

桂郁金多糖结构表征及其体外抗氧化活性研究

关媛, 严淑昕, 钱少林, 王雪盈, 陆芽春, 李霞*
(桂林理工大学, 广西 桂林 541000)

摘要: 目的 表征桂郁金多糖结构, 并考察其体外抗氧化活性。方法 以桂郁金为原料, 采用热水提取法提取粗多糖, DEAE-52纤维素柱层析分离得到中性糖(WPCK-N)、酸性糖(WPCK-A), 对两者进行理化性质分析和结构表征, 测定其DPPH、羟基自由基清除能力及铁离子还原能力。结果 WPCK-N、WPCK-A总糖量分别为76.16%、54.02%, 分子量分别为 2.88×10^5 、 1.39×10^5 Da。WPCK-N主要由葡萄糖组成, 而WPCK-A主要由半乳糖、葡萄糖组成, 并且具有明显的糖醛酸结构。WPCK-N、WPCK-A外貌形状都比较粗糙, 前者整体上更小; 两者对DPPH自由基、羟基自由基都具有清除作用, 并表现出还原能力, 前者更明显, DPPH自由基清除率为56.78%。结论 桂郁金多糖具有较好的抗氧化活性。

关键词: 桂郁金; 多糖; 结构表征; 体外抗氧化活性

中图分类号: R284.1

文献标志码: B

文章编号: 1001-1528(2023)12-4166-05

doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2023.12.054

郁金是郁金属植物温郁金、姜黄、广西莪术的干燥块根^[1], 它及其所含生物活性成分可调控多种凋亡蛋白、炎症因子、酶和非酶抗氧化剂^[2]。该植物性寒, 归肝、心、肺经, 具有活血止痛、行气解郁、癩痢痰闭、利胆退黄等功效^[3], 其提取物具有抗炎、抗菌、抗抑郁、抗肿瘤、免疫调节等功能^[4]。

机体氧化应激会导致皮肤衰老、免疫功能下降、内分泌紊乱、肠炎等^[5-6]风险。桂郁金中富含多糖类成分, 具有降血糖^[7]、抗脂质过氧化、抗凝血活性^[8], 但目前对该类成分分离纯化、结构、活性等方面的研究较少。Xu等^[9]通过水提法得到莪术多糖, 能加快糖尿病小鼠的创面收缩, 促进皮肤再生。Dong等^[10]从莪术中提取多糖, 能提高小鼠抗免疫调节能力, 具有抑制肿瘤作用。侯敏娜等^[11]以姜黄郁金为原料, 研究了它对DPPH、ABTS自由基的清除能力。本实验从桂郁金中分离得到2种多糖, 初步表征其结构特征, 研究其体外抗氧化活性, 旨在为开发新型天然抗氧化剂提供依据。

1 材料

1.1 试剂与药物 浓硫酸(批号210916, 纯度95.0%~98.0%)、氨基磺酸(批号210205, 纯度 $\geq 99.5\%$)、七水合硫酸亚铁(批号161012, 纯度99.0%~101.0%)、磷酸氢二钠(批号180619, 纯度 $\geq 99.0\%$) (汕头市西陇科学股份有限公司); 抗坏血酸[批号J2120100, 阿拉丁试剂

(上海)有限公司, 纯度 $\geq 99.0\%$]; 3, 5-二硝基水杨酸(批号RH249811, 纯度98%)、铁氰化钾(批号S61033, 纯度98%) (上海源叶生物科技有限公司); 1, 1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH, 批号W3008E46572, 美国Sigma公司); 其他试剂均为分析纯。桂郁金(批号160401, 产地广西钦州, 广西南宁生源中药饮片责任有限公司), 经桂林理工大学副研究员李静鉴定为广西莪术 *Curcuma kwangsiensis*。

1.2 仪器 SQP电子天平(德国Sartorius公司); ALPHA1-2 LD型冷冻干燥机(德国Martin Christ公司); Nicolet iS 10型傅里叶红外变换光谱仪(上海亚荣生化仪器厂); YK722PC型紫外可见分光光度计(北京瑞利分析仪器有限公司); XD-5210A型旋转蒸发仪、YJD20D-GL型十功能自动煎药机(上海贤德实验仪器有限公司); 98-1-B型电子调温电热套(天津市泰斯特仪器有限公司); DL-5-B型大型离心机(上海安亭科学仪器厂); BT100-2J型恒流泵(保定兰格恒流泵有限公司)。

2 方法

2.1 多糖制备 参考文献[12-13]报道, 将桂郁金与75%乙醇以1:20比例浸泡过夜, 电热套加热5h以去除脂溶性杂质。乙醇提取后的药材于通风处晾晒至干燥后, 与蒸馏水以1:16比例在100℃下提取3h, 共2次。旋转蒸发仪浓缩后, 加入无水乙醇至终体积分数为60%, 静置

收稿日期: 2022-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(32000253); 广西自然科学基金青年基金项目(2021JJB130086); 广西高校中青年教師科研基础能力提升项目(2020KY06018)

作者简介: 关媛(1989—), 女, 博士, 讲师, 从事生物大分子结构与功能研究。Tel: 19178305102, E-mail: 2019017@glut.edu.cn

* **通信作者:** 李霞(1981—), 女, 博士, 教授, 从事特色生物资源的研究与开发。Tel: 18107735083, E-mail: biology754@163.com

网络出版日期: 2022-12-29

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1368.R.20221228.1509.002.html>

24 h后 4 000 r/min 离心 15 min, 收集沉淀, 蒸馏水溶解, 冷冻干燥, 得到粗多糖, 取 2 g 至 200 mL 蒸馏水中溶解, 得到 10 mg/mL 溶液, 在 -20 °C 下冷冻 24 h 后 4 °C 下解冻, 8 000 r/min 离心 10 min, 取上清, 采用 DEAE52 柱层析进行分离, 蒸馏水洗脱得到中性糖部分 WPCK-N, 0.7 mol/L NaCl 洗脱得到酸性糖部分 WPCK-A。

2.2 理化性质测定 以葡萄糖为对照品, 采用苯酚-硫酸法测定总糖含量^[14], 取 1 mL 0.1 g/L 样品溶液至试管中, 加入 0.5 mL 6% 苯酚溶液、2.5 mL 浓硫酸, 振荡, 沸水浴反应 10 min, 于 490 nm 波长处测定吸光度。以半乳糖醛酸为对照品, 采用间羟基苯基法检测糖醛酸含量^[15], 在试管中依次加入 400 μL 0.1 g/L 样品溶液、40 μL 氨基磺酸、2.5 mL 浓硫酸, 振荡摇匀, 沸水浴 20 min, 冷却至室温后加入 40 μL 间羟基苯基试剂, 室温反应 15 min, 于 525 nm 波长处测定吸光度。以牛血清白蛋白 (BSA) 为对照品, 采用考马斯亮蓝法测定蛋白含量。采用 3, 5-二硝基水杨酸法测定还原糖含量^[16], 取 1 mL 样品溶液, 加入 1 mL 蒸馏水、1.5 mL DNS, 沸水浴 5 min, 冷却至室温后定容至 25 mL, 于 540 nm 波长处测定吸光度。

2.3 单糖组成分析 以 1-苯基 3-甲基 5-吡唑酮 (PMP) 进行样品衍生化。称取 10 mg 样品, 5 mL 3 mmol/L 三氟乙酸在 105 °C 下水解 6 h, 加入 100 μL 0.3 mmol/L 氢氧化钠、0.3 mmol/L PMP, 在 70 °C 下放置 1 h, 冷却至室温, 100 μL 0.3 mmol/L 盐酸中和混合物, 氯仿提取 3 次, 采用 HPLC 法对水相进行分析, 条件为安捷伦 XDB-C₁₈ 色谱柱 (4.6 mm×250 mm, 5 μm); 流动相 0.05 mmol/L 磷酸盐缓冲液 (A, pH=6.8) -83% 乙腈 (B), 梯度洗脱 (0~6 min, 90%~85% A; 7~13 min, 85%~80% A; 30~36 min, 65%~60% A; 60~67 min, 40%~35% A); 体积流量 1 mL/min; 柱温 30 °C; 检测波长 254 nm; 进样量 10 μL^[16]。

2.4 多糖分子量测定 采用高效凝胶渗透色谱仪, 凝胶柱选用 TSK-gel G-4000PWxl; 洗脱液 0.02 mmol/L 磷酸二氢钾溶液; 体积流量 0.5 mL/min; 检测器 Waters2414 示差折光检测器; 不同分子量葡聚糖 (T1000、T500、T70、T40、T10、T5) 校准色谱柱; 柱温 35 °C^[17-18]。

2.5 红外光谱测定 取 1 mg 样品, 于玛瑙研钵中与 100 mg KBr 混合, 在红外烘灯下烘干研磨, 取少量粉末在 9.81

GPa 压力下压 30 s, 制成薄片, 红外光谱仪在 4 000 ~ 500 cm⁻¹ 波数范围内进行红外光谱扫描^[19]。

2.6 XRD 测定 参考文献 [20] 报道, 采用 X 射线粉末衍射仪对样品进行测定, 条件设置为管压 40 kV; 管流 30 mA; 数据采集范围 5 ~ 80°; 步幅 0.02°; 计数时间 0.78 s/step。

2.7 扫描电镜测定 取样品粉末适量, 通过导电胶粘附于扫描电镜样品台上, 喷金处理 20 s, 在扫描电子显微镜下观察外貌形态, 放大倍数为 1 000, 并进行拍照。

2.8 体外抗氧化活性研究 以抗坏血酸为阳性对照, 样品浓度分别为 0.2、0.4、0.8、1.6、3.2 mg/mL, 平行 3 次。

2.8.1 DPPH 自由基清除能力 参考文献 [21] 报道, 将 50 μL 不同浓度样品溶液与 200 μL 0.004% DPPH 溶液 (无水甲醇溶解) 混合反应, 在 37 °C 下避光反应 1 h, 12 000 r/min 离心 5 min, 于 517 nm 波长处测定吸光度 A₁; 用无水甲醇代替 DPPH 溶液, 测定吸光度 A₂; 用蒸馏水代替样品溶液, 测定吸光度 A₀, 计算 DPPH 自由基清除率, 公式为清除率 = [1 - (A₁ - A₂)] × 100%。

2.8.2 羟基自由基清除能力 参考文献 [22-23] 报道, 将 50 μL 样品溶液与 100 μL 9 mmol/L 硫酸亚铁、100 μL 9 mmol/L 水杨酸 (无水乙醇溶解) 混合, 加入 100 μL 过氧化氢 (8.8 mmol/L), 在 25 °C 下反应 30 min, 12 000 r/min 离心 5 min, 于 510 nm 波长处测定吸光度 A₁; 用蒸馏水代替过氧化氢, 测定吸光度 A₂; 用蒸馏水代替样品溶液, 测定吸光度 A₀, 计算羟基自由基清除率, 公式为清除率 = [1 - (A₁ - A₂) / A₀] × 100%。

2.8.3 铁离子还原能力 参考文献 [24] 报道, 将 1.0 mL 样品溶液与 1.0 mL 1% 铁氰化钾溶液混合, 在 50 °C 下反应 20 min, 冷却至室温后, 加 1.0 mL 10% 三氯乙酸, 5 000 r/min 离心 15 min, 取 2.5 mL 上清液与 0.15 mL 0.1% 氯化铁混合, 于 700 nm 波长处测定吸光度。

3 结果

3.1 多糖组成 表 1 显示, WPCK-N 主要由葡萄糖组成, 还含有少量甘露糖、半乳糖, 而 WPCK-A 主要由半乳糖、葡萄糖组成, 还含有少量甘露糖、阿拉伯糖、鼠李糖、木糖、岩藻糖; 两者酸性单糖含量均较低。综上所述, 从桂郁金中提取的多糖大多为中性糖。

表 1 桂郁金多糖组成分析

样品	总糖/ %	糖醛酸/ %	还原糖/ %	蛋白质/ %	淀粉/ %	分子量/ Da	单糖/%								
							甘露糖	鼠李糖	葡萄糖 醛酸	半乳糖 醛酸	葡萄糖	半乳糖	木糖	阿拉伯糖	岩藻糖
WPCK-N	76.16	0.77	9.59	0.10	0.92	2.88×10 ⁵	0.8	—	—	—	98.3	0.9	—	—	—
WPCK-A	54.02	9.25	9.13	0.03	1.46	1.39×10 ⁵	12.6	8.6	4.4	5.5	21.4	26.9	6.3	11.7	2.5

3.2 红外光谱 图 1 显示, WPCK-N 在 3 410 cm⁻¹ 附近的宽拉伸峰对应于 O-H 的拉伸振动, 2 920 cm⁻¹ 附近具有弱 C-H 拉伸振动的特征吸收, 1 400 ~ 1 000 cm⁻¹ 分别由 O-H、C-H 伸缩振动导致, 678 cm⁻¹ 为长链烷烃骨架振动吸收峰, 而

WPCK-A 的 C=O 吸收峰集中在 1 640 cm⁻¹ 处, 主要是羧基的 C=O 吸收峰, 峰的强度和尖锐程度可能体现羧基含量; 在 3 430 cm⁻¹ 附近的谱带强度为 O-H 的伸展频率, 此处强度较大; 吸收峰集中于 1 120.40 cm⁻¹, 在 1 600 ~ 600 cm⁻¹

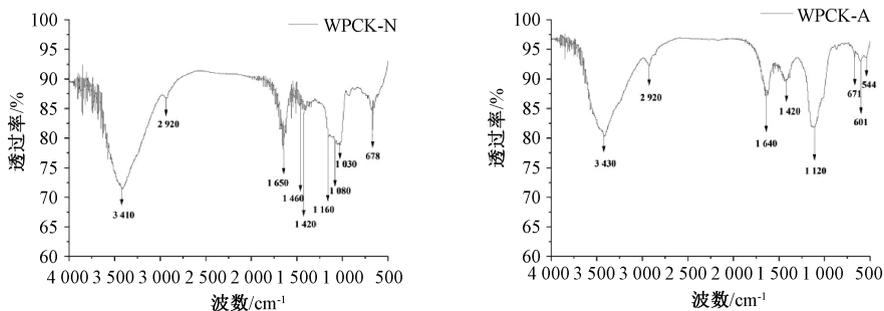


图1 桂郁金多糖红外光谱图

范围内的峰型更清晰集中；与 WPKC-N 相比，WPKC-A 吸收峰主要集中在 $1\ 419.06\ \text{cm}^{-1}$ 处， $1\ 200 \sim 950\ \text{cm}^{-1}$ 附近峰归属于 C-O-H 变角振动或吡喃糖环中 C-O-C 伸缩振动 ($1\ 100 \sim 1\ 200\ \text{cm}^{-1}$ 附近为吡喃糖环上 C-O 吸收峰， $1\ 070$ 、 $1\ 023\ \text{cm}^{-1}$ 附近 C-O-H 变角振动)。

3.3 扫描电镜 图 2 显示，WPKC-N 主要呈片状，而 WPKC-A 主要由块状和少许的片状组成，两者表面都比较粗糙。研究表明，中性、酸性多糖外貌形状差异可能和所带电荷不同有关^[25]，而 WPKC-N 整体上外貌形状比 WPKC-A 小，可能与多糖本身性质有关。

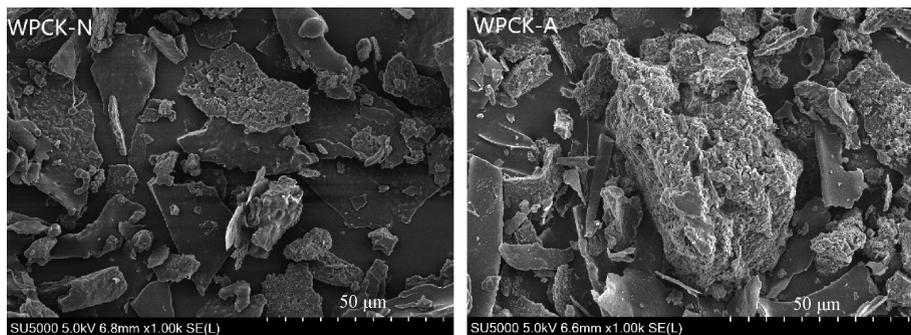


图2 桂郁金多糖扫描电镜图 (HE, ×1 000)

3.4 XRD 分析 图 3 显示，2 种多糖的最高峰都出现在 20° 左右，WPKC-N 在 21.32° 处有 1 个较为宽的衍射峰，而

WPKC-A 在 20.29° 处有 1 个不明显的包峰，其他范围只有少数弱衍射峰存在，并且两者均为无定形结构。

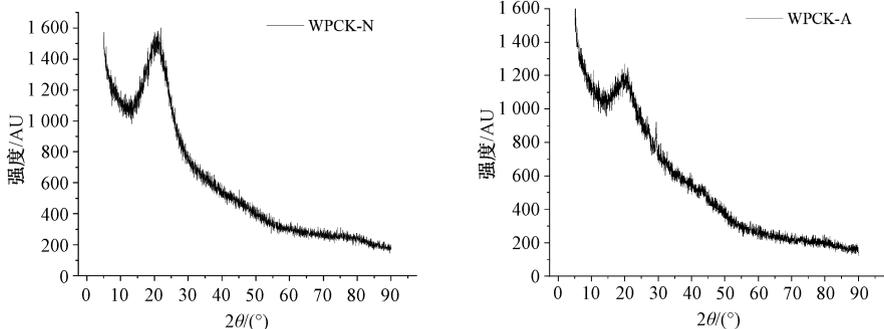


图3 桂郁金多糖 XRD 图

3.5 体外抗氧化活性研究

3.5.1 DPPH 自由基清除能力 图 4 显示，在 $0 \sim 3.2\ \text{mg/mL}$ 质量浓度范围内 2 种多糖均具有 DPPH 自由基清除能力，并呈剂量依赖性，但均小于抗坏血酸；为 $3.2\ \text{mg/mL}$ 时清除作用最强，清除率分别为 56.78% 、 32.22% ，以 WPKC-N 更明显。另外，相比绵麦冬中性糖^[26]、北五味子中性糖^[27]、人参果^[28] 等植物中性糖，WPKC-N 的 DPPH 自由基清除能力较强。

3.5.2 羟基自由基清除能力 图 5 显示，在 $0 \sim 3.2\ \text{mg/mL}$ 质量浓度范围内，2 种多糖对羟基自由基的清除率逐步上

升，并具有剂量依赖性；为 $0.8\ \text{mg/mL}$ 后增长程度趋于平缓；WPKC-A 质量浓度为 $3.2\ \text{mg/mL}$ 时清除作用最强，清除率达 23.45% 。Chaiwong 等^[29] 证实，低分子量多糖呈现出较好的羟基自由基清除率，而 WPKC-N 分子量较高，为 $2.88 \times 10^5\ \text{Da}$ ，WPKC-A 分子量仅为 $1.39 \times 10^5\ \text{Da}$ ，故推测可能是后者效果更好的原因。

3.5.3 铁离子还原能力 刘宏等^[30] 报道，还原能力与多糖体外抗氧化能力有一定联系，多糖还原性的吸光度越高，其抗氧化能力越强。图 6 显示，随着铁离子浓度升高，抗坏血酸总还原能力变化不大，但总体仍呈上升趋势；2 种多

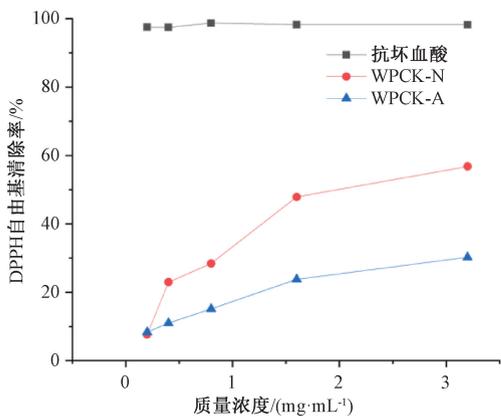


图4 桂郁金多糖对DPPH自由基的清除能力

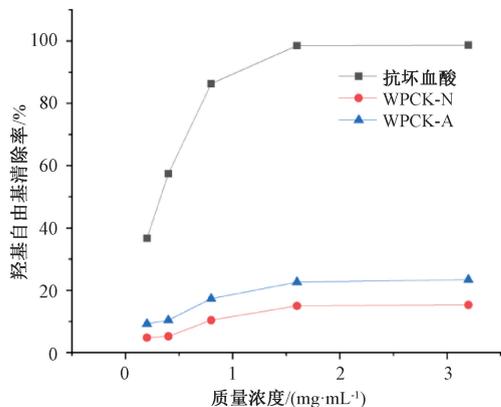


图5 桂郁金多糖对羟基自由基的清除能力

糖的还原能力随着其质量浓度升高而逐渐增加,以WPCK-N更明显。综上所述,桂郁金多糖具有将Fe³⁺还原成Fe²⁺的能力,从而增强其体外抗氧化活性。

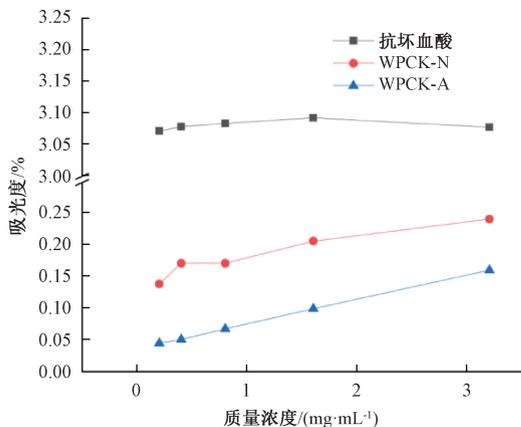


图6 桂郁金多糖铁离子还原能力

4 讨论

倪力军^[31]、Chaiwong等^[29]研究表明,多糖单糖组成、含量、分子量会影响其体外抗氧化活性,含有葡萄糖的多糖抗氧化活性明显高于不含葡萄糖者。实验结果显示,WPCK-N的DPPH自由基清除能力及铁离子还原能力比WPCK-A更明显,推测可能与葡萄糖含量差异有关(WPCK-N为98.3%,WPCK-A为21.4%),但羟基自由基清除作用恰好相反,低分子量的WPCK-A呈现出较好的清

除能。前期报道,中性糖、酸性糖存在活性差异,胡彦波^[32]对薇菜多糖进行分离纯化,发现中性糖DPPH清除率、还原能力均高于酸性糖,但羟基自由基抗氧化能力略弱于后者,与本实验结果一致。黄妮等^[26]发现,绵麦冬多糖有较强的抗氧化活性,其中性糖的DPPH自由基清除活性低于酸性糖,羟基自由基活性更高。程丽敏等^[33]以金花葵茎可溶性糖为研究对象,发现其酸性糖抗氧化活性强于中性糖,该差异可能与多糖本身性质有关。

本实验以热水提取、乙醇沉淀的方法提取得到粗多糖,再利用DEAE-52纤维素分离得到桂郁金中的中性多糖(WPCK-N)和酸性多糖(WPCK-A)。对WPCK-N和WPCK-A进行了理化性质检测和体外抗氧化分析。结果显示WPCK-N主要由葡萄糖组成,WPCK-A主要由半乳糖、葡萄糖组成,半乳糖醛酸和葡萄糖醛酸的所占比例较低,与红外光谱分析结果一致。扫描电镜进一步显示,WPCK-N主要是片状,WPCK-A主要是块状和少许的片状。体外抗氧化结果表明,桂郁金多糖具有清除自由基(DPPH和羟基自由基)的能力和较好的还原能力,且呈浓度依赖性。其中WPCK-N的DPPH自由基清除能力较强,质量浓度为3.2 mg/mL时,清除率最高,达到56.78%。WPCK-A在质量浓度为3.2 mg/mL的羟基自由基清除率最高为23.45%。WPCK-N的总还原能力较WPCK-A明显。上述结果表明,桂郁金多糖有较好的抗氧化活性,具有开发为新型天然抗氧化剂及功能性食品的潜力,并为今后相关研究提供参考思路。

参考文献:

- [1] Xiang H P, Zhang L Y, Yang Z W, et al. Chemical compositions, antioxidative, antimicrobial, anti-inflammatory and antitumor activities of *Curcuma aromatica* Salisb. essential oils[J]. *Ind Crop Prod*, 2017, 108: 6-16.
- [2] Hu D Y, Gao J Y, Yang X, et al. A comprehensive mini-review of *Curcuma Radix*: ethnopharmacology, phytochemistry, and pharmacology[J]. *Nat Prod Commun*, 2021, 16(5): 1-11.
- [3] 李泽宇, 郝二伟, 杜正彩, 等. 桂郁金研究进展及基于质量标志物的保肝、抗肿瘤机制分析[J]. *中国中药杂志*, 2022, 47(7): 1739-1753.
- [4] Chun S, Gopal J, Muthu M. Antioxidant activity of mushroom extracts/polysaccharides-their antiviral properties and plausible antiCOVID-19 properties[J]. *Antioxidants (Basel)*, 2021, 10(12): 1899.
- [5] Lephart E D. Skin aging and oxidative stress: Equol's anti-aging effects via biochemical and molecular mechanisms[J]. *Ageing Res Rev*, 2016, 31: 36-54.
- [6] 韩佳良, 刘建新, 刘红云. 热应激对奶牛泌乳性能的影响及其机制[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(16): 3162-3170.
- [7] 段晋宁, 肖旺, 曾建红, 等. 莜术多糖对糖尿病大鼠血糖、抗脂质过氧化作用的影响与单糖组分分析[J]. *时珍国医国药*, 2016, 27(3): 569-572.
- [8] 俞献文, 唐丽清, 覃琴, 等. 桂郁金多糖对H₂O₂致人脐

- 静脉内皮细胞损伤的保护作用及机制[J]. 中国实验方剂学杂志, 2018, 24(23): 146-152.
- [9] Xu N, Wang L L, Guan J J, *et al.* Wound healing effects of a *Curcuma zedoaria* polysaccharide with platelet-rich plasma exosomes assembled on chitosan/silk hydrogel sponge in a diabetic rat model [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 117: 102-107.
- [10] Dong C X, Zhang W S, Sun Q L, *et al.* Structural characterization of a pectin-type polysaccharide from *Curcuma kwangsiensis* and its effects on reversing MDSC-mediated T cell suppression[J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 115: 1233-1240.
- [11] 侯敏娜, 侯少平, 吴满芳, 等. 响应面—满意度函数优化姜黄郁金多糖和黄酮共提工艺条件及其抗氧化性研究[J]. 食品与机械, 2020, 36(12): 159-164.
- [12] Dou Z M, Chen C, Huang Q, *et al.* Comparative study on the effect of extraction solvent on the physicochemical properties and bioactivity of blackberry fruit polysaccharides [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 183: 1548-1559.
- [13] Arab K, Ghanbarzadeh B, Ayaseh A, *et al.* Extraction, purification, physicochemical properties and antioxidant activity of a new polysaccharide from *Ocimum album* L. seed [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 180: 643-653.
- [14] 牛晓方, 高一军, 怀宝刚, 等. 硫酸-苯酚法测定六种牡丹叶中总多糖的含量 [J]. 山东农业工程学院学报, 2021, 38(4): 33-35.
- [15] 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.
- [16] 张 军, 石典花. 四种不同药材来源郁金饮片中吉马酮和姜黄素含量的高效液相色谱法测定 [J]. 时珍国医国药, 2016, 27(8): 1846-1849.
- [17] Xu C, Qin N B, Yan C Y, *et al.* Isolation, purification, characterization and bioactivities of a glucan from the root of *Pueraria lobata* [J]. *Food Funct*, 2018, 9(5): 2644-2652.
- [18] Li G Q, Chen P F, Zhao Y T, *et al.* Isolation, structural characterization and anti-oxidant activity of a novel polysaccharide from garlic bolt [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 267: 118194.
- [19] Gunasekaran S, Govindan S, Ramani P. Investigation of chemical and biological properties of an acidic polysaccharide fraction from *Pleurotus eous* (Berk) Sacc [J]. *Food Biosci*, 2021, 42: 101209.
- [20] Patel M K, Tanna B, Mishra A, *et al.* Physicochemical characterization, antioxidant and anti-proliferative activities of a polysaccharide extracted from psyllium (*P. ovata*) leaves [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 118(Pt A): 976-987.
- [21] Yan J M, Zhu L, Qu Y H, *et al.* Analyses of active antioxidant polysaccharides from four edible mushrooms [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 123: 945-956.
- [22] Yang X L, Wang R F, Zhang S P, *et al.* Polysaccharides from *Panax japonicus* C. A. Meyer and their antioxidant activities [J]. *Carbohydr Polym*, 2014, 101: 386-391.
- [23] Ning X, Liu Y, Jia M D, *et al.* Pectic polysaccharides from *Sophorae Tonkinensis* exhibit significant antioxidant effects [J]. *Carbohydr Polym*, 2021, 262: 117925.
- [24] Liu Y, Du Y Q, Wang J H, *et al.* Structural analysis and antioxidant activities of polysaccharide isolated from Jinqian mushroom [J]. *Int J Biol Macromol*, 2014, 64: 63-68.
- [25] Abuduwaili A, Mutailifu P, Nuerxiati R, *et al.* Structure and biological activity of polysaccharides from *Nitraria sibirica* pall fruit [J]. *Food Biosci*, 2021, 40: 100903.
- [26] 黄 妮, 熊双丽, 卢 飞. 绵麦冬多糖的分离纯化及自由基清除活性 [J]. 林产化学与工业, 2011, 31(1): 68-72.
- [27] 李珊珊, 祁玉丽, 华 梅, 等. 北五味子多糖的分离纯化及抗氧化活性研究 [J]. 食品工业, 2018, 39(4): 233-237.
- [28] 李珊珊, 祝 贺, 祁玉丽, 等. 人参果多糖的分离纯化及体外抗氧化活性研究 [J]. 食品工业与科技, 2018, 39(4): 73-76; 99.
- [29] Chaiwong N, Leelapornpisid P, Jantanasakulwong K, *et al.* Antioxidant and moisturizing properties of carboxymethyl chitosan with different molecular weights [J]. *Polymers (Basel)*, 2020, 12(7): 1445.
- [30] 刘 宏, 陈晓琳, 孙雨豪, 等. 蜈蚣藻多糖的降解及其体外抗氧化活性研究 [J]. 海洋科学, 2020, 44(8): 186-196.
- [31] 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.
- [32] 胡彦波, 翟丽媛, 刘 扬, 等. 薇菜多糖的分离纯化及体外抗氧化活性 [J]. 食品科学, 2022, 43(1): 59-66.
- [33] 程丽敏, 董 爽, 梁文明, 等. 金花葵茎可溶性糖的提取及抗氧化性研究 [J]. 食品研究与开发, 2016, 37(22): 59-63.