彭欣宇, 邵予欣, 沙旖璇, 等. 半仿生法提取夏枯草多糖工艺优化及其体外抗氧化、酶抑制活性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 239−250. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030365
PENG Xinyu, SHAO Yuxin, SHA Yixuan, et al. Optimization of Semi-bionic Extraction Process of Polysaccharides from *Prunella vulgaris* L. and Analysis of Its *in Vitro* Antioxidant and Enzyme Inhibitory Activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 239−250. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030365

· 工艺技术 ·

半仿生法提取夏枯草多糖工艺优化及其体外抗氧化、酶抑制活性研究

彭欣宇, 邵予欣, 沙旖璇, 刘东来, 尹星福*
（延边大学农学院, 吉林延吉 133002）

摘　要: 以多糖得率为指标，研究热水浸提法（Hot water extraction，HWE）、酶辅助提取法（Enzyme-assisted extraction，EAE）、半仿生提取法（Semi-bionic extraction，SBE）对夏枯草多糖得率的影响，选取多糖得率最高方法进行工艺优化，通过高效液相色谱、凝胶渗透色谱、紫外光谱和傅里叶红外光谱法对其结构进行表征，并对其体外抗氧化活性和酶抑制活性进行研究。结果表明，三种方法提取的夏枯草多糖得率分别为：5.9%、7.54%、9.87%。半仿生法优化后的最佳提取条件为：提取温度 85 ℃、时间 2.5 h、模拟胃液（pH2）和肠液（pH8.5）、料液比 1∶30，在此条件下多糖得率达到 11.69%。结构分析显示，夏枯草多糖主要由鼠李糖（Rham）、半乳糖醛酸（GalUA）、葡萄糖（Glc）、半乳糖（Gal）、木糖（Xyl）及阿拉伯糖（Ara）构成，摩尔比为 8.89、41.81、17.53、6.85、14.32、7.21。活性测试表明夏枯草多糖对四种自由基 DPPH·、$ABTS^{+}$·、·OH、O_2^{-}·的 IC_{50} 值分别为 0.049、0.092、0.085、0.062 mg/mL，浓度为 1.1 mg/mL 时总还原力值最大为 0.314。其对 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶具有抑制效果，IC_{50} 值为 1.72 和 8.43 mg/mL。本研究系统优化了夏枯草多糖的提取工艺，初步阐明了其结构特征，并证实了其具有较强的抗氧化活性，为夏枯草多糖的进一步开发和应用提供了理论依据和技术支持。

关键词: 夏枯草多糖, 半仿生提取法, 结构表征, 抗氧化活性, 酶抑制活性
中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0239−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030365
本文网刊:

Optimization of Semi-bionic Extraction Process of Polysaccharides from *Prunella vulgaris* L. and Analysis of Its *in Vitro* Antioxidant and Enzyme Inhibitory Activities

PENG Xinyu，SHAO Yuxin，SHA Yixuan，LIU Donglai，YIN Xingfu*
（Agriculture College, Yanbian University, Yanji 133002, China）

Abstract: Using polysaccharide extraction yield as the indicator, this study investigated the effects of hot water extraction (HWE), enzyme-assisted extraction (EAE), and semi-bionic extraction (SBE) on the extraction yield of *Prunella vulgaris* L. polysaccharides. The extraction method with the highest polysaccharide yield was selected for process optimization. The structure of the polysaccharides was characterized using high-performance liquid chromatography, gel permeation chromatography, ultraviolet spectroscopy, and Fourier-transform infrared spectroscopy. In addition, the *in vitro* antioxidant and enzyme inhibitory activities were evaluated. The results showed that the polysaccharide yields obtained by the HWE, EAE, and SBE were 5.9%, 7.54%, and 9.87%, respectively. After optimization, the best extraction conditions for the SBE method were determined as follows: extraction temperature of 85 ℃, duration of 2.5 h, simulated gastric fluid (pH2.0) and intestinal fluid (pH8.5), and a solid-to-liquid ratio of 1∶30. Under these conditions, the polysaccharide yield reached 11.69%. Structural analysis revealed that *Prunella vulgaris* polysaccharides were mainly composed of rhamnose,

收稿日期: 2025−03−28
作者简介: 彭欣宇（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然有效成分分离与功能性研究, E-mail: 2289040153@qq.com。
*** 通信作者:** 尹星福（1984−）, 女, 博士, 讲师, 研究方向: 天然有效成分分离与功能性研究, E-mail: yinxingfu@ybu.edu.cn。

galacturonic acid, glucose, galactose, xylose, and arabinose, the molar ratios were 8.89, 41.81, 17.53, 6.85, 14.32 and 7.21, respectively. Antioxidant activity tests showed that the IC_{50} values for scavenging DPPH·, $ABTS^{+}$·, ·OH and O_2^{-}· were 0.049, 0.092, 0.085 and 0.062 mg/mL, respectively, while the maximum total reducing power was measured at 0.314 when the polysaccharide concentration was 1.1 mg/mL. The polysaccharide also exhibited inhibitory effects on α-glucosidase and α-amylase, with IC_{50} values of 1.72 and 8.43 mg/mL, respectively. This study systematically optimized the extraction process of *P. vulgaris* L. polysaccharides, preliminarily clarified their structural characteristics, and confirmed their strong antioxidant activity. These findings provide theoretical basis and technical support for the further development and application of *P. vulgaris* L. polysaccharides.

Key words: *Prunella vulgaris* L. polysaccharide; semi-bionic extraction; structural characterization; antioxidant activity; enzyme inhibitory activity

夏枯草(*Prunella vulgaris* L.),是一种分布广泛、资源丰富的药食同源植物,其名称来源于夏季结束时自然枯萎的特性,通常在夏季采收,并以其干燥的果穗食用或入药。该植物主要分布于温带和热带山区,包括欧洲、亚洲、非洲西北部及北美洲,在中国则集中于淮河流域和长江中下游地区,拥有数千年药用历史[1]。其重要活性成分夏枯草多糖(*Prunella vulgaris* L. polysaccharides, PVP)通常占干重的 5%~11%,其中常规水提法得率约 5%~8%,而超声辅助提取得率可提升至 10% 以上[2]。研究表明,PVP 具有显著的抗炎、抗氧化、免疫调节等生物活性[3−5],同时在清热解毒、抗菌、抗病毒、调控代谢(降血压、降血糖及血脂)等方面表现出潜在应用价值[6−8]。因此,开发高效且最大限度保留 PVP 天然活性的提取工艺,是实现其深度开发和价值转化的关键前提。

目前,夏枯草多糖的提取方法主要包括热水提取法[9]、酶解提取法[10]、超声辅助法[11] 等,但这些方法普遍存在提取效率低、活性成分易破坏等问题。半仿生提取法(Semi-bionic extraction, SBE)是一种模拟人体胃肠消化环境的提取技术,通过交替使用近似胃肠道 pH 的酸性和碱性溶剂,依次连续提取目标成分[12−13]。由于该方法契合夏枯草药食同源的特性及其在体内的作用途径,理论上能够更高效地释放并保留其天然活性成分,真实反映其营养与功效的转化关系。目前,SBE 已在人参、黄芪等药用植物的多糖提取中展现出优势[14−16]。但在夏枯草多糖提取中的应用仍局限于初步探索,其工艺参数的优化、提取机制及对 PVP 结构-活性的影响尚未系统研究。

基于此,本研究优化半仿生法提取夏枯草多糖的工艺参数,结合现代分析技术对所得多糖进行结构表征,并系统评价其抗氧化、降血糖等生物活性,以期为夏枯草多糖的高效利用和功能产品开发提供理论依据与技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

夏枯草 广西贺州,烘干粉碎后备用;葡萄糖、水杨酸、V_C 上海迈瑞尔生化科技有限公司;浓硫酸、Tris-HCl 国药集团化学试剂有限公司;苯酚、丙酮、石油醚、铁氰化钾、无水乙醇、三氯乙酸、三氧化铁、硫酸亚铁、过氧化氢、邻苯三酚 天津科密欧化学试剂有限公司;DPPH、ABTS、DNS 试剂、pNPG、纤维素酶(酶活≥50000 U/g)、α-葡萄糖苷酶(酶活≥50000 U/g)、α-淀粉酶(酶活 4000 U/g) 源叶生物科技有限公司。

LC-FA2004 型电子天平 上海力辰科学仪器有限公司;HM-SY96 型酶标仪、E-201-C 型 pH 计 上海精密科学仪器有限公司;FDU-2110 型冰冻干燥机 东京理化器械株式会社;TDZ5-WS 型离心机 湖南湘仪实验室仪器有限公司;HH-S21-4S 型恒温水浴锅 上海新苗医疗器械有限公司;Agilent1100 型高效液相色谱仪 安捷伦科技有限公司;Waters 1525 型凝胶色谱仪 美国 Waters 公司;UV-2550 型紫外可见光谱仪 上海菁华仪器有限公司;IRTracer-100 型傅里叶变换红外光谱仪 日本岛津公司;SU8010 型冷场发射扫描电子显微镜 日本日立公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品预处理 将夏枯草实体晒干至恒重,并用高速粉碎机碎成粉末,过 60 目筛得到预处理样品,干燥后储存在−4 ℃ 冰箱中用于后续研究。

1.2.2 夏枯草多糖提取

1.2.2.1 热水浸提法 称取 1 g 夏枯草干粉置于烧杯,按料液比 1∶30 加入蒸馏水,90 ℃ 提取 1 h 后以 4000 r/min 离心 10 min,收集上清液。将残渣再次按料液比 1∶30 加水,90 ℃ 二次提取 1 h,离心后合并两次上清液。向混合液中加入 3 倍体积 95% 乙醇,4 ℃ 醇沉过夜。离心收集多糖沉淀,依次用无水乙醇、丙酮、石油醚洗涤,弃去洗涤液后冷冻干燥,获得夏枯草粗多糖[17]。

1.2.2.2 酶辅助提取法 称取 1 g 夏枯草干粉置于烧杯,加入料液比 1∶30 的蒸馏水和 5% 的纤维素酶,55 ℃ 下提取 1 h 后于 4000 r/min 下离心 10 min,保留上清液[18]。将残渣按上述步骤再次提取,收集上清液;合并两次上清液,后续步骤同上。

1.2.2.3 半仿生提取法 根据半仿生法的原理,为模拟人体胃肠道环境条件,用 HCl 和 NaOH 分别配制模拟胃液(pH1.5)和模拟肠液(pH8)。准确称取夏枯草粉样品 1 g,加入料液比 1∶30 的模拟胃液,在 90 ℃ 条件下提取 1 h,在 4000 r/min 条件下离心 10 min,

保留上清液，残渣溶于料液比 1∶30 的模拟肠液，重复上述步骤，保留上清液；合并两次上清液，向其加入 3 倍体积的 95% 乙醇，醇沉过夜；醇沉后收集多糖沉淀，用无水乙醇、丙酮、石油醚分别洗涤，弃去上清收集沉淀，冷冻干燥后即得夏枯草粗多糖[19]。夏枯草粗多糖得率计算公式如下：

$$粗多糖得率(\%) = \frac{V_1}{V_2} \times 100 \qquad 式（1）$$

式中：V_1 为样品中多糖质量(g)；V_2 为样品质量(g)。

1.2.3　总糖含量测定　标准曲线的绘制：向试管中分别加入 0、0.3、0.6、0.9、1.2、1.5 和 1.8 mL 的 100 μg/mL 葡萄糖标准液，去离子水补总体积至 2 mL，加入 1 mL 5% 苯酚溶液，混匀后加入 5 mL 浓硫酸，室温下反应 20 min，于 490 nm 处测定吸光值。横坐标为葡萄糖浓度，纵坐标为吸光值，绘制回归方程为：y=0.0164x−0.0443，R^2=0.9996。

吸取 2 mL 夏枯草粗多糖溶液、1 mL 5% 苯酚溶液混合均匀，迅速加入 5 mL 浓硫酸，充分摇匀后室温条件下显色反应 20 min，在 490 nm 处检测其吸光度值。

$$总糖含量(\%) = \frac{C \times V \times N}{m} \times 100 \qquad 式（2）$$

式中：C 为根据吸光度值计算出的溶液质量浓度(mg/mL)；V 为多糖溶液总体积(mL)；N 为溶液稀释倍数；m 为 PVP 取样量(mg)。

1.2.4　单因素实验　准确称取一定量夏枯草粉末，在固定其中 4 个因素水平的条件下，对余下 1 个因素设计 5 个不同水平的实验，固定条件为：料液比 1∶30(g/mL)，提取温度 85 ℃，提取时间 120 min，胃液 pH2，肠液 pH8。分别选取料液比 1∶10、1∶20、1∶30、1∶40、1∶50 g/mL，提取温度 40、55、70、85、100 ℃，提取时间 60、90、120、150、180 min，胃液 pH1.0、1.5、2.0、2.5、3.0，肠液 pH7.0、7.5、8.0、8.5、9.0 进行单因素实验。

1.2.5　响应面试验　以单因素实验结果为基础，为了探究 PVP 得率(%)作为响应值(Y)的影响，采用 Box-Behnken 设计原理，运用软件 Design Expert 13.0.6 进行了 3 因素 3 水平的响应面分析试验，如表 1 所示。

表 1　响应面试验的因素水平

Table 1　Factors and levels of the response surface test

水平	因素		
	A 料液比(g/mL)	B 提取温度(℃)	C 提取时间(min)
−1	1∶20	70	90
0	1∶30	85	120
1	1∶40	100	150

1.2.6　夏枯草多糖精制　通过 Sevage 法去除蛋白质，配制适当浓度的夏枯草粗多糖溶液，加入 1/3 体积的 Sevage 试剂(正丁醇∶氯仿=1∶4)，混合并振荡 10 min，静置 30 min。随后在 4000 r/min 下离心 5 min，收集上清液，去除交界处的变性蛋白质。重复操作直至交界处无白色沉淀后，用旋转蒸发仪浓缩，供后续试验使用。

活性炭脱色：向除蛋白后的多糖溶液中加入 1.5%(w/v)的活性炭，在 58 ℃ 水浴条件下搅拌 20 min，抽滤，重复以上操作，直至溶液颜色变为淡黄色[20]。

透析：将上述处理过的多糖上清液装入 3500 Da 透析袋中，流水透析 48 h，除去有机试剂及其他小分子物质。每 12 h 换一次水。透析完成后的精多糖溶液进行真空冷冻干燥，得夏枯草精制多糖。

1.2.7　结构鉴定

1.2.7.1　单糖组成分析　参考何坤明等[21] 的方法，采用 1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(PMP)柱前衍生化结合反相高效液相色谱(HPLC)技术，建立了 14 种常见还原性单糖的分离分析方法，并通过 PMP 柱前衍生高效液相色谱法进行检测。

1.2.7.2　分子量测定　多糖纯度鉴定和分子量测定采用凝胶渗透色谱法(GPC)，参考黄春花[22] 的方法并稍作改动。水相仪器为 Waters 1525，检测器为 2414，色谱柱为 PL aquqgel-OH MIXED 8 μm。流动相为 0.2 mol/L $NaNO_3$ 和 0.01 mol/L NaH_2PO_4(pH7)，流速为 1 mL/min，柱温为 30 ℃。

1.2.7.3　紫外吸收光谱分析　配制浓度为 1 mg/mL 的夏枯草多糖溶液，用去离子水稀释约 30 倍，以纯净水为空白，使用紫外可见光分光光度仪在 200~400 nm 波长范围内进行全波长扫描[23]。

1.2.7.4　红外吸收光谱分析　取 2 mg 干燥的夏枯草多糖与 200 mg KBr 粉末混合后研磨 10 min，取适量混合物压片。将薄片置于傅里叶变换红外光谱仪中，扫描并分析 4000~500 cm^{-1} 范围内的光谱图[23]。

1.2.8　体外抗氧化活性

1.2.8.1　DPPH·清除能力的测定　参考周元龙等[24] 方法并改进。将 PVP 和 V_C 配制成不同浓度样品溶液。取 100 μL 各浓度 PVP 溶液与等体积 DPPH 工作液混匀(A_1)；取 100 μL 无水乙醇与等体积 DPPH 工作液混匀(A_0)；取 100 μL 无水乙醇与等体积 PVP 溶液混匀(A_2)。避光反应 30 min，517 nm 测吸光值。以 V_C 为标准品，DPPH·清除率公式为：

$$DPPH\cdot清除率(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \qquad 式（3）$$

式中：A_0 为空白组，A_1 为样品组，A_2 为对照组。

1.2.8.2　$ABTS^+$·清除能力的测定　将 PVP 和 V_C 配制成不同浓度样品溶液。取 50 μL 各浓度 PVP 溶液与 150 μL $ABTS^+$·工作液混匀(A_1)；取 50 μL 无水乙醇与 150 μL $ABTS^+$·工作液混匀(A_0)；取 50 μL

无水乙醇与 150 μL PVP 溶液混匀(A_2)。避光反应 10 min, 734 nm 测吸光值[24]。以 V_C 为标准品, $ABTS^+$·清除率公式为:

$$ABTS^+\cdot\text{清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad \text{式（4）}$$

式中: A_0 为空白组, A_1 为样品组, A_2 为对照组。

1.2.8.3 ·OH 清除能力的测定 参考韩秋菊等[25]的方法, 采用水杨酸法测定 PVP 的·OH 清除能力。将 PVP 和 V_C 配制成不同浓度样品溶液。依次加入 1 mL 各浓度 PVP 溶液、1 mL 6 mmol/L 硫酸亚铁和 1 mL 6 mmol/L 水杨酸, 混匀后静置 5 min, 再加入 1 mL 6 mmol/L 过氧化氢, 37 ℃ 水浴反应 30 min, 510 nm 测吸光值(A_1)。以 V_C 为标准品, 蒸馏水代替样品为空白组(A_0), 蒸馏水代替过氧化氢为阴性对照组(A_2)。羟基自由基清除率公式为:

$$\cdot OH\text{清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad \text{式（5）}$$

式中: A_0 为空白组, A_1 为样品组, A_2 为对照组。

1.2.8.4 O_2^-·清除能力的测定 将 PVP 和 V_C 配制成不同浓度样品溶液。取 5 mL 0.05 mol/L Tris-HCl 缓冲液, 加入 4 mL 各浓度 PVP 溶液, 25 ℃ 水浴预热 20 min, 再加入 1 mL 3 mmol/L 邻苯三酚溶液(预热 20 min), 混匀后 25 ℃ 反应 5 min, 加入 1 mL 10 mol/L HCl 终止反应, 320 nm 测吸光值(A_1)[26]。以蒸馏水替代邻苯三酚溶液为对照组(A_2), 蒸馏水代替样品为空白组(A_0), V_C 为标准品。超氧阴离子自由基清除率公式为:

$$O_2^-\cdot\text{清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad \text{式（6）}$$

式中: A_0 为空白组, A_1 为样品组, A_2 为对照组。

1.2.8.5 总还原力的测定 参考文献方法[27]并作适当修改, 将 PVP 和 V_C 配制为不同浓度样品溶液。取 0.2 mmol/L 磷酸缓冲液(pH6.6)2 mL、各浓度 PVP 供试液 2 mL 和 1% 的铁氰化钾 2 mL 摇匀, 在 50 ℃ 环境下水浴 20 min, 然后加入 10% 三氯乙酸(TCA)2 mL。经 4000 r/min 离心 10 min 后, 吸取 2 mL 上清液、2 mL 蒸馏水和 1mL 0.1% $FeCl_3$, 室温下静置 10 min 后测定 700 nm 处的吸光度, 以吸光值表示总还原能力。以 V_C 为标准品。

1.2.9 酶抑制活性

1.2.9.1 α-葡萄糖苷酶的抑制率测定 参考文献方法[28], 将 PVP 配制成 1、3、5、7、9 mg/mL 溶液。试验组加入 PVP 溶液和 1 U/mL 的 α-葡萄糖苷酶溶液各 50 μL; 试验空白组加入 PBS 和 PVP 溶液各 50 μL; 对照组加入 PBS 和 α-葡萄糖苷酶溶液各 50 μL; 空白组加入 100 μL PBS 溶液。37 ℃ 水浴 10 min, 加入 100 μL 6 mmol/L pNPG, 37 ℃ 反应 10 min, 最后加入 1000 μL 1 mol/L 的 Na_2CO_3 终止反应, 400 nm 处测吸光度。抑制率公式:

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{OD_A-OD_a}{OD_B-OD_b}\right)\times 100 \quad \text{式（7）}$$

式中: OD_A: 试验组; OD_a: 试验空白组; OD_B: 对照组; OD_b: 空白组。

1.2.9.2 α-淀粉酶的抑制率测定 参考文献方法[29], 将 PVP 配制成 1、3、5、7、9 mg/mL 溶液。试验组加入 PVP 溶液和 1 U/mL 的 α-淀粉酶溶液各 50 μL; 试验空白组加入 PBS 和 PVP 溶液各 50 μL; 对照组加入 PBS 和 α-葡萄糖苷酶溶液各 50 μL; 空白组加入 100 μL PBS 溶液。37 ℃ 水浴 10 min, 加入 100 μL 1% 淀粉溶液, 37 ℃ 反应 5 min, 加入 500 μL DNS 显色剂, 100 ℃ 水浴 10 min, 定容至 3 mL, 540 nm 测吸光度。抑制率计算公式同上。

1.3 数据处理

所有实验步骤重复三次, 采用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行单因素方差分析, 结果以平均值±标准差表示。利用软件 Origin 2021 进行绘图。采用 Design-Expert 13 软件进行响应面试验设计、回归拟合分析, 并对所建立的二次多项式回归模型进行方差分析与显著性检验。

2 结果与分析

2.1 多糖提取方法优选

以 PVP 得率为评价指标, 比较不同提取方法对 PVP 得率的影响, 结果如图 1 所示。半仿生提取法的 PVP 得率最高(9.87%±0.72%), 显著高于酶辅助提取法(7.54%±0.36%)和传统水提法(5.9%±0.37%)($P<0.05$), 这一差异主要源于不同提取方法的机理差异: 半仿生提取法通过模拟人体消化环境的酸碱交替处理, 能够更充分地破坏植物细胞结构, 从而释放更多的多糖活性成分。相比之下, 酶辅助提取法虽然能有效降解细胞壁, 但由于其使用的纤维素酶、果胶酶等仅针对特定细胞壁组分发挥作用, 且需要严格控制酶解条件, 导致其提取效果受到限制。传统水提法则采用高温长时间处理, 不仅提取效果有限, 还可能导致部分多糖降解。基于上述实验结果和分析, 本研究

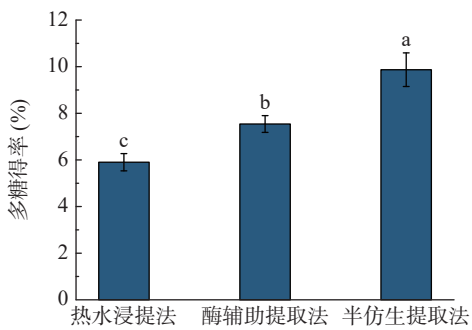


图 1 不同提取方法的 PVP 得率

Fig.1 Yield of PVP by different extraction methods

注: 同一指标各组之间标注不同字母代表差异显著($P<0.05$), 图 2~图 6 同。

最终选择多糖得率最高的半仿生提取法进行后续工艺优化研究。

2.2　单因素实验结果

2.2.1　料液比对多糖得率的影响　由图 2 可得, 料液比对多糖得率的影响呈现先升高后降低的变化趋势。当料液比从 1∶10 增至 1∶30 时, 多糖得率由 5.43% 显著提升至 9.81%±0.23%(P<0.05), 达到最大值。这一变化趋势可归因于溶剂用量的适当增加扩大了料液接触面积, 增强溶液传质动力, 从而促进多糖分子由植物组织向提取液的扩散转移[30]。然而, 当料液比超过 1∶30 后, 多糖得率反而呈现下降趋势。可能是因为在恒定加热条件下, 过量的溶剂会导致更多水溶性杂质溶出, 同时单位体积内多糖浓度降低, 不利于多糖的有效提取。基于上述实验结果和分析, 选择 1∶30 作为 PVP 的最优提取料液比。

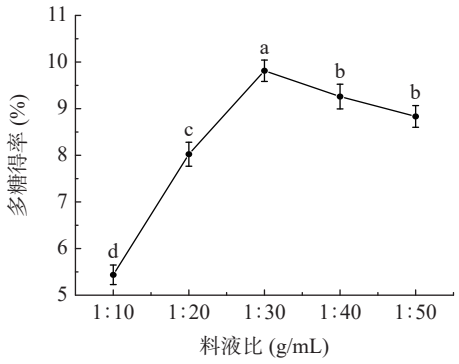


图 2　料液比对 PVP 得率的影响

Fig.2　Effect of solid-liquid ratio on the yield of PVP

2.2.2　提取温度对多糖得率的影响　根据图 3 所示, 在 40~85 ℃ 温度范围内, PVP 得率与提取温度呈现显著的正相关关系。当提取温度达到 85 ℃ 时, 多糖得率达到最高值 10.55%±0.24%。温度升高能够增强糖类分子与水分子之间的扩散作用, 从而促进多糖的溶出。当温度超过一定阈值时, 糖苷键的稳定性会受到破坏, 导致多糖分解和氧化[31−33]。因此选择 85 ℃ 作为 PVP 的最优提取温度。

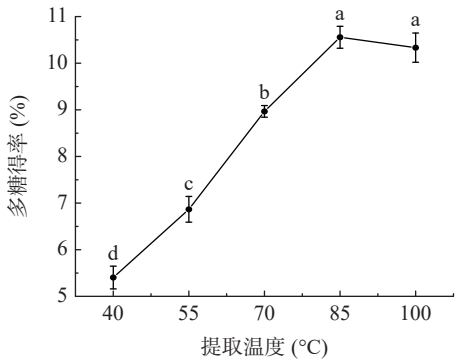


图 3　提取温度对 PVP 得率的影响

Fig.3　Effect of extraction temperature on the yield of PVP

2.2.3　提取时间对多糖得率的影响　如图 4 所示, PVP 得率随提取时间增加呈现先上升后下降的趋势。当提取时间为 120 min 时, 多糖得率达到峰值 11.06%±0.26%。从动力学角度分析, 提取初期, 随着时间延长, PVP 不断从原料中溶出; 当达到 120 min 时, PVP 的溶出接近饱和状态, 继续延长提取时间并不能提高得率。相反, 过长的提取时间可能导致多糖分子发生降解、氧化等副反应, 使得率降低[34]。综上, 选择 120 min 作为 PVP 的最优提取时间进行后续优化。

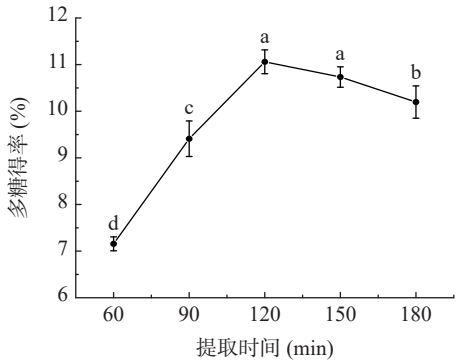


图 4　提取时间对 PVP 得率的影响

Fig.4　Effect of extraction time on the yield of PVP

2.2.4　模拟胃液 pH 对多糖得率的影响　模拟胃液 pH 对 PVP 得率的影响表现为先升高后降低的趋势(图 5)。当在 pH2 时, 得率最高(9.18%±0.17%), 表明适度的酸性环境可通过增强多糖溶解性提高提取效率。然而, 过强的酸性可能导致糖苷键断裂, 从而限制得率的进一步提升[35]。此外, 酸性条件(pH2)更有利于后续纯化工艺中蛋白质的沉淀, 从而简化分离步骤。因此, 在综合考虑提取效率与后续工艺的基础上, 选择 pH2 作为响应面试验的固定水平。后续研究可进一步探讨时间与 pH 的交互作用, 以优化整体提取工艺。

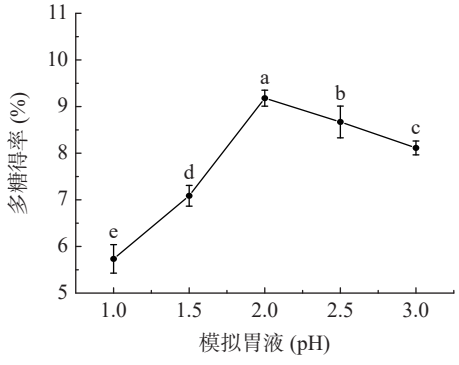


图 5　模拟胃液 pH 对 PVP 得率的影响

Fig.5　Effect of simulated gastric fluid pH on the yield of PVP

2.2.5　模拟肠液 pH 对多糖得率的影响　由图 6 可得, PVP 得率随模拟肠液 pH 增加呈现先上升后下降的趋势。当模拟肠液 pH 为 8.5 时, 多糖得率达到峰值 10.38%±0.25%, 显著高于其他 pH 条件下的得率(P<0.05)。在碱性环境下, 随着 pH 的升高, 夏枯草细胞壁逐渐破裂, 从而促进多糖的溶出。但当 pH 超

过一定范围后，过强的碱性条件可能导致部分多糖分子发生降解或结构破坏[35]，进而导致得率下降，综上，选择 pH8.5 作为响应面试验中模拟肠液的 pH 进行试验。

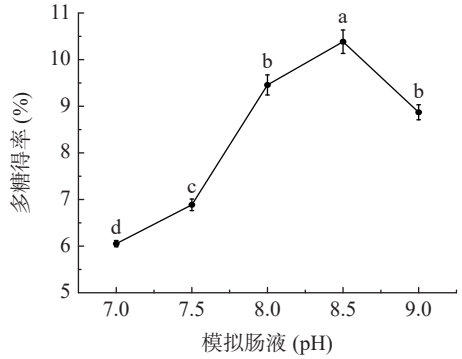


图 6 模拟肠液 pH 对 PVP 得率的影响

Fig.6 Effect of simulated intestinal fluid pH on the yield of PVP

2.3 响应面试验结果

在单因素实验基础上，根据 BBD 试验原理，设计三因素三水平试验，见表 2。数据通过 Design Expert 13 响应面回归分析，得到响应值和各因素间的二次多项式回归方程为：$Y=-20.9636+0.946483A+0.191494B+0.123719C-0.00133333AB-0.0021AC+0.000905556BC-0.0094025A^2-0.00154556B^2-0.000425278C^2$。显著性和多元回归模型方差分析结果见表 3。对回归方程进行方差分析：该模型 $P<0.0001$，表明该拟合方程具有极强的显著性和较好的回归效果。回归系数 $R^2=0.9846$，校正系数 $R^2_{adj}=0.9648$，预测 $R^2_{pre}=0.8973$，变异系数 C.V.=1.90%<10%，说明该模型回归方程有较高的可信度，能够较

表 2 响应面设计试验方案及试验结果

Table 2 Response surface design test scheme and test results

试验号	因素			多糖得率 (%)
	A料液比(g/mL)	B提取温度(℃)	C提取时间(min)	
1	1∶20	70	120	9.35
2	1∶40	70	120	10.21
3	1∶20	100	120	9.77
4	1∶40	100	120	9.83
5	1∶20	85	90	7.87
6	1∶40	85	90	9.35
7	1∶20	85	150	11.42
8	1∶40	85	150	10.38
9	1∶30	70	90	9.85
10	1∶30	100	90	8.86
11	1∶30	70	150	11.02
12	1∶30	100	150	11.66
13	1∶30	85	120	11.35
14	1∶30	85	120	10.82
15	1∶30	85	120	10.94
16	1∶30	85	120	11.19
17	1∶30	85	120	11.09

表 3 回归模型方差分析

Table 3 ANOVA for regression models

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	17.06	9	1.90	49.76	<0.0001	**
A	0.2312	1	0.2312	6.07	0.0432	*
B	0.0120	1	0.0120	0.3154	0.5919	
C	9.14	1	9.14	239.92	<0.0001	**
AB	0.1600	1	0.1600	4.20	0.0796	
AC	1.59	1	1.59	41.68	0.0003	**
BC	0.6642	1	0.6642	17.44	0.0042	**
A^2	3.72	1	3.72	97.74	<0.0001	**
B^2	0.5092	1	0.5092	13.37	0.0081	**
C^2	0.6168	1	0.6168	16.20	0.0050	**
残差	0.2666	7	0.0381			
失拟项	0.0943	3	0.0314	0.7300	0.5856	
纯误差	0.1723	4	0.0431			
总变异	17.32	16				

$R^2=0.9846$ $R^2_{adj}=0.9648$ $R^2_{pre}=0.8973$ Adeq Precision=26.0474 C.V.%=1.90%

注：**表示差异极显著（$P<0.01$）；*表示差异显著（$P<0.05$）。

好地反映真实值。根据 F 检验结果显示，各因素对多糖得率的影响顺序为 C>A>B。一次项 A 对结果的影响程度达到显著水平（$P<0.05$），一次项 C、交互项 AC、BC 以及二次项 A^2、B^2、C^2 的结果对多糖得率的影响程度均达到极显著水平（$P<0.01$）。精密度 ADP=26.0474>4，一般认为当 ADP超过 4.0 时，模型与试验值拟合度匹配较好，响应面二次回归方程的拟合度效果较好，说明该模型适用于预测和分析 PVP 的提取工艺条件。

线的形状可以反映因素间交互作用的强弱，椭圆形与圆形表示交互作用的显著与否[36]，三维图越陡峭，表明相应因素对响应值影响越大[37]。图 7 显示，多糖得率随料液比（A）的增加呈先升后降趋势，而提取温度（B）的影响不明显，方差分析显示 P（AB）>0.05，表明两者交互作用不显著。当提取时间（C）处于低水平或高水平时，多糖得率随料液比（A）的变化趋势不同，且料液比（A）在低水平和高水平时，多糖得率随提取时间（C）的变化规律相似，说明两者交互作用显著。方差分析显示 P（AC）<0.01，影响较大。等高线图显示，当料液比 A 为 1∶20~1∶35 g/mL、提取时间 C 为 130~150 min 时，多糖得率较高。当提取温度（B）处于低水平时，多糖得率随提取时间（C）的增加而逐步升高；当提取温度（B）升至较高水平后，随提取时间（C）的增加，得率仍呈上升趋势，但增幅趋于平缓，两者表现出显著的交互作用。综上所述，交互项 AC 和 BC 对多糖得率的影响显著，而 AB 的影响较小。交互项的影响顺序为 AC>BC>AB。

2.3.1 模型验证 经过 Design-Expert 13 软件计算得到优化后各因素参数值为料液比 1∶29.549 g/mL、提取温度 83.512 ℃、提取时间 148.904 min，预测在此条件下多糖得率为 11.731%。实际操作中适当调整为料液比 1∶30 g/mL、提取温度 85 ℃、提取时间 150 min，进行三次复性实验，得到平均多糖得率为

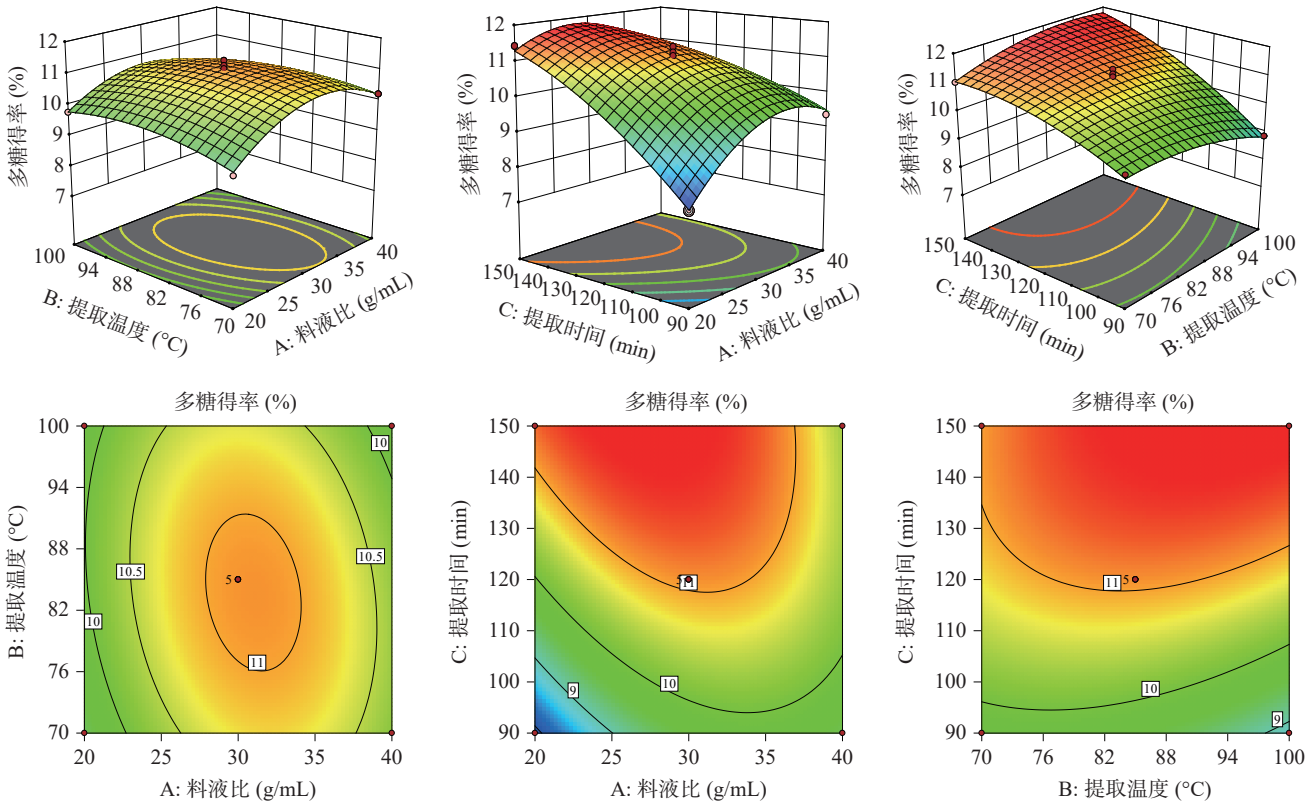


图 7　料液比、提取温度和提取时间两两交互作用对多糖得率的影响

Fig.7　Effects of two-by-two interaction of material-liquid ratio, extraction temperature, and extraction time on polysaccharide yield

11.69%±0.12%，与预测值基本一致，与熊双丽等[38]通过水提醇沉得到的夏枯草多糖得率（5.39%）和张华等[39]通过微波提取得到的夏枯草多糖得率（5.28%）比较，本试验得到夏枯草多糖得率明显提高。

2.4　单糖组成分析

如图 8 可得，夏枯草多糖由古洛糖醛酸、甘露糖醛酸、甘露糖、氨基葡萄糖、核糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、氨基半乳糖、葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖、岩藻糖构成，其摩尔百分比（%）为 0.14、0.2、1.58、0.32、0.45、8.89、1.16、41.81、0.43、17.53、6.85、14.32、7.21、0.84。即夏枯草多糖主要由单糖鼠李糖、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、木糖及阿拉伯糖构成。与金辰光[40]的研究结果基本一致。由表 4 可得，半乳糖醛酸含量最高为 41.81%，其次为葡萄糖和木糖为 17.53%、14.32%。

2.5　分子量的测定

如图 9 所示，夏枯草多糖的 GPC 测试结果只有一个单峰，无明显的杂质峰出现。对峰进行积分计算，得到样品数均分子量（Mn）为 27811 Da，重均分子量（Mw）为 52180 Da。数均分子量和重均分子量反映了夏枯草多糖中分子大小、分子数量和分子量的分布情况。重均分子量（Mw）与数均分子量（Mn）的比值，分散系数（PDI）为 1.88，小于 2，表明多糖样品分子量分布较窄，分子质量较为一致，结果符合预期。

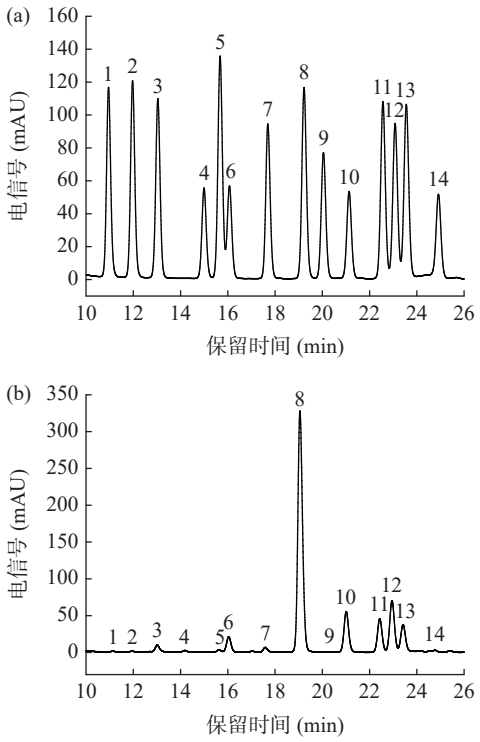


图 8　单糖混合标品（a）及夏枯草多糖（b）的离子色谱图

Fig.8　Ion chromatograms of the mixed standard products (a) and PVP (b)

注：1.L-古洛糖醛酸；2.D-甘露糖醛酸；3.Man；4.GlcN；5.Rib；6.Rham；7.GlcUA；8.GalUA；9.GalN；10.Glc；11.Gla；12.Xyl；13.Ara；14.Fuc。

表 4 夏枯草多糖液相色谱保留时间及单糖组成摩尔百分比

Table 4 Monosaccharide composition and liquid chromatography retention time of PVP

还原性单糖	标准曲线	相关性	保留时间(min)	摩尔百分比(%)
L-古洛糖醛酸	y=9.20509 x+15.21008	0.99463	11.14	0.14
D-甘露糖醛酸	y=8.51694x+18.34239	0.99401	11.94	0.20
D-甘露糖	y=5.23410x+13.12779	0.99061	13.01	1.58
D-氨基葡萄糖	y=11.70794x+20.33993	0.99466	14.79	0.32
D-核糖	y=5.34370x+8.28668	0.99596	15.63	0.45
L-鼠李糖	y=12.27376x+22.4697	0.99397	16.04	8.89
D-葡萄糖醛酸	y=6.88387x+12.38855	0.99423	17.58	1.16
D-半乳糖醛酸	y=12.55296x+17.47096	0.99631	19.05	41.81
D-氨基半乳糖	y=8.76168x+17.78057	0.99458	20.37	0.43
D-葡萄糖	y=11.26089x+1.49701	0.99446	21.01	17.53
D-半乳糖	y=7.61458x+15.8602	0.99424	22.43	6.85
D-木糖	y=6.83493x+14.35306	0.99355	22.95	14.32
L-阿拉伯糖	y=6.01494x+10.45809	0.99548	23.42	7.21
L-岩藻糖	y=5.13040x+13.73783	0.99219	24.76	0.84

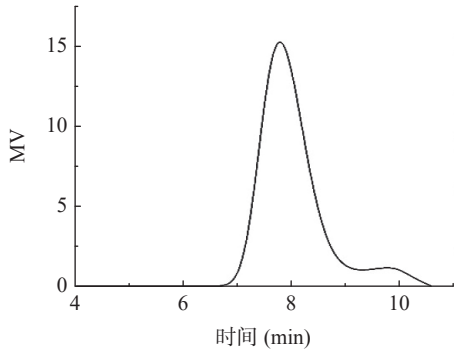


图 9 夏枯草多糖凝胶渗透色谱图

Fig.9 Gel permeation chromatograms of PVP

2.6 紫外吸收光谱分析

260 nm 处为核酸吸收峰，280 nm 处为蛋白吸收峰。如图 10 所示，在波长 200~400 nm 范围内夏枯草多糖吸光值整体呈下降趋势。260 nm 以及 280 nm 处特征吸收峰不明显，表明多糖样品基本不含核酸和蛋白质等杂质。

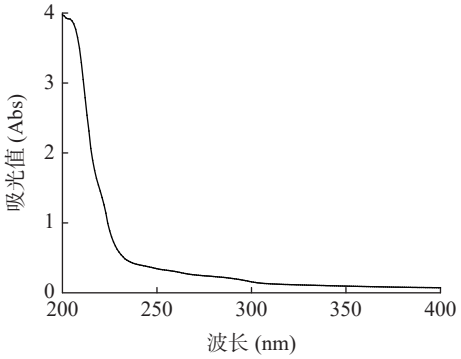


图 10 夏枯草多糖的紫外扫描图

Fig.10 UV scan image of PVP

2.7 红外光谱分析

红外光谱分析可用于确定多糖的单糖种类、糖苷键连接方式及官能团结构。夏枯草多糖的红外光谱图如图 11 所示：3417 cm^{-1} 处的宽强吸收峰为 O-H 伸缩振动，2937 cm^{-1} 处为 C-H 伸缩振动，表明存在有机物质[41]；1744 cm^{-1} 处的 C=O 伸缩振动峰提示含糖醛酸；1617 cm^{-1} 处为 O-H 弯曲振动，1417 cm^{-1} 处为 C-H 弯曲振动，可能来自甲基基团；1250 cm^{-1} 处为 C-O 伸缩振动，1099 cm^{-1} 处为 C-O-C 伸缩振动，表明存在醚键[42]；894 cm^{-1} 处可能是 β 构型糖苷键的特征吸收峰，这种吸收峰被认为是与糖苷键的 β 构型相关的特征之一；767 cm^{-1} 处可能与 C-C 骨架振动有关。综上，夏枯草多糖含有羟基、羰基、甲基、C-O 键、C-O-C 键、α-构型和 β 构型糖苷键等官能团，表明其结构复杂，为进一步研究其化学性质及生物活性提供了重要信息。

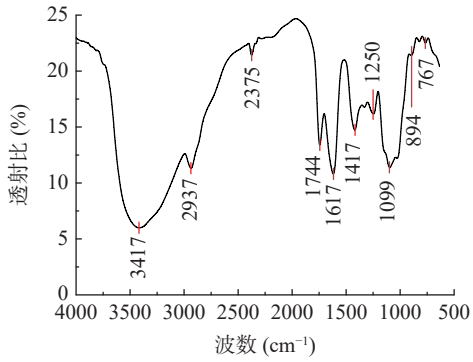


图 11 夏枯草多糖红外扫描图

Fig.11 Infrared scan diagram of PVP

2.8 体外抗氧化活性研究

2.8.1 DPPH·清除能力分析 DPPH 比色法基于自由基清除剂提供电子与 DPPH 自由基配对，使其紫色褪去导致 517nm 处吸光度降低，该降低程度与自由基清除能力成正比[43]。由图 12 可知，随着 PVP 质量浓度的增大，对 DPPH·清除能力逐渐增强，具有明显的剂量依赖性。当浓度达到最大实验浓度 0.7 mg/mL 时，PVP 的清除率为 87.36%，与 V_C 清除率相差不大。计算得到，阳性对照 V_C 和 PVP 对

DPPH·的 IC_{50} 值分别为 0.023 mg/mL 和 0.049 mg/mL，PVP 的清除效果较强但略逊于 V_C，与文献 [10] 报道的酶解多糖（IC_{50} 0.062 mg/mL）和水解多糖（IC_{50} 0.538 mg/mL）相比，本研究中 PVP 的 IC_{50} 值显著更低，抗氧化效率更高。

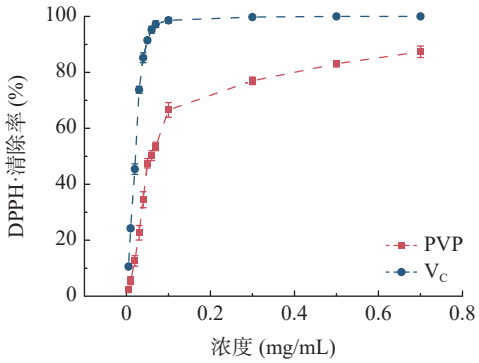


图 12　DPPH·清除能力

Fig.12　Scavenging capacity of DPPH·

2.8.2　$ABTS^+$·清除能力分析　$ABTS^+$·清除法的原理是抗氧化剂能还原蓝绿色的 $ABTS^+$·使其褪色，通过测定吸光度变化来评价样品的抗氧化能力[44]。图 13 为 PVP 清除 $ABTS^+$·能力，PVP 对 $ABTS^+$·清除率初期快速上升，随后逐渐趋于饱和，最高清除率达 95.44%，对 $ABTS^+$·的清除效果与 PVP 浓度呈剂量依赖性。当浓度达到 0.3 mg/mL 时，清除率可达 86.83%，接近阳性对照的水平，通过剂量-效应曲线分析得到 IC_{50} 值为 0.092 mg/mL。与席与斌等[45] 醇提夏枯草残渣制备的夏枯草多糖对 $ABTS^+$·清除率的结果（IC_{50} 0.231 mg/mL）相比，效果较好。

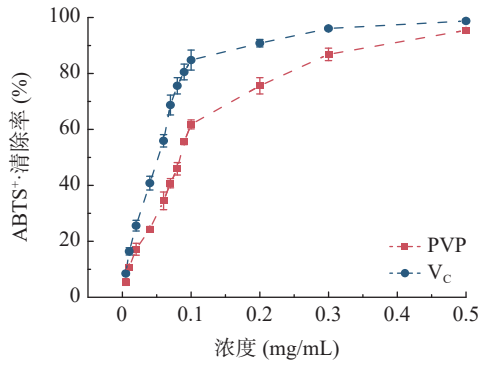


图 13　$ABTS^+$·清除能力

Fig.13　Scavenging capacity of $ABTS^+$·

2.8.3　·OH 清除能力分析　Fenton 反应（$Fe^{2+}+H_2O_2$）产生·OH，利用抗氧化剂与显色探针水杨酸竞争结合·OH 的特性，通过测定吸光度变化来定量样品的清除能力[46]。由图 14 可得，在一定浓度范围内随着 PVP 浓度的增大，对·OH 的清除率呈逐渐上升的趋势。当浓度为 1.0 mg/mL 时，清除率为 84.02%，经计算，PVP 和 V_C 的 IC_{50} 值分别为 0.085 mg/mL 和 0.053 mg/mL，实验结果优于施晓丹等[47] 用 Fenton 试剂测得的夏枯草多糖的 IC_{50} 值 13.24 mg/mL。

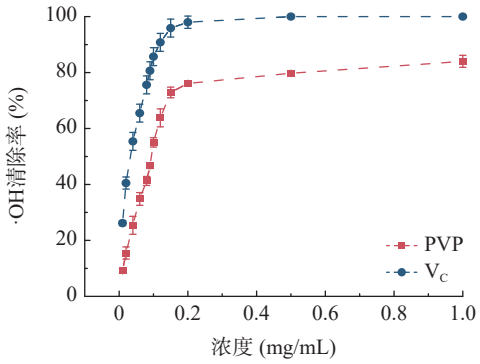


图 14　·OH 清除能力

Fig.14　Scavenging capacity of ·OH

2.8.4　O_2^-·清除能力分析　O_2^-·作为生物体内半衰期最长的自由基，常作为氧化链式反应的起始因子，催化生成·OH 等更高活性氧物种，加剧机体氧化损伤，邻苯三酚在碱性环境中通过自氧化作用释放 O_2^-·，同时降解产生有色中间体[48]，添加抗氧化剂可清除 O_2^-·从而抑制显色，通过测定 560 nm 吸光度变化定量清除能力。由图 15 可得，PVP 对 O_2^-·的清除能力呈现显著的浓度依赖性。在 1.1 mg/mL 浓度下，其清除率高达 88.86%，IC_{50} 值为 0.062 mg/mL。尽管本研究所得样品的抗氧化活性与阳性对照 V_C（IC_{50}= 0.053 mg/mL）相比仍存在一定差距，但其对超氧阴离子自由基（O_2^-·）的清除能力已显著优于施晓丹等[47] 采用水提醇沉法制备的夏枯草多糖（IC_{50}= 1.33 mg/mL）。

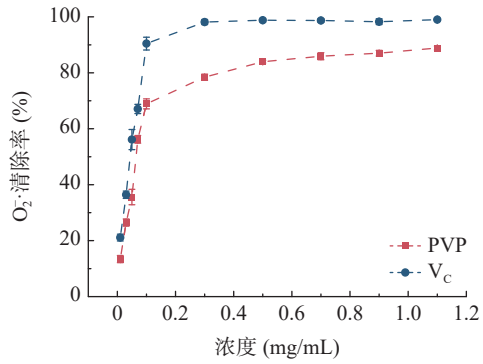


图 15　O_2^-·清除能力

Fig.15　Scavenging capacity of O_2^-·

2.8.5　总还原能力分析　通过物质将氧化态探针，

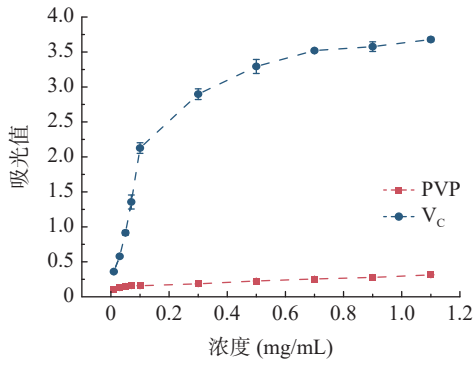


图 16　总还原能力

Fig.16　Total reducing power

如铁氰化钾中的 Fe^{3+}还原为还原态 Fe^{2+}，生成有色产物普鲁士蓝[49]，测定吸光值，吸光值越高表明样品电子供给能力越强，综合抗氧化能力越优。试验结果如图 16 所示，PVP 的总还原能力随着浓度的增加而逐渐增强，呈明显的剂量效应关系。当浓度为 1.1 mg/mL 时，总还原能力达到最大值 0.314，是同等浓度下 V_C 的 11.72%，与金辰光[40] 的研究结果一致。

2.9 体外酶抑制活性研究

2.9.1 *α*-葡萄糖苷酶活性抑制分析 如图 17 所示，PVP 对 *α*-葡萄糖苷酶的抑制活性表现出显著的浓度依赖性。结果显示，当 PVP 浓度从 1 mg/mL 增加到 9 mg/mL 时，其抑制率呈现明显的剂量效应关系，在最高测试浓度（9 mg/mL）时抑制率高达 93.5%。经计算，PVP 的 IC_{50} 值为 1.72 mg/mL，显示出较强的抑制活性。与吴慧萍等[50] 的实验中，夏枯草提取物（在 9 mg/mL 下抑制率为 91.7%）相比，表现出更优的抑制效果。

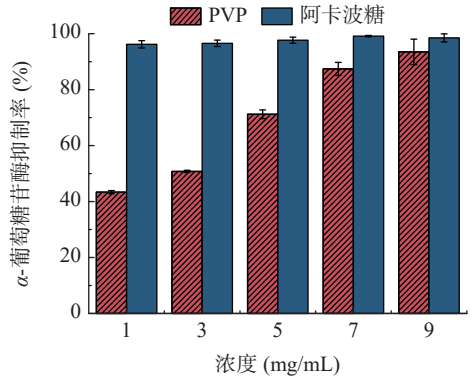


图 17 *α*-葡萄糖苷酶抑制率

Fig.17 Inhibitory rate on *α*-glucosidase

2.9.2 *α*-淀粉酶活性抑制分析 PVP 对 *α*-淀粉酶的抑制活性呈现明显的浓度依赖性，如图 18 所示。实验结果表明，随着 PVP 浓度的增加，其对 *α*-淀粉酶的抑制能力显著增强。当 PVP 浓度达到 9 mg/mL 时，抑制率为 58.25%，其 IC_{50} 值为 8.43 mg/mL。与庄玲玲等[51] 的实验相比，夏枯草水提物（在 9 mg/mL 下，抑制率 45.71%）相比，表现出更强的抑制能力，抑制效率提升约 28%。

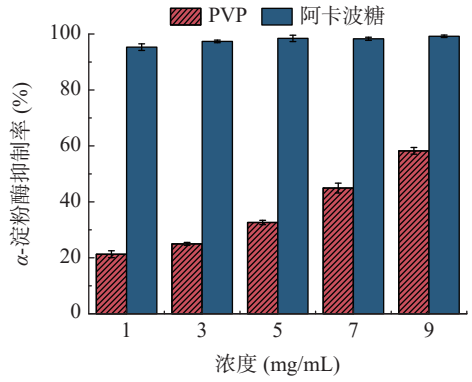


图 18 *α*-淀粉酶抑制率

Fig.18 Inhibitory rate on *α*-amylase

3 结论

本研究结果表明，半仿生提取法（9.87%±0.72%）较热水浸提和酶辅助提取法能更高效地提取夏枯草多糖。经响应面法优化后，在料液比 1∶30 g/mL、85 ℃、150 min 条件下，采用模拟胃肠液（pH2~pH8.5）依次提取，多糖得率提升至 11.69%±0.12%。结构表征显示该多糖分子量分布为 27811~52180 Da，主要由 6 种单糖组成并含 *α*/*β*-糖苷键。体外活性研究表明，该多糖具有显著的抗氧化能力（DPPH、$ABTS^{+\cdot}$，清除率峰值分别为 87.36% 和 95.44%，IC_{50}<0.1 mg/mL）和降血糖活性（*α*-葡萄糖苷酶抑制率最高为 93.5%，IC_{50} 1.72 mg/mL、*α*-淀粉酶抑制率最高为 58.25%，IC_{50} 8.43 mg/mL）。这些发现为夏枯草多糖在功能性食品中的应用提供了理论依据，后续研究可进一步探讨其构效关系及作用机制。

© The Author(s) 2026. 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] 简美玲, 郑基焕, 毛润乾. 夏枯草药材资源开发研究[J]. 广东农业科学, 2011, 38(5): 109−111. [JIAN Meiling, ZHENG Jihuan, MAO Runqian. Research on the development of *Prunella vulgaris* medicinal resources[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(5): 109−111.]

[2] 赵二劳, 刘乐, 范建凤, 等. 夏枯草多糖提取纯化及其药理作用研究进展[J]. 生物技术通报, 2020, 36(4): 159−163. [ZHAO Erlao, LIU Le, FAN Jianfeng, et al. Research progress on the extraction, purification and pharmacological effects of polysaccharides from *Prunella vulgarism*[J]. Biotechnology Bulletin, 2020, 36(4): 159−163.]

[3] 尹震花, 张娟娟, 郭庆丰, 等. 夏枯草多糖的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(18): 334−339,347. [YIN Zhenhua, ZHANG Juanjuan, GUO Qingfeng, et al. Research progress in polysaccharides of *Prunella vulgaris* L[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(18): 334−339,347.]

[4] 杨慧珍, 李映, 葛喜珍. 夏至草、益母草及夏枯草的化学成分及药理作用研究进展[J]. 北京联合大学学报(自然科学版), 2021, 35(2): 85−92. [YANG Huizhen, LI Ying, GE Xizhen. Research progress on chemical components and pharmacological effects of *Lagopsis supina*, *Leonurus japonicus* and *Prunella vulgaris*[J]. Journal of Beijing Union University (Natural Sciences), 2021, 35(2): 85−92.]

[5] BAI Yubing, XIA Bohou, XIE Wenjian, et al. Phytochemistry and pharmacological activities of the genus *Prunella*[J]. Food Chemistry, 2016, 204: 483−496.

[6] 徐华影, 金妍. 夏枯草抗肿瘤转移活性成分及其作用机制研究[J]. 中药新药与临床药理, 2015, 26(3): 351−355. [XU Huaying, JIN Yan. Study on anti-tumor constituents of Spica Prunellae and their anti-tumor activity[J]. Traditional Chinese Drug Research and Clinical Pharmacology, 2015, 26(3): 351−355.]

[7] ZENG Min, QIN Xinyi, YI Tao, et al. Integration of pharmacodynamics, metabolomics and network pharmacology to elucidate the effect of *Prunella vulgaris* seed oil in the treatment of hyperlipidemia[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2024, 17(2): 105486.

[8] 王艳杰, 郝嘉平, 代巧妹, 等. 中药夏枯草药理作用及其分子

机制研究进展[J]. 中医药导报, 2022, 28(2): 118−122. [WANG Yanjie, HAO Jiaping, DAI Qiaomei, et al. Research progress on pharmacological action and molecular mechanism of *Prunella vulgaris* L[J]. Guiding Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2022, 28(2): 118−122.]

[9] 张德华. 夏枯草多糖的分离纯化与抗氧化活性研究[J]. 云南植物研究, 2006, 28(4): 410−414. [ZHANG Dehua. Isolation, purification and antioxidant activity of the polysaccharide of *Prunella vugaris* (Labiatae)[J]. Acta Botanica Yunnanica, 2006, 28(4): 410−414.]

[10] 赵玉荣, 许金玉, 侯宪邦, 等. 酶解法提取夏枯草中多糖的工艺研究[J]. 药品评价, 2024, 21(8): 946−950. [ZHAO Yurong, XU Jinyu, HOU Xianbang, et al. Study on the extraction process of polysaccharide from *Prunellae Spica* by enzymatic hydrolysis[J]. Drug Evaluation, 2024, 21(8): 946−950.]

[11] LI Chao, FU Xiong, HUANG Qiang, et al. Ultrasonic extraction and structural identification of polysaccharides from *Prunella vulgaris* and its antioxidant and antiproliferative activities[J]. European Food Research and Technology, 2015, 240(1): 49−60.

[12] 范保瑞, 马逢伯, 刘卉, 等. 半仿生法提取夏枯草中熊果酸和齐墩果酸[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2019, 39(6): 605−610. [FAN Baorui, MA Fengbo, LIU Hui, et al. Study on the extraction of ursolic acid and oleanolic acid of *Prunella vulgaris* by semi-bionic method[J]. Journal of Hebei University (Natural Science Edition), 2019, 39(6): 605−610.]

[13] LI Lan, XIE Jingchen, ZHANG Zhimin, et al. Recent advances in medicinal and edible homologous plant polysaccharides: Preparation, structure and prevention and treatment of diabetes[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 258 (Pt 2): 128873.

[14] 李成华, 薛长松, 张伟豪. 半仿生法提取酸浆茎活性成分及抗氧化性规律[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2020, 41(5): 57−61. [LI Chenghua, XUE Changsong, ZHANG Weihao. Use the method of semi-bionic to extract active ingredients from stem of *Physali alkekengi* L. and to study the antioxidant activity[J]. Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition), 2020, 41(5): 57−61.]

[15] YAN Xinlei, MIAO Jing, ZHANG Bao, et al. Study on semi-bionic extraction of *Astragalus* polysaccharide and its anti-aging activity *in vivo*[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1201919.

[16] 张兆旺, 孙秀梅. 半仿生提取法"的特点与应用[J]. 世界科学技术, 2000(1): 35−38,55. [ZHANG Zhaowang, SUN Xiumei. Characteristics and application of semi-bionic extraction (SBE)[J]. World Science and Technology/Modernization of Chinese Materia Medica, 2000(1): 35−38,55.]

[17] 权彦, 何建军, 刘靖丽, 等. 水提醇沉法提取黄芪中黄芪多糖的工艺优化及含量测定[J]. 当代化工, 2018, 47(7): 1374−1376. [QUAN Yan, HE Jianjun, LIU Jingli, et al. Optimization of extraction process of *Astragalus* polysaccharides from *Astragalus membranaceus* by water extraction and ethanol precipitation and determination of *Astragalus* polysaccharides content[J]. Contemporary Chemical Industry, 2018, 47(7): 1374−1376.]

[18] 周亚敏. 夏枯草多糖制备工艺、结构表征及其生物活性研究[D]. 长沙: 湖南中医药大学, 2017. [ZHOU Yamin. Preparation technology and characterization of polysaccharides from *Prunella vulgaris* L. and its biological activity[D]. Changsha: Hunan University of Chinese Medicine, 2017.]

[19] ZHU Zhenyuan, DONG Fengying, LIU Xiaocui, et al. Effects of extraction methods on the yield, chemical structure and antitumor activity of polysaccharides from *Cordyceps gunnii* mycelia [J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 140: 461−471.

[20] 王波. 灵芝多糖提取、分离纯化、表征及体外抗氧化活性探究[D]. 郑州: 郑州大学, 2016. [WANG Bo. Extraction, isolation, purification, characterization and *in vitro* antioxidant activity of polysaccharidefrom *Ganoderma lucidum*[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.]

[21] 何坤明, 王国锭, 白新鹏, 等. 山茱萸籽多糖分离纯化、结构表征及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2021, 42(19): 81−88. [HE Kunming, WANG Guoding, BAI Xinpeng, et al. Isolation, purification, structure characterization and antioxidant activity of *Cornus officinalis* seed polysaccharides[J]. Food Science, 2021, 42(19): 81−88.]

[22] 黄春花. 基于凝胶渗透色谱法的枸杞多糖含量测定[J]. 化学与粘合, 2023, 45(4): 376−380. [HUANG Chunhua. Content determination of *Lycium barbarum* polysaccharide based on gel permeation chromatography[J]. Chemistry and Adhesion, 2023, 45(4): 376−380.]

[23] 刘春阳, 白金波, 杨尚青, 等. 枳椇子多糖的酸提取工艺优化及其理化性质与抗氧化活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 148−156. [LIU Chunyang, BAI Jinbo, YANG Shangqing, et al. Optimization of acid extraction process for polysaccharide from *Hovenia dulcis* seed and analysis of its antioxidant activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(9): 148−156.]

[24] 周元龙, 宋年年, 易宇欣, 等. 不同提取方法对罗布麻多糖理化性质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 40−48. [ZHOU Yuanlong, SONG Niannian, YI Yuxin, et al. Effects of different extraction methods on physicochemical properties and antioxidant activity of *Apocynum venetum* polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 40−48.]

[25] 韩秋菊, 王晓玲, 王菲, 等. 薤白多糖的提取及体外抗氧化活性研究[J]. 应用化工, 2018, 47(8): 1680−1683. [HAN Qiuju, WANG Xiaoling, WANG Fei, et al. Extraction of polysaccharide from *Allium macrostemon* Bunge and their antioxidant activity *in vitro*[J]. Applied Chemical Industry, 2018, 47(8): 1680−1683.]

[26] XU Renjie, YE Hong, SUN Yi, et al. Preparation, preliminary characterization, antioxidant, hepatoprotective and antitumor activities of polysaccharides from the flower of tea plant (*Camellia sinensis*)[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(7): 2473−2480.

[27] 王萍, 郭金英, 王立博, 等. 香菜多糖的抗氧化及降血糖活性研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(1): 171−176. [WANG Ping, GUO Jinying, WANG Libo, et al. Antioxidant and hypoglycemic activity of polysaccharide extracted from cilantro[J]. China Food Additives, 2024, 35(1): 171−176.]

[28] 侯润庚, 丁骁, 杨力颖, 等. 西印度醋栗枝叶提取物的 α-葡萄糖苷酶抑制活性及安全性评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 252−259. [HOU Rungeng, DING Xiao, YANG Liying, et al. α-Glucosidase inhibitory activity and safety evaluation of branch and leaf extracts of *Phyllanthus acidus*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 252−259.]

[29] 潘玥. 蓝莓叶多酚提取物对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的抑制作用及其在低 GI 米糕中应用研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021. [PAN Yue. Inhibitory effect of blueberry leaf polyphenols on α-amylase and α-glucosidase and its application in low GI rice cake[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.]

[30] BENDAHOU A, DUFRESNE A, KADDAMI H, et al. Isolation and structural characterization of hemicelluloses from palm of *Phoenix dactylifera* L[J]. Carbohydrate Polymers, 2007, 68(3): 601−608.

[31] 玉澜, 肖云, 陈燕萌, 等. Box-Behnken 响应面优化超声波辅助双水相提取枇杷叶多糖及其抗氧化活性研究[J]. 饲料研究, 2024, 47(7): 94−99. [YU Lan, XIAO Yun, CHEN Yanmeng, et al.

Ultrasonic-assisted aqueous two-phase extraction of polysaccharide from loquat leaves by Box-Behnken response surface optimization and its antioxidant activity[J]. Feed Research, 2024, 47(7): 94−99.]
[32] 刘永玲, 刘向炼, 陶欣, 等. 八月瓜果皮多糖提取工艺优化及其体外抗氧化、降糖活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 17−24. [LIU Yongling, LIU Xianglian, TAO Xin, et al. Optimization of polysaccharides extraction from the peels of *Akebia trifoliate* and evaluation of its *in vitro* antioxidant and hypoglycemic activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 17−24.]
[33] 赵小亮, 牟翩, 张晶, 等. 苦参多糖的提取工艺优化及体外抗氧化、降血脂活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 212−220. [ZHAO Xiaoliang, MOU He, ZHANG Jing, et al. Optimization of the extraction process and *in vitro* antioxidant and hypolipidemic activities of polysaccharides from *Sophora flavescens*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 212−220.]
[34] 闭爱艳, 韦啟球, 裴世成, 等. 星点设计-效应面法优化扛板归多糖超声辅助提取工艺[J]. 食品工业, 2024, 45(4): 47−52. [BI Aiyan, WEI Qiqiu, PEI Shicheng, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Polygonum perfoliatum* L. by central composite design-response surface methodology[J]. The Food Industry, 2024, 45(4): 47−52.]
[35] 卯明娟, 陆源添, 洪鹏, 等. 超声波-半仿生法提取瓦尼桑黄子实体多糖的工艺优化[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(4): 113−120. [MAO Mingjuan, LU Yuantian, HONG Peng, et al. Optimization of ultrasonic-assisted semi-bionic extraction of polysaccha-rides from *Sanghuangporus vaninii* fruit body[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2025, 38(4): 113−120.]
[36] 胡云飞, 周德, 曾青兰, 等. 天麻多糖酶解工艺优化、结构表征及其抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(4): 205−214. [HU Yunfei, ZHOU De, ZENG Qinglan, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis process, structural characterization and antioxidant activity analysis of *Gastrodia elata* polysaccharide[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(4): 205−214.]
[37] 王天怡, 张庆芬, 黄磊磊, 等. 白丁香花多糖的提取、纯化及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 233−243. [WANG Tianyi, ZHANG Qingfen, HUANG Leilei, et al. Extraction, purification and antioxidant activity of polysaccharide from white lilacs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 233−243.]
[38] 熊双丽, 李安林. 夏枯草多糖的清除自由基及抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(11): 61−64. [XIONG Shuangli, LI Anlin. Free radical-scavenging and antioxidant activity of polysaccharide from *Prunella vulgaris* Linn[J]. Food Research and Development, 2010, 31(11): 61−64.]
[39] 张华, 郑建东, 马田林, 等. 响应面法优化微波提取夏枯草多糖及其抗氧化活性[J]. 化学研究与应用, 2020, 32(2): 264−272. [ZHANG Hua, ZHENG Jiandong, MA Tianlin, et al. Response surface methodology for optimization of microwave extraction of polysaccharide from *Prunella vulgaris* linn and their antioxidant activity[J]. Chemical Research and Application, 2020, 32(2): 264−272.]
[40] 金辰光. 夏枯草、橘皮中多糖分离纯化、结构及抗氧化活性研究[D]. 长春: 长春师范大学, 2016. [JIN Chenguang. The isolation, purification, structure and antioxidant activity of polysaccharides from *Prunella vulgaris* Linn and tangerine peel[D]. Changchun: Changchun Normal University, 2016.]
[41] 张慧慧, 李灿, 刘会平, 等. 肉桂多糖的提取纯化及体外抗氧化和降血糖活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(7): 15−24. [ZHANG Huihui, LI Can, LIU Huiping, et al. Extraction and purification of *Cinnamomum cassia* polysaccharides and its antioxidant and hypoglycemic activities *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(7): 15−24.]
[42] HUANG Fei, ZHANG Ruifen, DONG Lihong, et al. Antioxidant and antiproliferative activities of polysaccharide fractions from *Litchi* pulp[J]. Food & Function, 2015, 6(8): 2598−2606.
[43] 熊双丽, 卢飞, 史敏娟, 等. DPPH 自由基清除活性评价方法在抗氧化剂筛选中的研究进展[J]. 食品工业科技, 2012, 33(8): 380−383. [XIONG Shuangli, LU Fei, SHI Minjuan, et al. Advanement of evaluation methods about DPPH radical scavenging activity in screening antioxidant[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(8): 380−383.]
[44] 朱玉昌, 焦必宁. ABTS 法体外测定果蔬类总抗氧化能力的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2005, 31(8): 77−80. [ZHU Yuchang, JIAO Bining. Research progress on ABTS assay in determination of TAA in fruits and vegetables *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2005, 31(8): 77−80.]
[45] 席与斌, 吴允孚, 陈刚. 夏枯草多糖的分离及抗氧化活性研究[J]. 广东药学院学报, 2010, 26(6): 594−598. [XI Yubin, WU Yunfu, CHEN Gang. Study on isolation and anti-oxidant activity of the polysaccharide from *Prunella vulgaris* L[J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical College, 2010, 26(6): 594−598.]
[46] 李贵荣, 杨胜圆. 党参多糖的提取及其对活性氧自由基的清除作用[J]. 化学世界, 2001, 42(8): 421−422,434. [LI Guirong, YANG Shengyuan. Extraction of *Codonopsis pilosula* polysaccharide and its effects of anti-active oxygen free radicals[J]. Huaxue Shijie (Chemical World), 2001, 42(8): 421−422,434.]
[47] 施晓丹, 张霞, 殷军艺, 等. 夏枯草水溶性多糖体外抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(6): 1596−1601. [SHI Xiaodan, ZHANG Xia, YIN Junyi, et al. Antioxidant activities of soluble polysaccharides from *Prunella vulgaris* Linn[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2014, 5(6): 1596−1601.]
[48] 赵琳静, 李洪森, 吴晓英, 等. 板蓝根抗氧化成分的提取及活性分析[J]. 食品工业科技, 2014, 35(10): 195−197,201. [ZHAO Linjing, LI Hongsen, WU Xiaoying, et al. Extraction of antioxidant components from Indigowoad Root and evaluation their antioxidation *in vitro*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(10): 195−197,201.]
[49] 周方, 赵宏飞, 杨洋, 等. 高丛蓝莓品种花青素含量与抗氧化能力比较[J]. 西南林业大学学报, 2011, 31(5): 53−57. [ZHOU Fang, ZHAO Hongfei, YANG Yang, et al. Comparitive study on anthocyanin level and antioxidant activity among the tall-stemmed blueberry cultivars[J]. Journal of Southwest Forestry University, 2011, 31(5): 53−57.]
[50] 吴慧平, 张喆, 丁婷, 等. 夏枯草提取物对 α-葡萄糖苷酶抑制作用研究[J]. 南京中医药大学学报, 2009, 25(5): 361−363. [WU Huiping, ZHANG Zhe, DING Ting, et al. Inhibiting effect of *Spica Prunellae vulgaris* extract on α-glucosidase[J]. Journal of Nanjing University of Traditional Chinese Medicine, 2009, 25(5): 361−363.]
[51] 庄玲玲, 丁婷, 吴慧平. 夏枯草提取物对 α-淀粉酶抑制作用的初步研究[J]. 现代中西医结合杂志, 2009, 18(19): 2243−2245. [ZHUANG Lingling, DING Ting, WU Huiping. Preliminary study on inhibitory effect of extract from *Prunella vulgaris* L. on α-amylase[J]. Modern Journal of Integrated Traditional Chinese and Western Medicine, 2009, 18(19): 2243−2245.]