

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250115004

引用格式: 赵欣蕾, 刘宁, 夏其乐, 等. 酶解超声波联合提取桑椹多糖及其抗氧化能力和降血糖活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 292–301.

ZHAO XL, LIU N, XIA QL, *et al.* Enzymatic hydrolysis combined with ultrasonication extraction of *Mori fructus* polysaccharide and study on its antioxidant and hypoglycemic activities [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 292–301. (in Chinese with English abstract).

酶解超声波联合提取桑椹多糖及其抗氧化能力和降血糖活性研究

赵欣蕾^{1,2}, 刘宁¹, 夏其乐², 刘晨星², 曹艳^{2*}

[1. 陕西科技大学食品科学与工程学院, 西安 710021; 2. 浙江省农业科学院食品科学研究所, 农业农村部果品产后处理重点实验室, 农业农村部蔬菜采后保鲜与加工重点实验室(部省共建), 全省生鲜食品智慧物流与加工重点实验室, 杭州 310021]

摘要: **目的** 研究酶解超声联合提取条件对桑椹多糖得率及其抗氧化能力和降血糖活性的影响。**方法** 以桑椹果渣为原料, 以桑椹多糖得率为指标, 通过单因素实验优化提取工艺, 并对热水浸提所得多糖(hot water extracting polysaccharide, HWP)、酶解辅助提取所得多糖(enzyme-assisted extracting polysaccharide, EWP)、超声辅助提取所得多糖(ultrasound-assisted extracting polysaccharide, UWP)、酶解超声联合提取所得多糖(enzymatic hydrolysis combined with ultrasonication extracting polysaccharide, EUP)的1,1-二苯基-2-三硝基胍(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, DPPH)自由基清除率、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS⁺]自由基清除率、 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性抑制率进行研究。**结果** 酶解超声联合提取桑椹多糖的最佳条件为料液比1:80 (g:mL)、添加2.0%复合酶(纤维素酶和果胶酶体积比为1:1)、50℃酶解2 h后, 于400 W、60℃超声提取50 min, 该条件下EUP得率为4.81%, 分别比HWP、EWP、UWP提高了7.6%、17.5%、21.6%。EUP对ABTS⁺自由基清除率和DPPH自由基清除率也有所提高。EUP对 α -淀粉酶活性的半抑制浓度(semi-inhibitory concentration, IC₅₀)为1.18 mg/mL, 比HWP、EWP和UWP分别降低了40.1%、18.6%、30.6%; EUP对 α -葡萄糖苷酶活性的IC₅₀为0.31 mg/mL, 比HWP、EWP和UWP分别降低了16.8%、8.0%、39.4%。**结论** 采用酶解超声联合提取法既能提高桑椹多糖得率, 还可提高其抗氧化能力和降血糖活性, 具有较好的应用前景。

关键词: 桑椹多糖; 酶解超声联合提取法; 抗氧化能力; α -淀粉酶活性; α -葡萄糖苷酶活性

Enzymatic hydrolysis combined with ultrasonication extraction of *Mori fructus* polysaccharide and study on its antioxidant and hypoglycemic activities

ZHAO Xin-Lei^{1,2}, LIU Ning¹, XIA Qi-Le², LIU Chen-Xing², CAO Yan^{2*}

收稿日期: 2025-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(32472363); 浙江省“三农九方”科技协作项目(2023ZJSNJF016)

第一作者: 赵欣蕾(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品精深加工。E-mail: zhaoxinlei202105@163.com

*通信作者: 曹艳(1985—), 女, 副研究员, 主要研究方向为农产品精深加工。E-mail: caoyan_115@163.com

[1. School of Food Science and Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China; 2. Key Laboratory of Post-harvest Handling of Fruits, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Post-harvest Preservation and Processing of Vegetables (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Provincial Key Laboratory of Intelligent Logistics and Processing of Fresh Food, Institute of Food Science, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China]

ABSTRACT: Objective To investigate the effects of enzymatic hydrolysis combined with ultrasonication extraction conditions on the yield, antioxidant and hypoglycemic activities of *Mori fructus* polysaccharides. **Methods** Using *Mori fructus* pomace as the raw material and the yield of *Mori fructus* polysaccharide as the index, the extraction conditions was optimized through single-factor experiments. Then the 1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine (DPPH) radical scavenging capacity, 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt (ABTS⁺) radical scavenging capacity, and the inhibitory effects on α -amylase and α -glucosidase activity of hot water extracting polysaccharide (HWP), enzyme-assisted extracting polysaccharide (EWP), ultrasound-assisted extracting polysaccharide (UWP), enzymatic hydrolysis combined with ultrasonication extracting polysaccharide (EUP) were investigated. **Results** The optimal conditions for polysaccharide extraction by enzymatic hydrolysis combined with ultrasonication was obtained. *Mori fructus* pomace powder was mixed with water at ratio of 1:80 (g:mL), and 2.0% composite enzyme (cellulase and pectinase at a ratio of 1:1, V:V) was added in the mixture which was maintained at 50 °C for 2 h with stirring. Then the mixture was treated by ultrasonication at 400 W and 60 °C for 50 min, and the final yield of EUP was 4.81%, increased by 7.6%, 17.5% and 21.6% compared with HWP, EWP and UWP. EUP also exhibited an improvement in the scavenging activity of both ABTS⁺ radical and DPPH radical. Compared with HWP, EWP and UWP, the semi-inhibitory concentration (IC₅₀) of α -amylase activity of EUP was 1.18 mg/mL, reduced by 40.1%, 18.6% and 30.6%, respectively, and the IC₅₀ of α -glucosidase activity of EUP was 0.31 mg/mL, reduced by 16.8%, 8.0% and 39.4%, respectively. **Conclusion** The enzymatic hydrolysis combined with ultrasonication extraction can not only improve the *Mori fructus* polysaccharide yield, but also enhance the antioxidant power and hypoglycemic activity of *Mori fructus* polysaccharide, which has a potential application prospect in the industry.

KEY WORDS: *Mori fructus* polysaccharides; enzymatic hydrolysis combined with ultrasound extraction method; antioxidant power; α -amylase activity; α -glucosidase activity

0 引言

桑椹(*Mori fructus*), 又名桑椹子、乌椹、桑果等, 隶属于桑科(Moraceae)桑属(*Morus*), 是一种广泛分布于亚洲、欧洲、南美和北美的植物^[1]。在我国, 桑椹不仅是特色“食药同源”果品之一^[2], 而且在传统医学中被认为具有多种健康益处。然而, 除鲜食外, 大部分桑椹被榨汁制成饮料, 而榨汁后的果渣约占鲜果重的 30%, 这些果渣由于蛋白含量低, 目前仅有少量用于动物饲料, 大部分作为垃圾处理, 未能得到充分开发利用^[3]。桑椹果渣中多糖含量丰富, 并具有抗氧化、降血糖、增强免疫和保护肝脏的特性^[4]。近年来, 多糖成为继蛋白质与核酸之后的又一大功能性食品及科研焦点^[5]。

提取多糖的常见方法有热水浸提法、酸提取法、酶辅助提取法和超声辅助提取法等^[6]。传统热水浸提法得率不高, 而酸提取法则可能使多糖结构遭到破坏^[7]; 相比之下, 酶辅助提取法不仅效率更高, 还能更好地保留多糖的生理活性^[8]; 超声辅助提取法是提取多糖的高

效方式, 其原理是利用超声波产生的机械效应和空化作用破坏植物细胞壁、细胞膜等组织, 促进植物细胞内多糖的释放, 提高提取效率^[9]。此外, 多种技术联合使用提取多糖, 例如超声辅助酶解法、微波辅助酶解法以及微波辅助酸解法等, 能够克服单一技术的局限性, 从而显著提升多糖提取的效率及其生理活性^[10]。ZHANG 等^[11]研究了热水提取、微波、超声和超声微波联合辅助提取对工业双胞菌多糖得率和抗氧化能力的影响, 结果表明, 超声微波联合辅助处理对细胞壁损伤程度更大, 多糖得率提高, 多糖抗氧化能力更强。YAO 等^[12]发现超声处理可以减小皂荚种子多糖的分子量和黏度并提高其抗氧化能力。张涵等^[13]研究发现使用复合酶提取可以提高昆布多糖抑制 α -葡萄糖苷酶活性的能力, 多糖得率是传统水提多糖得率的 3.44 倍。

不同的提取方法会导致得到的多糖含量有所差异, 这种差异进而会影响其生物活性。LI 等^[14]研究结果表明, 超声辅助酶提法对桃金娘多糖分子结构的破坏更小, 官能团的保留更好, 得到的桃金娘多糖得率和清除 2,2-联氮-二

(3-乙基-苯并噻唑啉-6-磺酸)二铵盐 [2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) diammonium salt, ABTS⁺] 自由基的活性均优于微波辅助酶提法。TANG 等^[15] 研究热水法、酸提取法、碱提取法、酶提取法、超声提取法和热水-碱提取法提取香蕉花多糖, 结果表明 6 种方法不会改变多糖的主要结构, 其中热水-碱法提取的多糖中糖醛酸含量最高, 体外抗氧化能力最强; 热水法提取的多糖中阿拉伯糖和古罗糖醛酸的摩尔比最高, α -葡萄糖苷酶抑制活性最好。HUI 等^[16] 的研究结果表明, 与热水提取法相比, 酶辅助提取法提高了茯苓多糖的分子量及还原糖、甘露糖和葡萄糖的含量, 超声辅助提取所得多糖中甘露糖和葡萄糖降低, 但还原糖含量增加; 超声波辅助纤维素酶提取的多糖中还原糖、葡萄糖和甘露糖含量较高, 具有更强的抗氧化能力和降血糖活性。

本研究采用酶解超声联合提取技术, 从桑椹果渣中提取桑椹多糖, 通过单因素实验探讨了酶添加量、提取料液比、超声温度、超声功率及超声时间对桑椹多糖得率的影响。此外, 还比较了热水浸提法、酶解提取法、超声提取法和酶解超声联合提取法所得桑椹多糖的抗氧化能力及其对 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用, 以明确酶解超声联合提取法在提高桑椹多糖得率和增强桑椹多糖生理功能方面的优势, 为桑椹多糖的有效提取及其生物活性研究提供理论依据, 同时为桑椹果渣资源化利用、减少废弃物排放及环境保护贡献新思路。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

桑椹: 采自浙江省湖州市安吉县。新鲜的桑椹采摘后, 挑除霉变及坏果, 榨汁处理, 果渣冷冻干燥后打粉, 冷冻干燥条件为 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 抽真空干燥 72 h, 过 40 目筛后置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱储存。

对硝基苯基- α -D-吡喃葡萄糖苷 (4-nitrophenyl α -D-glucopyranoside, PNPG)、1,1-二苯基-2-三硝基胍 (1,1-diphenyl-2-picrylhydrazine, DPPH)、阿卡波糖、ABTS(分析纯)、 α -淀粉酶(10 U/mg)、 α -葡萄糖苷酶(50 U/mg)、纤维素酶(400 U/mg)、 α -淀粉酶(50 U/mg)、果胶酶(50 U/mg)、木瓜蛋白酶(800 U/mg)(上海源叶生物科技有限公司); 磷酸二氢钠、正丁醇、无水乙醇、抗坏血酸、柠檬酸、柠檬酸三钠、磷酸氢二钠(分析纯, 上海麦克林生化科技有限公司); 三氯甲烷、可溶性淀粉(分析纯, 上海凌峰化学试剂有限公司); 过硫酸钾、氢氧化钠(分析纯, 上海国药集团化学试剂有限公司); 3,5-二硝基水杨酸(dinitrosalicylic acid, DNS)显色液(生物试剂, 福州飞净生物科技有限公司)。

1.2 仪器与设备

BSA124S 电子天平[精度为 0.0001 g, 赛多利斯科学

仪器(北京)有限公司]; TDL-5-A 低速离心机(上海安亭科学仪器厂); SCIENTZ-18N/A 冷冻干燥机(宁波新芝生物科技股份有限公司); FE28pH 计[梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司]; FORMA 900 SERIES 超低温冰箱(美国赛默飞世尔科技公司); HH-600 数显恒温水浴锅(上海力辰邦西仪器科技有限公司); DE-2000A 旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂); HJ-4A 多头磁力搅拌器(常州金坛区西城新瑞仪器厂); DHG-9140A 电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司); UV-6100A 紫外可见风光光度计(上海元析仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 脱脂

称取一定质量冻干粉, 按 1:40 (g:mL) 比例加入乙醇, 室温磁力搅拌 12.0 h, 过滤去除乙醇后得脱脂桑椹粉末。

1.3.2 酶液制备

纤维素酶溶液的配制: 称取 100.0 mg 纤维素酶溶于 10.0 mL 柠檬酸缓冲液(pH=4.8)。果胶酶溶液的配制: 称取 100.0 mg 果胶酶溶于 10.0 mL 柠檬酸缓冲液(pH=3.5)。木瓜蛋白酶溶液的配制: 称取 100.0 mg 木瓜蛋白酶溶于 10.0 mL 磷酸缓冲液(pH=7.0)。

1.3.3 不同酶对桑椹多糖得率的影响

料液比 1:80 (g:mL), 分别加入复合酶(纤维素酶和果胶酶体积比为 1:1^[8]) 2.0%、纤维素酶 2.0%、果胶酶 2.0%、木瓜蛋白酶 2.0%, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水浴 2.0 h, $100.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 加热 5.0 min 使酶失活, 离心取上清液, 脱蛋白后冷冻干燥($-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 抽真空干燥 48 h), 比较不同酶酶解的桑椹多糖得率。

1.3.4 不同提取条件对桑椹多糖得率的影响

(1) 酶添加量

固定料液比 1:80 (g:mL), 超声温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 超声功率 300 W, 超声时间 50 min, 考察复合酶添加量(0.5%、1.0%、2.0%、3.0%、4.0%)对桑椹多糖得率的影响。

(2) 料液比

固定复合酶添加量 2.0%, 超声温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 超声功率 300 W, 超声时间 50 min, 考察料液比 1:20、1:40、1:60、1:80、1:100 (g:mL) 对桑椹多糖得率的影响。

(3) 超声温度

固定复合酶添加量 2.0%, 料液比 1:80 (g:mL), 超声功率 300 W, 超声时间 50 min, 考察超声温度(30、40、50、60、70 $^{\circ}\text{C}$) 对桑椹多糖得率的影响。

(4) 超声功率

固定复合酶添加量 2.0%, 料液比 1:80 (g:mL), 超声温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 超声时间 50 min, 考察超声功率(100、200、300、400、500 W) 对桑椹多糖得率的影响。

(5) 超声时间

固定复合酶添加量 2.0%, 料液比 1:80 (g:mL), 超声温度 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, 超声功率 400 W, 考察超声时间(30、40、50、60、

70 min)对桑椹多糖得率的影响。

1.3.5 不同方法提取桑椹多糖的得率、抗氧化能力和降血糖活性比较

(1)热水浸提法

称取 10.0 g 脱脂桑椹粉按照 1:80 (g:mL)加入蒸馏水, 在 60 °C 水浴磁力搅拌 2 h, 3000 r/min 离心 10 min 获取上清液, 50 °C 浓缩提取液至 20 mL。所得多糖记为热水浸提所得多糖(hot water extracting polysaccharide, HWP)。

(2)酶解提取法

称取 10.0 g 脱脂桑椹粉按照 1:80 (g:mL)加入蒸馏水, 加入 2.0% 复合酶, 置于 50 °C 恒温水浴锅中磁力搅拌 2 h, 100 °C 加热 5 min 使酶失活。3000 r/min 离心 10 min 获取上清液, 50 °C 浓缩提取液至 20 mL。所得多糖记为酶解辅助提取所得多糖(enzyme-assisted extracting polysaccharide, EWP)。

(3)超声提取法

称取 10.0 g 脱脂桑椹粉按照 1:80 (g:mL)加入蒸馏水, 400 W 超声功率、60 °C 条件下提取 50 min, 3000 r/min 离心 10 min 获取上清液, 50 °C 浓缩提取液至 20 mL。所得多糖记为超声辅助提取所得多糖(ultrasound-assisted extracting polysaccharide, UWP)。

(4)酶解超声联合提取法

称取脱脂桑椹粉 10.0 g, 按料液比 1:80 (g:mL)加入蒸馏水, 加入 2% 复合酶溶液, 置于 50 °C 恒温水浴锅中磁力搅拌 2 h, 100 °C 加热 5 min 使酶失活。酶解后于 400 W 超声功率、60 °C 条件下提取 50 min, 3000 r/min 离心 10 min 获取上清液, 50 °C 浓缩提取液至 20 mL。所得多糖记为酶解超声联合提取所得多糖(enzymatic hydrolysis combined with ultrasonication extracting polysaccharide, EUP)。

向上述所得 4 种浓缩液按体积比 1:5 加入 Sevage 试剂 ($V_{\text{三氯甲烷}}:V_{\text{正丁醇}}=4:1$), 室温磁力搅拌 30.0 min 后置于分液漏斗中静置, 去除中间的蛋白和下层的有机试剂, 取上层的多糖溶液重复前面的脱蛋白操作 3 次。脱蛋白后的多糖溶液加入 4 倍体积乙醇, 混匀室温静置 8.0 h 后 3000 r/min 离心 15.0 min 取沉淀, 将沉淀用蒸馏水复溶后置于 -80.0 °C 冰箱, 冻干后得 4 种桑椹多糖, 称重计算后比较桑椹多糖得率。将 4 种桑椹多糖配制成相同的浓度梯度溶液, 比较抗氧化能力和降血糖活性。

1.3.6 不同酶对酶解超声联合提取桑椹多糖的得率、抗氧化能力、降血糖活性的影响

按照 1.3.5 中酶解超声联合提取法的步骤, 考察添加 3 种单酶和复合酶对桑椹多糖得率、抗氧化能力、降血糖活性的影响。

1.3.7 桑椹多糖得率测定

根据公式(1)计算桑椹多糖得率:

$$Y\% = \frac{m}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中: m 为桑椹多糖质量, g ; M 为脱脂桑椹粉质量, g ; Y 为

桑椹多糖得率, %。

1.3.8 DPPH 自由基清除率测定

参考 TANG 等^[17]的方法测定桑椹多糖清除 DPPH 自由基能力。将 1.0 mL 不同质量浓度(1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mg/mL)的多糖溶液与 1.0 mL DPPH 自由基溶液(0.2 mmol/L, 溶解于无水乙醇中)混匀后室温下避光 30.0 min, 并于 517 nm 处测定吸光度。以维生素 C (vitamin C, VC)作为阳性对照。根据公式(2)计算 DPPH 自由基清除率:

$$\text{DPPH 自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_s - A_c}{A_b}\right) \times 100\% \quad (2)$$

式中, A_s 为样品组吸光度, A_c 为样品对照组吸光度, A_b 为空白对照组吸光度。

1.3.9 ABTS⁺自由基清除率测定

根据文献报道的方法稍作修改测定 ABTS⁺自由基清除率^[18]。将等体积的 ABTS 溶液(7.0 mmol/L)与过硫酸钾溶液($K_2S_2O_8$, 2.5 mmol/L)混合, 室温下暗处反应 12.0 h, 制备 ABTS⁺自由基溶液。将 0.4 mL 不同质量浓度(1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mg/mL)的桑椹多糖溶液与 3.0 mL ABTS⁺自由基溶液混匀后室温下避光 30.0 min, 并于 734 nm 处测定吸光度。以 VC 作为阳性对照。根据公式(3)计算 ABTS⁺自由基清除率:

$$\text{ABTS}^+ \text{ 自由基清除率}/\% = \left(1 - \frac{A_{s1} - A_{c1}}{A_{b1}}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中, A_{s1} 为样品组吸光度, A_{c1} 为样品对照组吸光度, A_{b1} 为空白对照组吸光度。

1.3.10 α -淀粉酶活性抑制率测定

根据文献报道方法适当调整后测定 α -淀粉酶活性抑制率^[19]。用磷酸盐缓冲溶液(0.1 mol/L, pH=6.9)制备 α -淀粉酶溶液(0.1 mg/mL)。将 500.0 μ L 不同质量浓度(1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 mg/mL)的桑椹多糖溶液与 500.0 μ L 的 α -淀粉酶溶液混匀后在室温下孵育 10.0 min, 加入 500.0 μ L 1.0% ($W:V$)淀粉溶液, 继续在室温下孵育 10.0 min。孵育结束后加入 1.0 mL DNS 试剂并煮沸 5.0 min 以终止反应。冷却后用超纯水定容至 10.0 mL, 在 520 nm 处测定吸光度。以阿卡波糖为阳性对照。根据公式(4)计算 α -淀粉酶活性抑制率:

$$\alpha\text{-淀粉酶活性抑制率}/\% = \left(1 - \frac{A_{s2} - A_{c2}}{A_{b2}}\right) \times 100\% \quad (4)$$

式中, A_{s2} 为样品组吸光度, A_{c2} 为样品对照组吸光度, A_{b2} 为空白对照组吸光度。

1.3.11 α -葡萄糖苷酶活性抑制率测定

参照文献测定桑椹多糖对 α -葡萄糖苷酶活性抑制率^[20]。用磷酸缓冲液(pH=6.9)制备 α -葡萄糖苷酶(0.03 mg/mL)和 PNPG 溶液(1.5 mmol/L)。取 50.0 μ L 不同质量浓度(0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL)的桑椹多糖溶液与 α -葡萄糖苷酶溶液 100.0 μ L 混合, 37.0 °C 水浴 20.0 min。加入 100.0 μ L PNPG 溶液室温下孵育 10.0 min。最后加入 1.0 mL Na_2CO_3 溶液(1.0 mol/L)终止反应, 在 400 nm 处测定吸光度。以阿卡波

糖为阳性对照。根据公式(5)计算 α -葡萄糖苷酶活性抑制率:

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶活性抑制率}/\% = (1 - \frac{A_{s3} - A_{c3}}{A_{b3}}) \times 100\% \quad (5)$$

式中, A_{s3} 为样品组吸光度, A_{c3} 为样品对照组吸光度, A_{b3} 为空白对照组吸光度。

1.4 数据处理

实验数据以平均值 \pm 标准偏差表示, 每个实验组设置3个平行。使用 Origin 2021 软件绘图, 使用 Graph Pad prism 9 软件计算半抑制浓度(semi-inhibitory concentration, IC_{50})。使用 IBM SPSS Statistics 23 软件进行统计学分析, 当 $P < 0.05$ 时表示有显著差异。

2 结果与分析

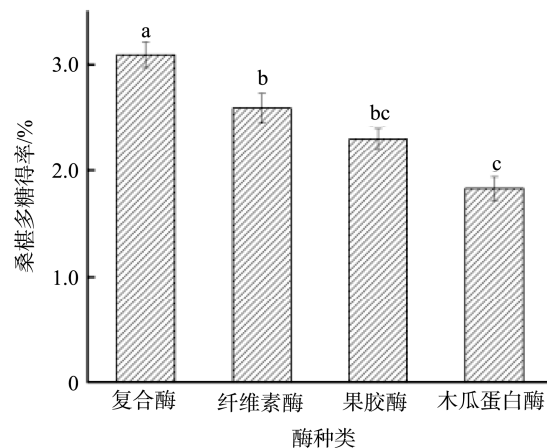
2.1 不同酶提取对桑椹多糖得率的影响分析

在桑椹果渣中, 纤维素和果胶是主要的成分, 使用纤维素酶能够将植物细胞壁分解成葡萄糖, 同时保持内部的纤维素骨架不被破坏, 保留多糖的高级结构和生理活性; 利用果胶酶分解细胞壁中的果胶为半乳糖醛酸, 破坏细胞壁的结构, 可以促进多糖的溶出^[21]。蛋白质是影响植物多糖提取和纯化难易程度的一个关键因素, 进而影响多糖最终的得率和纯度^[22]。木瓜蛋白酶可以使蛋白质对植物多糖结合力降低, 水解糖蛋白和蛋白聚糖中游离的蛋白质, 有利于多糖的提取^[23]。图1为复合酶和3种单酶提取对桑椹多糖得率的影响, 由图1可知, 使用复合酶提取桑椹多糖的得率最高, 分别比纤维素酶、果胶酶、木瓜蛋白酶提高19.3%、34.3%、68.9%, 说明复合酶可以有效提高桑椹多

糖得率, 因此后续实验选择复合酶提取桑椹多糖。

2.2 不同提取条件对桑椹多糖得率的影响分析

图2展示了酶添加量、料液比、超声温度、超声功率、超声时间对桑椹多糖得率的影响。酶的用量在多糖提取效率中起着关键作用。由图2A可知在复合酶添加量由0.5%增加到4.0%过程中, 桑椹多糖得率先升高后降低。这一现象可归因于: 随着复合酶添加量的增加, 细胞壁被破坏程度增大, 从而促进了多糖从细胞壁中的释放, 进而提高了多糖的得率^[23]; 当添加量为2.0%时, 达到最高得率。然而, 当添加量继续增加时, 过强的酶促反应会导致杂质也被释放出来, 反而降低了桑椹多糖的纯度与得率^[23]。



注: 图中不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 图2、3、6同。

图1 不同酶对桑椹多糖得率的影响

Fig.1 Effects of different enzymes on the yield of Mori fructus polysaccharide

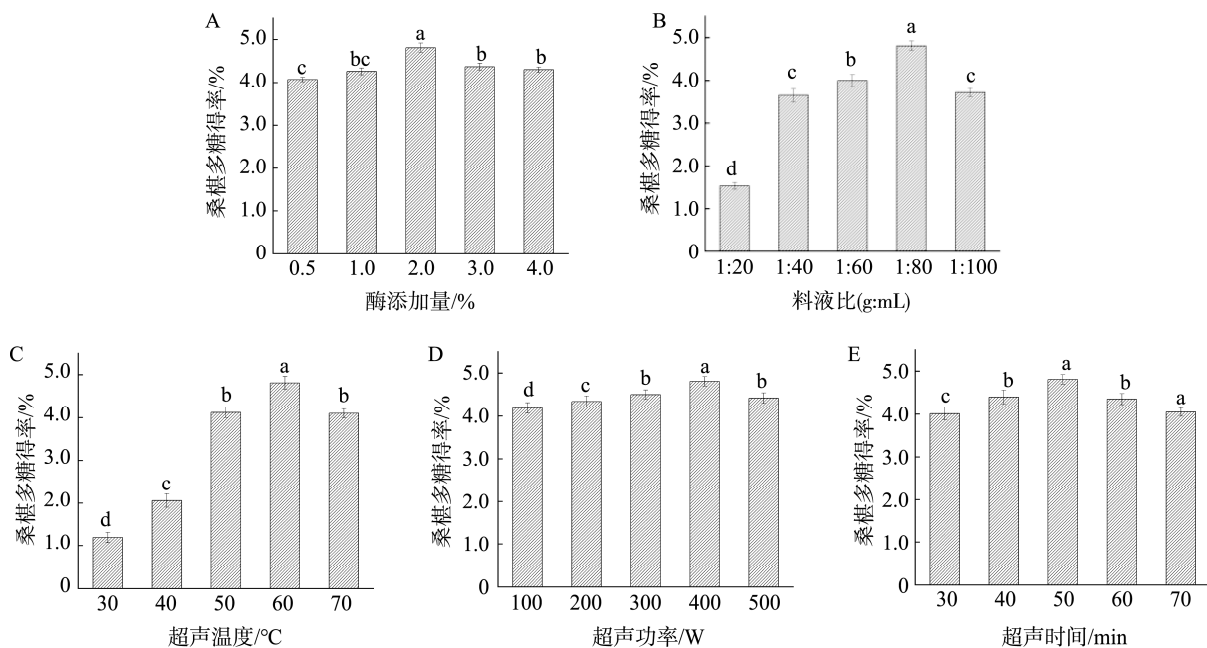


图2 不同提取条件对桑椹多糖得率的影响

Fig.2 Effects of different extraction conditions on the yield of Mori fructus polysaccharide

料液比对料液的充分混合、提取液黏度以及溶质浓度梯度具有显著影响, 从而影响多糖得率^[24]。由图 2B 所示, 随着料液比从 1:20 (g:mL) 变化至 1:100 (g:mL), 桑椹多糖的得率先升高后降低。当料液比为 1:80 (g:mL) 时, 桑椹多糖的得率达到最高。增加溶剂体积能够提升多糖溶液的浓度差, 从而加速其溶解与扩散; 然而, 当多糖的扩散达到平衡后, 继续增加溶剂体积会导致杂质也溶出, 反而使多糖的得率下降^[25]。

温度是影响多糖溶解度和溶液黏度的关键因素, 随着温度的升高, 分子间的热力学运动加速, 促进多糖的溶出^[26]。由图 2C 可知, 当超声温度在 30 °C 至 60 °C 范围内时, 桑椹多糖得率逐渐增加, 当超声温度超过 60 °C 后, 过高的温度导致了多糖的降解^[27], 多糖得率降低。

增强超声功率能够显著提升超声波的热效应、空化作用和机械搅动效果, 有助于破坏细胞壁并加速多糖的释放^[28]。如图 2D 所示, 随着超声功率从 100 W 增加至 500 W, 得率呈先上升后下降的趋势。当超声功率达到 400 W 时, 桑椹多糖的得率达到最高。虽然超声功率的提升增加了细胞壁的破坏程度, 使多糖更容易扩散到溶剂中, 提高了多糖的得率, 然而, 当空化效应过强时, 也会破坏多糖的结构, 导致多糖得率下降^[29]。

由图 2E 可知, 桑椹多糖的得率随超声时间(30~70 min)的增加呈先上升后下降的趋势。这是因为提取时间过短时, 超声波对细胞壁的破坏效果不佳, 细胞壁未完全破裂, 导致多糖未能充分释放, 多糖未完全进入提取溶剂中, 随着提取时间的延长, 多糖扩散逐渐达到平衡状态, 得率在 50 min 时达到最高值; 提取时间超过 50 min 后, 更多的色素等杂质溶解在提取溶剂中, 导致多糖得率下降^[30]。综上所述, 酶解超声联合提取桑椹多糖的最佳条件参数为复合酶添加 2.0%、料液比 1:80 (g:mL)、超声温度 60 °C, 超声功率 400 W, 超声时间 50 min。

2.3 不同提取方法对桑椹多糖得率的影响分析

根据单因素实验结果选取各条件的最优参数, 比较热水浸提法、超声提取法、酶解提取法和酶解超声联合提

取法的桑椹多糖得率, 结果如图 3 所示。EUP 得率最高 (4.81%), 分别比 HWP、EWP 和 UWP 提高 7.6%、17.5%、21.6%。这可能是由于纤维素酶和果胶酶能够分解植物细胞壁内的纤维素和果胶, 使细胞壁结构被破坏, 内部的多糖溶出, 超声波的空化作用促进溶剂进入细胞内部溶解多糖, 因此, 与传统的单一方法相比, 酶解超声联合提取显著提高了桑椹多糖的得率^[31]。

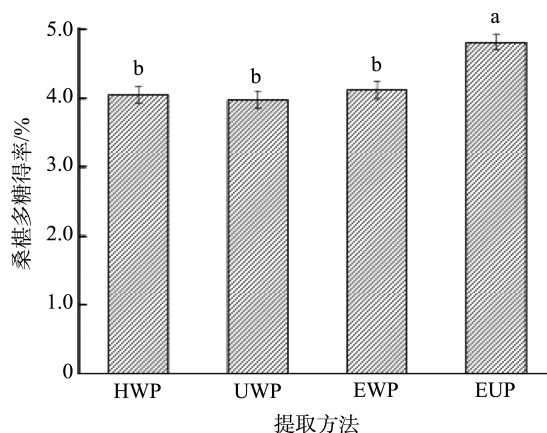


图 3 不同提取方法对桑椹多糖得率的影响

Fig.3 Effects of different extraction methods on the yield of *Mori fructus* polysaccharide

2.4 不同提取方法对桑椹多糖抗氧化能力的影响分析

图 4 为不同方法提取得到的桑椹多糖对 ABTS⁺ 自由基和 DPPH 自由基的清除能力。由图 4 可知, 抗氧化能力的强弱依次顺序为 VC>EUP>EWP>HWP>UWP。EUP 清除 ABTS⁺ 自由基 IC₅₀ 为 1.38 mg/mL, 分别比 HWP、EWP、UWP 降低 39.4%、25.5%、46.9%, 清除 DPPH 自由基 IC₅₀ 为 1.39 mg/mL, 分别比 HWP、EWP、UWP 降低 46.5%、38.5%、63.2% (表 1)。因此, EUP 的抗氧化能力明显高于其他多糖样品, 可能是因为与 HWP 相比, EUP 在酶的作用下产生更多糖醛酸^[30], 同时超声作用使多糖中还原糖含量增加, 促使了 EUP 的抗氧化能力显著提高^[31]。值得注意的是,

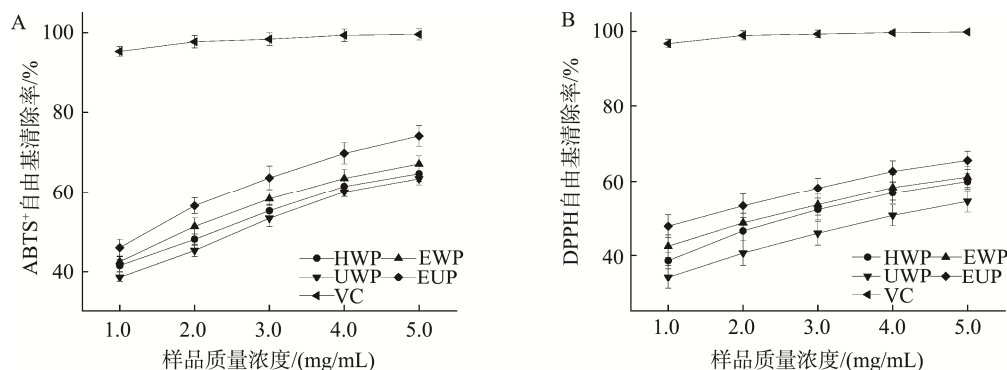


图 4 不同提取方法对桑椹多糖抗氧化能力的影响

Fig.4 Effects of different extraction methods on the antioxidant power of *Mori fructus* polysaccharide

表 1 不同提取方法所得多糖抗氧化能力和酶抑制活性的 IC₅₀ 值(mg/mL)
Table 1 IC₅₀ value of antioxidant power and enzyme inhibition activity of *Mori fructus* polysaccharide extracted by different methods (mg/mL)

样品不同处理方式	清除 ABTS ⁺ 自由基 IC ₅₀	清除 DPPH 自由基 IC ₅₀	抑制 α-淀粉酶活性 IC ₅₀	抑制 α-葡萄糖苷酶活性 IC ₅₀
HWP	2.26±0.15 ^b	2.60±0.22 ^b	1.97±0.14 ^a	0.37±0.03 ^b
EWP	1.85±0.12 ^c	2.26±0.20 ^b	1.45±0.13 ^b	0.34±0.03 ^b
UWP	2.58±0.18 ^a	3.78±0.24 ^a	1.70±0.16 ^b	0.51±0.04 ^a
EUP	1.38±0.10 ^d	1.39±0.18 ^c	1.18±0.11 ^c	0.31±0.03 ^b

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 下表同。

相同浓度的桑椹多糖样品的 ABTS⁺自由基清除率高于 DPPH 自由基清除率, 这一现象可能与多糖的电子转移更高效有关, 因为清除 ABTS⁺自由基的反应更依赖电子转移, 而多糖的糖醛酸可高效提供电子, 电子转移速率更高^[32]。综上所述, 酶解超声联合提取法可以提高桑椹多糖的抗氧化能力, 尤其是 ABTS⁺自由基清除能力。

2.5 不同提取方法对桑椹多糖降血糖活性的影响分析

已有研究表明多糖通过抑制 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶活性, 减少葡萄糖吸收、增加其代谢, 并提高胰岛素敏感性, 延缓葡萄糖转化为血糖, 从而调节糖代谢并降低血糖水平^[33]。不同方法提取的桑椹多糖对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶活性抑制率如图 5 所示, EUP 对 α-淀粉酶活性的 IC₅₀ 为 1.18 mg/mL, 分别比 HWP、EWP、UWP 降低了 40.1%、18.6%、30.6%; EUP 对 α-葡萄糖苷酶活性的 IC₅₀ 为 0.31 mg/mL, 分别比 HWP、EWP、UWP 降低了 16.8%、8.0%、39.4%。说明 EUP 的降血糖活性高于其他样品。根据已有研究报道, α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的抑制机制主要与底物和酶之间的接触能力有关^[1]。EUP 经过酶解和超声处理后, 糖醛酸和还原糖含量增加, 短链分子增多, 暴露出更多的游离羟基、疏水基团和氢键, 暴露的游离羟基基团可促进抑制剂对酶的抑制活性, 疏

水作用和氢键作用是形成多糖-酶复合物的主要动力^[34]。因此, EUP 抑制 α-淀粉酶活性和 α-葡萄糖苷酶活性的能力显著提高^[35]。

2.6 不同酶对酶解超声联合提取桑椹多糖的得率、抗氧化能力、降血糖活性的影响分析

多糖的抗氧化能力和降血糖活性与多糖结构关系密切, 桑椹果渣成分复杂, 含有纤维素、果胶、蛋白质等大分子物质, 不同酶由于作用位点和底物专一性的差异, 对提取桑椹多糖的得率及多糖结构的影响也不同。酶解超声联合提取桑椹多糖时, 不同酶对多糖得率、抗氧化能力和降血糖活性的影响如图 6 所示。由图 6 可知, 复合酶水解条件下桑椹多糖的得率比单独使用纤维素酶、果胶酶和木瓜蛋白酶分别提高了 41.9%、55.6%、94.4%, 且所得桑椹多糖的抗氧化能力和降血糖活性显著提高。与纤维素酶、果胶酶、木瓜蛋白酶相比, 其清除 ABTS⁺自由基 IC₅₀ 为 1.62 mg/mL, 分别降低 47.1%、60.0%、64.1%, 清除 DPPH 自由基 IC₅₀ 为 1.39 mg/mL, 分别降低 29.1%、53.5%、68.0%; 抑制 α-淀粉酶活性 IC₅₀ 为 1.18 mg/mL, 分别降低 68.5%、63.3%、78.8%, 抑制 α-葡萄糖苷酶活性 IC₅₀ 为 0.31 mg/mL, 分别降低 38.0%、31.1%、82.8%(表 2)。因此, 使用复合酶酶解超声联合提取确实可以提高桑椹多糖的得率、抗氧化能力和降血糖活性。

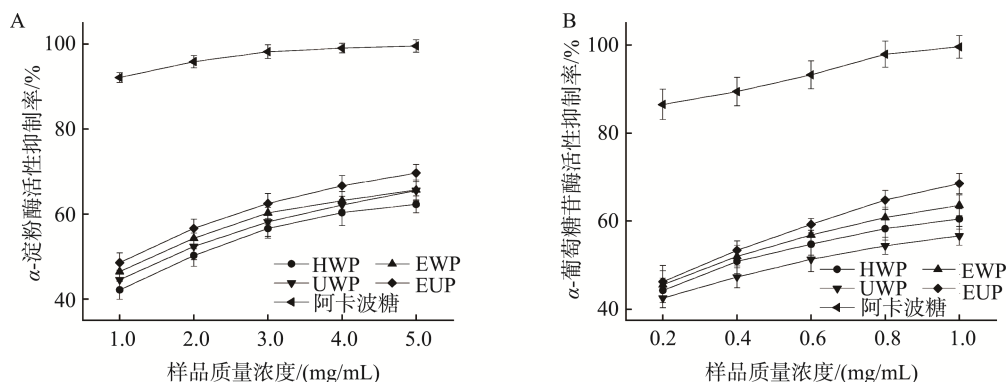


图 5 不同提取方法对桑椹多糖降血糖活性的影响

Fig.5 Effects of different extraction methods on the hypoglycemic activity of *Mori fructus* polysaccharide

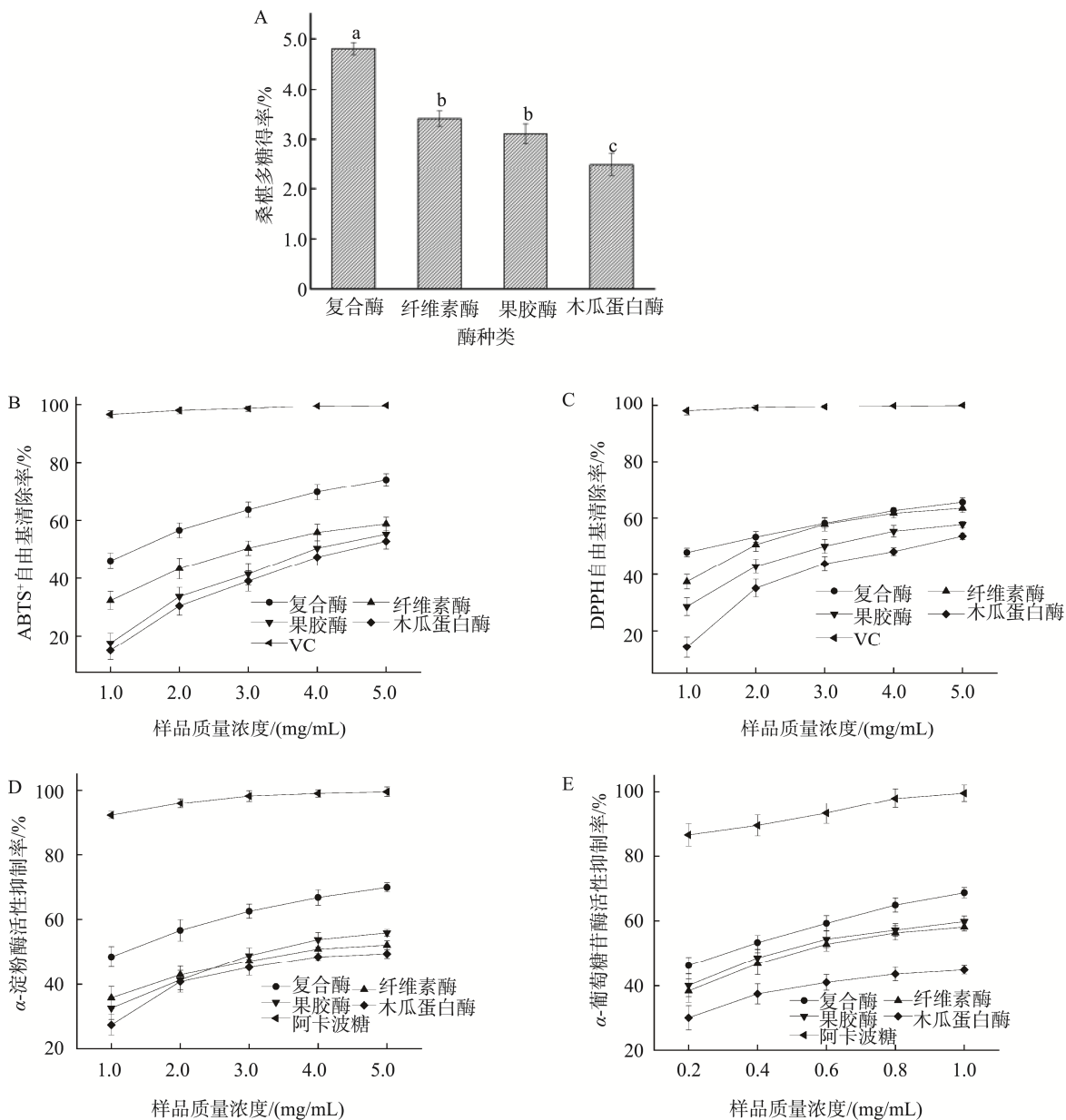


图 6 酶解超声联合提取时不同酶对多糖得率及其抗氧化能力、降血糖活性的影响

Fig.6 Effects of different enzymes on the yield, antioxidant activity and hypoglycemic activity of *Mori fructus* polysaccharide extracted by enzymatic hydrolysis combined with ultrasonication

表 2 酶解超声联合提取时不同酶提取所得多糖抗氧化能力和酶抑制活性的 IC₅₀ 值(mg/mL)

Table 2 IC₅₀ value of antioxidant power and enzyme inhibition activity of *Mori fructus* polysaccharide extracted by different enzymes during the combined extraction by enzymatic hydrolysis and ultrasound (mg/mL)

样品名称	清除 ABTS ⁺ 自由基 IC ₅₀	清除 DPPH 自由基 IC ₅₀	抑制 α-淀粉酶活性 IC ₅₀	抑制 α-葡萄糖苷酶活 性 IC ₅₀
复合酶	1.62±0.11 ^d	1.39±0.10 ^d	1.18±0.14 ^d	0.31±0.05 ^c
纤维素酶	3.06±0.12 ^c	1.96±0.15 ^c	3.75±0.13 ^b	0.50±0.05 ^b
果胶酶	4.04±0.15 ^b	2.99±0.18 ^b	3.22±0.16 ^c	0.45±0.08 ^b
木瓜蛋白酶	4.51±0.17 ^a	4.34±0.19 ^a	5.56±0.11 ^a	1.80±0.12 ^a

3 结 论

本研究通过单因素实验优化了酶解超声联合提取桑椹多糖的工艺, 并比较了热水浸提、酶解辅助提取、超声辅助提取、酶解超声联合提取 4 种不同方法所得桑椹多糖的抗氧化能力和降血糖活性。结果表明使用纤维素酶和果胶酶组成的复合酶预处理联合超声提取条件下桑椹多糖的得率较高, 所得多糖具有较强的抗氧化能力、抑制 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶的活性。与传统的提取方法相比, 酶解超声联合提取法可以提高桑椹多糖的得率, 对多糖的结构破坏更小, 且更加绿色环保; 与新型的提取方法如低共溶剂提取法、超临界流体萃取法等相比, 成本较低、工艺流程简单、能耗少。因此, 酶解超声联合提取法条件温和, 安全性较高, 具有工业化可行性。本研究结果为桑椹多糖提取工艺的优化提供新的思路, 也为桑椹果渣的开发利用开辟新道路, 而酶解和超声对桑椹多糖活性影响的机制还需要进一步探索与研究, 如多糖分子量、多糖结构、单糖组成、微观结构等。

参考文献

- [1] CHEN C, WANG PP, HUANG Q, *et al.* A comparison study on polysaccharides extracted from *Fructus mori* using different methods: Structural characterization and glucose entrapment [J]. *Food & Function*, 2019, 10(6): 3684–3695.
- [2] 刘朝良, 孙辉, 尹志亮, 等. 桑椹粗提取物中的有效活性物质分析[J]. *激光生物学报*, 2007, 16(5): 547–551.
LIU CL, SUN H, YIN ZL, *et al.* Analysis of available active substance in crude ethanol precipitation of *Mulberry syncarp* [J]. *Acta Laser Biology Sinica*, 2007, 16(5): 547–551.
- [3] 李国章, 于华忠, 卜晓英, 等. 桑椹籽中黄酮的 CO₂ 超临界流体萃取及抑菌作用研究[J]. *现代食品科技*, 2006, 22(2): 86–88.
LI GZ, YU HZ, BU XY, *et al.* Extraction of flavone glycosides from the seed of *Morus alba* L. by CO₂ supercritical fluid and its antimicrobial effect [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2006, 22(2): 86–88.
- [4] DENG QF, WANG X, CHEN HG, *et al.* Structural characterization, modification and hepatoprotective effects of polysaccharide from *Mori fructus* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 153: 357–363.
- [5] ZHANG Y, ZHOU T, WANG HJ, *et al.* Structural characterization and *in vitro* antitumor activity of an acidic polysaccharide from *Angelica sinensis* (Oliv.) *Diels* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2016, 147: 401–408.
- [6] RAJAURIA G, RAVINDRAN R, GARCIA VM, *et al.* Molecular characteristics and antioxidant activity of laminarin extracted from the seaweed species *Laminaria hyperborea*, using hydrothermal-assisted extraction and a multi-step purification procedure [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 112: 106332.
- [7] 聂小伟, 陈志兵, 顾晓慧, 等. 微波-复合酶辅助提取海带多糖工艺优化及其抗氧化性能分析[J]. *应用海洋学学报*, 2021, 40(2): 355–365.
NIE XW, CHEN ZB, GU XH, *et al.* Optimization of microwave and compound enzyme assisted extraction of laminaria polysaccharide and analysis of antioxidant activity [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2021, 40(2): 355–365.
- [8] 张会佳, 侯相竹, 张涵, 等. 黄芪多糖复合酶提取工艺优化及其 α -葡萄糖苷酶抑制活性[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(17): 181–189.
ZHANG HJ, HOU XZ, ZHANG H, *et al.* Optimization of complex enzyme extraction process of *Astragalus* polysaccharides and its α -glucosidase inhibitory activities [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(17): 181–189.
- [9] CHEN C, YOU LJ, ABBASI MA, *et al.* Optimization for ultrasound extraction of polysaccharides from mulberry fruits with antioxidant and hyperglycemic activity *in vitro* [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 130: 122–132.
- [10] 何传波, 魏好程, 熊何健, 等. 酶与微波处理对海带多糖提取及抗氧化活性的影响[J]. *食品科学*, 2013, 34(18): 51–55.
HE CB, WEI HC, XIONG HJ, *et al.* Extraction and antioxidant activities of polysaccharides from *Laminaria japonica* as affected by enzymatic hydrolysis and microwave [J]. *Food Science*, 2013, 34(18): 51–55.
- [11] ZHANG YL, LEI Y, QI SR, *et al.* Ultrasonic-microwave-assisted extraction for enhancing antioxidant activity of *Dictyophora indusiata* polysaccharides: The difference mechanisms between single and combined assisted extraction [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 95: 106356.
- [12] YAO QP, PU LL, DONG BY, *et al.* Effects of ultrasonic degradation on physicochemical and antioxidant properties of *Gleditsia sinensis* seed polysaccharides [J]. *Carbohydrate Research*, 2024, 545: 109272.
- [13] 张涵, 殷澳, 张会佳, 等. 昆布多糖的复合酶法提取工艺优化及其对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(3): 197–206.
ZHANG H, YIN AO, ZHANG HJ, *et al.* Optimization of multi-enzyme-assisted *Laminarin* extraction and evaluation of *Laminarin* inhibitory effect on α -glucosidase activity [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(3): 197–206.
- [14] LI DJ, IBADULLAH WZW, SHUKRI R, *et al.* The effects of different extraction methods on the yield, microstructure, and antioxidant activity of polysaccharides from *Rhodomyrtus tomentosa* Berry [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2025, 18: 3719–3731.
- [15] TANG YY, WEI Z, HE XM, *et al.* A comparison study on polysaccharides extracted from banana flower using different methods: Physicochemical characterization, and antioxidant and antihyperglycemic activities [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 264(1): 130459.
- [16] HUI HP, WANG XJ, HE NW, *et al.* Process optimization and effect of different extraction methods on the characteristics and activities of *Herba Patriniæ* polysaccharides: A correlation analysis [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2024, 17(1): 105460.
- [17] TANG YY, HE XM, SUN J, *et al.* Polyphenols and alkaloids in byproducts of longan fruits (*Dimocarpus longan* Lour) and their bioactivities [J]. *Molecules*, 2019, 24(6): 1186.
- [18] PARHAT R, AYTURSUN A, MA SJ, *et al.* Isolations, characterizations and bioactivities of polysaccharides from the seeds of three species *Glycyrrhiza* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 145(C): 364–371.
- [19] SHANG HM, ZHAO JC, GUO Y, *et al.* Extraction, purification, emulsifying property, hypoglycemic activity, and antioxidant activity of

- polysaccharides from comfrey [J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 146: 112183.
- [20] ZHANG JQ, LI C, HUANG Q, *et al.* Comparative study on the physicochemical properties and bioactivities of polysaccharide fractions extracted from *Fructus mori* at different temperatures [J]. *Food & Function*, 2019, 10(1): 410–421.
- [21] DU J, ANDERSON CT, XIAO CW. Dynamics of pectic homogalacturonan in cellular morphogenesis and adhesion, wall integrity sensing and plant development [J]. *Nature Plants*, 2022, 8(4): 332–340.
- [22] 朱嘉玺, 陈正豪, 李广将, 等. 超声辅助提取刺梨果渣多糖及其抗氧化活性的研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(12): 81–88.
ZHU JX, CHEN ZH, LI GJ, *et al.* Ultrasound-assisted extraction of *Rosa roxburghii* trutt pomace polysaccharide and its antioxidant activity [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2024, 15(12): 81–88.
- [23] 金瑾, 隋志方, 秦令祥, 等. 加压辅助碱法提取蝉花子实体多糖工艺优化及体外免疫活性研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(20): 96–103.
JIN J, SUI ZF, QIN LX, *et al.* Optimization of process of *Cordyceps cicadae* fruiting body polysaccharides by pressurization-assisted alkaline extraction method and its *in vitro* immunoactivity [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(20): 96–103.
- [24] 苑璐, 冷凯良, 周余航, 等. 复合酶解法优化黄精多糖提取工艺[J]. *食品与生物技术学报*, 2017, 36(9): 996–1001.
YUAN L, LENG KL, ZHOU YH, *et al.* Optimization of multi-enzymatic extraction process of polysaccharide from *Polygonatum sibiricum* [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2017, 36(9): 996–1001.
- [25] SUN HY, LI CY, NI YJ, *et al.* Ultrasonic/microwave-assisted extraction of polysaccharides from *Camptotheca acuminata* fruits and its antitumor activity [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 206: 557–564.
- [26] BENJAMIN VR, JANET AGU, MARILENA AR, *et al.* Ultrasound-assisted extraction of phlorotannins and polysaccharides from *Silvetia compressa* (*Phaeophyceae*) [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2020, 32: 1441–1453.
- [27] REN YP, LIU SX. Effects of separation and purification on structural characteristics of polysaccharide from quinoa (*Chenopodium quinoa willd*) [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2019, 522(2): 286–291.
- [28] TIWARI BK. Ultrasound: A clean, green extraction technology [J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2015, 71: 100–109.
- [29] 王君, 陈新, 高文彬, 等. 响应面法优化超声辅助提取金丝皇菊多糖工艺及生理活性研究[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(2): 100–109.
WANG J, CHEN X, GAO WB, *et al.* Optimization of ultrasonic-assisted extraction process and physiological activity of polysaccharide from *Dendranthema morifolium* by response surface methodology [J]. *China Food Additives*, 2022, 33(2): 100–109.
- [30] HU XT, XU FR, LI JL, *et al.* Ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from coix seeds: Optimization, purification, and *in vitro* digestibility [J]. *Food Chemistry*, 2022, 374: 131636.
- [31] KONG TY, LIU SH, FENG YQ, *et al.* Slit dual-frequency ultrasound-assisted pulping of *Lycium barbarum* fresh fruit to improve the dissolution of polysaccharides and *in situ* real-time monitoring [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 98: 106509.
- [32] LI M, YAN DL, HU XY, *et al.* Structural, rheological properties and antioxidant activities of polysaccharides from mulberry fruits (*Morus alba* L.) based on different extraction techniques with superfine grinding pretreatment. [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 183: 1774–1783.
- [33] DING M, WANG G, YUAN P, *et al.* Research progress in the role and mechanism of polysaccharides in regulating glucose and lipid metabolism [J]. *Journal of Southern Medical University*, 2021, 41(3): 471–475.
- [34] ZHAO MM, BAI JW, BU XY, *et al.* Characterization of selenized polysaccharides from *Ribes nigrum* L. and its inhibitory effects on α -amylase and α -glucosidase [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 259: 117729.
- [35] HUANG YY, XIE W, TANG T, *et al.* Structural characteristics, antioxidant and hypoglycemic activities of polysaccharides from *Mori fructus* based on different extraction methods [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2023, 10: 1125831.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)