

基于综合功能特性的滇黄精多糖提取方法优选

唐雅园^{1,2} 韦 珍^{1,2} 岳 健³ 苏 娟³ 孙 健² 何雪梅¹

(1. 广西农业科学院农产品加工研究所, 广西 南宁 530007; 2. 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室, 广西 南宁 530007; 3. 云南青谷生物科技有限公司, 云南 昆明 650200)

摘要: [目的] 探讨提取方法对白花和紫红花滇黄精多糖的化学组成及其功能特性的影响。[方法] 采用传统热水法、碱液法、酸液法、复合酶辅助法、超声辅助法和碱式复合热水法提取多糖, 并测定所得多糖的得率、总糖、硫酸根、糖醛酸、DPPH 自由基清除能力、 α -葡萄糖苷酶抑制能力及酪氨酸酶抑制活性的变化情况。[结果] 滇黄精多糖的得率及其化学组成成分受提取方法和品种的影响显著。其中, 采用传统热水法提取的白花和紫红花滇黄精多糖的得率分别为 23.27% 和 9.58%, 总糖含量分别为 54.53% 和 68.59%, 硫酸根含量分别为 7.28% 和 35.41%, 糖醛酸含量分别为 8.26% 和 10.84%, 均表现出较高的水平。此外, 滇黄精多糖的 DPPH 自由基清除能力、 α -葡萄糖苷酶抑制能力及酪氨酸酶抑制活性也受到提取方法和品种的影响。通过综合量化评价得出, 紫红花滇黄精在这 3 项功能特性上表现更为优越, 复合酶辅助法和传统热水法可作为生产优质滇黄精多糖的有效提取方法。[结论] 复合酶辅助法和传统热水法是提取滇黄精多糖的最佳方法。

关键词: 滇黄精; 多糖; 品种; 提取方法; 化学成分; 综合功能特性

Optimization of extraction method for *Polygonatum kingianum* polysaccharides based on comprehensive functional characteristics

TANG Yayuan^{1,2} WEI Zhen^{1,2} YUE Jian³ SU Juan³ SUN Jian² HE Xuemei¹

(1. Institute of Agro-products Processing Science and Technology, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-processing Technology, Nanning, Guangxi 530007, China; 3. Yunnan Qinggu Biotechnology Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650200, China)

Abstract: [Objective] This study investigates the effects of various extraction methods on the chemical composition and functional characteristics of polysaccharides derived from *Polygonatum kingianum*, specifically the white flower and purple-red flower varieties. [Methods] *P. kingianum* polysaccharides (PKPs) are extracted with traditional hot water, alkaline, acidic, enzymatic, ultrasonic, and hot water-alkaline extraction methods, and a comparative evaluation is made on their extraction yield, chemical composition (including total sugar, sulfate, and uronic acid content), and biological properties (including DPPH radical scavenging activity, α -glucosidase inhibitory activity, and tyrosinase inhibitory activity). [Results] The extraction yield of PKPs and their chemical composition are significantly influenced by extraction methods and varieties. PKPs extracted with the hot water method from the white flower and purple-red flower varieties exhibit relatively higher extraction yields (23.27% and 9.58%, respectively), along with elevated total sugar content (54.53% and 68.59%, respectively), sulfate content (7.28% and 35.41%, respectively), and uronic acid content (8.26% and 10.84%, respectively). Additionally, the DPPH radical scavenging activity, α -glucosidase inhibitory activity, and tyrosinase inhibitory activity of PKPs are also influenced by extraction methods and varieties. A comprehensive quantitative evaluation reveals that PKPs derived from the purple-red

基金项目: 云南省科技人才和平台计划项目 (编号: 202305AF150191); 广西自然科学基金 (编号: 2025GXNSFAA069644); 广西农业科学院基本科研业务费项目 (编号: 2021YT116)

通信作者: 孙健 (1978—), 男, 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室研究员, 博士。E-mail: jiansun@gxaas.net

何雪梅 (1981—), 女, 广西农业科学院农产品加工研究所研究员, 硕士。E-mail: xuemei@gxaas.net

收稿日期: 2024-12-26 **改回日期:** 2025-07-21

引用格式: 唐雅园, 韦珍, 岳健, 等. 基于综合功能特性的滇黄精多糖提取方法优选[J]. 食品与机械, 2025, 41(10): 167-173.

Citation: TANG Yayuan, WEI Zhen, YUE Jian, et al. Optimization of extraction method for *Polygonatum kingianum* polysaccharides based on comprehensive functional characteristics[J]. Food & Machinery, 2025, 41(10): 167-173.

flower variety exhibit stronger performance in the three aspects. Both enzymatic and traditional hot water extraction methods are effective for producing high-quality PKPs. [Conclusion] Enzymatic and traditional hot water extraction methods are the most effective techniques for extracting PKPs.

Keywords: *Polygonatum kingianum*; polysaccharides; varieties; extraction methods; chemical composition; comprehensive functional characteristics

滇黄精(*Polygonatum kingianum*)作为中国独具特色的食药同源资源之一,分布于云南、四川、贵州等地,其中云南的滇中和滇西北地区的滇黄精产量较为丰富^[1]。《云南植物志》对滇黄精花的颜色类型进行了记录,主要包括紫红色、绿色、黄绿色和白色,其中紫红色和白色最为常见^[2]。多糖被认为是滇黄精的关键活性成分^[3],并且是《中国药典》中用于评估黄精品质的一项关键指标^[4]。现代药理学研究表明,滇黄精中的多糖具有抗氧化^[5]、降血糖^[6]、增强免疫力^[7]和抗疲劳^[8]等多种功能特性,目前已被广泛应用于食品、医药等领域^[9]。然而,紫红花和白花滇黄精中多糖成分在化学组成及功能特性方面的差异尚未得到充分研究。

不同植物多糖的功能特性易受到其化学组成的影响显著,而多糖的化学组成又与其提取方法密切相关^[10]。目前,滇黄精多糖的提取方法包括传统热水法、酶辅助法和超声辅助法等。传统热水法利用多糖在水中的溶解性,具有成本低廉的优点^[11]。酶辅助法则通过酶解反应破坏细胞壁,从而释放多糖^[12]。超声辅助提取则主要依赖于空化作用或高强度机械波对细胞壁的破裂,以提高多糖的提取效率,该方法具有高效且对活性成分损伤小等优势^[13]。

目前,关于滇黄精多糖的研究主要集中于单一提取方法的优化,而对多种提取方法及不同花被之间的比较研究相对较少。研究拟以白花滇黄精和紫红花滇黄精为研究对象,比较分析 6 种提取方法(包括传统热水法、碱液法、酸液法、复合酶辅助法、超声辅助法和碱式复合热水法)对滇黄精多糖的得率、化学成分以及其抗氧化、降血糖和抑制酪氨酸酶等功能特性的影响,旨在为筛选出最佳提取方法和滇黄精复合功能产品的开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

白花滇黄精、紫红花滇黄精:云南青谷生物科技有限公司;

葡萄糖、无水乙醇、盐酸、氢氧化钠、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、无水碳酸钠:分析纯,天津市科密欧化学试剂有限公司;

对硝基苯- α -D-吡喃葡萄糖苷(PNPG)、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)、 α -葡萄糖苷酶:Sigma-Aldrich(上海)贸易有限公司;

阿卡波糖:上海源叶生物科技有限公司;

纤维素酶:2 万 U/g,南宁庞博生物工程有限公司;

果胶酶:3 万 U/g,南宁庞博生物工程有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

数控超声波清洗机:JAC-300N 型,山东省济宁奥波超声电气有限公司;

高速冷冻离心机:3-18KS 型,德国 Sigma 公司;

旋转蒸发仪:RE-52AA 型,上海亚荣生化仪器厂;

真空冷冻干燥机:PILOT10-15M 型,北京博医康实验仪器有限公司;

紫外分光光度计:UV-1800PC 型,上海美析仪器有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 滇黄精多糖制备

(1) 传统热水法:参照 Tang 等^[14]的方法。首先将鲜滇黄精切片后置于 50℃ 的干燥箱中进行烘干,随后粉碎并通过 60 目筛进行筛分。将滇黄精粉末与去离子水按 1:30 (g/mL) 比例混合,在 100℃ 下加热浸提 2 h,此过程重复两次,并将两次提取液合并。将提取液浓缩至原体积的 10%,并与 4 倍体积的体积分数为 95% 的乙醇混合,静置于 4℃ 环境中醇沉 12 h。4 800 r/min 离心 15 min,收集沉淀物,用去离子水溶解,采用 3000-Da 超滤膜透析 72 h,浓缩后经过冷冻干燥得到白花滇黄精水提多糖(H-WPKP)和紫红花滇黄精水提多糖(H-PPKP),最后称量并根据式(1)计算滇黄精多糖的得率。

$$Y = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

Y ——多糖得率,%;

m_1 ——滇黄精多糖质量,g;

m_2 ——滇黄精原料质量,g。

(2) 碱液法:将滇黄精粉末与 pH 8 的 NaOH 溶液按照 1:30 (g/mL) 比例混合,随后在 50℃ 下加热浸提 2 h,进行两次提取,并将两次提取液合并。提取液的处理同 1.2.1 (1),从而获得白花滇黄精碱提多糖(A-WPKP)和紫红花滇黄精碱提多糖(A-PPKP)。

(3) 酸液法:将滇黄精粉末与 pH 3 的 HCl 溶液按照 1:30 (g/mL) 比例混合,随后在 50℃ 下加热浸提 2 h,进行两次提取。提取液的处理同 1.2.1 (1),从而获得白花滇黄精酸提多糖(I-WPKP)和紫红花滇黄精酸提多糖(I-PPKP)。

(4) 复合酶辅助法:将滇黄精粉末与去离子水按照 1:

30 (g/mL)比例混合,调节溶液的pH值至4.5~5.0,随后加入纤维素酶和果胶酶($m_{\text{纤维素酶}}:m_{\text{果胶酶}}=1:1$),在50℃下提取2 h,进行两次提取。然后提取液在100℃下加热5 min,使酶失活。最后收集浓缩的上清液。上清液的处理同1.2.1(1),从而获得白花滇黄精酶提多糖(E-WPKP)和紫红花滇黄精酶提多糖(E-PPKP)。

(5) 超声辅助法:将滇黄精粉末与去离子水按照1:30 (g/mL)比例混合均匀,随后在功率为300 W、温度为50℃的条件下超声提取,时间为0.5 h,提取过程重复两次,并将两次提取液合并。提取液的处理同1.2.1(1),从而获得白花滇黄精超声提取多糖(U-WPKP)和紫红花滇黄精超声提取多糖(U-PPKP)。

(6) 碱式复合热水法:将滇黄精粉末与pH 8的NaOH溶液按照1:30 (g/mL)比例混合,随后在100℃下加热浸提2 h,此过程重复两次,并将两次提取液合并。提取液的处理同1.2.1(1),从而获得白花滇黄精碱式复合热水提取多糖(C-WPKP)和紫红花滇黄精碱式复合热水提取多糖(C-PPKP)。

1.2.2 滇黄精多糖化学成分测定

(1) 多糖含量:采用苯酚—硫酸法^[15],按式(2)计算多糖含量。

$$c = \frac{m_1 \times v_1 \times n}{m_2 \times v_2 \times 1000} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

c ——多糖含量,%;

m_1 ——葡萄糖(标准品)质量,mg;

v_1 ——样品总体积,mL;

n ——稀释倍数;

m_2 ——滇黄精样品质量,g;

v_2 ——测定时样液体积,mL。

(2) 硫酸根含量:采用硫酸钡比浊法^[16],按式(3)计算硫酸根含量。

$$c = \frac{f \times c \times v}{0.2w} \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

c ——硫酸根含量,%;

f ——换算因子;

c ——样品测定浓度;

v ——样品水解液总体积,mL;

w ——初始样品质量,mg。

(3) 糖醛酸含量:采用硫酸—呋唑比色法^[14],按式(4)计算糖醛酸含量。

$$c = \frac{m_1 \times v_1}{m_2 \times v_2 \times 10^6} \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

c ——糖醛酸含量,%;

m_1 ——半乳糖醛酸(标准品)质量, μg ;

v_1 ——样品提取液总体积,mL;

v_2 ——测定时所取样品提取液体积,mL;

m_2 ——滇黄精样品质量,g。

1.2.3 滇黄精多糖功能特性分析

(1) DPPH 自由基清除能力:根据 Tang 等^[14]的方法,于517 nm测吸光度。以0.1 mg/mL的维生素C溶液作为阳性对照,按式(5)计算DPPH自由基清除率。

$$Z = \left(1 - \frac{A_2 - A_1}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (5)$$

式中:

Z ——DPPH 自由基清除率,%;

A_0 ——无水乙醇吸光度值;

A_1 ——无水乙醇与样品溶液反应后的吸光度值;

A_2 ——DPPH 自由基溶液与样品溶液反应后的吸光度值。

(2) α -葡萄糖苷酶抑制能力:根据 Tang 等^[14]的方法,使用405 nm测定反应混合物的吸光度。以8 mmol/L的阿卡波糖溶液作为阳性对照。按式(6)计算 α -葡萄糖苷酶抑制率。

$$Z = \left(1 - \frac{A_2 - A_1}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (6)$$

式中:

Z —— α -葡萄糖苷酶抑制率,%;

A_0 ——蒸馏水代替样品反应后的吸光度值;

A_1 ——蒸馏水代替 α -葡萄糖苷酶反应后的吸光度值;

A_2 ——加入待测样品反应后的吸光度值。

(3) 酪氨酸酶抑制活性:根据何雪梅等^[17]的方法,在490 nm下测定反应液的吸光度值。以5 mg/mL的熊果苷溶液作为阳性对照。按式(7)计算酪氨酸酶抑制率。

$$Z = \left(1 - \frac{A_3 - A_4}{A_1 - A_2}\right) \times 100\%, \quad (7)$$

式中:

Z ——酪氨酸酶抑制率,%;

A_1 ——蒸馏水代替样品反应后的吸光度值;

A_2 ——蒸馏水代替样品、缓冲液代替酪氨酸酶反应后的吸光度值;

A_3 ——加入待测样品反应后的吸光度值;

A_4 ——缓冲液代替酪氨酸酶反应后的吸光度值。

1.2.4 综合量化评价方法 对6种提取方法制备的滇黄精多糖的DPPH自由基清除能力、 α -葡萄糖苷酶抑制能力、酪氨酸酶抑制活性3项正向功能指标进行归一化处理,并综合量化评价^[18],以便直观地反映不同提取方法所制备的滇黄精多糖的综合功能特性。归一化处理的具体方法依据式(8)。

$$Y_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}, \quad (8)$$

式中:

Y_i ——多糖样品*i*的归一化值;

X_i ——多糖样品在某项指标测定值;

$X_{\min}$ ——某项指标的最小测定值;

$X_{\max}$ ——某项指标的最大测定值。

1.3 统计与分析

所有试验均进行 3 次重复,结果以平均值±标准差的形式呈现。数据分析采用 IBM SPSS 26 软件,绘图使用 GraphPad Prism 8.0.2 软件。通过单因素方差分析 (ANOVE) 及 Duncan 多重比较法确定显著性差异。

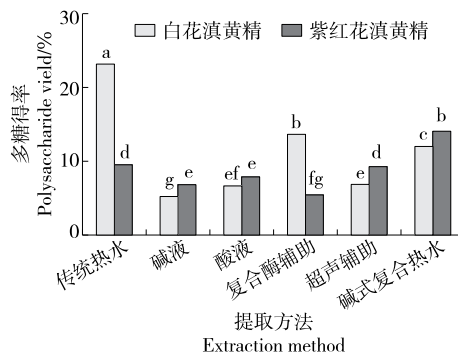
2 结果与分析

2.1 提取方法对滇黄精多糖得率的影响

图 1 显示,滇黄精多糖的得率受到提取方法的显著影响 ($P<0.05$)。采用相同提取方法时,从不同花被的滇黄精中提取的多糖的得率也存在显著差异 ($P<0.05$)。以白花滇黄精为原料时,H-WPKP 得率最高,达到 (23.27 ± 1.26)%;其次为 E-WPKP,得率为 (13.72 ± 1.56)%;而 A-WPKP 得率最低,仅为 (5.32 ± 0.42)%。以紫红花滇黄精为原料时,C-PPKP 得率最高,为 (14.13 ± 0.52)%;其次是 H-PPKP 和 U-PPKP,分别为 (9.58 ± 0.52)% 和 (9.36 ± 0.40)%;E-PPKP 得率最低,仅为 (5.56 ± 0.34)%。在白花滇黄精多糖中,中性糖成分占据主导地位^[19]。传统热水浸提法以水为溶剂,通过高温处理破坏细胞壁,使水能够迅速渗透到组织内部,从而加速中性糖的溶出^[20]。因此,在沸水的作用下,白花滇黄精多糖的得率达到最高。

2.2 提取方法对滇黄精多糖化学组成的影响

2.2.1 多糖含量的比较分析 如图 2(a) 所示,除了传统热水法外,其余 5 种提取方法所获得的白花滇黄精多糖含量均高于紫红花滇黄精。这表明白花滇黄精的多糖成分更加丰富。进一步分析显示,滇黄精的多糖含量受到提取方法的显著影响。以白花滇黄精为原料,其多糖含量从高到低依次为:U-WPKP (64.79 ± 0.45)%>A-WPKP (56.62 ± 0.41)%>H-WPKP (54.53 ± 2.33)%>C-WPKP (42.99 ± 0.83)%>E-WPKP (36.84 ± 0.49)%>I-WPKP (34.62 ± 0.64)% ($P<0.05$)。而以紫红花滇黄精为原料,H-PPKP 中多糖含量最高,为 (68.59 ± 1.55)%;其次是 U-PPKP 和 A-PPKP,分别为 (58.12 ± 0.87)% 和 ($48.76\pm$



小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

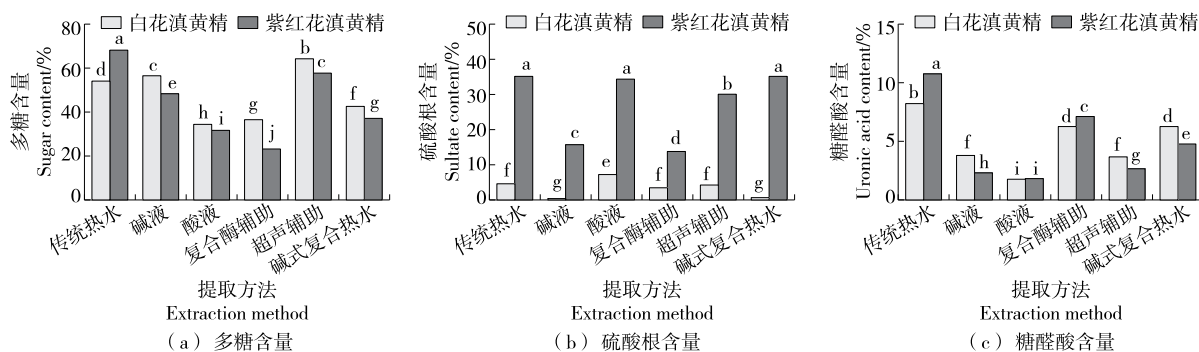
图 1 提取方法对滇黄精多糖得率的影响

Figure 1 Effects of different extraction methods on extraction yields of *Polygonatum kingianum* polysaccharides

0.27)%;E-PPKP 中多糖含量最低,仅为 (23.50 ± 0.32)% ($P<0.05$)。超声辅助浸提法通过机械效应和空化作用破坏植物细胞壁,促进多糖成分的溶出,从而提高了两种滇黄精提取的多糖含量。

2.2.2 多糖中硫酸根含量的比较分析 如图 2(b) 所示,在相同的提取条件下,紫红花滇黄精多糖中的硫酸根含量显著高于白花滇黄精多糖 ($P<0.05$),这一结果验证了紫红花滇黄精中酸性糖含量较高。进一步分析可知,滇黄精多糖中的硫酸根含量受到提取方法的显著影响。以白花滇黄精为原料的 I-WPKP,其硫酸根含量为 (7.28 ± 1.80)%;而以紫红花滇黄精为原料的 I-PPKP、H-PPKP 和 C-PPKP,其硫酸根含量分别为 (34.48 ± 0.99)%, (35.41 ± 0.86)%, (35.35 ± 0.52)% ($P>0.05$)。这是因为酸性溶液和高温条件能够定向降解植物多糖链,释放出多糖结构中的硫酸基团^[21],从而有效促进滇黄精中富含硫酸根的多糖溶出。而在单独的碱性溶液环境中,无法较好实现富含硫酸根的多糖释放。

2.2.3 多糖中糖醛酸含量的比较分析 如图 2(c) 所示,



小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

图 2 提取方法对滇黄精多糖化学成分的影响

Figure 2 Effects of different extraction methods on chemical composition of *Polygonatum kingianum* polysaccharides

6种提取方法获得的白花和紫红花滇黄精多糖中均含有酸性糖。这与Capek等^[22]及Li等^[23]的研究结论相似。进一步分析表明,滇黄精多糖中糖醛酸含量受到提取方法的显著影响($P<0.05$)。在H-WPKP和H-PPKP中,糖醛酸含量最高,分别为 $(8.26\pm 0.19)\%$ 和 $(10.84\pm 0.02)\%$;其次为U-WPKP和U-PPKP。而在I-WPKP和I-PPKP中,糖醛酸含量最低,分别仅为 $(1.84\pm 0.09)\%$ 和 $(1.88\pm 0.05)\%$ 。这可能是由于高温条件和物理辅助作用(如超声波)能够有效地软化并加速植物细胞壁的破坏,从而促进滇黄精多糖中糖醛酸的释放^[24]。

2.3 提取方法对滇黄精多糖体外功能特性的影响

2.3.1 多糖抗氧化能力的比较分析 如图3(a)所示,整体而言,除了酸液法,其余5种提取方法所获得的紫红花滇黄精多糖的DPPH自由基清除率均高于白花滇黄精多糖,表明紫红花滇黄精多糖具有更优越的抗氧化能力。另一方面,滇黄精多糖的抗氧化能力受到提取方法的显著影响。以白花滇黄精为原料,H-WPKP、A-WPKP、I-WPKP、E-WPKP、U-WPKP和C-WPKP的DPPH自由基清除率分别为 $(59.71\pm 1.14)\%$ 、 $(32.62\pm 2.01)\%$ 、 $(21.65\pm 2.03)\%$ 、 $(44.33\pm 1.78)\%$ 、 $(32.31\pm 2.72)\%$ 、 $(66.84\pm 3.11)\%$ ($P<0.05$)。而以紫红花滇黄精为原料,C-PPKP的DPPH自由基清除率最高,为 $(87.10\pm 2.62)\%$;其次是I-PPKP和H-PPKP,分别为 $(77.22\pm 1.81)\%$ 和 $(75.28\pm 1.83)\%$;A-PPKP的DPPH自由基清除率最低,仅为 $(23.57\pm 1.09)\%$ ($P<0.05$)。由此可见,采用碱式复合热水法提取的白花和紫红花滇黄精多糖均展现出最强的DPPH自由基清除活性。这可能是热水协同碱性溶液的提取环境在破坏滇黄精细胞壁的同时,对其多糖分子产生了一定的降解作用^[25],从而提高了多糖糖苷键断裂的概率,形成了多个相对分子质量较小的多糖片段,最终增强了其抗氧化能力^[26]。

2.3.2 多糖降血糖能力的比较分析 如图3(b)所示,整体而言,除了酸液法外,其余5种提取方法所获得的紫

花滇黄精多糖的 α -葡萄糖苷酶抑制率均高于白花滇黄精多糖,表明前者在降血糖方面的效果更为显著。进一步分析发现,滇黄精多糖的降血糖能力受到提取方法的显著影响。以白花滇黄精为原料,其多糖的 α -葡萄糖苷酶抑制率从高到低依次为:E-WPKP $(81.05\pm 1.46)\%$ >H-WPKP $(69.22\pm 0.95)\%$ >C-WPKP $(51.75\pm 2.67)\%$ >I-WPKP $(47.23\pm 0.79)\%$ >U-WPKP $(44.29\pm 2.32)\%$ >A-WPKP $(35.12\pm 1.72)\%$ ($P<0.05$)。而以紫红花滇黄精为原料,E-PPKP的 α -葡萄糖苷酶抑制率最高,为 $(93.20\pm 0.69)\%$;其次是H-PPKP和C-PPKP,分别为 $(71.04\pm 1.80)\%$ 和 $(62.32\pm 2.24)\%$;I-PPKP的 α -葡萄糖苷酶抑制率最低,仅为 $(37.06\pm 0.50)\%$ ($P<0.05$)。采用复合酶辅助法和传统热水法提取的白花及紫红花滇黄精多糖的 α -葡萄糖苷酶抑制率均超过65%,优于阳性对照阿卡波糖溶液[抑制率为 $(67.87\pm 2.84)\%$]($P<0.05$)。尽管复合酶辅助法的多糖得率和含量相对较低,但其提取条件温和,能够有效溶出多糖,同时较好地保持了具有降血糖能力的多糖结构^[27]。

2.3.3 多糖酪氨酸酶抑制活性的比较分析 通过降低体内酪氨酸酶的活性,可以减少黑色素的生成,从而实现淡斑和美白的效果^[28]。因此,体外酪氨酸酶抑制率可以迅速评估不同提取方法对滇黄精多糖抑制黑色素活性的影响。如图3(c)所示,滇黄精多糖的抑制酪氨酸酶能力受到提取方法的显著影响。E-WPKP和E-PPKP的酪氨酸酶抑制率最高,分别为 $(88.82\pm 1.62)\%$ 和 $(84.03\pm 3.68)\%$;其次是H-WPKP和H-PPKP。而I-WPKP和I-PPKP的酪氨酸酶抑制率最低,分别仅为 $(36.25\pm 1.26)\%$ 和 $(40.41\pm 2.78)\%$ ($P<0.05$)。在复合酶辅助法中,滇黄精多糖经过果胶酶和纤维素酶处理后,能够定向保留“活性多糖片段”结构,从而使多糖的生物活性不易丢失。

2.4 综合量化评价

如表1所示,不同提取方法制备的白花和紫红花滇黄精多糖的综合功能特性强弱排序为:E-PPKP>H-PPKP>

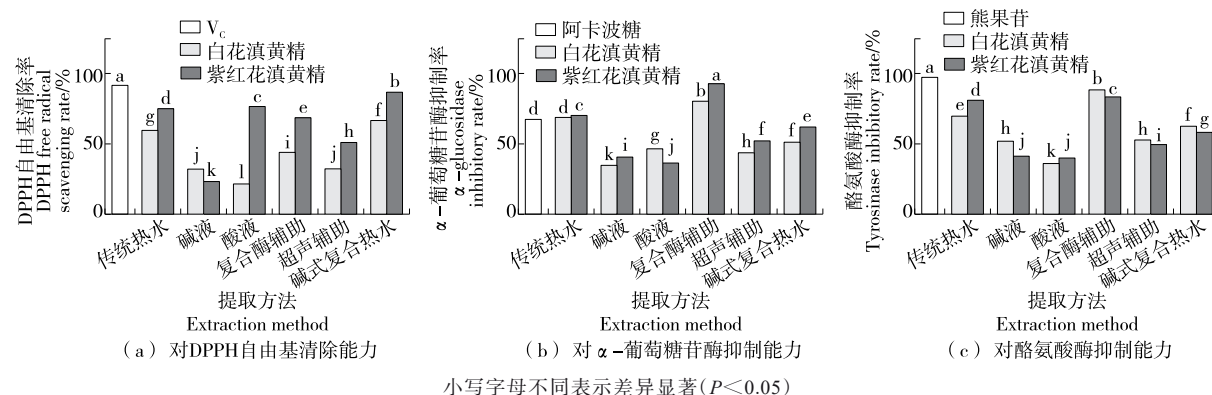


图3 提取方法对滇黄精多糖体外功能特性的影响

Figure 3 Effects of different extraction methods on *in vitro* functional characteristics of *Polygonatum kingianum* polysaccharides

E-WPKP>C-PPKP>H-WPKP>C-WPKP>U-PPKP>I-PPKP>U-WPKP>A-WPKP>A-PPKP>I-WPKP。表明紫红花滇黄精在抗氧化、降血糖及酪氨酸酶抑制能力方面表现更为优越,且复合酶辅助法与传统热水法可作为生产优质滇黄精复合功能产品的有效提取方法。

表 1 滇黄精多糖提取方法的综合量化评价结果
Table 1 Comprehensive quantitative evaluation of extraction methods for *Polygonatum kingianum* polysaccharides

样品	DPPH 自由基清除能力正向与无量纲化	α -葡萄糖苷酶抑制能力正向与无量纲化	酪氨酸酶抑制能力正向与无量纲化	综合功能活性评价价值	综合排序
H-WPKP	0.58	0.59	0.64	1.81	5
A-WPKP	0.17	0.00	0.31	0.47	10
I-WPKP	0.00	0.21	0.00	0.21	12
E-WPKP	0.35	0.79	1.00	2.14	3
U-WPKP	0.16	0.16	0.32	0.64	9
C-WPKP	0.69	0.29	0.51	1.49	6
H-PPKP	0.82	0.62	0.86	2.30	2
A-PPKP	0.03	0.11	0.11	0.24	11
I-PPKP	0.85	0.03	0.08	0.96	8
E-PPKP	0.73	1.00	0.91	2.63	1
U-PPKP	0.45	0.30	0.26	1.02	7
C-PPKP	1.00	0.47	0.42	1.89	4

2.5 相关性分析

为探讨滇黄精多糖的功能特性与其化学成分之间的相关性,分析了二者的皮尔逊(Pearson)相关系数。如表 2 所示,滇黄精多糖的抗氧化能力、降血糖效果及抑制酪氨酸酶的能力与其多糖得率、硫酸根及糖醛酸含量之间均呈正相关关系。表明滇黄精多糖的抗氧化、降血糖及抑制酪氨酸酶能力可能源于其多糖中丰富的硫酸根和糖醛酸结构。此外,多糖中的酮基或醛基作为亲电基团,在酸性环境下能够促进 O—H 键的氢原子释放^[29]。因此,富含糖醛酸和硫酸根的多糖通常展现出更强的功能特性。

表 2 滇黄精多糖功能活性与其化学组成的相关性分析[†]
Table 2 Correlation analysis of functional activities and chemical composition in *Polygonatum kingianum* polysaccharides

指标	多糖得率	硫酸根含量	糖醛酸含量
DPPH 自由基清除能力	0.49**	0.72**	0.58**
α -葡萄糖苷酶抑制能力	0.49**	0.15	0.89**
酪氨酸酶抑制能力	0.48**	0.26	0.84**

[†] **表示 $P<0.01$ 。

3 结论

该研究采用 6 种提取方法(包括传统热水、碱液、酸液、复合酶辅助、超声辅助及碱式复合热水法)对白花滇黄精和紫红花滇黄精中的多糖进行提取,并对 12 种多糖的化学成分及功能特性进行了表征。结果显示,滇黄精多糖的得率及其化学成分(如总糖、硫酸根和糖醛酸等)的含量受到提取方法和花被的显著影响。此外,不同提取方法所制备的白花滇黄精和紫红花滇黄精多糖在 DPPH 自由基清除能力、 α -葡萄糖苷酶抑制能力及酪氨酸酶抑制活性方面存在差异。通过综合评价量化法的进一步分析,发现紫红花滇黄精在上述 3 项功能特性中表现更为优越,复合酶辅助法和传统热水法可作为生产优质滇黄精复合功能产品的有效提取方法。后续研究将对筛选出的提取方法的具体工艺进行优化,并开展相应的滇黄精多糖结构分析。

参考文献

[1] 徐荣,焦蓉,王思婷,等.不同地理种源滇黄精内生菌的分离与功能研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2024,44(4): 116-124.
XU R, JIAO R, WANG S T, et al. Isolation and functional exploration of endophytes from different geographical origins of *Polygonatum kingianum*[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2024, 44(4): 116-124.
[2] 谢蕾,肖良俊,吴涛,等.3 种花色类型滇黄精的遗传关系研究[J].浙江林业科技,2022,42(2): 21-26.
XIE L, XIAO L J, WU T, et al. Genetic relationship of *Polygonatum kingianum* with three different flower colors[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2022, 42 (2): 21-26.
[3] LIU R L, ZHANG X L, CAI Y H, et al. Research progress on medicinal components and pharmacological activities of *Polygonatum sibiricum*[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 328: 118024.
[4] 国家药典委员会.中华人民共和国药典:一部[S].2020 版.北京:中国医药科技出版社,2020: 319-320.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China: volume I[M]. 2020 ed. Beijing: China Medical Science Press, 2020: 319-320.
[5] LI J, WANG Z, FAN M X, et al. Potential antioxidative and anti-hyperuricemic components targeting superoxide dismutase and xanthine oxidase explored from *Polygonatum Sibiricum* red[J]. Antioxidants (Basel), 2022, 11(9): 1 651.
[6] WANG X, YANG M Y, SHEN Y, et al. Structural characterization and hypoglycemic effect of polysaccharides of *Polygonatum sibiricum*[J]. Journal of Food Science, 2024, 89 (8): 4 771-4 790.
[7] WANG J, WANG F R, YUAN L X, et al. Blood-enriching effects and immune-regulation mechanism of steam-processed *Polygonatum sibiricum* polysaccharide in blood deficiency

- syndrome mice[J]. *Frontiers in Immunology*, 2022, 13: 813676.
- [8] GAO Y, WANG J Y, XIAO Y, et al. Structure characterization of an agavin-type fructan isolated from *Polygonatum cyrtoneura* and its effect on the modulation of the gut microbiota *in vitro*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 330: 121829.
- [9] QI Z H, GAO T X, LI J J, et al. Structural characterization and prebiotic potential of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum*[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2024, 13(4): 2 208-2 220.
- [10] FAN Y M, ZHOU X F, HUANG G L. Preparation, structure, and properties of tea polysaccharide[J]. *Chemical Biology & Drug Design*, 2022, 99(1): 75-82.
- [11] LV Q Q, CAO J J, LIU R, et al. Structural characterization, α -amylase and α -glucosidase inhibitory activities of polysaccharides from wheat bran[J]. *Food Chemistry*, 2021, 341(Pt 1): 128218.
- [12] 景永帅, 马云凤, 李明松, 等. 植物多糖结构解析方法研究进展[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(3): 411-421.
- JING Y S, MA Y F, LI M S, et al. Research progress in analytical methods for structures of phytogetic polysaccharides [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(3): 411-421.
- [13] XU T R, ZHANG H M, WANG S G, et al. A review on the advances in the extraction methods and structure elucidation of *Poria cocos* polysaccharide and its pharmacological activities and drug carrier applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 217: 536-551.
- [14] TANG Y Y, HE X M, LIU G M, et al. Effects of different extraction methods on the structural, antioxidant and hypoglycemic properties of red pitaya stem polysaccharide[J]. *Food Chemistry*, 2023, 405: 134804.
- [15] 韦珍, 向昱, 杨兆杏, 等. 火龙果茎多糖组成及抗氧化稳定性分析[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(22): 264-272.
- WEI Z, XIANG Y, YANG Z X, et al. Analysis of composition and antioxidant stability of pitaya stem polysaccharide[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(22): 264-272.
- [16] 颜丽, 刘秀河, 赵方铭, 等. 海茸中L-岩藻糖及硫酸基的测定 [J]. *中国调味品*, 2020, 45(2): 137-141.
- YAN L, LIU X H, ZHAO F M, et al. Determination of L-fucose and sulfate in seaweed[J]. *China Condiment*, 2020, 45 (2): 137-141.
- [17] 何雪梅, 岳健, 邱福荣, 等. 动态超高压微射流辅助提取对滇黄精多糖结构和活性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(19): 95-101.
- HE X M, YUE J, QIU F R, et al. Effect of dynamic high-pressure microfluidization assisted extraction on the structure and activity of polysaccharides from *Polygonatum kingianum* Coll. et Hemsl[J]. *Food Science*, 2022, 43(19): 95-101.
- [18] TANG Y Y, WEI Z, WEI P, et al. Influences on the phytochemical characteristics and multiple bioactivities of *Mesona chiensis* Benth polysaccharides in response to different drying methods[J]. *Food Research International*, 2025, 204: 115924.
- [19] 顾健, 姜苏锐, 刘江云. 比色法测定滇黄精的中性糖和酸性糖含量[J]. *中国处方药*, 2021, 19(12): 20-22.
- GU J, QIANG S R, LIU J Y. Determination of the neutral sugars and uronic acids in *Polygonatum kingianum* by colorimetric method[J]. *Journal of China Prescription Drug*, 2021, 19(12): 20-22.
- [20] SUN Y J, WANG F, LIU Y, et al. Comparison of water- and alkali-extracted polysaccharides from Fuzhuan brick tea and their immunomodulatory effects *in vitro* and *in vivo*[J]. *Food & Function*, 2022, 13(2): 806-824.
- [21] 陈红, 杨许花, 查勇, 等. 植物多糖提取、分离纯化及鉴定方法的研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2021, 27(22): 32-35.
- CHEN H, YANG X H, ZHA Y, et al. Research progress in extraction, purification and identification of plant polysaccharides[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(22): 32-35.
- [22] CAPEK P, DELORT A M. Polysaccharides extracted with hot water from wild *Prunus spinosa* L. berries[J]. *Carbohydrate Research*, 2023, 529: 108852.
- [23] LI L, LIAO B Y, THAKUR K, et al. The rheological behavior of polysaccharides sequential extracted from *Polygonatum cyrtoneura* Hua[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 109: 761-771.
- [24] RUPRECHT C, BLAUKOPF M, PFRENGLE F. Synthetic fragments of plant polysaccharides as tools for cell wall biology[J]. *Current Opinion in Chemical Biology*, 2022, 71: 102208.
- [25] ZHAO Y Y, WANG J Q, FU Q Z, et al. Characterization and antioxidant activity of mannans from *Saccharomyces cerevisiae* with different molecular weight[J]. *Molecules*, 2022, 27(14): 4 439.
- [26] YAN B W, DENG J P, GU J, et al. Comparison of structure and neuroprotective ability of low molecular weight galactomannans from *Sesbania cannabina* obtained by different extraction technologies[J]. *Food Chemistry*, 2023, 427: 136642.
- [27] NADAR S S, RAO P, RATHOD V K. Enzyme assisted extraction of biomolecules as an approach to novel extraction technology: a review[J]. *Food Research International*, 2018, 108: 309-330.
- [28] 梁朋光, 孙健, 岳健, 等. 响应面优化滇黄精多糖提取及其结构与活性分析[J]. *南方农业学报*, 2021, 52(12): 3 434-3 445.
- LIANG P G, SUN J, YUE J, et al. Response surface optimization of extraction and structure and activity analysis of polysaccharides from *Polygonatum kingianum* Coll. et Hemsl [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(12): 3 434-3 445.
- [29] CHEN G J, LI C F, WANG S S, et al. Characterization of physicochemical properties and antioxidant activity of polysaccharides from shoot residues of bamboo (*Chimonobambusa quadrangularis*): effect of drying procedures[J]. *Food Chemistry*, 2019, 292: 281-293.