

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80512

小白杏多糖的提取、结构表征及抗氧化活性分析

陈 麟^{1,2} 布海丽且姆·阿卜杜热合曼^{1,2} 姜露熙¹ 唐 睿^{1,2}
张剑林^{1,2} 高智慧¹

(1. 新疆理工学院食品安全与营养实验教学中心, 新疆 阿克苏 843100;

2. 新疆理工学院慕萨莱斯品质检测重点实验室, 新疆 阿克苏 843100)

摘要: [目的] 研究小白杏多糖的提取工艺, 并对其结构进行表征。[方法] 以新疆小白杏为原材料, 通过响应面法优化小白杏多糖的提取工艺; 运用高效液相色谱(HPLC)、傅里叶红外(FT-IR)、示差检测器、扫描电镜(SEM)等多糖结构进行表征; 采用 DPPH 自由基、ABTS⁺ 自由基和羟自由基清除能力探究小白杏多糖的抗氧化活性。[结果] 小白杏多糖的最佳提取工艺为料液比 1:40 (g/mL), 提取时间 6 h, 提取温度 80 °C, 该条件下多糖提取率为 7.75%。小白杏多糖主要由 L-鼠李糖(8.27%)、D-半乳糖醛酸(41.81%)、D-葡萄糖(27.47%)、D-半乳糖(9.25%)和 L-阿拉伯糖(6.47%)组成, 高半乳糖醛酸含量表明小白杏多糖主要成分为果胶。当小白杏多糖质量浓度为 0.6 mg/mL 时, ABTS⁺ 自由基、DPPH 自由基和羟自由基清除率分别为 73.00%, 64.10%, 40.50%; 小白杏多糖在体外对 ABTS⁺ 自由基显示出较强的抗氧化活性。[结论] 小白杏多糖是一类由鼠李糖、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖和阿拉伯糖组成的具有柑橘果胶类似结构的多糖。

关键词: 小白杏多糖; 提取; 工艺优化; 结构表征; 抗氧化活性

Extraction and analysis of structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides from Xiaobai apricots

CHEN Lin^{1,2} ABUDUREHEMAN Buhailiqiemu^{1,2} JIANG Luxi¹ TANG Rui^{1,2}
ZHANG Jianlin^{1,2} GAO Zhihui¹

(1. Center for Experimental Instruction in Food Safety and Nutrition, Xinjiang Institute of Technology, Aksu, Xinjiang 843100, China; 2. Key Laboratory for Quality Testing of Musalais, Xinjiang Institute of Technology, Aksu, Xinjiang 843100, China)

Abstract: [Objective] To explore the extraction process and structural characterization of polysaccharides from Xiaobai apricots. [Methods] Xinjiang Xiaobai apricots are used as raw materials. The extraction process of Xiaobai apricot polysaccharides is optimized using response surface methodology (RSM). The structural properties of the polysaccharides are characterized by high-performance liquid chromatography (HPLC), Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), differential refractometry, and scanning electron microscopy (SEM). The antioxidant activity is evaluated by measuring the scavenging abilities of DPPH radicals, ABTS⁺ radicals, and hydroxyl radicals. [Results] The optimal extraction conditions are determined as a solid-to-liquid ratio of 1:40 (g/mL), extraction time of 6 h, and extraction temperature of 80 °C, under which the polysaccharide yield is 7.75%. The polysaccharides are mainly composed of L-rhamnose (8.27%), D-galacturonic acid (41.81%), D-glucose (27.47%), D-galactose (9.25%), and L-arabinose (6.47%). The high content of D-galacturonic acid indicates that the Xiaobai apricot polysaccharides are mainly pectic polysaccharides. At a concentration of 0.6 mg/mL, the

基金项目: 新疆维吾尔自治区天池英才项目(编号:2024TCQN04); 自治区自然科学基金计划特培项目(编号:2023d03015); 新疆维吾尔自治区高校基本科研项目(编号:XJEDU2024P092)

通信作者: 布海丽且姆·阿卜杜热合曼(1987—), 女, 新疆理工学院教授, 博士。E-mail: buhalqam.a@163.com

收稿日期: 2025-06-04 **改回日期:** 2025-10-31

引用格式: 陈麟, 布海丽且姆·阿卜杜热合曼, 姜露熙, 等. 小白杏多糖的提取、结构表征及抗氧化活性分析[J]. 食品与机械, 2026, 42(2): 152-159.

Citation: CHEN Lin, ABUDUREHEMAN Buhailiqiemu, JIANG Luxi, et al. Extraction and analysis of structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides from Xiaobai apricots[J]. Food & Machinery, 2026, 42(2): 152-159.

scavenging rates for ABTS⁺, DPPH, and hydroxyl radicals are 73.00%, 64.10%, and 40.50%, respectively, showing strong antioxidant activity against ABTS⁺ radicals in vitro. [Conclusion] The Xiaobai apricot polysaccharides are composed of rhamnose, galacturonic acid, glucose, galactose, and arabinose, and possess a citrus pectin-like structure.

Keywords: Xiaobai apricot polysaccharide; extraction; process optimization; structural characterization; antioxidant activity

多糖是自然界中最丰富的一种聚合物,广泛存在于动植物体内和微生物细胞壁中^[1],具有降血糖与血脂水平等多种生理功能^[2-3]。目前,常用的多糖提取方法主要包括热水浸提法、酸碱浸提法、超声提取法和酶提法等^[4-5],不同提取方法所得多糖提取率也不同。Geng等^[6]比较了常用的6种提取方法对鳞伞多糖(CSFPs)理化性质、加工特性和生物活性的影响。结果表明,与其他方法相比,酶辅助提取法的多糖具有较高的提取率,微波提取法的多糖具有更高的抗氧化活性,热水浸提法的多糖具有更大的相对分子质量和水油相容性。Han等^[7]比较了4种提取方法对白芨多糖提取效果的影响。结果表明,热水浸提法的多糖相对分子质量较大,微波提取法的多糖具有更高的抗氧化活性,但热水浸提法操作简单、成本较低。植物品种及种植区也会影响多糖含量。Zheng等^[8]比较了不同品种火龙果茎皮多糖的化学成分、形态结构、抗氧化活性及抗炎活性。理化表征表明,不同品种火龙果茎皮多糖在植物单糖组成、相对分子质量、表面形态以及抗氧化活性等方面存在显著差异。此外,构成多糖的单糖残基、连接位置和糖苷键不同均会使多糖呈现不同的构象、相对分子质量以及链内和链间氢键形成的复杂的二级结构^[9]。植物多糖的结构是影响其生物活性的关键因素,确定多糖的结构有助于进一步了解其生物活性及机制^[10-11]。

杏子为蔷薇科李属落叶乔木或灌木,原产于中国和中亚地区,已有3 000多年的栽培历史,其品种超过2 000种,其中小白杏是新疆的一种特色水果,也是重要的经济植物,因其独特的风味备受市场欢迎^[12-13]。小白杏中富含蛋白质、脂肪、膳食纤维等营养成分^[14],以及矿物元素、类胡萝卜素^[15]、酚类化合物和多糖等活性成分,有助于人类健康^[16]。杏仁中含有的膳食纤维含量较高,不仅可以促进肠道蠕动、预防便秘,同时还具有降低胆固醇、降低血糖的功效^[17]。

目前,有关杏子的营养成分及功能活性研究较多^[18-19],并对小白杏的风味特性和营养构成进行了详细解析^[13],但目前针对小白杏多糖的提取工艺优化、结构表征及生物活性评价等方面的研究仍缺乏报道。试验拟选用新疆小白杏作为研究对象,通过响应面试验优化小白杏多糖的提取工艺,运用高效液相色谱法测定小白杏多糖的单糖种类组成及摩尔比,运用傅里叶红外、相对分子质量测定、扫描电镜等对小白杏多糖进行结构表征,并探究小白杏多糖的抗氧化活性,以期为小白杏的资源开发

利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

小白杏:选择外形完整、无霉变、无破损、果皮颜色为黄白色的样品,市售;

无水乙醇、柠檬酸、氯仿、正丁醇、水杨酸、七水合硫酸亚铁、过氧化氢、氯化钠:天津市鑫铂特化工有限公司;

DPPH、三氟乙酸、*N*-甲基-*N*-(三甲基硅烷基)三氟乙酰胺、溴化钾:上海源叶生物科技有限公司;

L-古洛糖醛酸、*D*-甘露糖、*D*-氨基葡萄糖、*D*-核糖、*L*-鼠李糖、*D*-葡萄糖醛酸、*D*-半乳糖醛酸、*D*-葡萄糖、*D*-半乳糖、*D*-木糖、*L*-阿拉伯糖、*L*-岩藻糖:美国Sigma公司。

1.2 主要仪器与设备

高效液相色谱仪:1260型,安捷伦科技有限公司;

扫描电镜:Gemini-SEM 300型,德国卡尔蔡司公司;

傅里叶红外光谱:IS50型,赛默飞世尔科技公司;

红外干燥箱:IS50型,赛默飞世尔科技公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品前处理 选用品相完整的新鲜小白杏,用清水冲洗表面污物,于0.1%的食品级次氯酸钠溶液中浸泡杀菌1~2 min,用蒸馏水漂洗2~3次后沥干水分。去除杏核后切块匀浆,冷冻干燥后备用,样品贮藏于新疆理工学院食品生产与加工实验室。

1.3.2 单因素试验 称取3.00 g冷冻干燥的小白杏[含水量为(4.67±0.22)%],粉碎过0.355 mm筛,回流除脂后干燥,分别考察提取温度(60, 70, 80, 90, 100 ℃)、提取时间(2, 4, 6, 8, 10 h)和料液比[1:20, 1:30, 1:40, 1:50, 1:60 (g/mL)]对多糖提取率的影响。提取完后蒸发浓缩,缓慢加入70%乙醇并持续搅拌,静止过夜,离心去除沉淀,参照陈盛宇等^[20]的方法除杂,冷冻干燥,称重,并按式(1)计算多糖提取率。

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

式中:

E ——多糖提取率, %;

m_1 ——水提醇沉后冷冻干燥得到的多糖质量, g;

m_2 ——小白杏的原始质量, g。

1.3.3 响应面试验 在单因素试验基础上,选择提取时间、提取温度和料液比进行响应面试验,优化小白杏多糖的最佳提取工艺。

1.3.4 单糖组成 参照Zhou等^[21]的方法并修改。取

10 mg 多糖样品,加入 4 mL 2 mol/L 三氟乙酸加热至 110 °C,水解 6 h,旋蒸除去三氟乙酸。向样品瓶中加入 3 mL 吡啶,加热至 80 °C 溶解,加入 100 μL *N*-甲基-*N*-(三甲基硅烷基)三氟乙酰胺,80 °C 反应 1 h,冷却,过 0.45 μm 滤膜后进样。色谱条件: C_{18} 柱,250 mm×4.6 mm×5 μm;流动相 A 为 100 mmol/L 磷酸钠缓冲液(pH 6.7);流动相 B 为乙腈,检测波长 250 nm;柱温 30 °C;流速 1 mL/min,进样量 5 μL。

1.3.5 扫描电镜观察 参照沈晓静等^[22]的方法。

1.3.6 FT-IR 分析多糖结构 参照 Chen 等^[23]的方法。

1.3.7 相对分子质量组成分析 参照王磊等^[24]的方法并修改。称取适量多糖样品,用流动相溶解,配制成质量浓度约为 1~3 mg/mL 的溶液,过 0.22 μm 微孔滤膜,色谱柱为 PLaquagel-OH Mixed-H(8 μm,7.5 mm×300 mm),示差检测器、双角度激光散射检测器和黏度检测器,流速 1.0 mL/min;柱温 45 °C;进样量 50 mL;流动相为 0.1 mol/L 硝酸钠,等度洗脱,通过样品的黏度、出峰时间等,利用 GPC 软件拟合计算出样品的相对分子质量。

1.3.8 抗氧化活性分析 参照 Li 等^[25]的方法。

1.3.9 数据处理 所有试验平行 3 次,采用 Excel 2010 软件进行数据整理,结果以平均值±标准差表示,所有数据均使用 SPSS 27.0.1 软件进行统计分析,数据分析采用方差分析(ANOVA),显著性差异采用 Duncun's multiple-range test($P<0.05$)进行检验,采用 Origin 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 提取温度 由图 1 可知,随着提取温度的升高,多糖提取率先增加后降低,当提取温度为 80 °C 时,多糖提取率最高。多糖是由多个单糖分子通过糖苷键连接而成的大分子化合物,提取温度过高会使糖苷键断裂,多糖分子链发生降解,从而降低多糖的相对分子质量,其结构完整

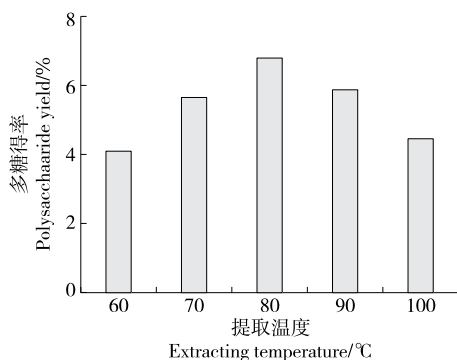


图 1 提取温度对小白杏多糖提取率的影响

Figure 1 Effect of extraction temperature on the yield of Xiaobai apricot polysaccharides

性被破坏,无法被有效提取出来^[26]。故选择 70,80,90 °C 作为响应面提取温度。

2.1.2 提取时间 由图 2 可知,随着提取时间的延长,多糖提取率先升后降,当提取时间为 6 h 时,多糖提取率最高。继续延长提前时间,多糖提取率降低,可能是长时间的提取,多糖会发生化学降解,生成小分子的降解产物,这些降解产物不仅难以被有效提取,还可能与多糖竞争提取过程中的有效位点,进一步降低多糖提取率^[27]。故选择 4,6,8 h 作为响应面提取温度。

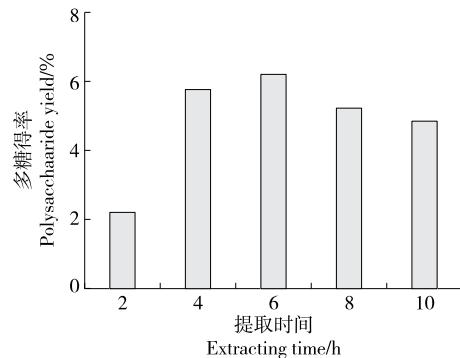


图 2 提取时间对小白杏多糖提取率的影响

Figure 2 Effect of extraction time on the yield of Xiaobai apricot polysaccharides

2.1.3 料液比 由图 3 可知,随着料液比的增加,多糖提取率先增加后降低,当料液比为 1:40 (g/mL) 时,多糖提取率最高。料液比过大,溶剂过量,可能会增强溶剂对多糖的吸附作用,导致多糖分子被吸附在溶剂中,难以从溶剂中分离出来,从而降低了多糖提取率^[28]。故选择 1:30,1:40,1:50 (g/mL) 作为响应面提取料液比。

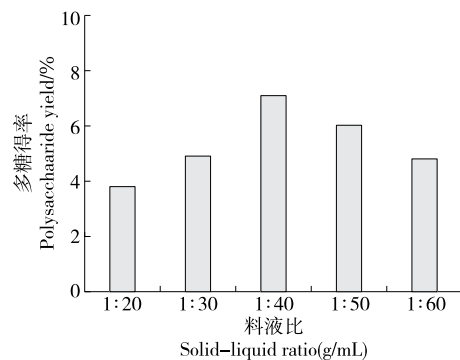


图 3 料液比对小白杏多糖提取率的影响

Figure 3 Effect of solid-to-liquid ratio on the yield of Xiaobai apricot polysaccharides

2.2 响应面实验

响应面实验因素水平见表 1,响应面实验设计及结果见表 2。通过多元非线性回归拟合分析,获得二次多项回

表1 响应面试验因素水平

水平	A 提取时间/h	B 提取温度/°C	C 料液比(g/mL)
-1	4.00	70.00	30
0	6.00	80.00	40
1	8.00	90.00	50

表2 响应面试验设计及结果

Table 2 Design and results of the response surface experiment

试验号	A	B	C	多糖提取率/%
1	-1	-1	0	5.27
2	-1	0	-1	5.22
3	-1	0	1	5.00
4	-1	1	0	5.68
5	0	-1	-1	5.35
6	0	-1	1	5.31
7	0	0	0	8.00
8	0	0	0	8.17
9	0	0	0	8.01
10	0	0	0	7.93
11	0	0	0	7.85
12	0	1	-1	5.65
13	0	1	1	5.25
14	1	-1	0	5.62
15	1	0	-1	5.26
16	1	0	1	5.16
17	1	1	0	5.51

归方程

$$Y=7.99+0.0048A+0.067B+0.095C-0.13AB+0.03AC-0.091BC-1.35A^2-1.12B^2-1.48C^2 \quad (2)$$

由表3可知,模型 $P<0.0001$,极显著;失拟项 $P=0.9764>0.05$,不显著,说明该模型的拟合程度较好,可以较好地预测结果。其决定系数 $R^2=0.9977$,表明所建立的模型能够解释99.77%的响应面变化;模型矫正系数 $R_{Adj}^2=0.9948$,说明该模型拟合程度好,与实际情况模拟较好,因此能用此模型分析和预测小白杏多糖的提取工艺条件;由 F 值可知,各因素对响应值的影响顺序为料液比>提取温度>提取时间。

由图4可知,AB相互作用的中心近似于椭圆,且比其他两个相互作用的曲线梯度更陡,说明提取温度和提取时间的相互作用对小白杏多糖提取率有较为显著的影

表3 回归模型方差分析[†]

Table 3 Analysis of variance (ANOVA) for the regression model

来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	25.000	9	2.780	343.98	<0.0001	***
A	0.018	1	0.018	2.25	0.1775	
B	0.036	1	0.036	4.48	0.0721	
C	0.073	1	0.073	9.01	0.0199	**
AB	0.067	1	0.067	8.28	0.0238	**
AC	0.036	1	0.036	0.45	0.5257	
BC	0.033	1	0.033	4.08	0.0832	
A ²	7.680	1	7.680	950.53	<0.0001	***
B ²	5.290	1	5.290	655.14	<0.0001	***
C ²	9.240	1	9.240	1143.93	<0.0001	***
残差	0.057	7	0.081			
失拟差	0.026	3	0.008	0.06	0.9764	
纯误差	0.054	4	0.013			
总和	25.050	16				

[†] *为差异显著($P<0.05$),**为差异较显著($P<0.01$),***为差异极显著($P<0.001$); $R^2=0.9977$, $R_{Adj}^2=0.9948$, $CV=1.47%$ 。

响。AC/BC相互作用的中心近似于圆形,表明其对小白杏多糖提取率的影响不显著^[29]。小白杏多糖的最佳提取工艺为料液比1:39.67(g/mL),提取时间6.03h,提取温度80.31°C,该条件下的提取率为(7.99±1.04)%。考虑实际操作可行性,将最优工艺条件修正为料液比1:40(g/mL),提取时间6h,提取温度80°C,该条件下的提取率为(7.75±0.92)%。

2.3 单糖组成分析

由图5可知,小白杏多糖中共检出12种单糖成分,通过与标准品对比,其单糖组成主要为L-古洛糖醛酸、D-甘露糖、D-氨基葡萄糖、D-核糖、L-鼠李糖、D-葡萄糖醛酸、D-半乳糖醛酸、D-葡萄糖、D-半乳糖、D-木糖、L-阿拉伯糖和L-岩藻糖,摩尔比为1.05:4.36:10.65:0.88:29.67:0.77:150.03:98.57:33.20:5.38:23.20:1.04。D-半乳糖醛酸为小白杏多糖的主要单糖,占比41.81%,其次是D-葡萄糖、D-半乳糖、L-鼠李糖和L-阿拉伯糖,高半乳糖醛酸含量表明小白杏多糖是一种果胶多糖。此外,D-甘露糖和L-岩藻糖存在于小白杏多糖中,可能与残留的淀粉或纤维素、半纤维素有关^[30]。果胶是一种复杂的酸性大分子多糖,通常由同型半乳糖醛酸酯(HG)、鼠李糖半乳糖醛酸聚糖I(RG-I)和鼠李糖半乳糖醛酸聚糖II(RG-II)组成^[31]。Rha/GalA的摩尔比反映了RG-I结构对果胶组成的贡献情况,若摩尔比为0.05~1.00,可以推测果胶的主要成分为RG-I区域^[31]。小白杏多糖中Rha/GalA的摩尔比为0.2,表明小

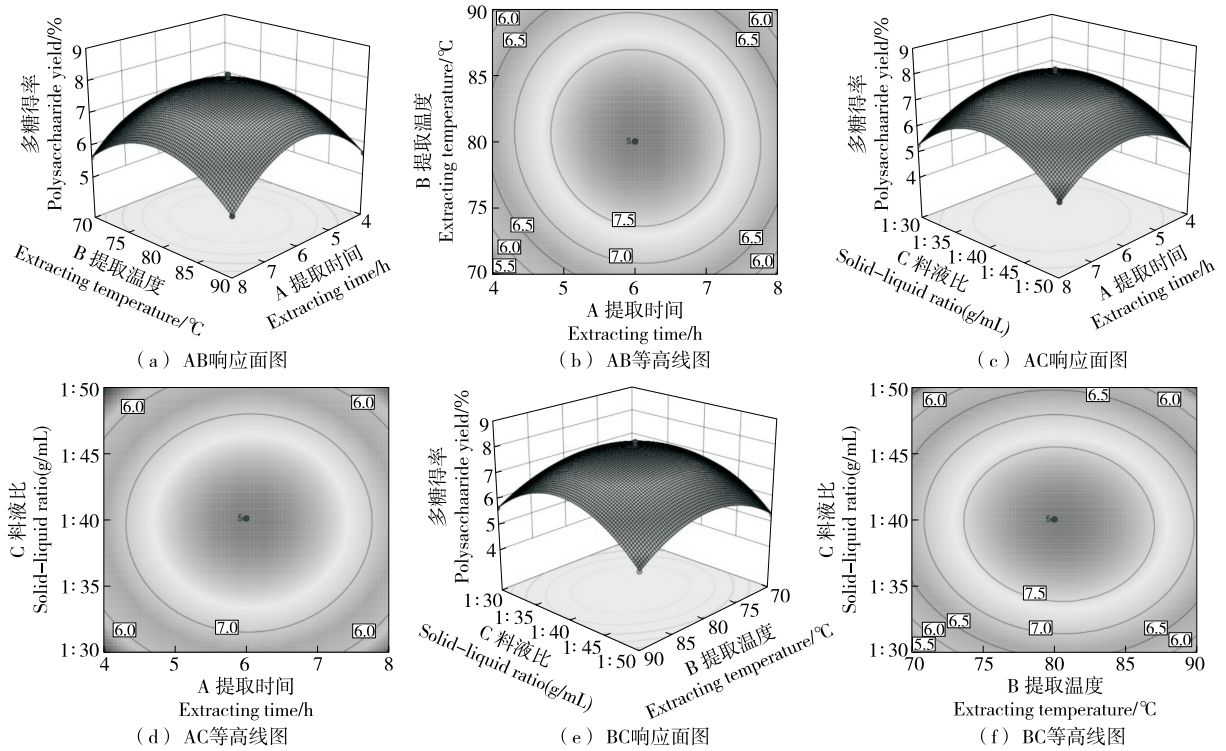


图 4 各因素相互作用对小白杏多糖提取率的影响

Figure 4 Interaction effects of various factors on the yield of Xiaobai apricot polysaccharides

小白杏多糖是一种含有较高 RG-I 结构的果胶多糖。

2.4 扫描电镜分析

由图 6 可知,当放大 100 倍时,小白杏多糖呈不规则的薄片状和鳞片状;当放大 1 000,10 000 倍时,小白杏多糖表面光滑,连接紧密,与柑橘果胶结构类似^[32]。

2.5 FT-IR 分析

由图 7 可知,3 258.18 cm⁻¹处吸收峰表明样品中含有羟基官能团;2 929.98,2 852.17 cm⁻¹处弱吸收峰代表糖环

中 C—H 键的不对称伸缩振动;1 740.61,1 596.80 cm⁻¹处吸收峰为果胶特征吸收峰,表明含酯化和游离羧基官能团(—COOR),证实了样品中存在糖醛酸,与小白杏多糖中高含量的半乳糖醛酸结果一致^[32-33]。1 400.45,1 362.61 cm⁻¹处吸收峰可能是多糖中 C—N 键的伸缩振动;1 326.09,1 236.16,1 136.65,833.04 cm⁻¹处吸收峰可能与多糖中的酮羰基的 C—O 伸缩振动有关;1 100.39,

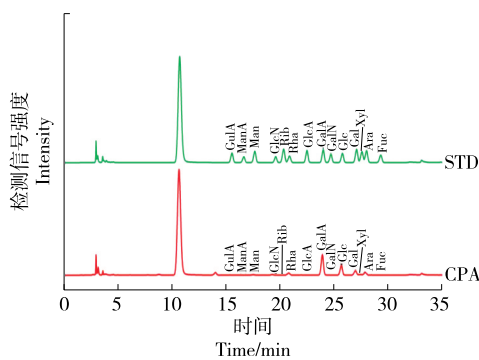


图 5 14 种单糖混合标曲(STD)及小白杏多糖(CPA)的单糖组成分析

Figure 5 Analysis of 14 mixed monosaccharide standards (STD) and monosaccharide composition (CPA) of Xiaobai apricot polysaccharides

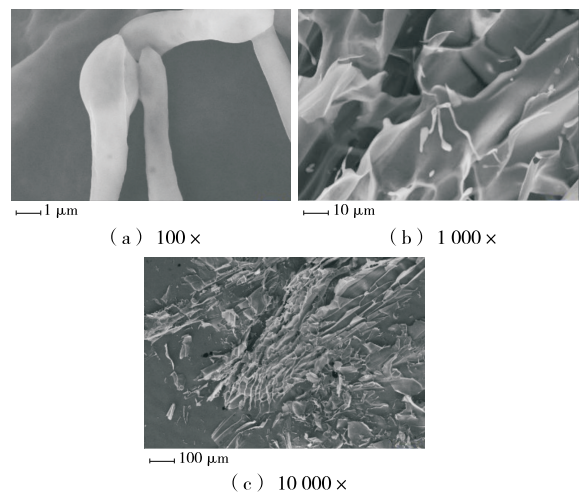


图 6 小白杏多糖的扫描电镜结果

Figure 6 SEM images of Xiaobai apricot polysaccharides

1 015.30 cm^{-1} 处吸收峰与C—O—C和C—O—H的振动有关,表明多糖中存在吡喃糖结构;924.95,765.22 cm^{-1} 处吸收峰与多糖中烯烃类C=C键的振动有关^[34];833,924.95 cm^{-1} 处吸收峰表明小白杏多糖中同时存在 α -和 β -两种构型^[35]。

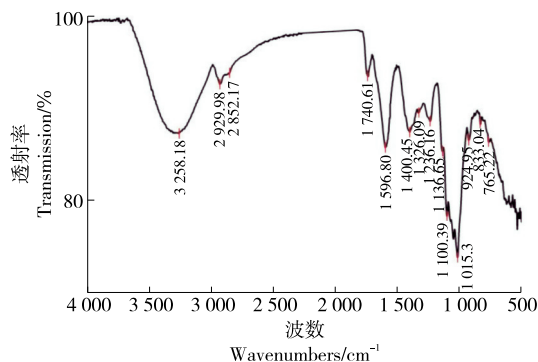


图7 FT-IR测定小白杏多糖结构图

Figure 7 FT-IR spectrum of Xiaobai apricot polysaccharides

2.6 相对分子质量分析

由图8和表4可知,小白杏多糖中存在3个多糖组分,表明小白杏多糖为杂多糖。以保留时间为横坐标、葡聚糖标准品相对分子质量的对数值 $\lg M_w$ 为纵坐标进行线性回归,得到葡聚糖标准曲线 $\lg M_w = -0.9802x + 12.341$, $R^2 = 0.9996$ 。经计算,小白杏多糖组分相对分子质量分别为122.95,1.53,0.46。峰1的多分散系数为5.19,表明该组分为多分散复合物;组分2和组分3的多分散系数分别为1.05,1.07,表明这两个组分的相对分子质量分布比较集中,多分散性较小。3个组分的相对含量分别为46.86%,15.63%,37.51%,小白杏多糖的平均相对分子质量为58.02。

2.7 抗氧化活性分析

以DPPH自由基、ABTS⁺自由基和羟自由基清除能力为评价指标,评价小白杏多糖的抗氧化活性,结果如

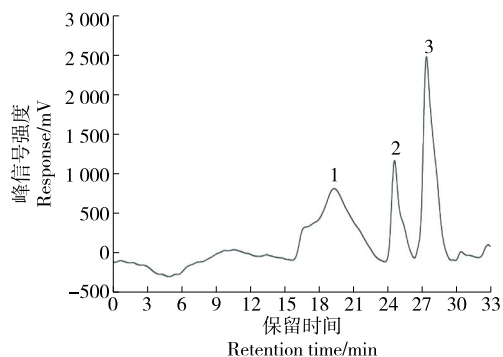


图8 相对分子质量组成

Figure 8 Molecular weight composition of Xiaobai apricot polysaccharides

图9所示。ABTS⁺是一种常用的自由基清除活性测试剂,其操作简单、快速,已被用于测定多糖的总抗氧化能力^[36]。由图9可知,当质量浓度为0.1~0.6 mg/mL时,小白杏多糖对ABTS⁺自由基的清除能力随着质量浓度的增加而升高,在质量浓度为0.6 mg/mL时,ABTS⁺自由基清除率为73.00%。DPPH自由基是一种较稳定的自由基,被广泛用于评价各种抗氧化剂清除自由基的能力^[37]。当质量浓度为0.6 mg/mL,小白杏多糖对DPPH自由基的清除率为64.10%。羟自由基被认为是活性氧中最有害的自由基,其通过芬顿反应产生,较易穿过细胞膜,并与细胞内的生物分子发生反应,导致组织损伤或细胞死亡,因此,清除羟自由基对抗氧化防御至关重要^[38]。当质量浓度为0.6 mg/mL时,小白杏多糖对羟自由基的清除率仅为40.50%。综上,小白杏多糖对ABTS⁺自由基的清除能力最强,对DPPH自由基的清除能力次之,对羟自由基的清除能力最弱,与Shao等^[39]的研究结果一致。

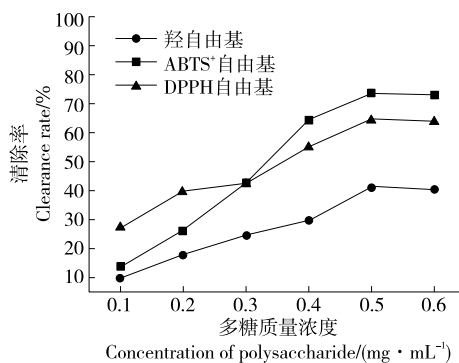


图9 小白杏多糖的体外抗氧化活性

Figure 9 *In vitro* antioxidant activity of Xiaobai apricot polysaccharides

3 结论

小白杏多糖的最佳提取工艺为料液比1:40 (g/mL),提取时间6 h,提取温度80 $^{\circ}\text{C}$,此时小白杏多糖提取率为 $(7.75 \pm 0.92)\%$,与预期值接近。小白杏多糖的单糖组成包括L-古洛糖醛酸、D-甘露糖、D-氨基葡萄糖、D-核糖、L-鼠李糖、D-葡萄糖醛酸、D-半乳糖醛酸、D-葡萄糖、D-半乳糖、D-木糖、L-阿拉伯糖及L-岩藻糖,其摩尔比为1.05:4.36:10.65:0.88:29.67:0.77:150.03:98.57:33.20:5.38:23.20:1.04,高半乳糖醛酸含量表明小白杏多糖的主要成分为果胶。单糖组成、傅里叶红外、扫描电镜结果表明,小白杏多糖是一种果胶多糖,具有较高的RG-I结构域且同时存在 α -和 β -两种构型。相对分子质量结果显示小白杏多糖为杂多糖。抗氧化分析表明,小白杏多糖对ABTS⁺自由基显示出较强的抗氧化活性。该研究采用传统的溶剂提取法展开试验,该试验方法操作简单,成本较

低,但方法创新性不足,未来可以探索其他提取技术对小白杏多糖的提取率和活性的影响;且试验仅对小白杏杂多糖进行了初步研究,可进一步对多糖进行分离纯化,并对比研究小白杏杂多糖与纯化多糖的差异性;也可基于小白杏多糖含有较高半乳糖醛酸这一特点开展后续试验。

参考文献

- [1] DONG X D, DENG P, WANG X K, et al. Structural characteristics and immunomodulatory effects of polysaccharides extracted from plant seeds: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 153: 104747.
- [2] LIU X Z, SUN K J, JIN X, et al. Review on active components and mechanism of natural product polysaccharides against Gastric carcinoma[J]. Heliyon, 2024, 10(5): e27218.
- [3] DONG Z, ZHANG M M, LI H X, et al. Structural characterization and immunomodulatory activity of a novel polysaccharide from *Pueraria lobata* (Willd.) Ohwi root[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 154: 1 556-1 564.
- [4] CHEN X, LIU Y B, DENG Y, et al. Primary study on effect of extraction methods on the properties and activities of polysaccharides from *Geum japonicum var. Chinense F. Bolle* [J]. Molecules, 2025, 30(1): 148.
- [5] LUO Y, TANG R L, HUANG Y G. Differences in structure, antioxidant capacity and gut microbiota modulation of red raspberry pectic polysaccharides extracted by different methods [J]. Food Research International, 2025, 211: 116474.
- [6] GENG X R, GUO D D, WU B, et al. Effects of different extraction methods on the physico-chemical characteristics and biological activities of polysaccharides from *Clitocybe squamulosa*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259: 129234.
- [7] HAN X, LIU H, ZHANG Y S, et al. The effects of different extraction methods on the structure and antioxidant properties of *Bletilla striata* polysaccharide[J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2025, 55(4): 392-402.
- [8] ZHENG C C, LI T, TANG Y Y, et al. Structural and functional investigation on stem and peel polysaccharides from different varieties of *pitaya*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 259: 129172.
- [9] PEESAPATI S, ROY D. Control of anomericity and glycosidic linkage on the mechanics of polysaccharides[J]. Journal of Chemical Sciences, 2023, 135(2): 32.
- [10] 沈晓静,叶仁凤,龚姝淳,等. 烘焙小粒咖啡豆多糖的提取、纯化及结构特征研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(4): 63-71.
SHEN X J, YE R F, GONG S C, et al. Extraction, purification, and structural characteristics of polysaccharide from roasted beans of *Coffea arabica*[J]. Food & Machinery, 2025, 41(4): 63-71.
- [11] WANG H T, LI H L, HOU Y T, et al. Plant polysaccharides: sources, structures, and antidiabetic effects[J]. Current Opinion in Food Science, 2023, 51: 101013.
- [12] SU C Y, ZHENG X C, ZHANG D D, et al. Investigation of sugars, organic acids, phenolic compounds, antioxidant activity and the aroma fingerprint of small white apricots grown in Xinjiang[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(12): 4 300-4 311.
- [13] CHEN L, TANG R, ZHANG J L, et al. Evaluation of the Xinjiang indigenous fruits Xiaobai apricots: chemical and nutritional studies[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2024, 18: 101536.
- [14] GÓMEZ-MARTÍNEZ H, BERMEJO A, ZURRAGA E, et al. Polyphenol content in apricot fruits[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 277: 109828.
- [15] SOKÓŁ-ŁĘTOWSKA A, KUCHARSKA A Z, HODUN G, et al. Chemical composition of 21 cultivars of sour cherry (*Prunus cerasus*) fruit cultivated in Poland[J]. Molecules, 2020, 25(19): 4 587.
- [16] LEVENT O. A detailed comparative study on some physicochemical properties, volatile composition, fatty acid, and mineral profile of different Almond (*Prunus dulcis* L.) varieties[J]. Horticulturae, 2022, 8(6): 488.
- [17] ALI KHONE M, BAINS A, TOSIF M M, et al. Apricot kernel: bioactivity, characterization, applications, and health attributes [J]. Foods, 2022, 11(15): 2 184.
- [18] MUHIDINOV Z K, NASRIDINOV A S, STRAHAN G D, et al. Structural analyses of apricot pectin polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 279: 135544.
- [19] SUN W J, KOU X H, WU C E, et al. Low-temperature plasma modification, structural characterization and anti-diabetic activity of an apricot pectic polysaccharide[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 240: 124301.
- [20] 陈盛宇,张淑梅,王玉霞,等. 桦褐孔菌菌丝体多糖除杂工艺及对 α -葡萄糖苷酶抑制作用的影响[J]. 菌物研究, 2024, 22(3): 268-275.
CHEN S Y, ZHANG S M, WANG Y X, et al. Removal processing of impurities from mycelia polysaccharide of *Inonotus obliquus* and its inhibition effect on α -glucosidase[J]. Journal of Fungal Research, 2024, 22(3): 268-275.
- [21] ZHOU S Y, HUANG G L, HUANG H L. Extraction, derivatization and antioxidant activities of onion polysaccharide[J]. Food Chemistry, 2022, 388: 133000.
- [22] 沈晓静,袁彪,郭毅,等. 普洱茶多糖结构及抗氧化活性的比较研究[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(8): 117-121.
SHEN X J, YUAN B, GUO Y, et al. Comparative study on structure and antioxidant activity of polysaccharides from Pu-erh tea[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(8): 117-121.
- [23] CHEN L, HU M B, CHEN Z Y, et al. Preparation, structural

- characterization and neuroprotective effects of polysaccharides from the pericarp of *Zanthoxylum bungeanum* Maxim against H₂O₂-induced oxidative damage in PC12 cells[J]. South African Journal of Botany, 2021, 142: 165-174.
- [24] 王磊, 李国龙, 唐志书, 等. 不同生长时期酸枣果肉多糖相对分子质量分布和单糖组成及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 1-7.
WANG L, LI G L, TANG Z S, et al. The relative molecular mass, monosaccharide composition and antioxidant activity of *Ziziphus jujuba* flesh polysaccharide at different stages[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 1-7.
- [25] LI D J, WAN IBADULLAH W Z, SHUKRI R, et al. Structural characterization and antioxidant activity of polysaccharide from *Rhodomyrtus tomentosa* berry[J]. Food Chemistry, 2025, 484: 144150.
- [26] CHEN X Y, SUN-WATERHOUSE D, YAO W Z, et al. Free radical-mediated degradation of polysaccharides: mechanism of free radical formation and degradation, influence factors and product properties[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130524.
- [27] 朱芙蓉, 程忠, 唐颖彤, 等. 金花茶多糖的提取纯化、结构及生物活性研究进展[J]. 食品与机械, 2025, 41(3): 228-235.
ZHU F R, CHENG Z, TANG Y Z, et al. Research progress on the extraction, purification, structure, and bioactivity of polysaccharides from *Camellia nitidissima* Chi[J]. Food & Machinery, 2025, 41(3): 228-235.
- [28] 乔艳艳, 蒋洪洲, 李冬男, 等. 蓝莓多糖的结构解析、抗氧化及抗菌活性[J]. 食品科学, 2024, 45(21): 94-103.
QIAO Y Y, JIANG H Z, LI D N, et al. Structural characterization, antioxidant and antibacterial activities of polysaccharides from blueberry[J]. Food Science, 2024, 45(21): 94-103.
- [29] 何俊叶, 刘成, 于宠洋, 等. 黄皮不同部位多糖的结构特性及体外降血糖活性[J]. 食品与机械, 2024, 40(3): 156-164.
HE J Y, LIU C, YU C Y, et al. Structural characteristics and hypoglycemic activity of polysaccharides from different parts of wampee[J]. Food & Machinery, 2024, 40(3): 156-164.
- [30] YU W, YI Y J, WANG H Y, et al. Effects of residual pectin composition and content on the properties of cellulose nanofibrils from ramie fibers[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 298: 120112.
- [31] SHEN L L, CHU X K, ZHANG Z Q, et al. Structural characterization and *in vitro* anti-inflammatory estimation of an unusual pectin linked by rhamnogalacturonan I and xylogalacturonan from lotus plumule[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 194: 100-109.
- [32] JIAO X, LI F, ZHAO J, et al. Structural diversity and physicochemical properties of polysaccharides isolated from pumpkin (*Cucurbita moschata*) by different methods[J]. Food Research International, 2023, 163: 112157.
- [33] 许梦粤, 田鑫, 王君可, 等. 菜豆多糖与香菇多糖结构特征以及体外重要生物活性综合对比评价[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 2318-2327.
XU M Y, TIAN X, WANG J K, et al. Comparative evaluation of structural characteristics and *in vitro* biological activities of polysaccharides from common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and those from shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. Food Science, 2024, 45(23): 2318-2327.
- [34] QIU T X, SHI Y, HE M, et al. Phosphorylated bush Sophora root polysaccharides protect the liver in duck viral hepatitis by preserving mitochondrial function[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 245: 125419.
- [35] HUANG Y C, BAI J, SHUI J M, et al. Simultaneous determination of the monosaccharide types and their absolute configurations in polysaccharides based on UPLC-MS/MS[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 295: 139647.
- [36] QIU J J, SHI M L, LI S Q, et al. Artificial neural network model- and response surface methodology-based optimization of *Atractylodes Macrocephalae Rhizoma* polysaccharide extraction, kinetic modelling and structural characterization[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 95: 106408.
- [37] LIN B B, HUANG G L. Chemical modification and antioxidant activity of Wendan peel polysaccharide[J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 6258.
- [38] JIANG L, WANG W J, WEN P W, et al. Two water-soluble polysaccharides from mung bean skin: physicochemical characterization, antioxidant and antibacterial activities[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 100: 105412.
- [39] SHAO K P, SUN X L, ZHANG W, et al. Structural characterisation and evaluation of antioxidant activity of coffee pericarp polysaccharides[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2025, 11: 100884.