

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2025.80082

超声辅助离子液体法提取地涌金莲多糖 及体外活性、单糖成分研究

段秋虹¹ 贾庆超²

(1. 河南工业贸易职业学院粮食工程学院, 河南 郑州 451191;

2. 郑州科技学院食品科学与工程学院, 河南 郑州 450000)

摘要: [目的] 以地涌金莲为原料, 研究其多糖提取工艺及体外活性。[方法] 采用超声辅助离子液体为提取法, 以多糖提取量为指标, 运用单因素和响应面优化法研究多糖的提取工艺, 并对多糖的体外抗氧化性、单糖成分、胰脂肪酶和 α -淀粉酶抑制活性进行研究。[结果] 地涌金莲多糖最佳提取工艺为: 提取功率 200 W, 离子液体体积 1.80 mL, 超声时间 32 min, 料液比 1:36 (g/mL), 超声温度 37 °C, 多糖提取量为 (32.20 ± 0.68) mg/g。HPLC 对纯化后多糖测定表明, 多糖的单糖成分包括甘露糖、核糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、木糖和阿拉伯糖, $n_{\text{甘露糖}}:n_{\text{核糖}}:n_{\text{鼠李糖}}:n_{\text{葡萄糖醛酸}}:n_{\text{半乳糖醛酸}}:n_{\text{葡萄糖}}:n_{\text{半乳糖}}:n_{\text{木糖}}:n_{\text{阿拉伯糖}} = 1.26:6.37:4.29:0.86:0.72:22.35:0.21:2.46:0.18$ 。多糖对 DPPH $\cdot$ 、 $\cdot$ OH、ABTS $^{+}$ 、 $O_2^{\cdot-}$ 清除率和胰脂肪酶、 α -淀粉酶的抑制率随着质量浓度的增大而增大。当多糖质量浓度为 5.0 mg/mL 时, 对 4 种自由基清除率分别为 78.60%, 67.70%, 79.85%, 69.67%, IC_{50} 值表明多糖对 4 种自由基清除能力强弱次序为 DPPH $\cdot$ > ABTS $^{+}$ > $\cdot$ OH > $O_2^{\cdot-}$, 当多糖质量浓度为 10 mg/mL, 多糖对胰脂肪酶和 α -淀粉酶的抑制率分别为 67.2%, 58.3%。[结论] 超声辅助离子液体法提取地涌金莲多糖, 具有提取量高、体外活性好等优点, 该方法在天然产物活性物质提取中具有良好的应用前景及较大的应用潜力。

关键词: 超声辅助; 离子液体; 地涌金莲; 多糖; 体外活性; 单糖成分

Extraction of polysaccharide from *Musella lasiocarpa* by ultrasonic-assisted ionic liquid method and study on the *in vitro* activity and monosaccharide composition of the polysaccharide

DUAN Qiuhong¹ JIA Qingchao²

(1. College of Grain Engineering, Henan Industry and Trade Vocational College, Zhengzhou, Henan 451191, China;

2. School of Food Science and Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract: [Objective] To study the extraction process and *in vitro* activity of polysaccharide from *Musella lasiocarpa*. [Methods] Ultrasonic-assisted ionic liquid extraction is adopted. With the extraction rate of polysaccharide as the evaluation index, single factor and response surface methods are used to optimize the extraction process of polysaccharide. Furthermore, the polysaccharide is characterized in terms of the antioxidant activity, monosaccharide composition, and inhibitory activities on pancreatic lipase and α -amylase. [Results] The

基金项目: 河南省科技攻关项目资助(编号:252102110079); 河南省教育厅重点研究项目资助(编号:24B550021); 郑州科技学院大学创新训练项目(编号:DC202548)

通信作者: 贾庆超(1981—), 男, 郑州科技学院副教授, 硕士。E-mail:someone0803@163.com

收稿日期: 2025-02-08 **改回日期:** 2025-08-10

引用格式: 段秋虹, 贾庆超. 超声辅助离子液体法提取地涌金莲多糖及体外活性、单糖成分研究[J]. 食品与机械, 2025, 41(8): 188-196.

Citation: DUAN Qiuhong, JIA Qingchao. Extraction of polysaccharide from *Musella lasiocarpa* by ultrasonic-assisted ionic liquid method and study on the *in vitro* activity and monosaccharide composition of the polysaccharide[J]. Food & Machinery, 2025, 41(8): 188-196.

extraction process of polysaccharide is optimized as follows: extraction power of 200 W, ionic liquid volume of 1.80 mL, ultrasonic time of 32 min, solid-liquid ratio of 1:36, and ultrasonic temperature of 37 °C, under which the extraction rate of polysaccharide is (32.20 ± 0.68) mg/g. HPLC shows that the monosaccharides of the purified polysaccharide include mannose, ribose, rhamnose, glucuronic acid, galacturonic acid, glucose, galactose, xylose, and arabinose, with the ratio of 1.26:6.37:4.29:0.86:0.72:22.35:0.21:2.46:0.18. The scavenging rates against $\text{DPPH}^\bullet$, $\cdot\text{OH}$, $\text{ABTS}^{+\bullet}$, and $\text{O}_2^\bullet$ and the inhibition rates on pancreatic lipase and α -amylase of polysaccharide increase with the increase in mass concentration. When the mass concentration of polysaccharide is 5.0 mg/mL, the scavenging rates against $\text{DPPH}^\bullet$, $\cdot\text{OH}$, $\text{ABTS}^{+\bullet}$, and $\text{O}_2^\bullet$ are 78.60%, 67.70%, 79.85%, and 69.67%, respectively. The IC_{50} values show that the scavenging abilities of the polysaccharide against free radicals follow the trend of $\text{DPPH}^\bullet > \text{ABTS}^{+\bullet} > \cdot\text{OH} > \text{O}_2^\bullet$. The polysaccharide at the mass concentration of 10 mg/mL shows the inhibition rates of 67.2% and 58.3% on pancreatic lipase and α -amylase, respectively. [Conclusion] The ultrasonic-assisted ionic liquid method for extracting polysaccharide from *M. lasiocarpa* has the advantages of high extraction yield and good *in vitro* activity. This method demonstrates good application prospects and great potential in the extraction of active substances from natural products.

Keywords: ultrasonic-assisted; ionic liquid; *Musella lasiocarpa*; polysaccharide; *in vitro* activity; monosaccharide composition

地涌金莲是芭蕉科多年生的草本植物,是一种药食同源食品^[1]。多糖是地涌金莲的主要活性成分之一,具有降血脂、抗肿瘤、抗氧化、抗菌消炎、预防心血管疾病以及提升免疫力等生理功效^[2-3]。

目前,多糖的传统提取方法主要有热水浸提法、酸碱提取法、微波辅助、酶辅助以及超声辅助等多种方法^[4-7]。热水浸提法提取简单,但提取率较低。酸碱提取法是利用多糖在不同 pH 值下的溶解度不同而提升多糖的提取率,但酸或碱的处理条件可能会对多糖的结构造成不良影响,进而降低其生物活性^[8-9]。微波辅助法是利用微波能量促进化学反应的技术,具有加热速率快等优点,但设备成本相对较高,不适宜工业化生产^[10]。酶辅助法是利用生物酶的分解提升多糖的溶解度,但酶制剂的价格偏高,酶解 pH、温度等多重因素制约^[11]。超声辅助是利用超声波的高频振动产生能量,促进植物细胞壁的破裂,提升多糖提取率^[11],与传统提取方法相比,超声波辅助提取法具有提取效率高、在不破坏化合物结构的同时还能提高其生物学活性的特点^[12]。近年来,具备高温稳定、不易挥发且可被回收利用的离子液体作为萃取剂被应用于提取中,取得了良好的效果,由于其易生物降解,无毒无害,在多糖提取中展现出卓越的溶解特性^[12-14],使其在天然产物萃取分离领域具有独特优势,因此离子液体被广泛应用于萃取、催化、电池研发、修饰改性、材料研发等领域^[12]。祝苗等^[12]采用超声辅助离子液体法提取猪苓多糖,表明此方法提取率高,且均高于相同条件下超声辅助法提取的多糖。贾庆超采用超声辅助离子液体法提取鸡枞菌^[11]和羊肚菌多糖^[15],结果表明该法提取率优于超声辅助酶解法。目前对于地涌金莲多糖的提取研究鲜有报道。研究拟以超声辅助为手段、以离子液体为媒介提取地涌金莲多糖,研究其最佳提取条件,并对多糖的抗氧化活性、酶抑制活性及单糖组成进行研究,以期地为地涌金莲多糖的研究开发提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

地涌金莲:特级,产地云南省楚雄;

无水乙醇:分析纯,天津市永大化学试剂有限公司;

水杨酸、浓硫酸、浓盐酸、过二硫酸钾:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

30%过氧化氢:分析纯,广东恒健制药有限公司;

苯酚:分析纯,北京百灵威科技有限公司;

Tris、邻苯三酚、无水葡萄糖:分析纯,河南泰利杰生物科技有限公司;

硫酸亚铁、抗坏血酸(V_C):分析纯,西陇科学股份有限公司;

1-乙基-3-甲基咪唑溴盐、1-丁基-3-甲基咪唑溴盐、1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐、1-辛基-3-甲基咪唑溴盐:分析纯,安徽酷尔生物工程有限公司;

2,2'-联苯基-1-苦基肼基($\text{DPPH}^\bullet$)、2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸($\text{ABTS}^{+\bullet}$):分析纯,上海麦克林生物科技有限公司;

DEAE 纤维素 DE-23:分析纯,上海康朗生物科技有限公司;

对硝基苯磷酸二钠(PNPP):分析纯,南京都莱生物技术有限公司;

磷酸缓冲盐溶液(PBS):分析纯,北京利维宁生物科技有限公司;

α -淀粉酶:100 U/mg,裕丰食品生物科技有限公司;

胰脂肪酶:100 U/mg,盈欣生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

电子天平:FA214A 型,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;

恒温水浴箱:202-00 型,西安医疗仪器有限公司;

超声波清洗机:KQ-5200B 型,深圳市钰洁清洗设备有限公司;

高效液相色谱仪(HPLC):Agilent 1260型,美国安捷伦科技有限公司;

高速台式离心机:TGL-16GB型,上海尚仪仪器制造有限公司;

紫外可见分光光度计:UV-2800H型,上海菁华科技仪器有限公司;

酶标仪:DNM9606型,北京普朗新技术有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 地涌金莲多糖提取 参照刘啸宇等^[16]的方法,挑选完整无霉腐变处理的地涌金莲原材,于80℃干燥至恒重,粉碎过40目筛。精确称量1.000 0 g地涌金莲粉末置于150 mL三角瓶中,按料液比1:30(g/mL)添加去离子水,于50℃恒温水浴1 h,以确保地涌金莲粉末与水充分混合和预热,再向三角瓶中滴入1 mL浓度为0.65 mol/L的离子液体,以促进多糖的提取,在200 W的超声功率和40℃的超声温度下提取30 min,3 000 r/min离心5 min,上清液即为地涌金莲多糖提取液。

1.3.2 多糖提取量计算 采用苯酚—硫酸法^[11]测定地涌金莲的多糖提取量,葡萄糖标准曲线如图1所示,标准曲线方程为 $y=0.1895x+0.0087$, $R^2=0.9983$ 。

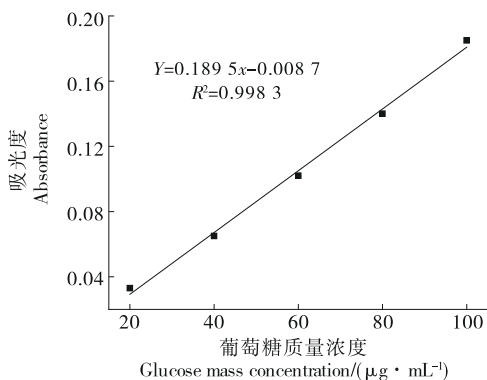


图1 葡萄糖标准曲线

Figure 1 Standard curve of glucose

按式(1)计算多糖提取量。

$$W = C \times V \times n \times 10^{-3} \div m, \quad (1)$$

式中:

W ——多糖提取量,mg/g;

C ——通过标准曲线得出的样品多糖质量浓度,mg/mL;

V ——提取液体积,mL;

n ——从原始提取液到最终测试溶液所经历的稀释倍数;

m ——地涌金莲原料的质量,g。

1.3.3 单因素试验 以地涌金莲多糖提取量为评价指标,根据文献^[11]设定预试验统一的试验条件:超声功率200 W、温度40℃、料液比1:30(g/mL)、离子液体体积

1.5 mL(0.65 mol/L)、超声时间30 min,选择4种具有代表性的离子液体:1-乙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐(L1)、1-乙基-3-甲基咪唑溴盐(L2)、1-辛基-3-甲基咪唑溴盐(L3)、1-丁基-3-甲基咪唑溴盐(L4),在此条件下分别使用4种离子液体和不使用离子液体进行地涌金莲多糖提取,通过对比提取量,得到最优离子液体为1-乙基-3-甲基咪唑溴盐(L2)。再以离子液体L2为提取剂,各单因素试验水平分别为:离子液体体积0.5,1.0,1.5,2.0,2.5 mL;料液比1:20,1:25,1:30,1:35,1:40(g/mL);超声时间20,25,30,35,40 min;超声温度20,30,40,50,60℃;超声功率50,100,150,200,250 W,考察各单因素对地涌金莲多糖提取量的影响,以确定响应面优化试验各因素水平。

1.3.4 地涌金莲多糖单糖的组成测定 将提取的地涌金莲多糖溶液置于60℃恒温干燥箱内5 h,干燥至恒重,研磨至粉末状。参照黄冬婷等^[17]的方法,进行相同条件下的样品的淀粉和蛋白质去除,利用DEAE纤维素DE-23柱层析纯化,于水热反应釜内进行相同条件下的多糖水解,并对其及50 μg/mL的葡萄糖、岩藻糖、甘露糖、葡萄糖醛酸、半乳糖、*N*-乙酰-氨基半乳糖、阿拉伯糖、核糖、*N*-乙酰-氨基葡萄糖、鼠李糖、半乳糖醛酸、木糖单糖标准溶液进行衍生,分别对多糖及各标准混合溶液进行HPLC图谱测定,分析地涌金莲多糖的主要单糖成分及含量。

1.3.5 地涌金莲多糖体外活性测定 将提取纯化的地涌金莲多糖溶液置于60℃恒温干燥箱内5 h,干燥至恒重,研磨至粉末状。准确称量相同质量的 V_c 和地涌金莲多糖粉末,配制质量浓度为1,2,3,4,5 mg/mL的 V_c 和地涌金莲多糖溶液,用于抗氧化性测定。同时,将地涌金莲多糖粉末配制质量浓度为0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,5.0,10.0 mg/mL的溶液,用于酶抑制活性测定。DPPH·、·OH、 $O_2^{\cdot-}$ 清除率的测定参照贾庆超等^[18]的方法,ABTS⁺清除率的测定参照黄冬婷等^[17]的方法,胰脂肪酶和α-淀粉酶清除率的测定参照胡霞等^[19]的方法。

1.3.6 数据处理 采用Design-Expert 13.0软件、Box-Behnken原理进行响应面优化试验,单因素和响应面试验均重复3次,使用Origin 2018软件用于数据方差分析和绘图,显著性水平 P 为0.05。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

由图2(a)可知,在相同的提取条件下,4种离子液体的多糖提取量均显著大于未添加离子液体的($P<0.05$)。离子液体L4的多糖提取量显著低于其余3种离子液体的($P<0.05$),L1与L3的多糖提取量差异不显著($P>0.05$),但均显著低于L2的($P<0.05$)。因此,选择离子液体L2为提取剂。

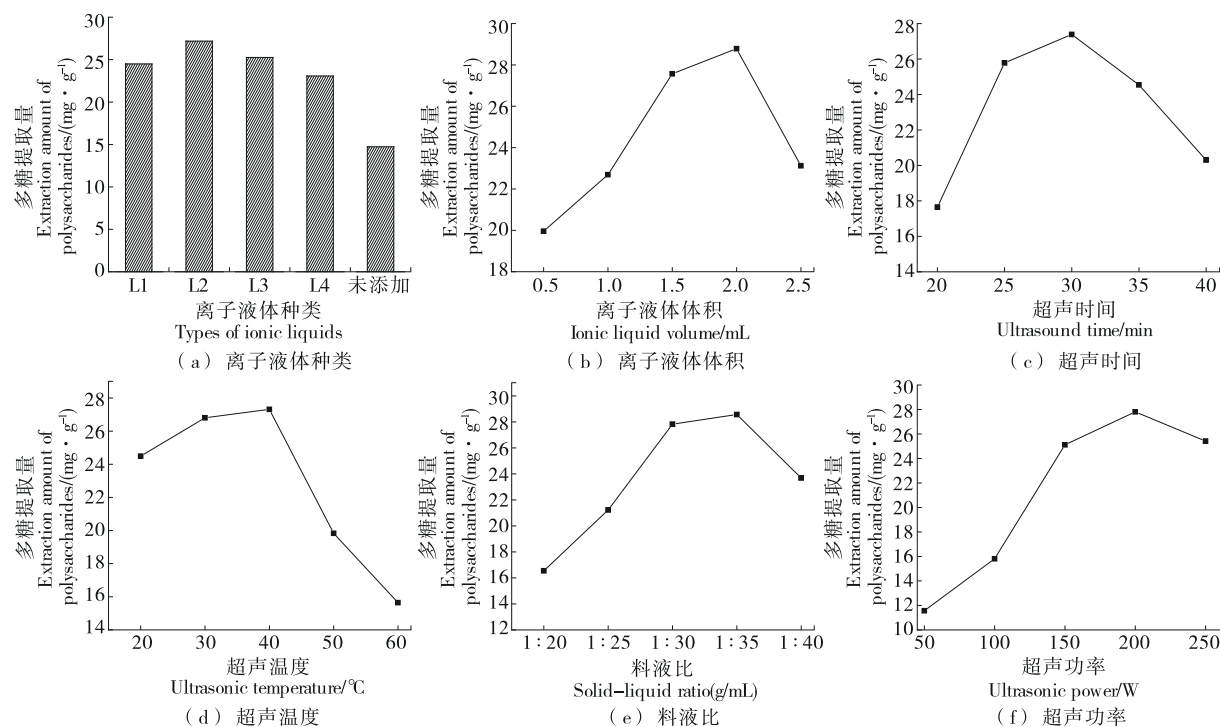


图2 多糖提取量的各单因素试验结果

Figure 2 Single factor test results of polysaccharide extraction yield

由图2(b)可知,离子液体体积为0.5~2.0 mL时,由于离子液体体积的增大,离子液体对植物细胞壁的破坏能力逐渐增大,促进多糖的溶出;离子液体体积>2.0 mL时,过多的离子液体导致提取液黏度增大,反而不利于多糖的溶出,导致提取量降低^[20-21]。因此,响应面优化选择1.5,2.0,2.5 mL 3个水平。

由图2(c)可知,超声时间为20~30 min时,超声时间的增大有利于多糖进一步溶出,当超声时间>30 min时,过长的超声时间会破坏多糖结构,也会促使糖分子中的糖苷键断裂,将多糖碎片化为小分子糖类,导致多糖提取量降低^[11,22]。因此,响应面优化选择25,30,35 min 3个水平。

由图2(d)可知,超声温度为20~40 °C时,温度的升高促使多糖溶解度增大,多糖的扩散速率也会增大,多糖提取量逐渐上升;超声温度>40 °C时,温度的升高会破坏多糖的结构,也会降低多糖的活性,促使多糖提取量的降低^[23-24]。因此,响应面优化选择30,40,50 °C 3个水平。

由图2(e)可知,料液比为1:20~1:35 (g/mL)时,溶剂的增多增大了多糖在地涌金莲与溶剂间的浓差,促进更多的多糖溶出,多糖提取量逐渐上升。但溶剂过多会导致超声波的作用减弱,同时也会促使地涌金莲中更多的其他物质的溶出,使多糖提取量的下降^[24]。因此,响应面优化选择1:30,1:35,1:40 (g/mL) 3个水平。

由图2(f)可知,超声功率为50~200 W时,功率的增大促进了超声波对植物细胞壁的破坏,促进了多糖的溶出;超声功率>200 W时,较大的超声功率影响了多糖的稳定性,破坏了多糖的结构,也促进了其他物质的溶出,造成多糖提取量下降。范三红等^[25]运用 Plackett-Burman 试验研究羊肚菌多糖提取时,表明功率对多糖提取量影响不显著,最佳提取功率为200 W。贾庆超^[11]研究鸡枞菌多糖提取时,亦认为200 W是最佳提取功率。因此,将地涌金莲多糖的提取功率设为200 W。

2.2 响应面试验

根据单因素试验结果,以多糖提取量为评价指标,进行四因素三水平响应面优化试验,各因素水平如表1所示。响应面试验结果如表2所示,方差分析结果如表3所示。

对表2数据进行拟合分析,得回归方程为:

表1 响应面因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface design

水平	A 超声温度/°C	B 料液比 (g/mL)	C 离子液体体积/mL	D 超声时间/min
-1	30	1:30	1.5	25
0	40	1:35	2.0	30
1	50	1:40	2.5	35

表 2 响应面试验设计与结果

Table 2 Response surface test design and results					
试验号	A	B	C	D	提取量/(mg·g ⁻¹)
1	0	0	0	0	32.87
2	-1	1	0	0	24.45
3	1	0	-1	0	24.92
4	0	0	1	1	21.88
5	1	0	0	1	25.10
6	0	0	1	-1	27.32
7	1	-1	0	0	24.11
8	1	1	0	0	22.98
9	0	-1	1	0	23.11
10	0	-1	0	-1	25.14
11	0	1	0	-1	27.10
12	1	0	1	0	22.11
13	0	0	0	0	31.46
14	-1	0	1	0	24.84
15	-1	0	0	1	25.06
16	0	1	1	0	24.12
17	0	1	-1	0	25.20
18	0	1	0	1	24.84
19	-1	-1	0	0	27.34
20	1	0	0	-1	24.78
21	0	0	0	0	31.67
22	0	-1	0	1	27.72
23	0	-1	-1	0	27.55
24	0	0	-1	1	28.34
25	0	0	0	0	32.19
26	0	0	0	0	31.78
27	0	0	-1	-1	25.62
28	-1	0	-1	0	27.88
29	-1	0	0	-1	28.47

$$W=31.99-1.17A-0.52B-1.34C-0.46D+0.44AB+0.057AC+0.93AD+0.84BC-1.21BD-2.04CD-3.66A^2-3.46B^2-3.55C^2-2.49D^2。$$
 (2)

由表 3 可知,模型 $P<0.000\ 1$,极显著,失拟项 $P=0.410\ 0$,不显著,表明模型是可靠的,试验方法可行^[26]。决定系数 $R^2=0.978\ 3$,表明方程的拟合度较好,响应值多糖提取量值的变化有 97.83% 来自所选因素,调整决定系数 $R^2_{Adj}=0.958\ 7$,说明有 95.87% 的试验符合该模型^[27]。变异系数为 2.36% ($<5\%$),方程模型具有良好的重现性。一次项 A、C,交互项 AD、BD、CD,以及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 影响极显著;一次项 B、D,交互项 BC 影响显著。根据 F 值,4 个因素对多糖提取量影响大小顺序为 $C>A>B>D$ 。由图 3 可知,在每个响应面图上均存在一个最高点,

表 3 响应面模型方差分析[†]

Table 3 Variance analysis of response surface model						
方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	P 值	显著性
模型	259.50	14	18.54	47.42	$<0.000\ 1$	**
A	16.44	1	16.44	42.06	$<0.000\ 1$	**
B	3.29	1	3.29	8.41	0.011 7	*
C	21.69	1	21.69	55.49	$<0.000\ 1$	**
D	2.51	1	2.51	6.43	0.023 9	*
AB	0.77	1	0.77	1.98	0.181 1	
AC	0.01	1	0.01	0.03	0.856 7	
AD	3.47	1	3.47	8.89	0.009 9	**
BC	2.82	1	2.82	7.22	0.017 7	*
BD	5.86	1	5.86	14.98	0.001 7	**
CD	16.63	1	16.63	42.54	$<0.000\ 1$	**
A^2	86.77	1	86.77	221.99	$<0.000\ 1$	**
B^2	77.46	1	77.46	198.17	$<0.000\ 1$	**
C^2	81.82	1	81.82	209.31	$<0.000\ 1$	**
D^2	40.24	1	40.24	102.95	$<0.000\ 1$	**
残差	5.47	14	0.39			
失拟项	4.23	10	0.42	1.36	0.410 0	不显著
纯误差	1.24	4	0.31			
总和	264.97	28				

[†] “*”代表显著($P<0.05$),“**”代表极显著($P<0.01$); $R^2=0.979\ 3$, $R^2_{Adj}=0.958\ 7$,变异系数 2.36。

说明影响地涌金莲多糖提取各因素的最优值在各因素所选水平区间内,各因素水平区间选择合理。

2.3 验证实验

利用响应面设计软件对表 3 中数据进行优化分析,得到地涌金莲多糖提取的最佳条件为:超声时间 31.92 min、料液比 1:35.66 (g/mL)、离子液体体积 1.80 mL、超声温度 37.30 ℃。地涌金莲多糖提取量为 32.26 mg/g。为方便操作,将参数调整为:离子液体体积 1.80 mL,超声处理时间 32 min,料液比 1:36 (g/mL),超声温度 37 ℃,进行 3 次验证实验,多糖的提取量为 (32.20 ± 0.68) mg/g,与理论预测值相差很小,说明此响应面优化方案合理可靠。

2.4 地涌金莲多糖单糖的组成测定

对比混合单糖标准溶液(图 4)和地涌金莲多糖溶液(图 5)的 HPLC 图,根据单糖的保留时间,地涌金莲多糖含有的单糖为甘露糖、核糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、木糖和阿拉伯糖,根据各单糖的峰面积,求得 $n_{甘露糖}:n_{核糖}:n_{鼠李糖}:n_{葡萄糖醛酸}:n_{半乳糖醛酸}:n_{葡萄糖}:n_{半乳糖}:n_{木糖}:n_{阿拉伯糖}=1.26:6.37:4.29:0.86:0.72:22.35:0.21:2.46:0.18$ 。

2.5 地涌金莲多糖抗氧化活性研究

由图 6 可知,多糖对 DPPH·、·OH、ABTS⁺·、O₂·清除

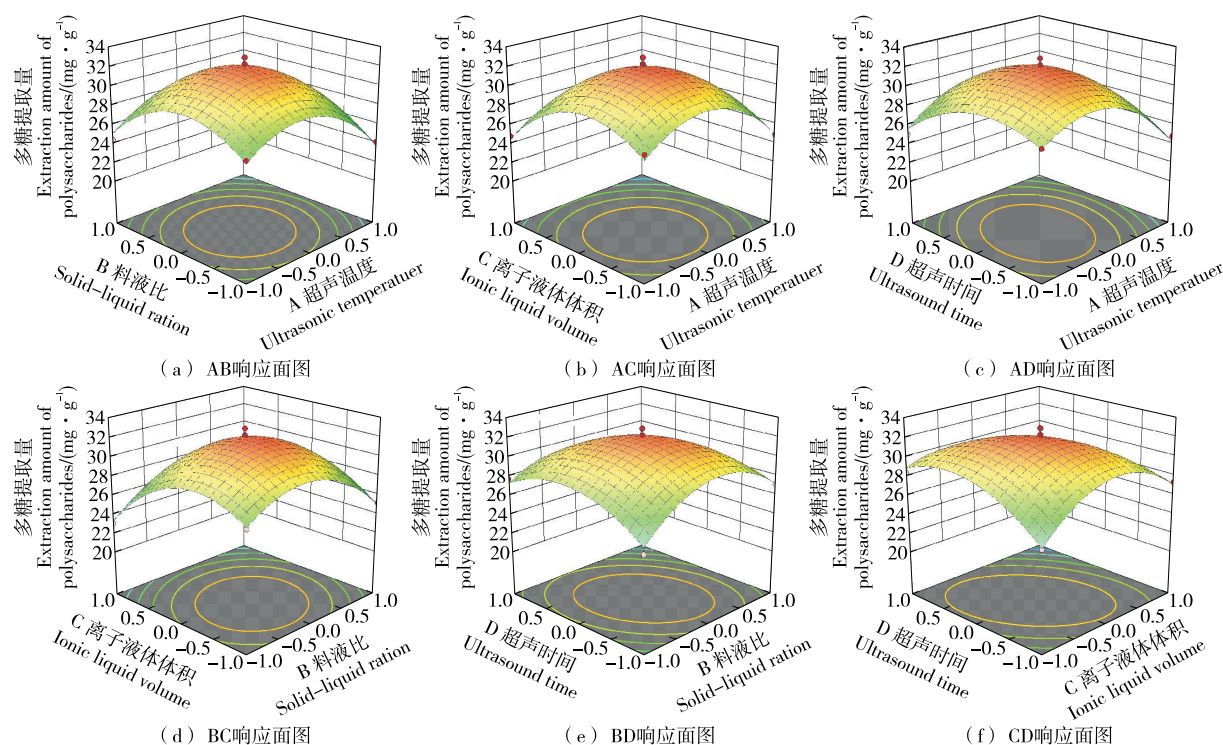


图3 地涌金莲多糖提取响应面图

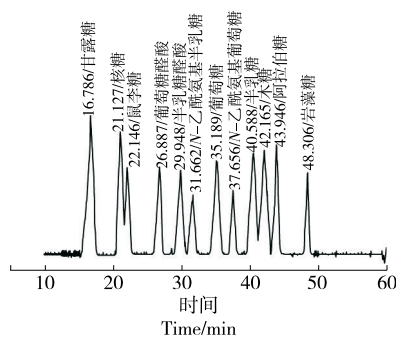
Figure 3 Response surface diagrams of polysaccharide extraction from *Musella lasiocarpa*

图4 混合单糖标准溶液的HPLC图

Figure 4 HPLC chromatogram of mixed monosaccharide standard solution

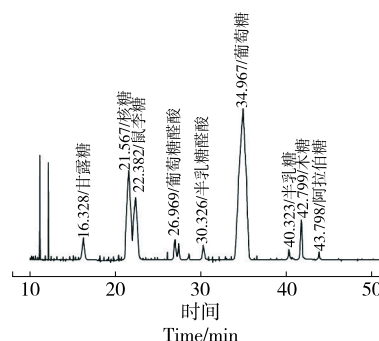


图5 地涌金莲多糖溶液的HPLC图

Figure 5 HPLC chromatogram of *Musella lasiocarpa* polysaccharide solution

率均随着质量浓度的增大呈增大趋势,在相同的质量浓度下,多糖对4种自由基清除率均小于 V_c 。多糖质量浓度为1.0 mg/mL时,对4种自由基清除率均最小,分别为33.30%, 22.60%, 31.37%, 27.21%。多糖质量浓度为5.0 mg/mL时,对4种自由基清除率均达到最大,分别为78.60%, 67.70%, 79.85%, 69.67%。当多糖质量浓度 > 3.0 mg/mL时,多糖对DPPH $\cdot$ 、ABTS $^{+}$ 清除率增大幅度较大,而当多糖质量浓度 > 4.0 mg/mL时,多糖对 $\cdot OH$ 、 $O_2^{\cdot -}$ 清除率增大幅度较大。多糖对DPPH $\cdot$ 的 IC_{50} 值最小,其次是ABTS $^{+}$ 、 $\cdot OH$ 、 $O_2^{\cdot -}$,说明地涌金莲多糖对4种自由基清除能力强弱次序为DPPH $\cdot > ABTS^{+} > \cdot OH > O_2^{\cdot -}$ 。

黄冬婷等^[17]采用超声辅助离子液体法提取人参多糖,多糖质量浓度 > 0.8 mg/mL时,DPPH $\cdot$ 清除率趋于稳定为30%,略低于地涌金莲多糖在相同质量浓度下的(33.3%);当多糖质量浓度为1.5 mg/mL时, $\cdot OH$ 和ABTS $^{+}$ 清除率分别为40%左右,而地涌金莲多糖质量浓度为1 mg/mL时, $\cdot OH$ 和ABTS $^{+}$ 清除率分别为27.21%和31.37%,质量浓度为2 mg/mL时, $\cdot OH$ 和ABTS $^{+}$ 清除率分别为46.20%和42.56%。贾庆超^[15]采用超声辅助离子液体法提取羊肚菌多糖,多糖质量浓度为5 mg/mL时,DPPH $\cdot$ 和 $\cdot OH$ 清除率分别为76.72%和67.65%,均略低于地涌金莲多糖在相同质量浓度下的78.60%和69.67%。

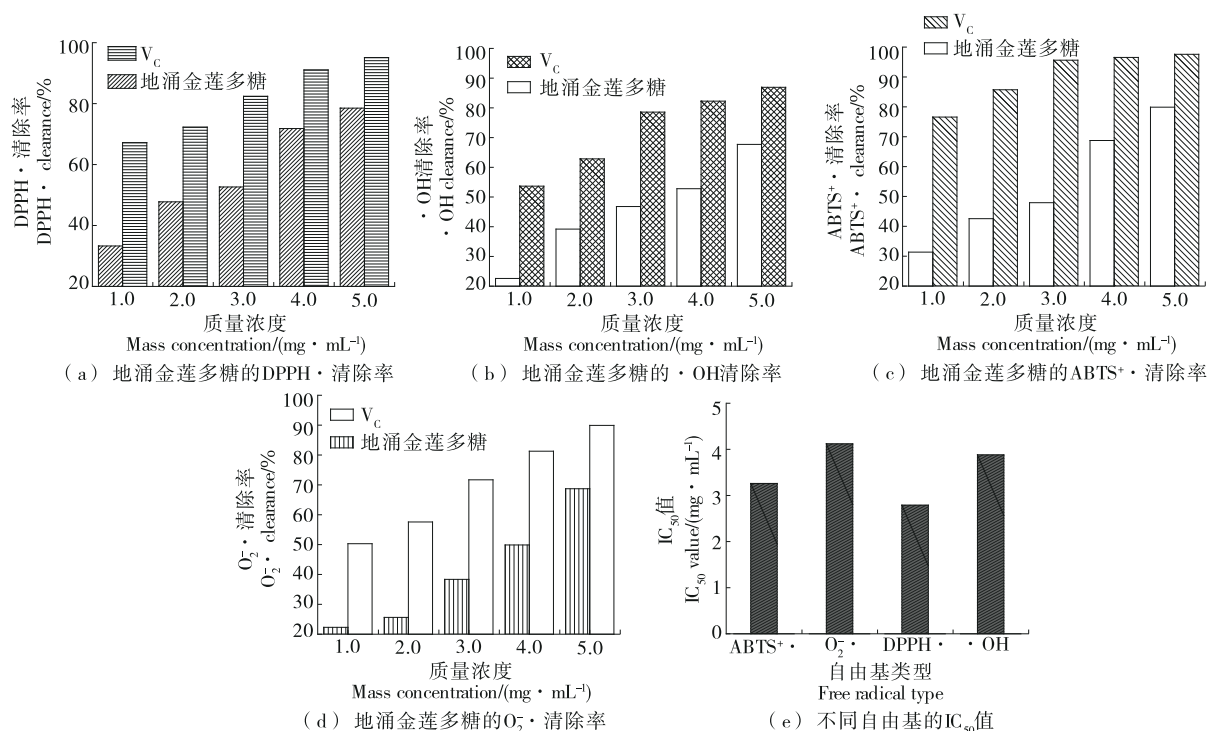


图6 多糖对DPPH·、·OH、ABTS⁺·、O₂·清除能力及 IC_{50} 值
Figure 6 DPPH·, ·OH, ABTS⁺·, and O₂· scavenging abilities of polysaccharide and IC_{50} values

说明地涌金莲多糖具有良好的抗氧化性能力。

2.6 地涌金莲多糖体外抑制酶活性研究

由图7可知,随着质量浓度的增大,多糖对胰脂肪酶和 α -淀粉酶的抑制率均呈增大趋势,二者呈正相关,当质量浓度为10.0 mg/mL时,多糖对二者的抑制率均达到最大,分别为67.2%和58.3%,当质量浓度为0.5 mg/mL时,抑制率均为最小,分别为12.86%和11.82%。滕聪等^[28]研究超声辅助提取藜麦多糖时,多糖质量浓度为4.0、10.0 mg/mL时,胰脂肪酶抑制率分别为40.0%和71.3%,

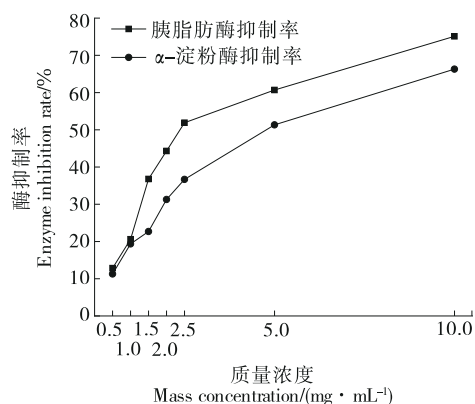


图7 地涌金莲多糖对胰脂肪酶和 α -淀粉酶的抑制活性
Figure 7 Inhibition rates of polysaccharide on pancreatic lipase and α -amylase

均低于地涌金莲多糖在相同质量浓度下的51.8%和75.1%,藜麦多糖对胰脂肪酶抑制率 IC_{50} 值为2.74 mg/mL,大于地涌金莲多糖的 IC_{50} 值(2.48 mg/mL),滕聪等^[28]研究后认为藜麦多糖具有良好的降脂活性,因此可认为试验提取的地涌金莲多糖的降脂活性更佳。恽含等^[29]采用超声辅助低共熔溶剂法提取珊瑚菌多糖,多糖质量浓度为2.0 mg/mL时,对 α -淀粉酶的抑制率分别为20%,低于地涌金莲多糖在相同质量浓度下的31.2%,但质量浓度为10.0 mg/mL时,其抑制率为69.21%,略大于地涌金莲多糖的66.3%,珊瑚菌多糖对 α -淀粉酶 IC_{50} 值为6.06 mg/mL,大于地涌金莲多糖的 IC_{50} 值(4.91 mg/mL),而恽含等^[29]研究后认为珊瑚菌多糖是一种较为理想的绿色天然 α -淀粉酶抑制剂,因此可认为试验提取的地涌金莲多糖对 α -淀粉酶有较强的抑制作用。

3 结论

1-乙基-3-甲基咪唑溴盐是超声辅助离子液体法提取地涌金莲多糖的较优离子液体,与超声辅助相结合能够有效提升多糖的提取量,提取工艺为:超声功率200 W、离子液体体积1.80 mL、超声时间32 min、料液比1:36 (g/mL),超声温度37℃,多糖的提取量为(32.20±0.68) mg/g。试验提取的地涌金莲多糖对DPPH·、·OH、ABTS⁺·、O₂·清除效果显著,当质量浓度为5.0 mg/mL时,清除率分别为78.60%、67.70%、79.85%、69.67%, IC_{50} 值表明多糖DPPH·

清除能力最强。同时,地涌金莲多糖对胰脂肪酶和 α -淀粉酶具有较强的抑制作用,当质量浓度为10 mg/mL,对胰脂肪酶和 α -淀粉酶的抑制率分别为71.3%,66.3%,是一种较为理想绿色天然的胰脂肪酶和 α -淀粉酶抑制剂。

超声辅助离子液体萃取法是一种高效的提取方法,不仅可提高活性物质的提取量,而且提取的多糖生理活性较高,在食品领域活性成分的提取具有良好的应用前景,后续将对复合型离子液体活性物质的提取及体外活性展开研究。

参考文献

- [1] 安静. 地涌金莲株形及花色形成的生理与分子基础[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021: 1-3.
AN J. Physiological and molecular basis of plant shape and flower color formation in *Musella lasiocarpa*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2021: 1-3.
- [2] 屈雅宁, 吴子龙, 陈禅友, 等. 食用豆类多糖提取纯化、结构特征与生物活性研究进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(7): 200-207.
QU Y N, WU Z L, CHEN C Y, et al. Research progress on extraction, purification, structural characteristics and bioactivities of polysaccharides from edible legumes[J]. China Condiment, 2024, 49(7): 200-207.
- [3] 闫帅. 玫瑰多糖的提取纯化、结构表征、生物活性及应用研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(10): 236-242.
YAN S. Research progress on extraction, purification, structural characteristics, biological activities, and application of rose polysaccharides[J]. Food & Machinery, 2024, 40(10): 236-242.
- [4] 陈坤林, 李祥, 何思思, 等. 响应面法优化芡实粉复合酶水解工艺及多糖抗氧化性研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(3): 20-27.
CHEN K L, LI X, HE S S, et al. Optimization of compound enzymatic hydrolysis process of euryale ferox powder by response surface methodology and study on antioxidant activity of polysaccharides[J]. China Condiment, 2024, 49(3): 20-27.
- [5] 任双, 陈顺心, 朱静, 等. 超声-酶法协同低共熔溶剂提取猫爪草多糖的工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(7): 117-123.
REN S, CHEN S X, ZHU J, et al. Optimization of extraction process of polysaccharides from ranunculus ternatus thub by ultrasonic-enzyme assisted deep eutectic solvents and analysis of its antioxidant activity[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(7): 117-123.
- [6] 郑婷婷, 张文杰, 龚婉莹, 等. 食用菌多糖提取纯化及结构修饰研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(7): 231-240.
ZHENG T T, ZHANG W J, GONG W T, et al. Research progress on extraction, purification and structural modification of polysaccharides from edible fungi[J]. Food & Machinery, 2024, 40(7): 231-240.
- [7] LIAO F, WEN R D, YANG L, et al. Oil tea soup formula optimization based on orthogonal test and fuzzy mathematics sensory evaluation[J]. Journal of Food Science and Engineering, 2017, 7(10): 435-442.
- [8] 吴烜, 黄晨燕, 陈龙斌, 等. 茶枯中有效成分的提取工艺研究进展[J]. 农业技术与装备, 2017(5): 6-7, 10.
WU X, HUANG C Y, CHEN L B, et al. Research progress on extraction technology of active ingredients in sasangua cake[J]. Agricultural Technology and Equipment, 2017(5): 6-7, 10.
- [9] 刘蕴恒. 岩豆多糖的提取工艺优化、结构表征及功能特性研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2022: 1-3.
LIU Y H. A dissertation submitted to sichuan agricultural university in partial fulfillment of the requirements for the professional degree of master of engineering[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2022: 1-3.
- [10] 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.
- [11] 贾庆超. 超声辅助离子液体法和酶解法提取鸡枞菌多糖及抗氧化性研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(9): 79-88.
JIA Q C. Study on extraction of polysaccharides from *Collybia albuminosa* by ultrasonic-assisted ionic liquid method and enzymatic hydrolysis method and their antioxidant activity[J]. China Condiment, 2024, 49(9): 79-88.
- [12] 祝苗, 李志洲, 刘军海, 等. 超声辅助离子液体提取猪苓多糖的工艺优化及抗氧化性研究[J]. 食品与机械, 2024, 40(9): 167-173.
ZHU M, LI Z Z, LIU J H, et al. Study on the optimization of the process of extracting *Polyporus umbellatus* polysaccharides by ultrasonic-assisted ionic liquid and its antioxidant activity[J]. Food & Machinery, 2024, 40(9): 167-173.
- [13] ANTUNES E C, OLIVEIRA F, TEMMINK H, et al. Separation of polysaccharide and protein by ionic liquid-based extraction techniques[J]. Journal of Ionic Liquids, 2023, 3(2): 100058.
- [14] SAHEED I O, AZEEZ S, SUAHI F. Imidazolium based ionic liquids modified polysaccharides for adsorption and solid-phase extraction applications: a review[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 298: 120138.
- [15] 贾庆超. 超声辅助离子液体和酶解法提取羊肚菌多糖及其抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(3): 128-133.
JIA Q C. Study on ultrasound assisted ionic liquid and enzymatic extraction of morchella polysaccharides and its antioxidant activity[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(3): 128-133.
- [16] 刘啸宇, 王秀凤, 后梦情, 等. 响应面优化超声提取蒲公英多糖及其抗氧化性的研究[J]. 农产品工, 2022(16): 1-6, 9.
LIU X Y, WANG X F, HOU M Q, et al. Optimization of ultrasonic extraction technology and antioxidant activity of dandelion polysaccharides by response surface methodology

- [J]. Processing of Agricultural Products, 2022(16): 1-6, 9.
- [17] 黄冬婷, 黄俊生, 汤静洁, 等. 超声辅助离子液体提取人参多糖工艺及其抗氧化活性[J]. 精细化工, 2022, 39(9): 1 851-1 857, 1 871.
- HUANG D T, HUANG J S, TANG J J, et al. Ultrasonic-assisted ionic liquid extraction of ginseng polysaccharide and its antioxidant activity[J]. Fine Chemicals, 2022, 39(9): 1 851-1 857, 1 871.
- [18] 贾庆超, 何军波, 李望铭, 等. 嗜热链球菌对液态发酵黑蒜品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 168-181.
- JIA Q C, HE J B, LI W M, et al. Effects of streptococcus thermophilus on the fermentation quality of liquid black garlic [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 168-181.
- [19] 胡霞, 王顺风, 白玉英, 等. 超声辅助纤维素酶法提取辣木籽多酚的工艺优化及其体外活性[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 207-214.
- HU X, WANG S F, BAI Y Y, et al. Process optimization of the extraction of moringa oleifera seed polyphenols by ultrasound-assisted cellulase and its in vitro activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7): 207-214.
- [20] TAN T, LAI C J S, OUYANG H, et al. Ionic liquid-based ultrasound assisted extraction and aqueous two phase system for analysis of caffeoylquinic acids from flos Ionicerae japonicae[J]. Journal of Pharmaceutical Biomedical Analysis, 2016, 120: 134-141.
- [21] SONG Y, GUAN H N, LIU B, et al. Ionic liquid-based ultrasonic assisted extraction of pueraria flavones and its antioxidant activity[J]. Food Research And Development, 2020, 41(20): 97-100.
- [22] SHU X, ZHANG Y, JIA J, et al. Extraction, purification and properties of water-soluble polysaccharides from mushroom *Lepista nuda*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 128(3): 858-869.
- [23] WANG L, CHENG L, XU Y, et al. Extraction technology optimization and antioxidant activity of polysaccharides from pumpkin seeds[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 284-290.
- [24] 孟雅红, 李辉. Plackett-Burman设计和响应面法优化超声协同酶法提取鸡油菌多糖工艺[J]. 食品工业科技, 2015, 36(21): 242-248.
- MENG Y H, LI H. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction of polysaccharides from *Cantharellus cibarius* by Plackett-Burman design and response surface methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(21): 242-248.
- [25] 范三红, 任嘉兴, 张锦华, 等. 响应面优化羊肚菌多糖提取工艺及抗氧化性[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 179-185, 192.
- FAN S H, REN J X, ZHANG J H, et al. Extraction optimization of *Morchella esculenta* polysaccharides by response surface methodology and its antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(6): 179-185, 192.
- [26] CHEN H T, WANG X Y, LIANG H B, et al. Preparation, oil removal and flocculation efficiency evaluation of a PAC-P (AM-BA) hybrid polymer flocculant based on response surface method[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(6): 114503.
- [27] DONG Z J, ZHANG J W, MA X Y, et al. Optimization of distributed fiber optic sensors for pavements by combining DEM-FDM coupled numerical simulation method and response surface method[J]. Structural Health Monitoring, 2024, 23(6): 3 687-3 704.
- [28] 滕聪, 吴萧宇, 郝宇琼, 等. 藜麦多糖超声辅助酶法提取工艺优化及其抑制胰脂肪酶活性分析[J]. 山西农业科学, 2025, 53(3): 135-142.
- TENG C, WU X Y, HAO Y Q, et. al. Study on the optimization of quinoa polysaccharide extraction process and the inhibition of pancreatic lipase activity[J]. Shanxi Agricultural Science, 2025, 53(3): 135-142.
- [29] 恽含, 于溪, 李芳菲, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取黑玉米芯多糖及其抑制 α -糖苷酶活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 153-162.
- YUN H, YU X, LI F F, et al. Extraction of polysaccharides from black corncob using ultrasonicassisted deep eutectic solvent and its activity in inhibiting α -glycosidase[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 153-162.