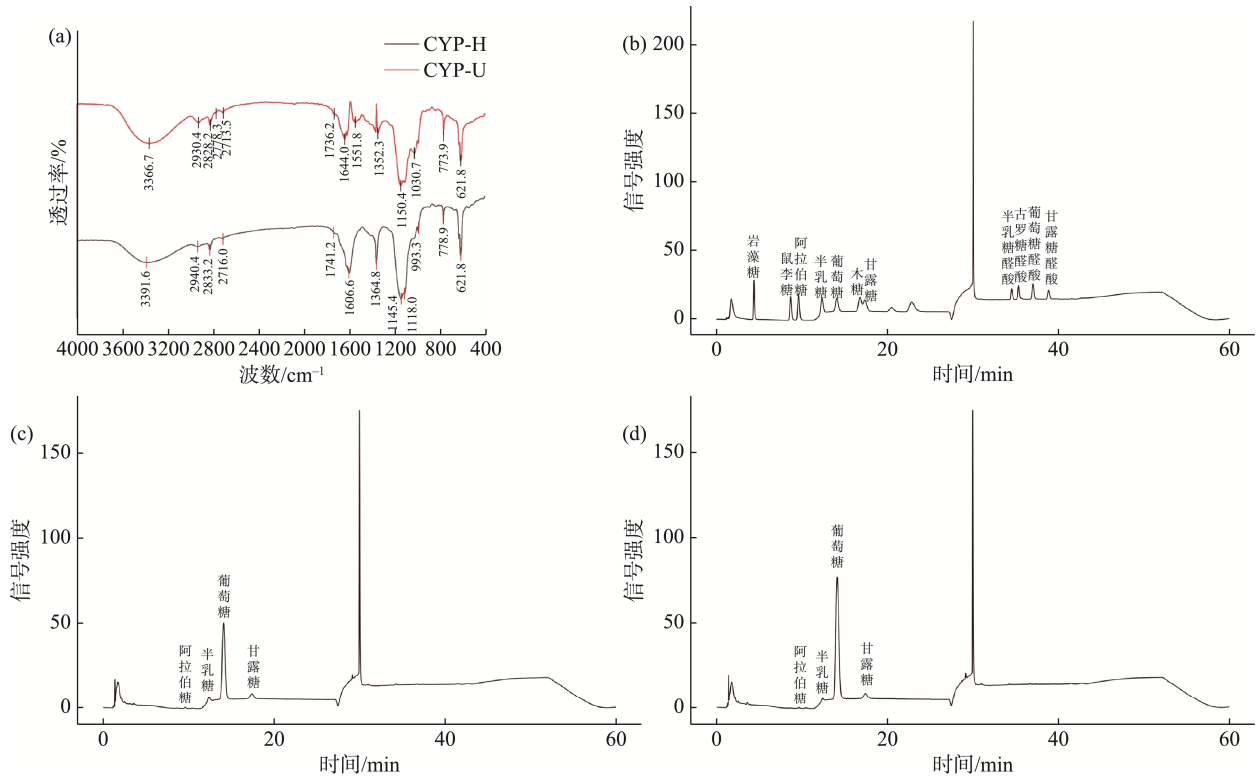
图 1 CYP-H (a)和 CYP-U (b)的 SEC-MALS 检测谱图

Fig.1 SEC-MALS spectrum of CYP-H (a) and CYP-U (b)

表 1 CYP-H 和 CYP-U 的分子量信息

Table 1 Molecular weight information of CYP-H and CYP-U

样品名称	数均分子量 /kDa	峰尖分子量 /kDa	重均分子量 /kDa	Z 均分子量 /kDa	分散指数(重均/数均分子量)
CYP-H	2.474	2.340	5.263	14.226	2.127
CYP-U	2.635	2.059	6.645	19.930	2.521



注：(a)红外光谱；(b)单糖混标离子色谱图；(c) CYP-H 离子色谱图；(d) CYP-U 离子色谱图。

图 2 CYP-H 和 CYP-U 的红外光谱和离子色谱图

Fig.2 Infrared spectrum and ion chromatograms of CYP-H and CYP-U

2.3　体外清除自由基活性分析

如图 3(a)~(c)所示, 在 2~10 mg/mL 质量浓度范围内, 两种非淀粉多糖对 DPPH 自由基的清除率随浓度的增加而提升, 低质量浓度时两者接近, 当质量浓度大于等于 8 mg/mL 时, CYP-U 的清除能力优于 CYP-H; 在羟基自由基清除率方面, CYP-U 随浓度增加清除率提升幅度较少, 当质量浓度在 6~10 mg/mL 时, CYP-H 的羟基自由基清除率快速增加, 且在 8~10 mg/mL 质量浓度时远远高于相同浓度的 CYP-U; 在 $ABTS^+$自由基清除率方面, 在 2~10 mg/mL 范围内, CYP-H 的清除率高于 CYP-U, 结果提示不同结构特征的多糖对不同类型自由基的清除有一定特异性。值得注意的是, CYP-H 和 CYP-U 对 3 种自由基的清除率远低于 VC, 说明山药多糖的体外抗氧化活性较弱, 与其他植物多糖的体外抗氧化活性结果相似[45–47]。FRAP 法基于 Fe^{3+}还原成 Fe^{2+}的浓度反映测试物总抗氧化能力的强弱, 如图 3(d)所示, 在测试浓度范围内, CYP-U 的总抗氧化能力增长平缓, 而 CYP-H 的总抗氧化能力表现出良好的浓度依赖性且强于 CYP-U。这些结果提示, 多糖的体外抗氧化活性强弱与自由基类型有关且受多糖结构如分子量、单糖组成与比例、功能基团等特性的影响[48]。

2.4　体内抗氧化活性分析

如图 4(a)所示, 两种非淀粉多糖对斑马鱼体内 ROS 清除率表现出明显的量效关系, 低剂量 CYP-H 和 CYP-U 处理斑马鱼后 ROS 清除率分别为 37.60%和 38.02%, 高剂量组达到 66.12%和 69.01%, 表明两种多糖均能够降低斑马鱼体内 ROS 水平。SOD 是生物体内一种重要的抗氧化酶, 如图 4(b)所示, 经 AAPH 诱导后, 模型组 SOD 活力由 156 U/mg 蛋白质降至 113 U/mg 蛋白质(P<0.05), CYP-H 和 CYP-U 低剂量组均可提升 SOD 活性但作用不显著(P>0.05), 与模型组相比, CYP-H 和 CYP-U 高剂量组的 SOD 活性显著提升(P<0.05), 表现出良好的量效关系; CYP-U 高剂量组的 SOD 活性明显高于 CYP-H 高剂量组(P>0.05), 说明 CYP-U 对 SOD 活性的保护作用优于 CYP-H。脂质过氧化产物 MDA 水平是反映机体氧化损伤程度的重要指标, 如图 4(c)所示, 与空白对照组相比, 模型对照组的 MDA 浓度显著升高(P<0.05), 表明 AAPH 诱导造成了严重的氧化损伤, 氧化应激模型构建成功; 经 CYP-H 和 CYP-U 处理后斑马鱼体内的 MDA 浓度显著降低(P<0.05), 并呈现剂量依赖性; 特别地, CYP-U 高剂量组的 MDA 水平显著低于 CYP-H 高剂量组(P<0.05), 与两种多糖对 SOD 活性保护作用效果相吻合。这些结果说明两种多糖均可降低 AAPH 诱导的体内氧化应激水平, 表现出抗氧化作用, 其中 CYP-U 的效果优于 CYP-H。研究表明, 多糖可以通过多条信号途径直接或间接调控体内抗氧化酶的表达, 从而降低氧化应激水平[48]。比如, 山药多糖可通过激活核因子 E2 相关因子 2/血红素加氧酶-1 信号通路, 提高细胞内 SOD 含量、降低 MDA 水平[49]。多糖构效关系表明, 抗氧化活性强弱与多糖分子构型、分子量、糖苷键类型、单糖组成与比例、水溶性等物理特征密切相关[48–50]。未来有必要对 CYP-U 和 CYP-H 进行进一步的分离纯化, 获得精确的结构特征信息, 探究不同提取方法获得的山药多糖的结构特点与抗氧化活性的差异, 丰富山药多糖结构与抗氧化活性的关系。

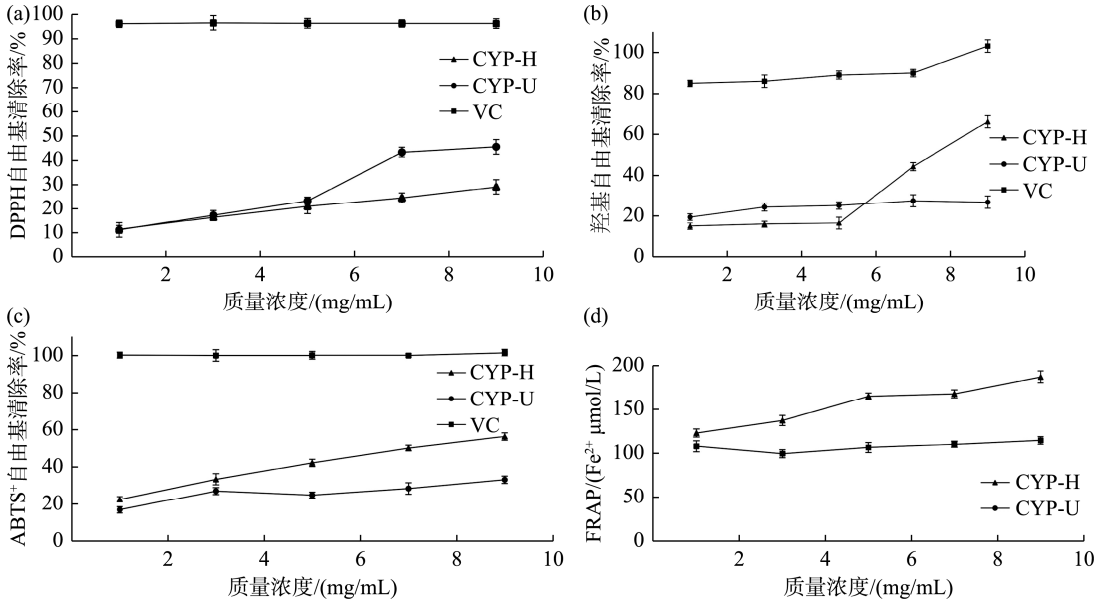
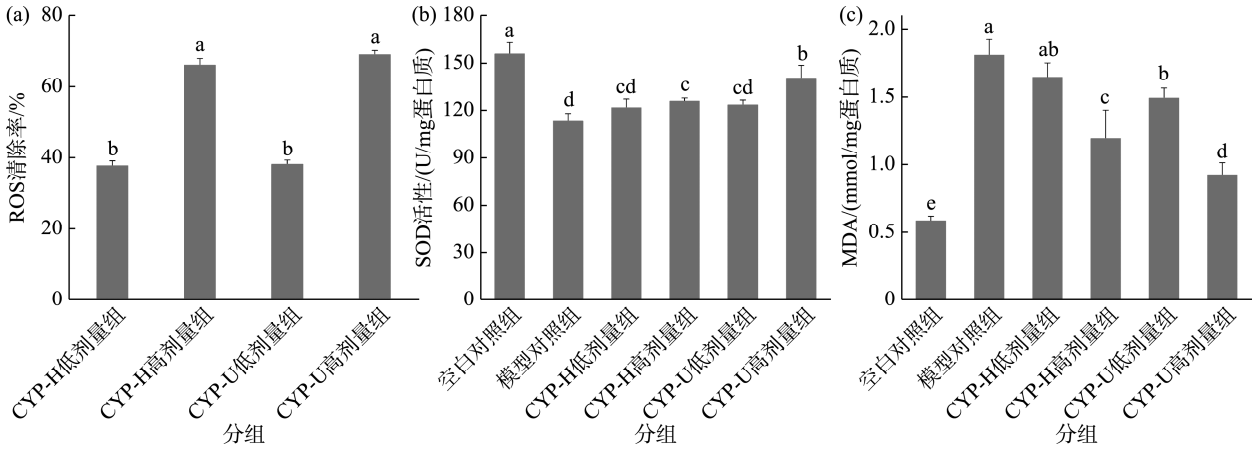


图 3　不同浓度的 CYP 对 DPPH 自由基清除率(a)、$ABTS^+$自由基清除率(b)、羟基自由基清除率(c)以及总抗氧化能力(d)的影响

Fig.3　Effects of different concentrations of CYP on DPPH radical scavenging rate (a), $ABTS^+$ radical scavenging rate (b), hydroxyl radical scavenging rate (c) and total antioxidant capacity (d)



注: 不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 4 CYP 对斑马鱼 ROS 水平(a)、MDA 水平(b)、SOD 活性(c)的影响

Fig.4 Effects of CYP on the levels of ROS (a), MDA (b) and SOD (c) activity in zebrafish

3 结 论

本研究以广东阳江陂面山药为原料, 分别采用热水浸提法和超声辅助-热水提取法制备非淀粉多糖 CYP-H 和 CYP-U。结果表明, 超声辅助提取可提高多糖得率(从 17.72%提升至 19.53%), 并影响其化学组成和结构特征, 两种多糖均含阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和甘露糖, 但单糖摩尔比存在差异。在体外化学模型中, CYP-H 和 CYP-U 对 DPPH、羟基和 $ABTS^{+}$自由基均表现出清除活性及 Fe^{3+}还原能力, 但活性弱于维生素 C; 在 AAPH 诱导的斑马鱼氧化应激模型中, 两种多糖均可降低体内 ROS 和 MDA 水平、提高 SOD 活性, 且 CYP-U 的抗氧化效果优于 CYP-H, 呈现良好的量效关系。研究结果为阳江山药的精深加工提供了实验依据, 未来需对非淀粉多糖进一步分离纯化和结构鉴定, 以阐释其抗氧化构效关系。

参考文献

[1] 陈梦雨, 刘伟, 俞桂新, 等. 山药化学成分与药理活性研究进展[J]. 中医药学报, 2020, 48(2): 62–66.
Chen Mengyu, Liu Wei, Chou Guixin, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological activities of *Dioscorea* opposita thunb [J]. Acta Chinese Medicine and Pharmacology, 2020, 48(2): 62–66.

[2] Raymundo R, Asseng S, Cammarano D, et al. Potato, sweet potato, and yam models for climate change: a review [J]. Field Crops Research, 2014, 166: 173–185.

[3] Li Ye, Ji Shengyang, Xu Tao, et al. Chinese yam (*Dioscorea*): nutritional value, beneficial effects, and food and pharmaceutical applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 134: 29–40.

[4] Yu Bin, Li Jie, Tao Haiteng, et al. Physicochemical properties and *in vitro* digestibility of hydrothermal treated Chinese yam (*Dioscorea* opposita Thunb.) starch and flour [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 176: 177–185.

[5] 潘景芝, 孟庆龙, 崔文玉, 等. 山药功能性成分及药理作用研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 420–428.
Pan Jingzhi, Meng Qinglong, Cui Wenyu, et al. Advances in studies on functional components and pharmacological effects of *Dioscorea* opposita thunb [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 420–428.

[6] 郭琪, 郭保党, 马燕, 等. 山药的活性成分与功能特性研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 431–439.
Guo Qi, Guo Baodang, Ma Yan, et al. Recent advances on active components and functional properties of Chinese yam [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 431–439.

[7] 徐小鸥, 官燮. 山药对人体多系统的健康影响[J]. 食品安全导刊, 2022(31): 104–106.
Xu Xiaoou, Guan Xie. Effects of Chinese yam on human health [J]. China Food Safety Magazine, 2022(31): 104–106.

[8] 刘广昊, 张桂香, 寇安琪, 等. 山药多维度品质评价体系的构建[J]. 中国果菜, 2026, 46(1): 16–23.
Liu Guanghao, Zhang Guixiang, Kou Anqi, et al. Construction of a multi-dimensional quality evaluation system for yam [J]. China Fruit & Vegetable, 2026, 46(1): 16–23.

[9] Shan Nan, Wang Putao, Zhu Qianglong, et al. Comprehensive characterization of yam *Tuber* nutrition and medicinal quality of *Dioscorea opposita* and *D. alata* from different geographic groups in China [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(11): 2839–2848.

[10] Zou Jinhao, Li Yan, Su Xiaojun, et al. Structure and processing properties of nine yam (*Dioscorea opposita* Thunb) starches from South China: a comparison study [J]. Molecules, 2022, 27(7): 2254.

[11] Ma Fanyi, Wang Ruijiao, Zhu Jinhua, et al. Characterisation comparison of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb. growing in sandy soil, loessial soil and continuous cropping [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 126: 776–785.

[12] Lang Yanhe, Qian Zhiru. Recent advances in the extraction, purification, structural characterization, bioactivities, and applications of polysaccharides from *Dioscorea opposita* [J]. Carbohydrate Research, 2026, 565: 109910.

[13] Zhang Luyao, Wang Shirui, Zhang Weimei, et al. Prospects of yam (*Dioscorea*) polysaccharides: structural features, bioactivities and

applications [J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138897.

[14] 黄少杰, 黎攀, 杜冰. 山药多糖的纯化、结构及生物活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(16): 209–215.
Huang Shaojie, Li Pan, Du Bing. Progress in purification, structure and bioactivity of Chinese yam polysaccharide [J]. Food Research and Development, 2022, 43(16): 209–215.

[15] 吴丰魏, 黄丽珊, 徐晓飞. 广东阳江地区淮山连作土壤中微生态的初步分析[J]. 浙江农业科学, 2025, 66(10): 2502–2510.
Wu Fengwei, Huang Lishan, Xu Xiaofei. Preliminary analysis of microecology in the soil of continuous cropping of *Dioscorea opposita* Thunb. in Yangjiang area, Guangdong Province [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2025, 66(10): 2502–2510.

[16] 张宁, 张文馨, 胡颖. 抗氧化防御系统及其在慢性疾病治疗中的应用[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2026, 42(6): 946–957.
Zhang Ning, Zhang Wenxin, Hu Ying. Targeting the antioxidant defense system for the treatment of chronic diseases [J]. Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 2026, 42(6): 946–957.

[17] Xu Baojun. Effect of dietary antioxidants in chronic disease prevention [J]. Antioxidants, 2025, 14(10): 1200.

[18] Khol M, Ma Fanyi, Lei Lijing, et al. A frontier review of nutraceutical Chinese yam [J]. Foods, 2024, 13(10): 1426.

[19] 杨欣宇, 高赛, 刘寅初, 等. 响应面法优化山楂多糖和山药多糖的提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(7): 38–44, 59.
Yang Xinyu, Gao Sai, Liu Yinchu, et al. Optimization of extraction process of polysaccharides from hawthorn and yam by response surface methodology and study on their antioxidant activities [J]. China Condiment, 2024, 49(7): 38–44, 59.

[20] Zhou Shiyang, Huang Gangliang, Chen Guangying. Extraction, structural analysis, derivatization and antioxidant activity of polysaccharide from Chinese yam [J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130089.

[21] Li Zhedong, Xiao Wenhao, Xie Jianhua, et al. Isolation, characterization and antioxidant activity of yam polysaccharides [J]. Foods, 2022, 11(6): 800.

[22] 吴金松, 耿广威, 任聪, 等. 超声辅助酶法提取山药皮水溶性多糖的工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(8): 90–97.
Wu Jinsong, Geng Guangwei, Ren Cong, et al. Optimization of enzymolysis-ultrasonic assisted extraction of water-soluble polysaccharides from peel of *Rhizoma dioscoreae* [J]. Food Research and Development, 2022, 43(8): 90–97.

[23] 杨钊, 周星彤, 于甜甜, 等. 海藻酸钠中糖醛酸含量测定方法的研究[J]. 中国卫生检验杂志, 2018, 28(9): 1049–1050, 1053.
Yang Zhao, Zhou Xingtong, Yu Tiantian, et al. Study on determination method of uronic acid content in sodium alginate [J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2018, 28(9): 1049–1050, 1053.

[24] Rajendar B, Reddy M J, Madhavi A, et al. Multi angle light scattering as a process analytical technology tool for real-time monitoring of molar mass of protein-polysaccharide conjugate fractions [J]. Journal of Chromatography Open, 2022, 2: 100045.

[25] 梁珊珊, 吴俊秋, 熊巧玲, 等. 白及多糖单糖组成及其抑制酪氨酸酶动力学机制[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(1): 9–16.
Liang Shanshan, Wu Junqiu, Xiong Qiaoling, et al. Monosaccharide composition and dynamic mechanism analysis of inhibiting tyrosinase of *Bletilla striata* polysaccharides [J]. Food Research and Development, 2025, 46(1): 9–16.

[26] Shao Yiwen, Kang Qiaozhen, Zhu Jiaqing, et al. Antioxidant properties and digestion behaviors of polysaccharides from Chinese yam fermented by *Saccharomyces* boulardii [J]. LWT, 2022, 154: 112752.

[27] 王远辉, 余晓宇. 铁棍山药多糖纯化及抗氧化活性[J]. 食品科技, 2018, 43(3): 165–172, 180.
Wang Yuanhui, Yu Xiaoyu. Antioxidant activity and purification of polysaccharide from *Dioscorea opposita* Thunb. cv. Tiegun [J]. Food Science and Technology, 2018, 43(3): 165–172, 180.

[28] 李琳, 陈丹, 范晓禹, 等. 英国红芸豆抗氧化肽对氧化应激斑马鱼的保护作用研究[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(2): 70–79.
Li Lin, Chen Dan, Fan Xiaoyu, et al. The protective effect of British red kidney bean antioxidant peptides on oxidatively stressed zebrafish [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(2): 70–79.

[29] 刘均, 冯巩, 谭蓉. 扁形绿茶加工过程中不同工艺对其抗氧化生物活性的影响[J]. 现代食品科技, 2025, 41(4): 275–285.
Liu Jun, Feng Gong, Tan Rong. Effect of different processing processeson antioxidant activity of flat shaped green tea during processing [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(4): 275–285.

[30] 邓嘉林, 类延菊, 周怡, 等. 超声波在植物多糖提取过程中应用的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(22): 184–191.
Deng Jialin, Lei Yanju, Zhou Yi, et al. Research progress on using ultrasonic waves in extraction of plant polysaccharides [J]. Food Research and Development, 2025, 46(22): 184–191.

[31] Chemat F, Rombaut N, Sicaire A G, et al. Ultrasound assisted extraction of food and natural products. Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 34: 540–560.

[32] 王晓敏, 林霖雨, 李康丽, 等. 超声波辅助提取山药多糖及体外抗氧化性研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(12): 24–28.
Wang Xiaomin, Lin Linyu, Li Kangli, et al. Ultrasonic-assisted extraction of yam polysaccharides and its antioxidant activity *in vitro* [J]. Food Research and Development, 2018, 39(12): 24–28.

[33] 薛丽洁, 马丽苹, 焦昆鹏, 等. 挤压对山药中非淀粉多糖理化性质和生物活性的影响[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(1): 164–172.
Xue Lijie, Ma Liping, Jiao Kunpeng, et al. Effect of extrusion on physicochemical properties and biological activity of non-starch polysaccharides from Chinese yam [J]. China Food Additives, 2022, 33(1): 164–172.

[34] 张百刚, 杨善德, 李燕, 等. 文成糯山药多糖纯化与体外生物活性研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 113–121.
Zhang Baigang, Yang Shande, Li Yan, et al. Purification and *in vitro* bioactivity of polysaccharide from Wencheng waxy yam [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 113–121.

[35] Zhao Zuowei, Wang Li, Ruan Yuan, et al. Physicochemical properties and biological activities of polysaccharides from the peel of *Dioscorea opposita* Thunb. extracted by four different methods [J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 130–139.

[36] Luo Donghui, Liu Xiaofei, Guan Jingjing, et al. Effects of *Tremella fuciformis*-derived polysaccharides with different molecular weight on *D*-galactose-induced aging of mice [J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2023: 163–174.

[37] 葛智超, 郎蒙, 李燕. 裸藻多糖的分离纯化、单糖组成及其抗氧化活性

[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(3): 564–571.
Ge Zhichao, Lang Meng, Li Yan. Isolation, purification, monosaccharide composition and antioxidant activity analysis of *Euglena gracilis* polysaccharides [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(3): 564–571.

[38] Barker S A, Bourne E J, Stacey M, et al. Infra-red spectra of carbohydrates. Part I. Some derivatives of *D*-glucopyranose [J]. Journal of the Chemical Society (Resumed), 1954: 171.

[39] 李亚平, 周鸿立. 多糖中糖醛酸含量测定方法的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 49(17): 207–211.
Li Yaping, Zhou Hongli. Progress on determination content of uronic acid in polysaccharides [J]. Food Research and Development, 2019, 49(17): 207–211.

[40] 张传香, 丁洁, 刘欣, 等. 山药多糖除淀粉前后的结构和免疫活性比较[J]. 现代食品科技, 2026, 42(1): 101–109.
Zhang Chuanxiang, Ding Jie, Liu Xin, et al. Comparison of structure and immune activity of *Dioscorea opposita* Thunb. polysaccharides before and after starch removal [J]. Modern Food Science & Technology, 2026, 42(1): 101–109.

[41] 李想, 何荧珠, 李龙, 等. 山药多糖构效关系及产业应用[J]. 食品科技, 2023, 48(11): 184–191.
Li Xiang, He Yingzhu, Li Long, et al. Structure-activity relationship and industrial application of Chinese yam polysaccharides [J]. Food Science and Technology, 2023, 48(11): 184–191.

[42] Liu Xuexia, Gu Lingbiao, Zhang Guangjie, et al. Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides extracted from Chinese yam by a cellulase-assisted method [J]. Process Biochemistry, 2022, 121: 178–187.

[43] Guo Yuanyuan, Liu Fangrui, Zhang Jin, et al. Research progress on the structure, derivatives, pharmacological activity, and drug carrier capacity of Chinese yam polysaccharides: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 261(Pt 2): 129853.

[44] 赵宁, 韩著, 简颖琳, 等. 中药多糖结构表征及质量评价研究进展[J]. 中草药, 2024, 55(21): 7491–7506.
Zhao Ning, Han Zhu, Jian Yinglin, et al. Research progress on structural characterization and quality evaluation of traditional Chinese medicine polysaccharides [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2024, 55(21): 7491–7506.

[45] 冯盼盼, 方颂平, 刘贝, 等. 黄水多糖醇沉工艺优化及其体外抗氧化、降血糖活性分析[J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 254–263.
Feng Panpan, Fang Songping, Liu Bei, et al. Optimization of the Huangshui polysaccharide ethanol precipitation process and its antioxidant and hypoglycemic activities *in vitro* [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 254–263.

[46] 郑玉凤, 陈兆媛, 喻丹丹, 等. 超声波辅助纤维素酶提取佛手山药多糖及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(23): 115–123.
Zheng Yufeng, Chen Zhaoyuan, Yu Dandan, et al. Ultrasound-assisted cellulase extraction and antioxidant activity of polysaccharide from Foshou yam [J]. Food Research and Development, 2025, 46(23): 115–123.

[47] 薛地, 易宇欣, 惠博阳, 等. 红枣多糖的分离纯化、结构表征及生物活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(19): 288–297.
Xue Di, Yi Yuxin, Xi Boyang, et al. Isolation, structural characterization and biological activity of *Ziziphus jujuba* polysaccharides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(19): 288–297.

[48] Liu Xiaofei, Huang Liufang, Zhang Xuewu, et al. Polysaccharides with antioxidant activity: extraction, beneficial roles, biological mechanisms, structure-function relationships, and future perspectives: a review [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 300: 140221.

[49] 李朋月, 景永帅, 吴兰芳, 等. 山药多糖对脑缺血再灌注损伤的保护作用机制[J]. 中国药理学与毒理学杂志, 2021, 35(9): 675–676.
Li Pengyue, Jing Yongshuai, Wu Lanfang, et al. Protective mechanism of *Dioscorea polysaccharide* against cerebral ischemia-reperfusion injury [J]. Chinese Journal of Pharmacology and Toxicology, 2021, 35(9): 675–676.

[50] Chen Nuo, Jiang Tingyue, Xu Jianxin, et al. The relationship between polysaccharide structure and its antioxidant activity needs to be systematically elucidated [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270(Pt 2): 132391.

(责任编辑: 蔡世佳 曹岱琳)