

三种玫瑰多糖的结构特征及美容相关活性的比较研究

赵永雷, 杨付锐, 牛俊华, 郑岚, 马耀宏, 孟庆军, 王丙莲, 杨艳

Comparative Study on the Structural Characterization and Cosmetic-related Activities of Three Rose Polysaccharides

ZHAO Yonglei, YANG Furui, NIU Junhua, ZHENG Lan, MA Yaohong, MENG Qingjun, WANG Binglian, and YANG Yan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023110048>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西番莲果皮多糖锌的结构表征和益生元作用

Structural Characterization and Prebiotic Effects of *Passiflora edulis* Sims Peel Polysaccharide-Zinc

食品工业科技. 2023, 44(17): 27-34 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022090177>

蕨菜多糖的提取、纯化、结构表征与抗氧化活性研究

Extraction, Purification, Structural Characterization and Antioxidant Activity of Polysaccharides from Bracken

食品工业科技. 2023, 44(17): 51-58 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022090327>

5种食用菌多糖的结构特征及抗氧化活性对比

Structural Characterization and Antioxidant Activity of Five Kinds of Edible Fungus Polysaccharides

食品工业科技. 2020, 41(15): 77-83,89 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.15.013>

硒化天麻多糖的制备、结构表征及其抗氧化活性评价

Preparation, Structure Characterization and Antioxidant Activity Evaluation of Selenized *Gastrodia elata* Polysaccharides

食品工业科技. 2024, 45(3): 18-30 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023060290>

三种食用菌多糖的基本结构与抗氧化活性研究

Study on Basic Structure and Antioxidant Activity of Polysaccharides from Three Edible Fungi

食品工业科技. 2022, 43(14): 69-76 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021100170>

骏枣多糖的分离纯化、结构表征及抗氧化活性研究

Study on Isolation, Purification, Structure Characterization and Antioxidant Activity of Polysaccharide from *Zizyphus jujuba* cv. Junzao

食品工业科技. 2022, 43(23): 71-78 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020076>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵永雷, 杨付锐, 牛俊华, 等. 三种玫瑰多糖的结构特征及美容相关活性的比较研究 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 325–336.
doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110048

ZHAO Yonglei, YANG Furui, NIU Junhua, et al. Comparative Study on the Structural Characterization and Cosmetic-related Activities of Three Rose Polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 325–336. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110048

· 营养与保健 ·

三种玫瑰多糖的结构特征及美容相关活性的比较研究

赵永雷, 杨付锐, 牛俊华, 郑 岚*, 马耀宏, 孟庆军, 王丙莲, 杨 艳
(齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院生物研究所, 山东济南 250103)

摘要: 分别提取获得和田玫瑰多糖、苦水玫瑰多糖和平阴玫瑰多糖。测定粗多糖得率及多糖含量, 利用离子色谱仪、傅里叶红外光谱仪、高效液相色谱联用多角度激光散射法、刚果红实验和碘-碘化钾实验表征多糖结构。利用体外抗氧化实验、益生元实验和酪氨酸酶抑制实验分析玫瑰多糖美容相关活性。结果表明, 和田玫瑰的粗多糖得率高于苦水玫瑰和平阴玫瑰 ($P<0.05$), 平阴玫瑰粗多糖中的多糖含量较低 ($P<0.05$)。3 种玫瑰多糖均包含 Glc、Ara、Gal 和 Fru 等 11 种单糖残基 (摩尔比例不同); 重均分子量在 $4.376\times 10^5\sim 5.841\times 10^5$ Da 之间 (分散系数: 1.35~1.72); 均为含有 α 和 β 构型的吡喃糖; 均不含有三螺旋结构, 具有较多侧链。活性评价实验表明, 3 种玫瑰多糖均具有良好的抗氧化能力、益生元作用及酪氨酸酶抑制能力。在 3 种玫瑰多糖中, 平阴玫瑰多糖具有较强的 ABTS⁺及 DPPH 自由基清除能力 ($P<0.05$), 而和田玫瑰多糖具有较强的酪氨酸酶抑制能力 ($P<0.05$)。因此, 3 种玫瑰多糖结构具有相似性, 其结构的差异导致生物学活性略有差异。3 种玫瑰多糖在美容功能食品领域具有良好的开发应用前景。

关键词: 玫瑰多糖, 结构表征, 抗氧化活性, 益生元活性, 酪氨酸酶抑制能力

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)19-0325-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110048



本文网刊:

Comparative Study on the Structural Characterization and Cosmetic-related Activities of Three Rose Polysaccharides

ZHAO Yonglei, YANG Furui, NIU Junhua, ZHENG Lan*, MA Yaohong,
MENG Qingjun, WANG Binglian, YANG Yan

(Biology Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250103, China)

Abstract: Hetian rose polysaccharides, Kushui rose polysaccharides and Pingyin rose polysaccharides were extracted and obtained respectively, and the crude polysaccharide yield and polysaccharide content were determined. The polysaccharide structure was characterized using ion chromatograph, Fourier transform infrared spectroscopy and high performance liquid chromatography coupled with multi-angle laser scattering method. Cosmetic-related activities were analyzed using *in vitro* antioxidant, prebiotic and tyrosinase inhibition assays. The results showed that the crude polysaccharide yield of Hetian rose was higher than that of Kushui rose and Pingyin rose ($P<0.05$), and the polysaccharide content in the crude polysaccharide of Pingyin rose was lower ($P<0.05$). All three rose polysaccharides contained 11 types of monosaccharide residues (with different molar ratios), including Glc, Ara, Gal and Fru. Their weight-averaged molecular weights ranged from 4.376×10^5 to 5.841×10^5 Da (dispersity index: 1.35~1.72). They were all pyranose containing α and β configurations. They all had non-triple helical spiral structures and multi-branched. The activity evaluation experiments showed that all three rose polysaccharides had good antioxidant activity, prebiotic effect and tyrosinase inhibition activity. Among the three rose

收稿日期: 2023-11-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (32102454)。

作者简介: 赵永雷 (1996-), 男, 硕士, 研究方向: 活性多糖的构效分析, E-mail: zyl03142021@163.com。

* 通信作者: 郑岚 (1984-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 活性多糖的构效分析, E-mail: zhenglan24@163.com。

polysaccharides, Pingyin rose polysaccharide had strong ABTS⁺ and DPPH free radical scavenging activities ($P<0.05$), while Hetian rose polysaccharide had strong tyrosinase inhibition activity ($P<0.05$). Therefore, the three rose polysaccharides were similar in structure, and their structural differences led to slight differences in biological activities. The three types of rose polysaccharides had good development and application prospects in the field of cosmetic functional foods.

Key words: rose polysaccharides; structural characterization; antioxidant activity; prebiotic activity; tyrosinase inhibitory capacity

玫瑰(*Rosa rugosa* Thunb.)为蔷薇科蔷薇属的多年生常绿或落叶灌木^[1]。新疆和田、甘肃苦水和山东平阴玫瑰种植历史悠久,玫瑰花质量上乘,是享誉全国的“玫瑰之乡”。玫瑰产业是山东平阴、甘肃苦水和新疆和田地区的特色产业,由于相关政策支持,玫瑰产业正在以上地区蓬勃发展^[2]。和田玫瑰、苦水玫瑰和平阴玫瑰是各具特色的不同玫瑰品种(图1)。平阴玫瑰,又称重瓣红玫瑰,为历史悠久的我国本土优良玫瑰品种^[3];苦水玫瑰是顿齿蔷薇和中国传统玫瑰的自然杂交种^[4];和田玫瑰来源于古丝绸之路,可能属于独特的突厥玫瑰品系^[5]。如何高质量地发展平阴、苦水和和田地区的特色玫瑰花产业是亟需解决的重要问题。



图1 和田玫瑰(A)、苦水玫瑰(B)和平阴玫瑰(C)的图片
Fig.1 Pictures of Hetian rose (A), Kushui rose (B) and Pingyin rose (C)

玫瑰花作为药食同源植物,自古以来就是深受女性喜爱的美容养颜佳品,具有行气解郁、活血化瘀、美容养颜的功效^[6]。美容功能食品是近年来受到广泛关注的功能食品研究方向。美容功能食品可以由内向外调理机体机能,通过机体生理状态整体的改善,达到容光焕发、美容养颜的效果^[7]。衰老的自由基学说认为抗氧化是预防衰老的关键^[8];肠道微生态环境与肌肤暗沉、机体衰老密切相关^[9];抑制皮肤黑色素形成是美容产品研发最关注的功效之一。因此,研发具有抗氧化作用、益生元作用和抑制黑色素形成作用的玫瑰美容功能产品可以作为玫瑰产业新的发展方向。

天然植物多糖是一类由单糖分子通过糖苷键结合而成的大分子化合物,具有抗氧化、调节免疫、降血糖和调节肠道菌群等广泛的生物学活性^[10]。天然植物多糖是一类极具开发潜力的天然活性物质,具有功效明确和无毒副作用的优点。多糖结构是多糖呈现不同生物学活性的基础,多糖构效关系的阐明对多糖研发具有重要意义。目前,不同品种玫瑰多糖的比较研究未见报道。玫瑰多糖相关研究主要集中于玫瑰多糖提取工艺的优化,结构的初步表征以及降血

糖^[11]、抗肿瘤^[12]等生物学活性的研究。但是,关于玫瑰多糖结构的研究较为浅显,缺乏玫瑰多糖结构特征的系统研究。玫瑰多糖美容相关生物学活性的研究还未见报道。

本研究选取平阴玫瑰、苦水玫瑰和田玫瑰作为研究对象,采用“水提醇沉法”分别提取3种玫瑰多糖。分析玫瑰多糖单糖组成、分子量、官能团、分支程度等结构特征,对比研究其抗氧化、益生元作用和抑制酪氨酸酶活性。本研究以期对玫瑰多糖开发为美容类功能产品提供理论依据,为我国主要产区不同品种玫瑰的产业化发展提供新的思路。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

和田玫瑰干花蕾 新疆阿克苏市实验林场六队;苦水玫瑰干花蕾 兰州永登苦水镇玫瑰产业基地;平阴玫瑰干花蕾 平阴县玫瑰镇夏沟村东(3种玫瑰干花蕾均为烘干品);*Lactobacillus casei*(菌株编号:23184)、*Lactobacillus plantarum*(菌株编号:21825) 购买自中国工业微生物菌种保藏管理中心;D-岩藻糖(Fucose, Fuc)、L-阿拉伯糖(Arabinose, Ara)、L-鼠李糖(Rhamnose, Rha)、L-半乳糖(Galactose, Gal)、D-葡萄糖(Glucose, Glu)、D-木糖(Xylose, Xyl)、D-甘露糖(Mannose, Man)、D-果糖(Fructose, Fru)、D-核糖(Ribose, Rib)、D-半乳糖醛酸(Galacturonic acid, Gal-UA)、D-古罗糖醛酸(Guluronic acid, Gul-UA)、D-葡萄糖醛酸(Glucuronic acid, Glu-UA)、D-甘露糖醛酸(Mannuronic acid, Man-UA)、右旋糖酐(纯度99%)、1,1-二苯基-2-苦基苯肼(1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 美国Sigma公司;2,2'-联氮双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐(2,2'-Azinobis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS) 阿拉丁化学试剂公司;其它化学试剂均为分析纯。

SBA-40E 生物传感分析仪 山东省科学院生物研究所;JY92-II 超声波细胞破碎机 宁波新芝生物科技股份有限公司;LE204E 电子天平 梅特勒-托利多(Mettler Toledo)仪器(上海)有限公司;5804R 离心机 德国Eppendorf公司;HH-2 数显恒温水浴锅 常州国华电器有限公司;101A-2 电热鼓风干燥箱 南通宏大实验仪器有限公司;Dynex Spectra MR 酶标仪 美国Dynex Technologies公司;ICS5000 离子色谱仪(Ion chromatography, IC)、Dionex™

CarboPac™MPA20 液相色谱柱 (150 mm×3.0 mm, 10 μm)、ICS5000 电导率检测器、Nicolet 6700 傅里叶变换红外光谱 (Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR) 仪 美国 Thermo 公司; 1260 Infinity II MDS 高效液相色谱仪、1260 Infinity II 等度泵、1260 Infinity II 示差检测器、1260 Infinity II 双角度激光散射检测器、1260 Infinity II 黏度检测器、PL aquagel-OH Mixed-H 色谱柱 (8 μm, 7.5×300 mm) 美国 Agilent 公司; Multimode 8 原子力显微镜 (Atomic force microscope, AFM) 德国布鲁克公司。

1.2 实验方法

1.2.1 粗多糖的制备 采用“水提醇沉法”提取玫瑰粗多糖^[13]。使用粉碎机分别粉碎和田玫瑰、苦水玫瑰和平阴玫瑰干花蕾, 获得玫瑰干花蕾粉末。按照粉末: 去离子水为 1:20(m/v) 的比例将玫瑰干花蕾粉末与去离子水混合。超声波破碎 (超声功率 300 W, 10 min), 置于 90 °C 水浴锅中水浴 2 h, 离心 (10000 r/min, 10 min, 4 °C) 取上清液, 上述步骤重复 3 次, 合并上清液。使用旋转蒸发器将上清液浓缩至 1/2 体积, 加入 3 倍体积的 95% 乙醇, 静置过夜。10000 r/min 离心 10 min 收集沉淀, 沉淀于 55 °C 烘干得和田玫瑰粗多糖、苦水玫瑰粗多糖以及平阴玫瑰粗多糖, 分别命名为 HRP、KRP 和 PRP。称量, 计算玫瑰粗多糖得率。

$$\text{玫瑰粗多糖得率(\%)} = \frac{\text{粗多糖质量(g)}}{\text{玫瑰干花蕾粉末质量(g)}} \times 100$$

1.2.2 多糖含量的测定 采用苯酚-硫酸法^[14] 测定多糖含量, 精确量取 400 μL 浓度为 0、0.0125、0.025、0.0375、0.05、0.0625、0.075、0.0875、0.1 mg/mL 的葡萄糖标准液, 加入 200 μL 苯酚溶液 (60 mg/mL) 和 1 mL 浓硫酸, 摇匀后反应 20 min, 使用酶标仪于 490 nm 波长下测定吸光度, 绘制标准曲线并求出回归方程。取 400 μL HRP、KRP、PRP 3 种玫瑰粗多糖样品溶液 (0.1 mg/mL), 同法测定, 经标准曲线计算多糖浓度。

$$\text{多糖含量(mg/g)} = \frac{\text{多糖浓度(mg/mL)} \times \text{溶液体积(mL)}}{\text{粗多糖质量(g)}}$$

1.2.3 多糖的结构表征

1.2.3.1 单糖组成测定 多糖的水解: a. 常规多糖水解法。各取 5 mg 多糖样品于安瓿中, 用 1 mL 2 mol/L 三氟乙酸在 121 °C 水解 2 h。b. 低强度多糖水解法。各取 5 mg 多糖样品于安瓿中, 用 1 mL 2.5 mol/L 三氟乙酸在 60 °C 水解 1 h。两种水解方法得到的溶液在 N₂ 下干燥, 加入甲醇, 然后再次干燥, 重复干燥 3 次, 然后溶解在超纯水中待测。

采用配置有 Dionex™CarboPac™MPA20 色谱柱 (150 mm×3.0 mm, 10 μm)、ICS5000 电导率检测器的 ICS5000 离子色谱仪进行测定。流动相由溶液 A (0.1 mol/L NaOH 溶液) 和溶液 B (0.1 mol/L NaOH

溶液和 0.2 mol/L NaAc 溶液) 组成。线性梯度洗脱: 0~30 min, 95%~80% A; 30.1~45 min, 60% A; 45.1~60 min, 95% A。进样量为 5 μL; 流速 0.5 mL/min; 柱温 30 °C^[15]。

1.2.3.2 分子量测定 采用高效液相色谱联用多角度激光散射 (High performance size exclusion chromatography-Multi angle laser light scattering, HPSEC-MALLS) 法测定 HRP、KRP 和 PRP 的分子量^[16]。设备条件: 1260 Infinity II MDS 高效液相色谱仪、1260 Infinity II 等度泵、1260 Infinity II 示差检测器、1260 Infinity II 双角度激光散射检测器、1260 Infinity II 黏度检测器以及 PL aquagel-OH Mixed-H 色谱柱 (8 μm, 7.5×300 mm)。流动相: 超纯水 (含有 0.02% 叠氮化钠), pH6; 柱温: 40 °C; 流速: 1.0 mL/min; 进样量 500 μL。以右旋糖酐作为标准品, 用 ATRA 软件分析 HRP、KRP、PRP 的重均分子量 (Weight-average molecular weight, M_w); 数均分子量 (Number average molecular weight, M_n); 峰值分子量 (Molecular weight of the highest peak, M_p) 和 Z 均分子量 (Z-average molecular weight, M_z)。

1.2.3.3 FT-IR 分析 利用 FT-IR 和 OMNIC 软件获得 3 种玫瑰多糖的 FT-IR 光谱。干燥的 HRP、KRP、PRP 组分 (1 mg) 与干燥的 KBr 粉末 (100 mg) 充分混合并压成圆片状, 在 4000~500 cm⁻¹ 范围内进行扫描^[17]。

1.2.3.4 碘-碘化钾实验 各取 1 mL 0.5 mg/mL HRP、KRP、PRP 3 种样品溶液, 加入 1.2 mL 碘-碘化钾试剂 (含 0.2 g/L I₂ 和 2 g/L KI), 混匀后, 使用酶标仪测定混合溶液在 250~600 nm 范围内的吸光度^[18]。以波长作为横坐标, 吸光度作为纵坐标, 绘制曲线。

1.2.3.5 刚果红实验 将 HRP、KRP 或 PRP 样品溶液 (1 mL, 0.5 mg/mL) 与 1 mL 80 μmol/L 的刚果红溶液混合均匀。分别加入 1.0 mol/L 的 NaOH, 使混合液中 NaOH 的浓度由 0 mol/L 逐渐升至 3 mol/L。使用酶标仪测定样品 485~520 nm 范围内的最大吸收波长^[19]。以 NaOH 浓度作为横坐标, 最大吸收波长作为纵坐标, 绘制曲线。

1.2.3.6 AFM 分析 将 5 μL HRP、KRP 和 PRP 溶液 (50 μL/mL) 分别滴加到干净的云母片上, 并在环境气压下干燥。用 AFM 在非接触模式下扫描观察, 扫描模式是 scanasyst, 扫描频为 1 Hz^[20]。

1.2.4 抗氧化实验

1.2.4.1 总抗氧化能力 配制 3 种多糖样品溶液, 分别稀释为不同浓度梯度 (0~4000 mg/L), 同时配制等浓度的维生素 C (Vitamin C, V_C) 溶液。取 0.2 mL 样品或维生素 C 溶液于试管中, 加入 2 mL P 溶液 (含有 0.6 mol/L 硫酸, 28 mmol/L 磷酸三钠和 4 mmol/L 钼酸铵), 95 °C 水浴 90 min, 冷却后用酶标仪于 695 nm 下测定吸光度^[21]。

1.2.4.2 还原力测定 采用普鲁士蓝法测定 HRP、KRP、PRP 的还原力^[22]。配制 3 种多糖样品溶液,分别稀释为不同浓度梯度(0~1600 mg/L),同时配制等浓度的 V_C 溶液。依次加入 1 mL 样品、2.5 mL 磷酸盐缓冲液(0.2 mol/L, pH6.6)和 1 mL 铁氰化钾溶液(10 g/L),混合均匀,置于 50 °C 水浴 20 min,加入 2 mL 三氯乙酸(100 g/L)和 1.2 mL 三氯化铁溶液(1 g/L)。混匀后使用酶标仪在 700 nm 处测定吸光度,用 V_C 作阳性对照。

1.2.4.3 DPPH 自由基清除能力 配制 3 种多糖样品溶液,分别稀释为不同浓度梯度(0~200 mg/L)。分别吸取 1 mL 多糖溶液加入到 1 mL 浓度为 200 μ mol/L 的 DPPH-乙醇溶液中。混合均匀后避光反应 30 min。在 517 nm 处测定吸光度^[23]。样品多糖溶液加 DPPH-乙醇溶液吸光度为 A,以无水乙醇代替 DPPH 的吸光度为 A_0 ,以蒸馏水代替样品多糖溶液的吸光度为 A_1 。

$$\text{DPPH自由基清除率(\%)} = \left(1 - \frac{A - A_0}{A_1}\right) \times 100$$

1.2.4.4 ABTS⁺自由基清除能力 ABTS 储液的制备:将 ABTS 溶液(7 mmol/L)和过硫酸钾溶液(4.9 mmol/L)等体积混合,避光静置 20 h。ABTS 工作液的制备:用磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L, pH7.4)稀释 ABTS 储液,使其在 734 nm 处吸光度为 0.70 ± 0.02 。配制 3 种多糖样品溶液,稀释为不同浓度梯度(0~200 mg/L)。取 ABTS 工作液 3 mL,加入多糖溶液 1 mL,室温避光 6 min,于 734 nm 下测吸光度^[24]。样品多糖溶液加 ABTS 工作液的吸光度为 A,磷酸盐缓冲液代替 ABTS 工作液为空白组 A_0 ,蒸馏水代替样品为对照组 A_1 。

$$\text{ABTS}^+\text{自由基清除率(\%)} = \left(1 - \frac{A - A_0}{A_1}\right) \times 100$$

1.2.5 益生元实验 将 *L. plantarum* 和 *L. casei* 分别接种于 MRS 平板中,置于 37 °C 恒温培养箱中培养 48 h 后,分别接种到 MRS 肉汤培养基中,摇床培养(37 °C, 150 r/min, 12 h),获得 2 种菌种的种子液。设置阴性对照组:去除碳源的 MRS 培养基;阳性对照组:菊粉加去除碳源的 MRS 培养基;HRP、KRP 或 PRP 实验组:多糖样品(HRP、KRP 或 PRP)加去除碳源的 MRS 培养基。其中,多糖样品和菊粉添加量皆为 50 g/L,接种量为 1%(v/v)。通过检测发酵过程中的 pH、 OD_{600} 值和乳酸含量来衡量 HRP、KRP 和 PRP 的益生元作用^[25]。

1.2.6 酪氨酸酶抑制实验 构建酪氨酸酶催化反应体系,在该体系中,L-酪氨酸被酪氨酸酶催化产生黑色素,在 475 nm 处有最大吸收峰,加入酪氨酸酶抑制剂,可以减少黑色素生成。通过 HRP、KRP、PRP 3 种玫瑰多糖对酪氨酸酶的抑制效果,评价其美白功效。将 HRP、KRP、PRP 用磷酸盐缓冲液(25 mmol/L,

pH6.8)稀释成不同浓度的样品溶液。取 120 μ L 样品溶液,分别加入 360 μ L 酪氨酸溶液(0.5 mg/L)、120 μ L 磷酸盐缓冲液(25 mmol/L, pH6.8)和 120 μ L 酪氨酸酶溶液(50 U/mL),以熊果苷作为阳性对照,根据公式计算酪氨酸酶抑制率(IR)^[26]。

$$\text{IR(\%)} = \left(1 - \frac{C - D}{A - B}\right) \times 100$$

式中:A 为等量磷酸盐缓冲液代替样品溶液的吸光度;B 为等量磷酸盐缓冲液代替样品溶液和酪氨酸酶溶液的吸光度;C 为样品溶液吸光度;D 为等量磷酸盐缓冲液代替酪氨酸酶溶液的吸光度。

1.3 数据处理

实验数据表示为至少 3 个独立实验的平均值 \pm 标准差(SD)。通过单因素方差分析(One Way ANOVA)检查测试组之间的显著差异, $P < 0.05$ 被认为具有统计学意义。统计分析使用 Excel 软件完成。

2 结果与分析

2.1 HRP、KRP 和 PRP 得率及多糖含量的测定结果

HRP、KRP 和 PRP 得率及多糖含量的测定结果见图 2。

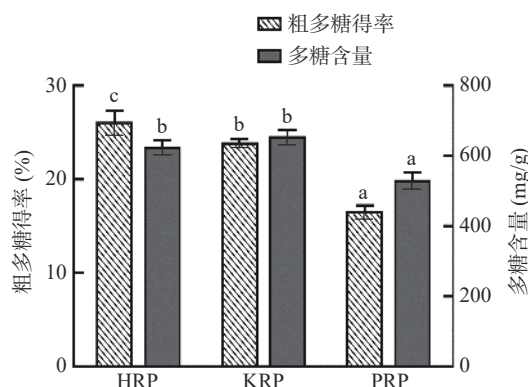


图 2 HRP、KRP 和 PRP 的得率及其多糖含量
Fig.2 Yield of HRP, KRP and PRP and their polysaccharide content

注:同组不同字母代表具有显著性差异($P < 0.05$),相同字母代表不具有显著性差异($P > 0.05$)。

由图 2 可知,HRP、KRP 和 PRP 的得率分别为 26.18%、23.95% 和 16.60%(HRP>KRP>PRP)。HRP 的得率显著高于 KRP 和 PRP 的得率($P < 0.05$),KRP 和 PRP 的得率分别为 HRP 得率的 91.49% 和 63.40%。HRP、KRP 和 PRP 中的多糖含量分别为 627.040、657.033 和 532.648 mg/g (KRP \approx HRP>PRP)。HRP 和 KRP 的多糖含量没有显著性差异($P > 0.05$),并且显著高于 PRP 的多糖含量($P < 0.05$)。

2.2 HRP、KRP 和 PRP 的单糖组成

HRP、KRP 和 PRP 的 IC 图谱及其单糖组成见图 3、图 4 和表 1。

采用了“常规多糖水解法”和“低强度多糖水解法”2 种多糖水解方法同时对玫瑰多糖进行单糖组成分析。其原因为 Fru 具有不稳定性,“常规多糖水解

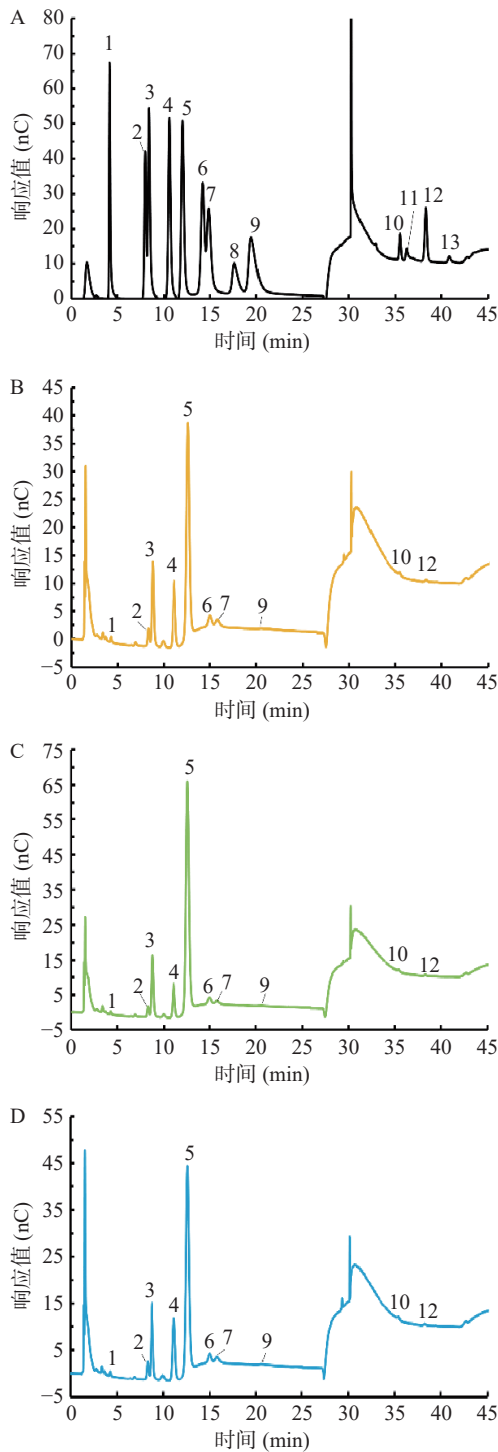


图 3 常规水解条件下 HRP、KRP 和 PRP 的 IC 图谱

Fig.3 IC spectra of HRP, KRP and PRP under conventional hydrolysis condition

注: 常规水解法: 2 mol/L 三氟乙酸, 121 °C, 2 h; (A) 标准单糖, (B) HRP, (C) KRP 和 (D) PRP; 峰值: 1. Fuc, 2. Rha, 3. Ara, 4. Gal, 5. Glc, 6. Xyl, 7. Man, 8. Fru, 9. Rib, 10. Gal-UA, 11. Gul-UA, 12. Glc-UA, 13. Man-UA。

法”的水解条件会破坏 Fru, 导致多糖中的 Fru 残基测定结果偏低或不能检出。而“低强度多糖水解法”将导致多糖水解不充分, 该实验条件仅能定性分析 3 种玫瑰多糖是否含有 Fru 残基(作为“常规多糖水解法”实验结果的补充)。由图 3 及表 1 可知, 在常规多糖水解条件下, HRP、KRP 和 PRP 玫瑰多糖的

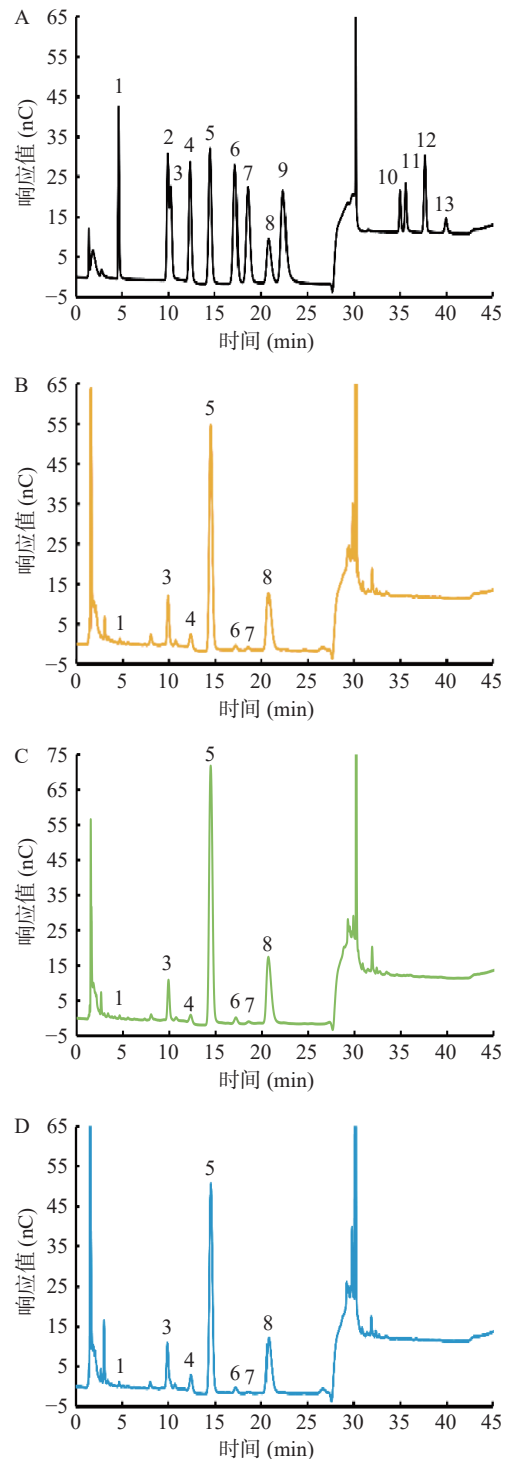


图 4 低强度水解条件下 HRP、KRP 和 PRP 的 IC 图谱

Fig.4 IC spectra of HRP, KRP and PRP under low intensity hydrolysis condition

注: 低强度水解法: 2.5 mol/L 三氟乙酸, 60 °C, 1 h; (A) 标准单糖, (B) HRP, (C) KRP 和 (D) PRP; 峰值: 1. Fuc, 2. Rha, 3. Ara, 4. Gal, 5. Glc, 6. Xyl, 7. Man, 8. Fru, 9. Rib, 10. Gal-UA, 11. GuL-UA, 12. Glc-UA, 13. Man-UA。

单糖组成具有一定的相似性, 其单糖残基均由 10 种单糖残基组成(Glc、Ara、Gal、Xyl、Rha、Man、Rib、Gal-UA、Glc-UA 和 Fuc)。由图 4 和表 1 可知, 降低 3 种玫瑰多糖的水解强度后, 3 种玫瑰多糖的水解液中均可以检出 Fru, 并且 3 种玫瑰多糖中的 Fru 残基比例较高。因此, HRP、KRP 和 PRP 玫瑰多糖为

表1 HRP、KRP和PRP的单糖组成(mol%)

Table 1 Monosaccharide composition of HRP, KRP and PRP (mol%)

	Fuc	Rha	Ara	Gal	Glc	Xyl	Man	Fru	Rib	Gal-UA	Gul-UA	Glc-UA	Man-UA
常规多糖水解法													
HRP	0.77	4.9	17.65	12.78	47.25	5.4	4.81	/	0.54	3.9	/	2.03	/
KRP	0.49	3.37	15.33	7.67	62.59	3.49	2.45	/	0.54	2.85	/	1.2	/
PRP	0.73	5.35	17.07	12.57	50.27	4.37	4.1	/	0.63	3.45	/	1.46	/
低强度多糖水解法													
HRP	0.61	/	10.7	2.85	39.87	0.99	0.82	44.15	/	/	/	/	/
KRP	0.36	/	7.72	1.36	42.23	1.11	0.47	46.75	/	/	/	/	/
PRP	0.59	/	11.23	3.38	37.94	1.26	0.48	45.13	/	/	/	/	/

主要包含 Glc、Ara、Gal 和 Fru 残基的,由 11 种单糖残基构成的杂多糖。其中 Glc、Ara、Gal、Fru 是 3 种玫瑰多糖含量最高的单糖残基。HRP 和 PRP 玫瑰多糖的单糖组成摩尔比例关系较为接近。相较于 HRP 和 PRP, KRP 含有的 Glc 残基比例略高, Gal 和 Ara 残基的比例略低。

关于玫瑰多糖结构特征的相关研究较少。张曰辉等^[27]利用柱前衍生 HPLC 法测定了平阴玫瑰多糖的单糖组成,结果表明平阴玫瑰多糖由 Man、Rha、Glc-UA、Glc、Gal、Ara 6 种单糖残基组成,其摩尔比为 0.93:0.98:1.15:0.97:0.97:0.97。Tang 等^[28]报道玫瑰多糖由 Ara、Xyl、Glc、Gal、Gal-UA 和 Glu-UA 6 种单糖残基组成,其摩尔比为 4.6:1.4:5.22:4.81:1:1.86。之前研究由于测定方法的局限性及未能考虑到 Fru 的不稳定性,未能检测出玫瑰多糖中较高含量的 Fru 残基。本研究发现玫瑰多糖中含有较高含量的 Fru 残基,并且将组成玫瑰多糖的单糖残基种类由 6 种提高到了 11 种。

2.3 HRP、KRP 和 PRP 的分子量测定

HRP、KRP 和 PRP 的 HPSEC-MALLS 图谱及其分子量见图 5 和表 2。

表 2 HRP、KRP 和 PRP 的分子量及分散系数

Table 2 Molecular weight and dispersion coefficient of HRP, KRP and PRP

	M _w (Da)	M _n (Da)	M _p (Da)	M _z (Da)	M _w /M _n
HRP	5.841×10 ⁵	3.391×10 ⁵	6.418×10 ⁵	8.784×10 ⁵	1.72
KRP	5.634×10 ⁵	4.169×10 ⁵	6.530×10 ⁵	7.146×10 ⁵	1.35
PRP	4.376×10 ⁵	3.141×10 ⁵	4.800×10 ⁵	5.774×10 ⁵	1.39

由图 5 和表 2 可知,HRP、KRP 和 PRP 玫瑰多糖的分子量差异较小,3 种玫瑰多糖的 M_w 在 4.376×10⁵~5.841×10⁵ Da 之间。3 种玫瑰多糖的分散系数(M_w/M_n)在 1.35~1.72 之间,说明 3 种玫瑰多糖均具有一定的均一性。比较可知,3 种玫瑰多糖的 M_w 从大到小依次为 HRP>KRP>PRP。HRP 的 M_w 较高,并且分散性较大;PRP 的 M_w 较小,并且分散性较小。

2.4 HRP、KRP 和 PRP 的 FT-IR 分析

HRP、KRP 和 PRP 的 FT-IR 图谱见图 6。

由图 6 可知,HRP、KRP 和 PRP 的 FT-IR 光谱

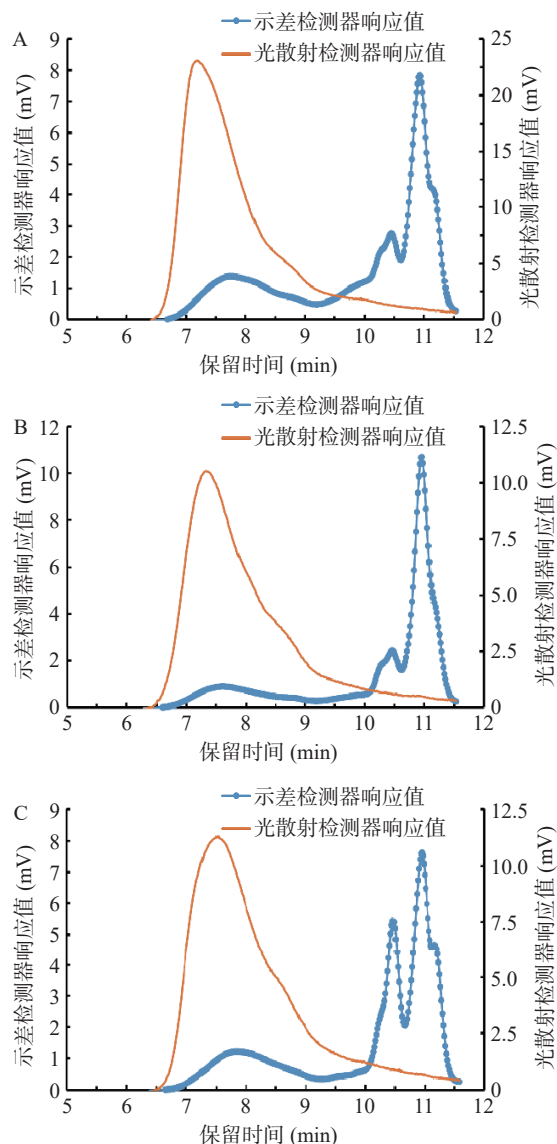


图 5 HRP(A)、KRP(B)和 PRP(C)的 HPSEC-MALLS 色谱图

Fig.5 Chromatograms of HPSEC-MALLS of HRP (A), KRP (B) and PRP (C)

图具有极高的相似性。在 3200~3600 cm⁻¹ 处的宽而强的吸收峰是羟基的伸缩振动。2935 cm⁻¹ 区域的吸收峰是由 C-H 键拉伸振动引起的^[29]。在 1600~1650 cm⁻¹ 处较强的吸收峰,符合 C=O 引起的吸收峰特征^[30]。在 1740 cm⁻¹ 附近的吸收峰表明多糖中存在糖醛酸。在 1000~1200 cm⁻¹ 处的吸收峰由 C-OH 的伸缩振动和 C-O-C 糖苷键振动叠加产生。在

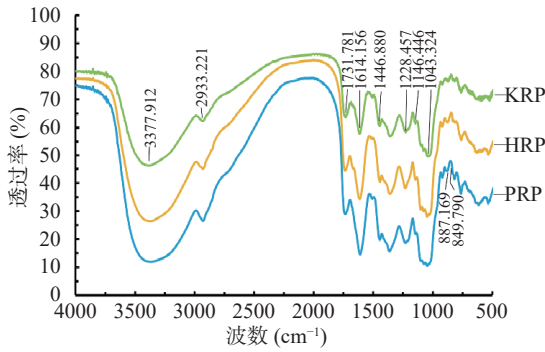


图 6 HRP、KRP、PRP 的 FT-IR 图谱

Fig.6 FT-IR spectra of HRP, KRP and PRP

840 cm^{-1} 和 890 cm^{-1} 左右的吸收峰表明多糖具有 α 和 β 构型^[31]。因此, HRP、KRP、PRP 具有多糖的典型特征吸收峰, 均为含有 α 和 β 构型的吡喃糖^[32]。并且, 3 种玫瑰多糖均含有糖醛酸, 该结果与单糖组成的测定结果一致。

2.5 HRP、KRP 和 PRP 的碘-碘化钾实验结果

HRP、KRP 和 PRP 的碘-碘化钾实验结果见图 7。

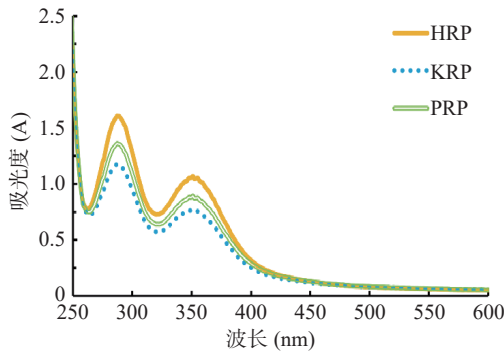


图 7 HRP、KRP 和 PRP 与碘-碘化钾混合溶液的紫外扫描曲线

Fig.7 Ultraviolet scanning curves of I_2 -KI with HRP, KRP and PRP solution

碘-碘化钾实验用于分析多糖的侧链情况, 若在 565 nm 处有最大吸收峰则说明多糖含有较少的分支

和较短的侧链^[33]。如图 7 所示, 3 种玫瑰多糖与碘-碘化钾的反应物最大吸收峰均在 288 nm 和 350 nm 附近, 在 565 nm 处没有最大吸收峰, 说明 HRP、KRP 和 PRP 可能存在较长的侧链和较多的分支。

2.6 HRP、KRP 和 PRP 的刚果红实验结果

HRP、KRP 和 PRP 的刚果红实验结果见图 8。

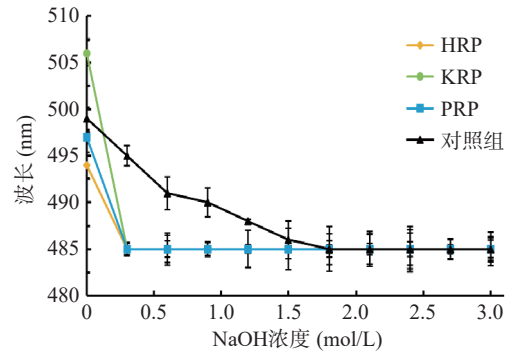


图 8 不同碱性条件下刚果红与 HRP、KRP 和 PRP 溶液的最大吸收波长

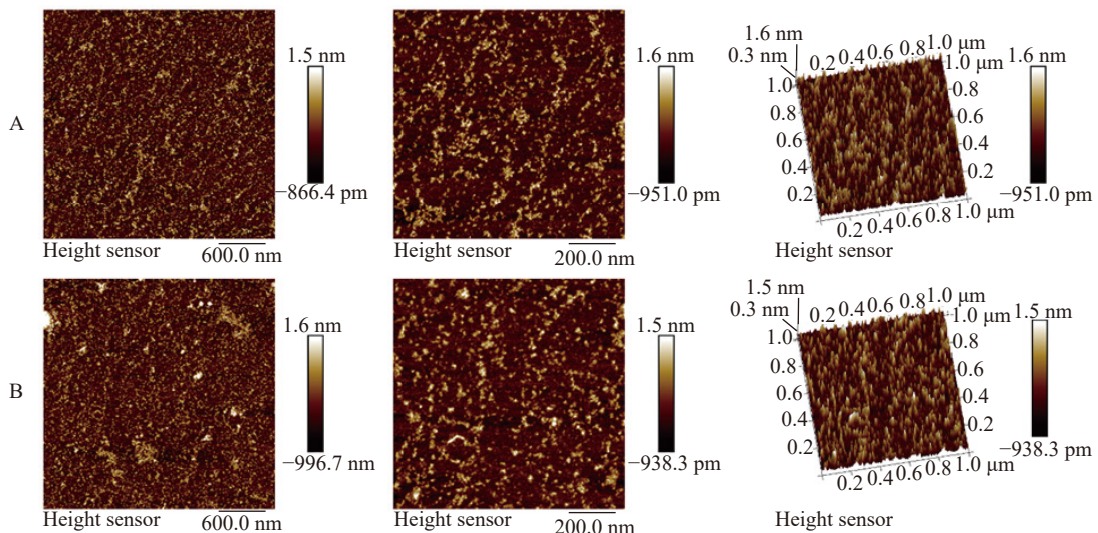
Fig.8 Maximum absorption wavelengths of Congo red in solution with HRP, KRP and PRP under different alkaline conditions

刚果红溶液是一种弱碱性的溶液, 具有三螺旋构象的多糖在稀 NaOH 溶液中与刚果红溶液形成络合物, 最大波长会出现红移现象(多糖溶液的最大吸收波长随 NaOH 溶液浓度的增加而增加)^[34]。随着 NaOH 溶液浓度逐渐增高, 多糖螺旋结构发生解体, 变成无规则的线团形式, 最大吸收波长又会发生蓝移现象^[35]。HRP、KRP 和 PRP 与刚果红溶液混合物在 NaOH 溶液中最大波长吸收的变化如图 8 所示, HRP、KRP 和 PRP 未出现红移现象, 因此 3 种玫瑰多糖均不含有三螺旋结构^[36]。

2.7 AFM 实验结果

HRP、KRP 和 PRP 的 AFM 实验结果见图 9。

HRP、KRP 和 PRP 的 AFM 平面及立体图如图 9 所示, HRP、KRP 和 PRP 的 AFM 原子力显微图差



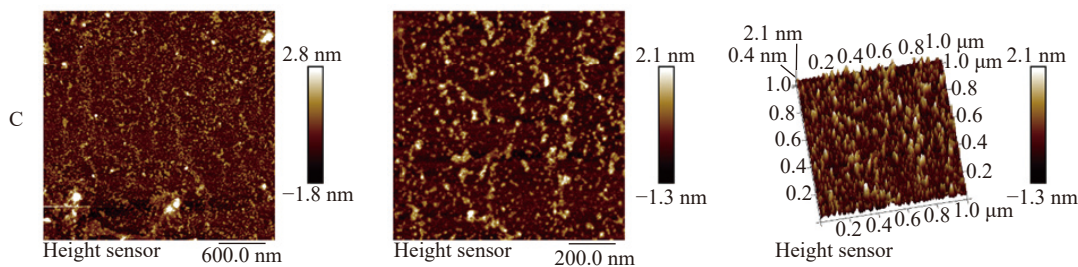


图9 HRP(A)、KRP(B)和PRP(C)的AFM图

Fig.9 AFM images of HRP (A), KRP (B) and PRP (C)

异性不大。由平面图可知,HRP、KRP和PRP均呈现有一定线状聚集形态的突起状结构;三维立体图像中3种玫瑰多糖呈较圆滑、高低不等的密集突起状结构。聚集突起结构可能与多糖的分子内及分子间作用力导致的多糖分子聚集有关。

2.8 抗氧化实验结果

HRP、KRP和PRP的总抗氧化能力、还原力、DPPH自由基清除能力和ABTS⁺自由基清除能力见图10及表3。

由图10和表3可知,HRP、KRP和PRP的体外抗氧化能力随着多糖样品浓度的增加而逐渐增加,表现出明显的量效关系。因此,3种玫瑰多糖均具有抗氧化能力。3种玫瑰多糖的总抗氧化能力和还原力无显著差异($P>0.05$)。而3种玫瑰多糖的ABTS⁺自由基清除能力($PRP>KRP>HRP$)及DPPH自由基清除能力($PRP\approx KRP>HRP$)具有显著差异($P<0.05$)。据报道,抗氧化能力较高的多糖通常具有较低的分子量^[37],PRP较强的ABTS⁺自由基及DPPH自由基清

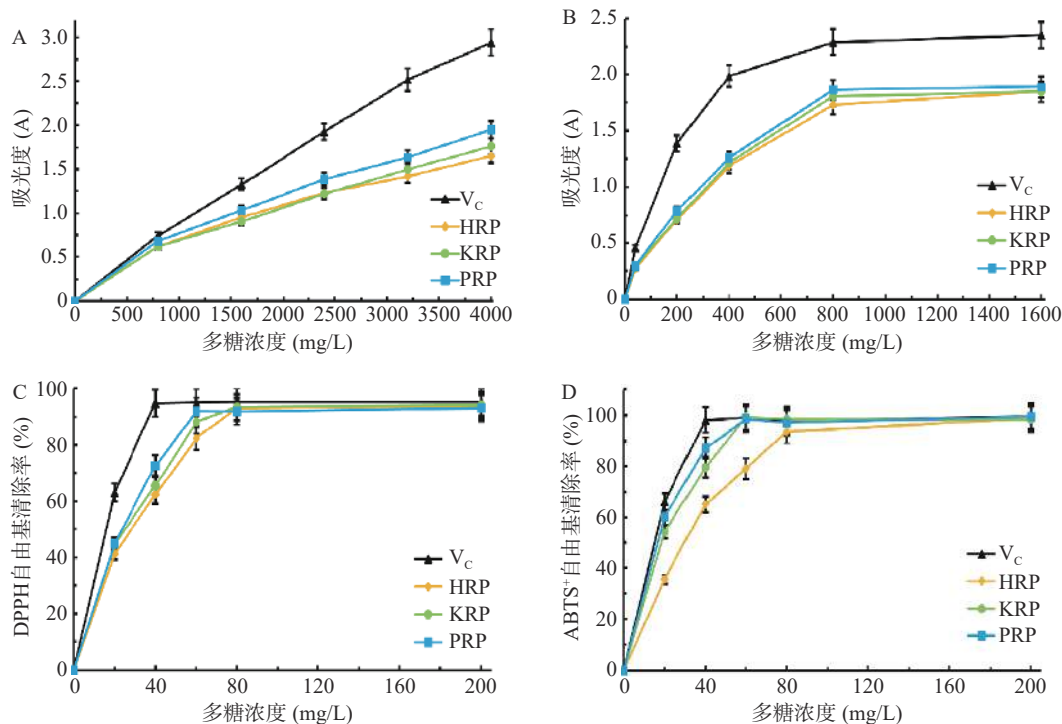


图10 HRP、KRP和PRP的抗氧化能力

Fig.10 Antioxidant capacities of HRP, KRP and PRP

注:总抗氧化能力(A)、还原力(B)、DPPH自由基清除能力(C)和ABTS⁺自由基清除能力(D)。

表3 HRP、KRP和PRP的抗氧化能力

Table 3 Antioxidant capacities of HRP, KRP and PRP

指标	HRP	KRP	PRP	V _c
总抗氧化能力	1.65±0.09 ^a	1.76±0.08 ^a	1.95±0.08 ^a	2.94±0.05 ^b
还原力	1.84±0.04 ^a	1.84±0.05 ^a	1.89±0.06 ^a	2.35±0.07 ^b
DPPH自由基清除能力(mg/L)	28.28±1.40 ^c	25.09±1.12 ^b	23.69±0.49 ^b	15.86±0.65 ^a
ABTS ⁺ 自由基清除能力(mg/L)	30.78±1.29 ^d	18.45±0.44 ^c	16.63±0.51 ^b	15.11±0.36 ^a

注:总抗氧化能力为多糖在4000 mg/L处的吸光度值;还原力为多糖在1600 mg/L处的吸光度值;DPPH和ABTS⁺自由基清除能力为多糖自由基清除率的EC₅₀值。同行中不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。

除能力可能与其较低的 M_w 有关。黄琼等^[38]报道玫瑰茄多糖 DPPH 自由基清除能力的 EC_{50} 值为 119.50 mg/L。Nuexiati 等^[39]报道兰花多糖 ABTS⁺ 自由基清除能力的 EC_{50} 值为 495.90 mg/L。金友权等^[40]报道粉花重瓣木槿花多糖在 1600 mg/L 浓度下的还原力约为 0.61, ABTS⁺ 自由基清除能力的 EC_{50} 值为 908 mg/L。任晓莉等^[41]报道槐花多糖 DPPH 自由基清除能力 EC_{50} 值约为 110 mg/L, 在 1600 mg/L 浓度下的还原力约为 0.59。本文所研究的 3 种玫瑰多糖的抗氧化能力皆显著高于上述报道的花朵类多糖, 这为玫瑰多糖研发为口服美容功能食品提供了理论支撑。

2.9 益生元实验

HRP、KRP 和 PRP 对 *L. plantarum* 和 *L. casei*

的生长促进作用见图 11。

由图 11 可知, 随着培养时间的增加, HRP、KRP 或 PRP 实验组(HRP、KRP 或 PRP+去除碳源的 MRS 培养基)的 OD_{600} 值和乳酸含量逐渐增加, pH 逐渐降低。并且, HRP、KRP 或 PRP 实验组中, OD_{600} 值、乳酸含量的增加程度, pH 的降低程度均显著高于阴性对照组(缺碳培养基)($P < 0.05$)。因此, 3 种玫瑰多糖(HRP、KRP 和 PRP)对 *L. plantarum* 和 *L. casei* 的生长均具有促进作用, 即 3 种玫瑰多糖(HRP、KRP 和 PRP)均具有益生元作用。进一步分析可知, *L. plantarum* 和 *L. casei* 培养过程中, HRP、KRP 或 PRP 实验组之间 OD_{600} 值、乳酸含量、pH 的变化基本一致($P > 0.05$)。因此, HRP、KRP 和 PRP 的益生元作用能力无显著差异。

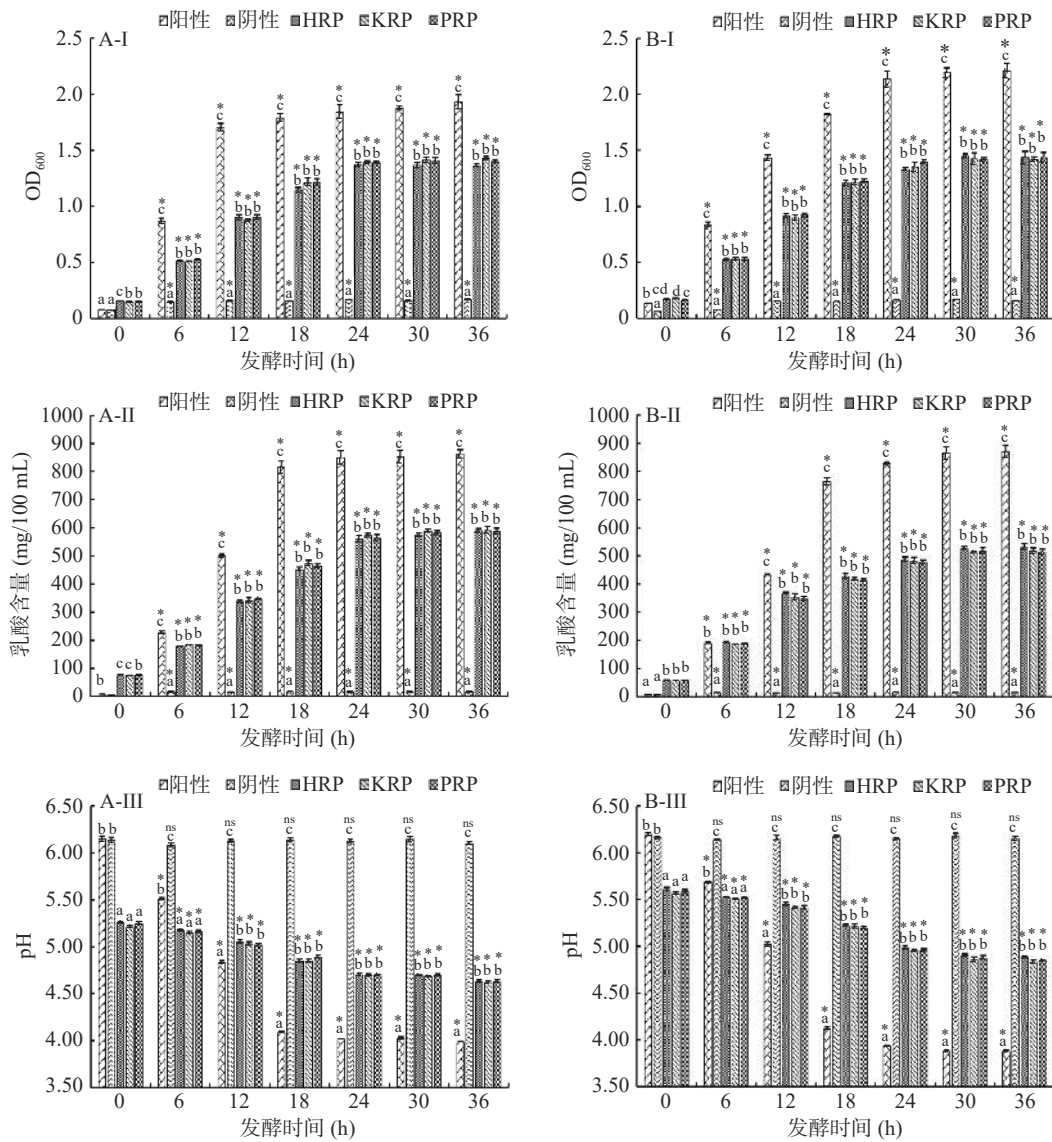


图 11 HRP、KRP 和 PRP 对 *L. plantarum*(A)和 *L. casei*(B)的生长促进作用

Fig.11 Growth promotion effects of HRP, KRP and PRP on *L. plantarum* (A) and *L. casei* (B)

注: (I) *L. plantarum* 或 *L. casei* 发酵过程中 OD_{600} 值的变化; (II) *L. plantarum* 或 *L. casei* 发酵过程中乳酸含量的变化; (III) *L. plantarum* 或 *L. casei* 发酵过程中 pH 的变化。阴性: 去除碳源的 MRS 培养基; 阳性: 菊粉+去除碳源的 MRS 培养基; HRP、KRP 或 PRP 实验组: HRP、KRP 或 PRP+去除碳源的 MRS 培养基。“ns”与对应组发酵前(0 h)相比不具有显著性差异($P > 0.05$); “*”与对应组发酵前(0 h)相比具有极显著性差异($P < 0.01$); 同一发酵时间不同字母代表具有显著性差异($P < 0.05$), 相同字母代表无显著性差异($P > 0.05$)。

由于低聚果糖不易被人体消化酶水解并且可以选择性地促进肠道益生菌生长,低聚果糖是被认可的益生元^[42]。由之前测定结果可知(2.2),3种玫瑰多糖均含有较高含量的Fru残基。因此,玫瑰多糖的益生元作用可能与其含有的Fru残基有关。玫瑰多糖等天然植物多糖通常具有良好的抗氧化、调节免疫力等生物学功效。因此,玫瑰多糖是具有多种生物学功效的更理想的益生元。

2.10 酪氨酸酶抑制实验

HRP、KRP和PRP对酪氨酸酶的抑制能力见图12。

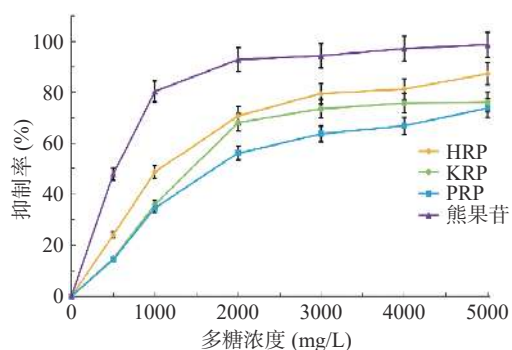


图12 HRP、KRP和PRP对酪氨酸酶的抑制能力

Fig.12 Tyrosinase inhibition activities of HRP, KRP and PRP

酪氨酸酶为黑色素合成关键酶,抑制酪氨酸酶活性,在一定程度上可以减少黑色素的生成^[43]。由图12可知,HRP、KRP和PRP在一定多糖浓度范围内,随着多糖浓度上升,对酪氨酸酶抑制率逐渐增强,表现出明显的量效关系。HRP、KRP和PRP对酪氨酸酶的抑制能力的 EC_{50} 值分别为1062.5、1438.6和1716.67 mg/L。其对酪氨酸酶的抑制能力的强弱顺序为HRP>KRP>PRP。3种玫瑰多糖对酪氨酸酶的抑制能力具有显著差异性($P<0.05$),因此,HRP、KRP和PRP均具有酪氨酸酶抑制能力,其中HRP的酪氨酸酶抑制能力最强。

Liang等^[15]报道糖醛酸含量较高的多糖可能具有较好酪氨酸酶抑制能力。本研究证明,玫瑰多糖为酸性多糖,含有Gal-UA和Glc-UA,并且HRP的糖醛酸含量最高。因此,3种玫瑰多糖对酪氨酸酶的抑制能力可能与其含有的糖醛酸有关。

3 结论

利用“水提醇沉法”分别从和田玫瑰、苦水玫瑰和平阴玫瑰干花蕾中获得3种玫瑰多糖(HRP、KRP和PRP)。结构表征结果表明,3种玫瑰多糖结构具有相似性。3种玫瑰多糖的单糖组成均包括Glc、Ara、Gal和Fru等11种单糖残基;分子量较大(M_w : $4.376 \times 10^5 \sim 5.841 \times 10^5$ Da),且较为均一(分散系数:1.35~1.72);含有 α 和 β 构型的吡喃糖;不含三螺旋结构;含有较多的长侧链。但是,3种玫瑰多糖在结构上仍有差异。HRP和PRP的单糖残基摩尔比例较为接近。相较于HRP和PRP,KRP的Glc残基

比例略高,Gal和Ara残基比例略低。HRP和KRP的 M_w 较为接近,相较于HRP和KRP,PRP的 M_w 略低。体外活性评价实验表明,3种玫瑰多糖均具有良好的抗氧化能力、益生元作用及酪氨酸酶抑制能力。PRP具有较强的ABTS⁺及DPPH自由基清除能力,HRP具有较强的酪氨酸酶抑制能力。因此,品种和产地对玫瑰多糖的结构略有影响,3种玫瑰多糖的生物学活性因此略有不同。玫瑰多糖可以研发为具有抗氧化、益生元及美白作用的美容类功能食品。

© The Author(s) 2024. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 王丽君,曹炎生,苗保河,等.两种玫瑰健康食品的开发及其检测与分析[J].现代食品,2022,28(19):42-45. [WANG L J, CAO Y S, MIAO B H, et al. Development and detection of two kinds of rose health food[J]. Modern Food, 2022, 28(19): 42-45.]
- [2] 朱峰,赵诗强.“一带一路”视野下平阴玫瑰产业发展思考[J].中共济南市委党校学报,2019(1):119-123. [ZHU F, ZHAO S Q. Thinking on the development of Pingyin rose industry under the vision of "One Belt and One Road"[J]. Journal of the Party School of CPC Jinan Municipal Committee, 2019(1): 119-123.]
- [3] 曾荣妹,韩琳,葛平珍,等.玫瑰酒生产及玫瑰品种选择研究进展[J].酿酒科技,2015(11):110-114. [ZENG R M, HAN L, GE P Z, et al. Research progress in rose wine production and rose species selection[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2015 (11): 110-114.]
- [4] 颜子曦,李永慧,孟德豪,等.苦水玫瑰中49项营养及活性成分指标分析与评价[J].北京林业大学学报,2023,45(2):120-128. [YAN Z X, LI Y H, MENG D H, et al. Analysis and evaluation of 49 nutritional and active component indexes of Kushui rose[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(2): 120-128.]
- [5] 宋焱,王辉.基于DNA序列的‘和田’玫瑰遗传背景分析研究[J].中国农学通报,2022,38(28):36-40. [SONG Y, WANG H. Genetic background analysis of 'Hetian' rose based on DNA sequence[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(28): 36-40.]
- [6] 田谊红,冯雅玲,王馨怡,等.玫瑰花化学成分质量评价及食用药用的研究进展[J].质量安全与检验检测,2022,32(2):43-46. [TIAN Y H, FENG Y L, WANG X Y, et al. Research progress on quality evaluation of chemical components and edible and medicinal use of *Rosa rugosa*[J]. Quality Safety Inspection and Testing, 2022, 32(2): 43-46.]
- [7] GRACIELA C Q, JOSÉ JUAN E C, GIERALDIN C L, et al. Hyaluronic acid-extraction methods, sources and applications[J]. Polymers, 2023, 15(16): 3473.
- [8] BEHOF W J, WHITMORE C A, HAYNES J R, et al. A novel antioxidant ergothioneine PET radioligand for *in vivo* imaging applications[J]. Scientific Reports, 2021, 11: 18450.
- [9] WU Y, ZHUANG J, ZHANG Q, et al. Aging characteristics of colorectal cancer based on gut microbiota[J]. Cancer Medicine, 2023, 12(17): 17822-17834.
- [10] 朱赤云,肖平,方悦悦,等.多糖体内过程与免疫调节机制研究方法和技术进展[J].药学报,2024,59(2):322-335. [ZHU C Y, XIAO P, FANG Y Y, et al. Advances in methods and tech-

- niques for the study of polysaccharide *in vivo* processes and immunomodulatory mechanisms[J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2024, 59(2): 322–335.]
- [11] 陈容容, 王常荣, 江筠, 等. 玫瑰花和鲍鱼菇中抗氧化成分的降血糖作用研究[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2009, 42(2): 87–91. [CHEN R R, WANG C R, JIANG Y, et al. Study on the hypoglycemic effect of antioxidant components in rosehips and abalone mushrooms[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2009, 42(2): 87–91.]
- [12] 白伟芳. 玫瑰花多糖的提取及其功效研究[D]. 济南: 山东轻工学院, 2010. [BAI W F. Extraction of polysaccharides from roses and their efficacy[D]. Jinan: Shandong Light Industry Institute, 2010.]
- [13] 孙艺, 乔旭光, 郑振佳, 等. 大蒜多糖脂质体制备及结构表征[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(14): 9–15. [SUN Y, QIAO X G, ZHENG Z J, et al. Preparation and structural characterization of garlic polysaccharide liposomes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(14): 9–15.]
- [14] 朱艳, 李先芝, 严玲, 等. 苯酚-硫酸法测定保健酒中多糖含量的分析研究[J]. *酿酒科技*, 2023(2): 118–121. [ZHU Y, LI X Z, YAN L, et al. Determination of polysaccharides in healthcare liqueur by phenol-sulfuric acid method[J]. *Liquor-Making Science & Technology*, 2023(2): 118–121.]
- [15] LIANG J, ZHAO Y L, YANG F R, et al. Preparation and structure-activity relationship of highly active black garlic polysaccharides[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 220: 601–612.
- [16] 赵婷婷, 商洛华, 姚肖翰, 等. 香菇菌柄营养成分、多糖结构表征及其体外抗氧化活性[J/OL]. *菌物研究*, 1–10[2024-08-12]. <https://doi.org/10.13341/j.jfr.2022.1522>. [ZHAO T T, SHANG L H, YAO X H, et al. *Lentinula edodes* stalks nutrient composition, characterization of polysaccharide structure and its antioxidant activity *in vitro*[J/OL]. *Journal of Fungal Research*, 1–10[2024-08-12]. <https://doi.org/10.13341/j.jfr.2022.1522>.]
- [17] 李雪超, 赵建伟, 周星, 等. 红米米糠非淀粉多糖的提取纯化与结构表征[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(9): 157–163. [LI X C, ZHAO J W, ZHOU X, et al. Extraction, purification, and structure characterization of non-starch polysaccharides from red rice bran[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2024, 50(9): 157–163.]
- [18] 张亚男, 王昌禄, 李贞景, 等. 金针菇根部多糖的结构特征[J]. *食品科技*, 2015, 40(3): 283–286. [ZHANG Y N, WANG C L, LI Z J, et al. Structural characterization of polysaccharides from root of *Flammulina velutipes*[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(3): 283–286.]
- [19] 陈庆庆, 陈帅, 李峰, 等. 阿魏菇子实体多糖的结构及其抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(2): 108–112. [CHEN Q Q, CHEN S, LI F, et al. Structural analysis and antioxidant activities of polysaccharides from the fruiting bodies of *Pleurotus ferulae* Lenzi[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(2): 108–112.]
- [20] 刘哲, 叶兴旺, 王吉平, 等. 生物结皮胞外多糖理化特性及菌群结构的季节动态[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1801–1809. [LIU Z, YE X W, WANG J P, et al. Seasonal dynamics the physicochemical properties of biological crusts exopolysaccharides and the microbial community structure[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(7): 1801–1809.]
- [21] 郑岚, 梁洁, 赵永雷, 等. 独瓣, 多瓣黑蒜发酵前后成分及抗氧化活性的分析[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(16): 95–102. [ZHENG L, LIANG J, ZHAO Y L, et al. Compositions and antioxidant activities of single-clove and multiple-clove black garlic before and after fermentation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2022, 48(16): 95–102.]
- [22] 姜冬洋, 苏林贺, 陈亚东, 等. 富硒黑木耳菌丝体硒多糖的提取优化与抗氧化活性研究[J]. *菌物学报*, 2024, 43(2): 115–128. [JIANG D Y, SU L H, CHEN Y D, et al. Extraction and antioxidant activities of selenium polysaccharides from selenium enriched *Auricularia heimuer* mycelia[J]. *Mycosystema*, 2024, 43(2): 115–128.]
- [23] WEI Q, ZHANG Y. Ultrasound-assisted polysaccharide extraction from *Cercis chinensis* and properites, antioxidant activity of polysaccharide[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 96: 106422.
- [24] CHENG S, HE F, FU L, et al. Polysaccharide from *Rubus chingii*: Extraction, optimization, characterization and antioxidant activities[J]. *RSC Advances*, 2021, 11(31): 18974–18983.
- [25] XIAO M, REN X, CHENG J, et al. Structural characterization of a novel fucosylated trisaccharide prepared from bacterial exopolysaccharides and evaluation of its prebiotic activity[J]. *Food Chemistry*, 2023, 420: 136144.
- [26] 刘晓英, 马诗经, 韩萍, 等. 不同分子量茯苓多糖抑制酪氨酸酶活性及抗炎功效的研究[J]. *中国食用菌*, 2021, 40(9): 47–53. [LIU X Y, MA S J, HAN P, et al. Study on inhibitory of tyrosinase activity and anti-inflammatory effect of *Poria cocos* polysaccharides with different molecular weight[J]. *Edible Fungi of China*, 2021, 40(9): 47–53.]
- [27] 张曰辉, 韩立文, 郑岚, 等. 玫瑰多糖的酶法提取及柱前衍生 HPLC 分析[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(20): 5031–5033. [ZHANG Y H, HAN L W, ZHENG L, et al. Enzymatic extraction and pre-column derivatization HPLC analysis of rose polysaccharides[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2013, 52(20): 5031–5033.]
- [28] TANG Y, ZHU Z Y, LIU Y, et al. The chemical structure and anti-aging bioactivity of an acid polysaccharide obtained from rose buds[J]. *Food & Function*, 2018, 9(4): 2300–2312.
- [29] ZHU H, NI L, REN S, et al. A composite carbon-based solid acid-supported palladium catalyst (Pd/C-SO₃H) for hydrogenolysis of plant-derived polymeric proanthocyanidins[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(35): 20665–20675.
- [30] 石硕, 孙康婷, 李继伟, 等. 琼枝麒麟菜多糖的分离纯化、结构表征及降血糖活性[J]. *大连海洋大学学报*, 2023, 38(5): 866–873. [SHI S, SUN K T, LI J W, et al. Isolation, purification and hypoglycemic activity of polysaccharides derived from *Eucheuma gelatiniae*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2023, 38(5): 866–873.]
- [31] HONG T, YIN J Y, NIE S P, et al. Applications of infrared spectroscopy in polysaccharide structural analysis: Progress, challenge and perspective[J]. *Food Chemistry: X*, 2021, 12: 100168.
- [32] 宋照凤, 谭杰安, 周子凡, 等. 黄芪多糖衍生物的制备及乳化性能研究[J]. *轻工科技*, 2023, 39(5): 8–15. [SONG Z F, TAN J A, ZHOU Z F, et al. Preparation and emulsification of astragalus polysaccharide derivatives[J]. *Light Industry Science and Technology*, 2023, 39(5): 8–15.]
- [33] DAI Y, WANG L, CHEN X, et al. *Lentinula edodes* Sing polysaccharide: Extraction, characterization, bioactivities, and emulsifying applications[J]. *Foods*, 2023, 12(17): 3289.
- [34] TANG Y, SHENG J, HE X, et al. Novel antioxidant and hypoglycemic water-soluble polysaccharides from jasmine tea[J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2375.
- [35] 杭书扬, 杨留枝, 史苗苗, 等. 山药皮残渣多糖结构表征及抗氧化活性测定[J]. *食品与机械*, 2023, 39(2): 153–158. [HANG S

- Y, YANG L Z, SHI M M, et al. Characterization and antioxidant activity determination of polysaccharide from yam peel residue[J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(2): 153–158.]
- [36] LIU Y, RAN L, WANG Y, et al. Basic characterization, antioxidant and immunomodulatory activities of polysaccharides from sea buckthorn leaves[J]. *Fitoterapia*, 2023, 169: 105592.
- [37] ZOU L. Deep eutectic solvent-assisted extraction, partially structural characterization, and bioactivities of acidic polysaccharides from lotus leaves[J]. *Foods*, 2021, 10(10): 2330.
- [38] 黄琼, 何燕萍. 玫瑰茄多糖含量测定及抗氧化活性研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(10): 49–53. [HUANG Q, HE Y P. Determination of polysaccharide content and antioxidant activity of rosehips[J]. *The Food Industry*, 2018, 39(10): 49–53.]
- [39] NUERXIATI R, MUTAILIPU P, ABUDUWAILI A, et al. Effects of different chemical modifications on the structure and biological activities of polysaccharides from *Orchis chusua* D. Don[J]. *Journal of Food Science*, 2021, 86(6): 2434–2444.
- [40] 金友权, 张四杰, 钱正, 等. 木槿花多糖的组成分析及抗氧化活性研究[J]. *中国中药杂志*, 2019, 44(9): 1822–1828. [JIN Y Q, ZHANG S J, QIAN Z, et al. Composition analysis and antioxidant activity of polysaccharide from *Hibiscus syriacus*[J]. *China Journal of Chinese Materia Medica*, 2019, 44(9): 1822–1828.]
- [41] 任晓莉, 杨璐, 乔鹏, 等. 复合酶法提取槐花多糖的工艺优化及其抗氧化活性[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(7): 8–14. [REN X L, YANG L, QIAO P, et al. Process optimization of complex enzyme extraction of polysaccharides from *Sophora japonica* flowers and its antioxidant activity[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(7): 8–14.]
- [42] AZIZ R H, LEILI M A, HOSSEIN K S, et al. Postbiotics as novel health-promoting ingredients in functional foods[J]. *Health Promotion Perspectives*, 2020, 10(1): 3–4.
- [43] 杜孝元, 刘玮, 史飞, 等. 酪氨酸酶活性抑制实验及其在祛斑美白化妆品功效评价中的应用[J]. *中国美容医学*, 2005, 14(6): 740–742. [DU X Y, LIU W, SHI F, et al. Tyrosinase inhibition test and its application in efficacy evaluation of whitening cosmetics[J]. *Chinese Journal of Aesthetic Medicine*, 2005, 14(6): 740–742.]