

缢蛏多糖提取工艺优化及生物活性研究

王 涛, 刘雨博, 佟长青, 曲 敏, 李 伟, 金 桥*

(大连海洋大学食品科学与工程学院, 大连 116023)

摘 要: **目的** 优化缢蛏多糖(*Sinonovacula constricta* polysaccharides, SCP)的提取工艺, 并对其生物活性进行研究。**方法** 采用响应曲面法对缢蛏多糖提取工艺进行优化, 红外光谱扫描和高效液相色谱法对缢蛏多糖进行光谱分析和单糖组成分析, 初步研究了缢蛏多糖的结构组成、体外抗氧化活性。**结果** 提取缢蛏多糖的最佳工艺条件是: 提取温度 80 °C、料液比 1:2 (g/mL)、提取时间 3 h, 此条件下多糖得率为 0.976%。该多糖分子量约为 480 kD, 单糖组成分析是由葡萄糖组成, 糖环构型为吡喃型。体外抗氧化试验结果表明, 缢蛏多糖的抗氧化活性较好, 其清除自由基能力与多糖浓度具有明显的量效关系。**结论** 本研究优化了缢蛏多糖的提取工艺, 初步分析了缢蛏多糖的结构组成和抗氧化活性, 实验结果可为缢蛏的精深加工及产品开发提供一定的理论依据。

关键词: 缢蛏多糖; 提取工艺优化; 结构分析; 抗氧化活性

Study on extraction process optimization and bioactivity of *Sinonovacula constricta* polysaccharides

WANG Tao, LIU Yu-Bo, TONG Chang-Qing, QU Min, LI Wei, JIN Qiao*

(College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

ABSTRACT: Objective To optimize the extraction process of *Sinonovacula constricta* polysaccharides (SCP), and study its biological activity. **Methods** Response surface methodology was applied to optimize the extraction process of SCP, the spectral analysis and monosaccharide compositions of SCP were analyzed by infrared spectrum scanning and high performance liquid chromatography, and the structural compositions, antioxidant activities *in vitro* of SCP were studied. **Results** The optimum technological conditions for extracting polysaccharides from *Sinonovacula constricta* were as follows: Extraction temperature 80 °C, solid-liquid ratio 1:2 (g/mL), extraction time 3 h, under these conditions, the yield of polysaccharide was 0.976%. The molecular weight of the polysaccharide was about 480 kD, the monosaccharide composition analysis was composed of glucose, and the sugar ring configuration was pyran type. The results of antioxidant test *in vitro* showed that the antioxidant activities of SCP were good, and its free radical scavenging abilities had obvious dose-response relationship with the concentration of polysaccharides. **Conclusion** The extraction process of *Sinonovacula constricta* polysaccharides is optimized, the structural compositions and antioxidant activities of *Sinonovacula constricta* polysaccharides are preliminarily analyzed, and this experimental results can provide a theoretical basis for the intensive processing and product development of *Sinonovacula constricta*.

KEY WORDS: *Sinonovacula constricta* polysaccharides; optimization of extraction process; structural analysis; antioxidant activity

*通信作者: 金桥, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋生物资源开发利用。E-mail: jinqiao43@dlou.edu.cn

*Corresponding author: JIN Qiao, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, No.52, Heishijiao Street, Shahekou District, Dalian 116023, China. E-mail: jinqiao43@dlou.edu.cn

0 引 言

缢蛏(*Sinonovacula constricta*)俗称蛏子、青子,是软体动物门瓣鳃纲真瓣鳃目竹蛏科缢蛏属海洋双壳类软体动物,是沿海地区的主要贝类养殖经济品种之一^[1],其 2019 年我国养殖产量已达到 87 万 t^[2]。蛏蛏肉性寒、味甘咸,具有清热除烦、补阴虚、补血止痢、利尿消肿等功效^[3]。

贝类多糖是贝类体内的一类重要的生物活性物质,而贝类品种丰富,资源量巨大,这为开发贝类多糖提供了良好的原料基础。贝类品种、生活习性及其生长环境的差异导致了贝类多糖的组成复杂、结构多变、生物活性多样^[4]。目前,贝类多糖常采用水提法、碱提法、酶解法、盐提法及超声波辅助提取法等提取^[5]。研究表明,贝类多糖具有良好的抗氧化^[6]、抗凝血^[7]、增强机体免疫力^[8-9]、抗疲劳^[10]、抗病毒^[11]、抗肿瘤^[12-13]、肝损伤保护^[14]等功效,但目前缢蛏的研究主要集中在营养与免疫方面,关于缢蛏多糖(*Sinonovacula constricta* polysaccharides, SCP)活性的报道有限。贝类多糖具有的良好理化特性及多种生物活性,使其在保健食品、化妆品和医药等多个领域具有很好的应用前景^[5,15]。而且食用贝类多糖没有毒副作用,这使其在临床和药物制剂方面也具有巨大的潜能^[16]。

本研究通过单因素试验选择自变量,以缢蛏多糖得率为响应值,运用 Box-Behnken 响应面分析研究优化多糖的提取工艺,并初步分析了缢蛏多糖的分子量、单糖组成、红外光谱性质等,探究其抗氧化活性,以期缢蛏资源的开发利用及精深加工提供一定的理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

鲜活缢蛏原料: 2019 年 9 月购于大连市新长兴水产批发市场。

Sephadex G-100 葡聚糖凝胶(纯度 100%)、1-苯基-3-甲基-5-吡唑啉酮(1-phenyl-3-methyl-5-pyrazolone, PMP, 纯度 99%)、10 种单糖标准品(纯度≥99%)(美国 Sigma 公司); 维生素 C (vitamin C, VC, 纯度>99%, 北京索莱宝科技有限公司); 乙腈(色谱纯, 德国 CNW 科技公司); 无菌双蒸水(北京伊塔生物科技有限公司); 无水乙醇、葡萄糖、过氧化氢、水杨酸、磷酸钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

BS224S 型电子分析天平(北京 Sartorius 仪器系统有限公司); Perkin Elmer 傅里叶变换红外光谱仪(美国珀金埃尔默仪器有限公司); UV-754 紫外分光光度计(上海光学仪器一厂); Agilent 1260 高效液相色谱仪(配备紫外检测器、示差检测器, 美国安捷伦公司); GL-21M 型高速冷冻离心机

(湘仪离心机仪器有限公司); 微孔滤膜(0.45 μm, 日本岛津公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 缢蛏多糖的提取流程

新鲜缢蛏→去掉蛏壳→组织粉碎机匀浆→热水浴浸提→离心→上清液进行等电点除杂蛋白→喷雾干燥→缢蛏多糖粗品。

1.3.2 样品前处理

将新鲜缢蛏去掉蛏壳, 利用组织粉碎机匀浆, 精确称取 20 g 匀浆液置于 500 mL 烧杯中, 采用一定料液比、提取温度、提取时间对缢蛏多糖进行热水浸提, 提取结束后, 5000 r/min 离心 10 min, 合并收集上清液, 调节 pH 为 5.5 进行等电点除杂蛋白, 4 ℃过夜放置, 离心去沉淀, 收集上清经喷雾干燥得到缢蛏多糖粗品。

1.3.3 缢蛏多糖含量的测定

苯酚-硫酸法测定总糖含量并绘制标准曲线^[17]。

1.3.4 单因素试验

称取一定量的缢蛏肉并匀浆, 按下列条件开展单因素试验: 在提取温度 80 ℃条件下, 分别以料液比 1:1、1:2、1:3、1:4、1:5、1:6 (g/mL)提取 3 h。在料液比 1:2 (g/mL)条件下, 分别在 50、60、70、80、90、100 ℃提取 3 h。在料液比 1:2 (g/mL)、提取温度 80 ℃的条件下, 分别提取 1、2、3、4、5、6 h。每组试验均重复 3 次, 考察单因素条件对缢蛏多糖得率的影响。

1.3.5 响应面试验

根据单因素试验结果, 选择料液比、提取时间、提取温度为自变量并设置合适的水平, 以缢蛏多糖得率作为响应值, 运用 Box-Benhken 响应面法进行响应面试验设计, 优化缢蛏多糖的提取工艺。响应面试验因素及水平设计见表 1。

表 1 响应曲面法试验因素水平表
Table 1 Response surface methodology factor level table

因子	编码	水平		
		-1	0	1
提取温度/℃	<i>A</i>	70	80	90
料液比(g/mL)	<i>B</i>	1:1	1:2	1:3
提取时间/h	<i>C</i>	2	3	4

采用 GB 5009.5—2010《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》及 GB/T 9695.31—2008《肉制品 总糖含量测定》检测缢蛏多糖样品中的蛋白质及总糖含量。

1.3.6 缢蛏多糖性质测定

(1)缢蛏多糖的纯化及分子量测定

将通过 1.3.2 制备的缢蛏粗多糖溶解, 经 Sephadex G-100 葡聚糖凝胶柱层析, 蒸馏水洗脱, 收集组分并透析, 冷冻干燥得缢蛏纯化多糖。

采用高效液相色谱法^[18]测定缢蛏多糖的分子量, 检测器为示差折光检测器, 流动相为双蒸水, 流速为 0.6 mL/min, 色谱柱为 TSK-gel G4000 (7.8 mm×300 mm, 10 μm), 柱温 30 ℃, 进样体积 20 μL, 称取分子量分别为 200 万、50 万、

7 万和 1 万的葡聚糖和缢蛭多糖,使用双蒸水配制质量浓度 10 mg/mL 的标准葡聚糖溶液和缢蛭多糖样品液,利用孔径为 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后进入高效液相色谱仪,利用流速为 0.6 mL/min 的双蒸水进行洗脱,绘制葡聚糖分子量标准曲线并测定缢蛭多糖分子量。

(2) 缢蛭多糖单糖组成分析

样品水解及标准品的衍生化方法参照陈燕文等^[19]的方法,采用高效液相色谱法测定样品中多糖组成。液相色谱条件: ZORBAX Eclipse XDB-C₁₈ 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm); 流动相 A 为 0.1 mol/L 磷酸钠缓冲液,流动相 B 为乙腈;检测波长 250 nm;柱温 30 $^{\circ}\text{C}$;洗脱流速 1.0 mL/min。

(3) 缢蛭多糖傅里叶变换红外光谱分析

将干燥的样品 2 mg 与 100 mg 溴化钾(KBr)研磨混匀后压成薄片,傅里叶变换红外光谱扫描 4000~400 cm^{-1} 范围,并对结果进行分析。

1.3.7 缢蛭多糖体外抗氧化活性测定

超氧阴离子自由基清除能力测定采用邻苯三酚自氧化法^[20];羟基自由基清除能力测定采用水杨酸法^[21];1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH) 自由基清除能力测定参考文献^[22]。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果

如图 1a 所示,随着提取时间的延长,缢蛭多糖得率先升

高后降低,在 3 h 时多糖得率达到最大值。过长的提取时间,会引起多糖结构变化及提取液中杂质的增加^[23],使得多糖得率相对降低。因而响应面优化提取时间选择 2、3、4 h。

温度对多糖得率的影响结果如图 1b 所示,随着温度的上升,缢蛭多糖得率先升高后降低,在 80 $^{\circ}\text{C}$ 时得率最大。温度直接影响物质在水中的溶解度,升温会加速传质过程,使多糖更易溶出,但过高的温度会引起多糖的降解,不利于多糖的提取^[24]。因而响应面优化提取温度选择 70、80、90 $^{\circ}\text{C}$ 。

如图 1c 所示,料液比对多糖得率的影响较为明显。随着料液比的增加,缢蛭多糖得率相应升高,当料液比小于 1:2 (g/mL) 时,多糖得率开始缓慢下降。过低的料液比会增加浓缩的工作量,综合节约资源以及生产工艺等因素考虑,选择 1:2 (g/mL) 为最适料液比。因而响应面优化料液比选择 1:1、1:2、1:3 (g/mL)。

2.2 缢蛭多糖提取工艺优化

2.2.1 回归模型的建立及显著性检验

在单因素试验基础上,选择提取温度(A)、料液比(B)和提取时间(C) 3 个因素,根据 Box-Behnken 的中心组合试验设计原理,采用三因素三水平的响应面分析方法,优化缢蛭多糖提取工艺,试验设计与结果见表 2。利用 Design Expert 8.0 软件对表 2 数据建立二次回归模型,所拟合的二次多元回归方程是:

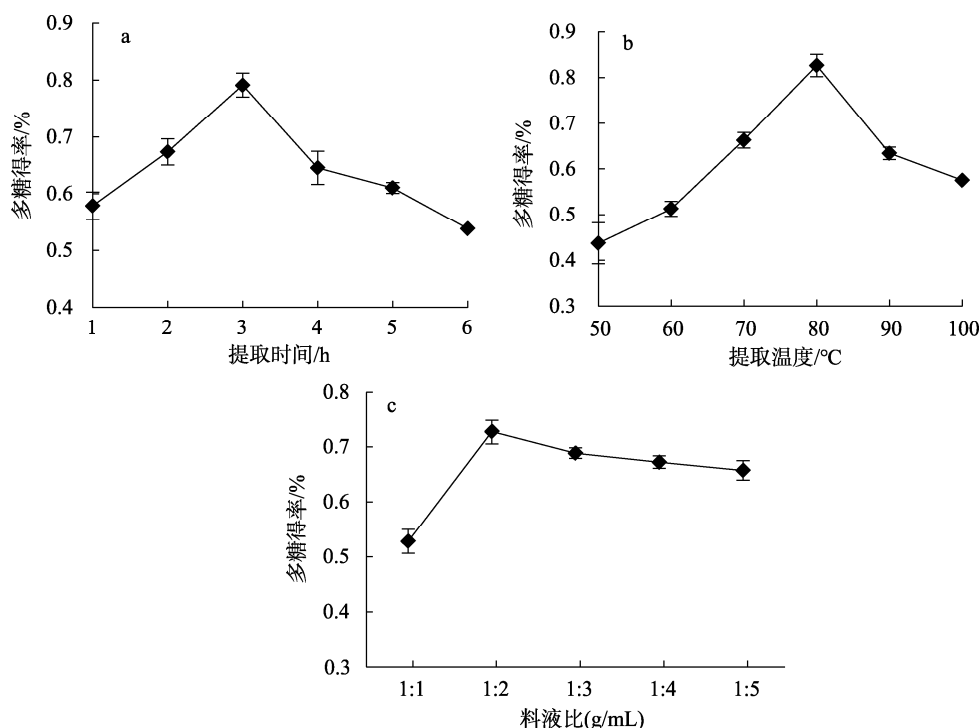


图 1 不同因素对多糖得率的影响

Fig.1 Effects of different factors on the yields of SCP

$$Y=0.93+0.020A-0.022B+0.047C-0.030AB+(4.250E-003)AC-(7.500E-003)BC-0.087A^2-0.44B^2-0.26C^2。$$

表 3 为上述模型的方差分析结果。由表 3 可知, 模型是显著的($P<0.0001$), 失拟项 P 值为 0.5436 大于 0.05, 不显著, 这说明模型的试验拟合程度较好。 R^2 为 0.9970 表示模型对各个试验点的适配度为 99.7%, 拟合度很好, 可以利用该回归方程代替试验真实点预测提取条件对缢蛏多糖得率的影响^[25]。分析模型回归方程的 P 值, 多糖提取模型中的一次项 A 、二次项(A^2 、 B^2 、 C^2)和交互项 AB 对多糖得率的影响表现为极显著, 一次项 B 对多糖得率的影响表现为显著水平, 而一次项 C 、交互项(AC 、 BC)则影响不显著。各因素对多糖得率的影响主次顺序为: A (提取温度) $>B$ (料液比) $>C$ (提取时间)。

2.2.2 响应面图和等高线图分析

等高线图可直观反映不同变量之间交互作用的显著程度, 椭圆形的等高线图意味着两被测变量间的交互作用显著, 而圆形的等高线图则表示两被测变量间的交互作用不显著^[26]。图 2~4 中的 3 个响应曲面图形状均为凸形曲面, 这代表响应值(Y)存在最高值, 而响应曲面的倾斜角度越陡峭, 表明两变量的交互作用越显著, 反之响应曲面的倾斜角度越平缓, 表示两因素的交互作用越微小。由图 2 可知, 提取温度与料液比之间的交互作用极为显著。

表 2 响应面法优化试验设计及结果
Table 2 Experimental results for response surface methodology

试验 编号	A 提取 温度/ $^{\circ}\text{C}$	B 料液比 (g/mL)	C 提取 时间/ h	Y 多糖 得率/%
1	1	0	1	0.460
2	-1	1	0	0.257
3	1	0	-1	0.498
4	0	-1	-1	0.301
5	1	-1	0	0.187
6	-1	0	1	0.623
7	0	0	0	0.961
8	0	-1	1	0.365
9	-1	-1	0	0.523
10	1	1	0	0.314
11	0	0	0	0.955
12	0	1	1	0.308
13	0	0	0	0.936
14	0	0	0	0.902
15	0	1	-1	0.295
16	-1	0	-1	0.555
17	0	0	0	0.923

表 3 响应面试验的方差分析
Table 3 Variance analysis of response surface test

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	1.25	9	0.14	260.04	$<0.0001^{**}$
A -提取温度/ $^{\circ}\text{C}$	0.031	1	0.031	58.22	0.0001^{**}
B -料液比(g/mL)	5.100E-003	1	5.100E-003	9.54	0.0176^{*}
C -提取时间/ h	1.431E-003	1	1.431E-003	2.68	0.1458
AB	0.039	1	0.039	72.22	$<0.0001^{**}$
AC	2.809E-003	1	2.809E-003	5.25	0.0556
BC	6.502E-004	1	6.502E-004	1.22	0.3066
A^2	0.17	1	0.17	312.51	$<0.0001^{**}$
B^2	0.73	1	0.73	1362.58	$<0.0001^{**}$
C^2	0.17	1	0.17	321.99	$<0.0001^{**}$
残差	3.742E-003	7	5.346E-004		
失拟项	1.433E-003	3	4.778E-004	0.83	0.5436
纯误差	2.309E-003	4	5.773E-004		
总离差	1.25	16			
R^2	0.9970				

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

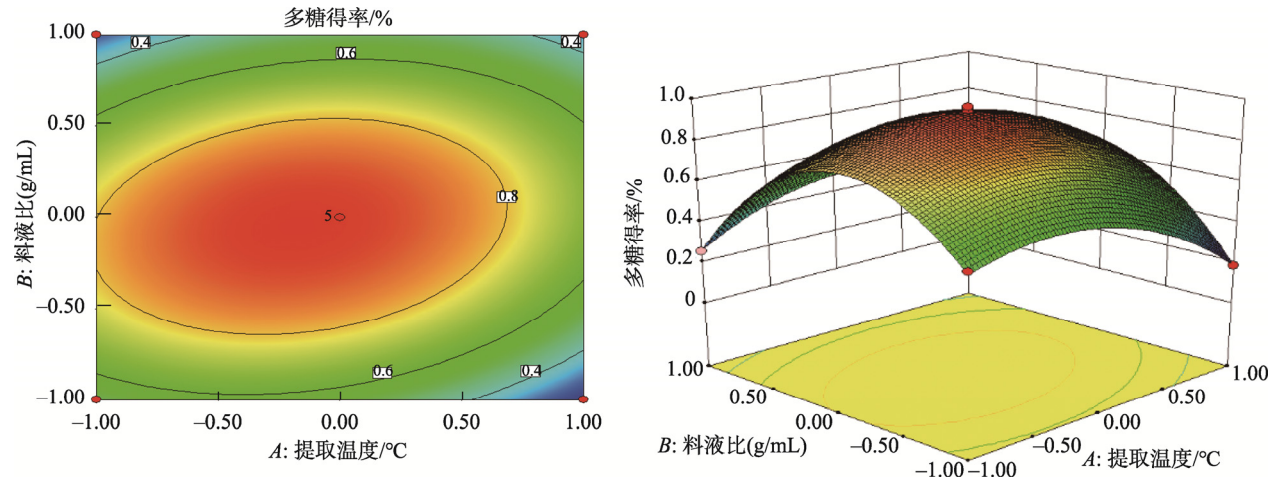


图 2 提取温度与料液比交互作用的响应面和等高线图
Fig.2 Response surface and contour map of the interaction between extraction temperature and solid-liquid ratio

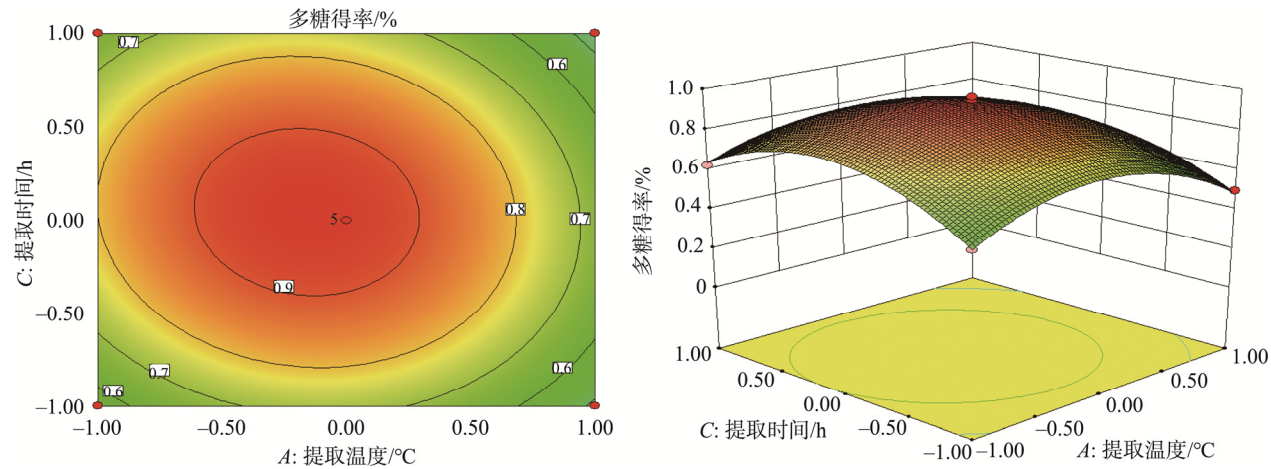


图 3 提取温度与提取时间交互作用的响应面和等高线图
Fig.3 Response surface and contour map of the interaction between extraction temperature and time

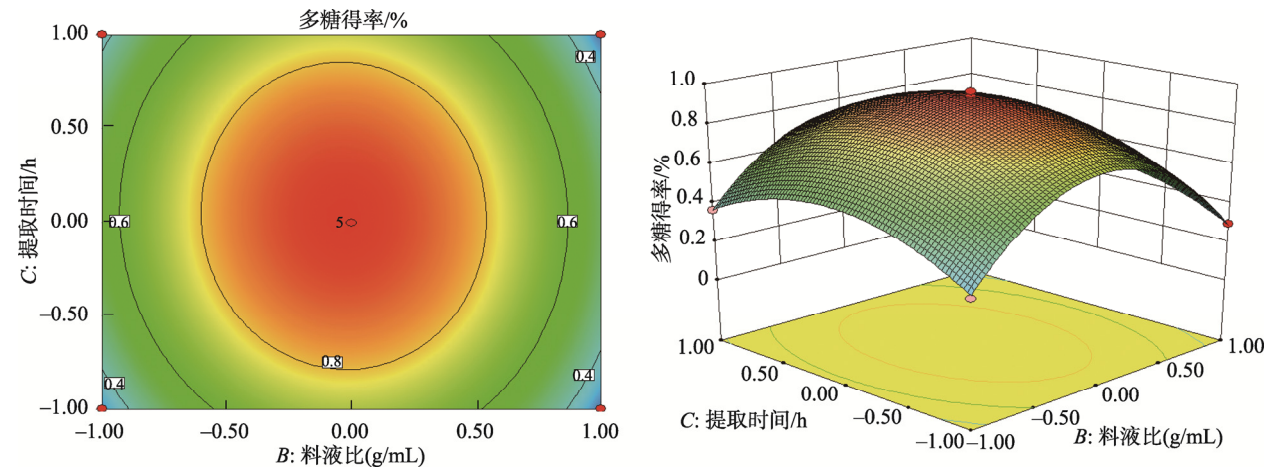


图 4 料液比与提取时间交互作用的响应面和等高线图
Fig.4 Response surface and contour map of the interaction between solid-liquid ratio and extraction time

2.2.3 验证与优化

通过软件求解回归方程, 得出提取工艺最优条件为: 提取温度 78.27 °C、料液比 1:1.95 (g/mL)、提取时间 3.05 h, 预测得率为 0.978%。考虑到实际的可操作性, 选择提取温度 80 °C、料液比 1:2 (g/mL)、提取时间 3 h, 在此条件下进行 3 次平行试验, 验证试验结果显示缢蛏多糖得率为 0.976%, 与理论预测值相对误差为 0.002%, 提取工艺可行。

经国家标准检测缢蛏多糖样品中的蛋白质及总糖含量分别为 28.6%和 48.61%。

2.3 缢蛏多糖性质分析

2.3.1 缢蛏多糖分子量测定

缢蛏多糖分子量测定结果如图 5 所示, 通过计算得出, 缢蛏多糖分子量约为 480 kD, 表明其为大分子多聚糖。

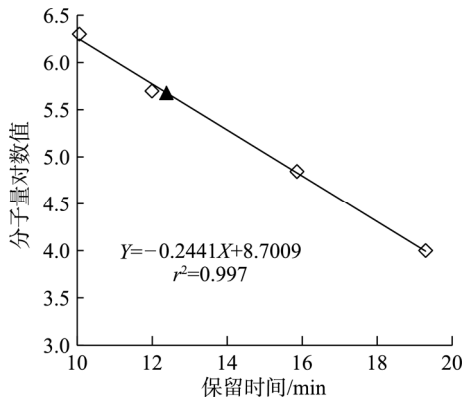
2.3.2 缢蛏多糖单糖组成分析

通过水解多糖并对其衍生化产物进行测定, 可以得出单糖组成及物质的量之比。缢蛏多糖经过水解、衍生化及高效液相色谱法检测, 试验结果如图 6 所示, 通过与单糖标准品谱图进行比对可知, 缢蛏多糖的单糖组分为葡萄糖。李志^[27]研究了牡蛎多糖的单糖组成, 发现其单糖组分也为葡萄糖。

2.3.3 傅里叶变换红外光谱分析

缢蛏多糖的红外光谱图如图 7 所示, 该图具有典型的

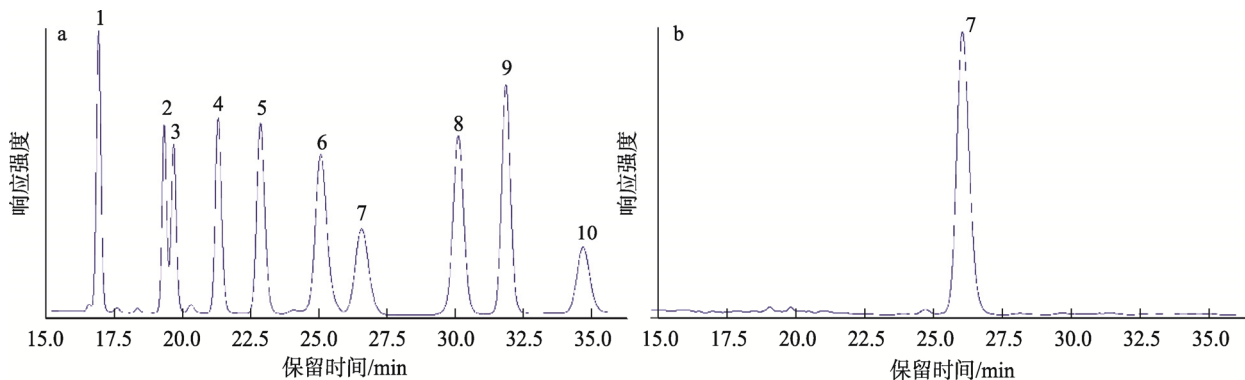
多糖红外吸收峰, 1635 cm^{-1} 处的吸收峰是 $\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动吸收, 2973 和 1380 cm^{-1} 的吸收峰为 $-\text{CH}_3$ 的伸缩振动和变角振动吸收, 3294 cm^{-1} 处的吸收峰为 $-\text{OH}$ 键的伸缩振动吸收, 1047、1088 和 1219 cm^{-1} 处均有吸收, 表明该糖环构型为吡喃型, 935 cm^{-1} 处的吸收峰为 D -吡喃糖的伸缩振动吸收, 且在 882 cm^{-1} 处有吸收峰, 推断该多糖为 α - D -吡喃型多糖。该试验结果也与刘志昌等^[28]的研究结论一致。



注: ◇为分子量标准品, ▲为缢蛏多糖样品。

图 5 高效液相色谱法测定缢蛏多糖分子量

Fig.5 Determination of molecular weight of SCP by high performance liquid chromatography



注: a 中 1~10 依次为:甘露糖、氨基葡萄糖、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、岩藻糖。

图 6 单糖标准品(a)和缢蛏多糖(b)的单糖高效液相色谱图

Fig.6 High performance liquid chromatograms of standard monosaccharides (a) and SCP (b)

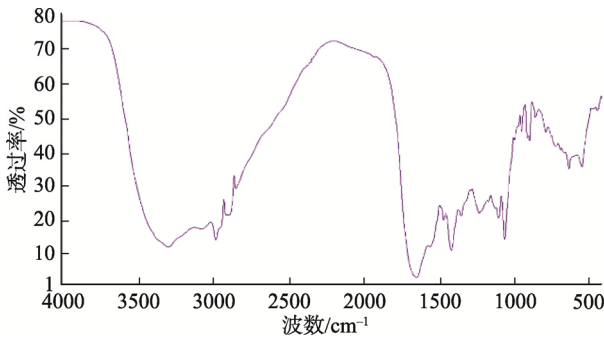


图 7 缢蛏多糖红外光谱图

Fig.7 Infrared spectrum of SCP

2.4 缢蛏多糖体外抗氧化活性

2.4.1 缢蛏多糖对超氧阴离子自由基的清除能力

超氧阴离子自由基是人体内常见的氧自由基, 是其他活性氧的产生前体, 而且超氧阴离子自由基可作为引发剂启动自由基链式反应, 会衍生出更多活性更强的自由基, 对人体造成更大伤害^[29]。由图 8 可知, VC 清除超氧阴离子的效率极高, 而缢蛏多糖对超氧阴离子自由基清除作用随着多糖浓度的增加相应增强, 具有明显的浓度依赖性。在试验所选浓度范围内, 当多糖的质量浓度为 10 mg/mL 时, 缢蛏多糖对超氧阴离子自由基清除率达到 33.71%。

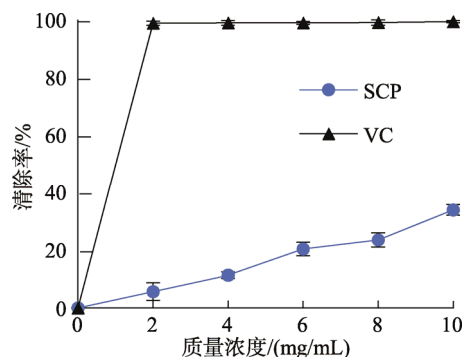


图 8 缢蛏多糖和 VC 清除超氧阴离子自由基的作用

Fig.8 Scavenging effects of SCP and VC on superoxide anion free radicals

2.4.2 缢蛏多糖对羟基自由基的清除能力

羟基自由基是一种活性氧,也是人体的正常代谢产物,当人体内的动态平衡被打破,羟基自由基会对人体造成损害,引发疾病。以 VC 作为对照,研究缢蛏多糖对羟基自由基的清除作用,结果见图 9。由图 9 可知,VC 清除羟基自由基的能力极高。在所选质量浓度范围内,缢蛏多糖对羟基自由基具有较好的清除作用,并且缢蛏多糖的质量浓度与清除羟基自由基的能力呈正相关。当质量浓度为 10 mg/mL 时,缢蛏多糖的羟基自由基清除率达到 91.71%。

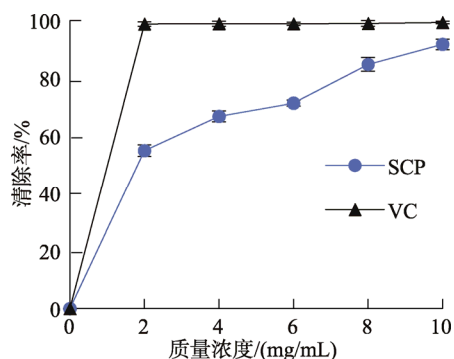


图 9 缢蛏多糖和 VC 清除羟基自由基的作用

Fig.9 Scavenging effects of SCP and VC on hydroxyl radical

2.4.3 缢蛏多糖对 DPPH 自由基的清除能力

抗氧化物质清除 DPPH 自由基的能力与其所能接受的电子数量密切相关,即与该物质的供氢能力相关。由图 10 可知,VC 清除 DPPH 自由基的能力极强,而在所选的浓度范围内,缢蛏多糖清除 DPPH 自由基的能力随着浓度的升高而增强,显示出良好的剂量关系,并且缢蛏多糖清除 DPPH 自由基的效果要优于其对超氧阴离子自由基和羟基自由基的清除效果。在质量浓度为 6~10 mg/mL 范围内,缢蛏多糖具有较高的 DPPH 自由基清除能力,当多糖质量浓度为 10 mg/mL 时,其对 DPPH 自由基的清除率达到 95.46%。

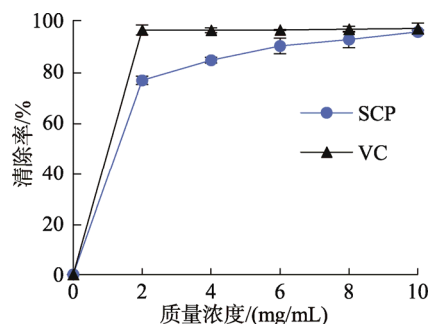


图 10 缢蛏多糖和 VC 清除 DPPH 自由基的作用

Fig.10 Scavenging effects of SCP and VC on DPPH radical

当前主流的抗氧化机制包括:清除活性自由基、清除非活性氧化因子、螯合金属离子等,而影响多糖物质抗氧化的因素很多,包括多糖来源、提取方法、纯度、分子量、化学结构、空间构象等^[30]。钟城城等^[31]研究了厚壳贻贝多糖的体外抗氧化活性,发现其抗氧化活性也与浓度呈一定正相关性,厚壳贻贝多糖清除 DPPH 自由基和超氧阴离子自由基的最大清除率均在 80%左右(10 mg/mL),但其多糖还原力测定中,多糖还原活性较低。郭雷等^[32]研究了青蛤多糖的体外抗氧化活性,发现其具有较强的浓度依赖的抗氧化能力。多糖物质的抗氧化活性在不同的体外抗氧化试验中并不总是保持一致,这主要是因为当前通用的多种体外抗氧化试验采用不同的试验方法,其适用对象和反应体系有差异,导致多糖体外抗氧化试验结果之间缺乏对比。

3 结 论

本研究采用响应面法优化了缢蛏多糖的提取工艺条件,其最佳提取工艺条件为:提取温度 80 °C、料液比 1:2 (g/mL)、提取时间 3 h,该条件下多糖得率为 0.976%。采用红外光谱扫描和高效液相色谱法对缢蛏多糖进行光谱分析和单糖组成分析,结果表明缢蛏多糖分子量约为 480 kD,主要由葡萄糖组成,以 α -D-吡喃型多糖形式存在。缢蛏多糖具有较好的体外抗氧化活性,其清除超氧阴离子自由基、羟基自由基、DPPH 自由基的能力与多糖浓度有明显的量效关系。以上试验结果可为缢蛏的精深加工及产品开发提供参考。

参考文献

- [1] 孙秋颖, 张付云, 李伟, 等. 缢蛏的营养及活性成分研究进展[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(12): 201-204.
SUN QY, ZHANG FY, LI W, et al. Research progress on the nutritional and functional ingredient of *Sinonovacula constricta* (Lamarck) [J]. Food Res Dev, 2011, 32(12): 201-204.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局. 2020 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
Fishery Administration of the Ministry of Agriculture and Rural Areas. China fishery statistical yearbook of 2020 [M]. Beijing: China Agricultural

- Press, 2020.
- [3] 黎跃成, 万德光. 中国药用动物原色图鉴[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010.
- LI YC, WAN DG. Primary color atlas of Chinese medicinal animals [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2010.
- [4] LIU B, LIU H, AI C, *et al.* Distribution of uronic acid-containing polysaccharides in 5 species of shellfishes [J]. Carbohydr Polym, 2017, 164: 195–199.
- [5] 刘志芳, 赵前程, 刘志东, 等. 贝类多糖研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 299–306.
- LIU ZF, ZHAO QC, LIU ZD, *et al.* Research progress of polysaccharides derived from shellfish [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(9): 299–306.
- [6] 董晓静, 范秀萍, 吴红棉, 等. 波纹巴非蛤糖胺聚糖抗氧化作用的研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(6): 181–184.
- DONG XJ, FAN XP, WU HM, *et al.* Study on antioxidation effect of glycosaminoglycan from *Paphia undulate* [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, 33(6): 181–184.
- [7] 吴红棉, 雷晓凌, 洪鹏志, 等. 珠母贝糖胺聚糖的结构初探及其生理活性[J]. 水产学报, 2001, 25(2): 166–170.
- WU HM, LEI XL, HONG PZ, *et al.* The preliminary probe of structure and physiological activity of glycosaminoglycan from *Pinctada martensis* [J]. J Fish China, 2001, 25(2): 166–170.
- [8] 胡雪琼, 吴红棉, 范秀萍, 等. 近江牡蛎糖胺聚糖的免疫调节活性研究[J]. 现代食品科技, 2014, 30(12): 16–24.
- HU XQ, WU HM, FAN XP, *et al.* Immunomodulatory activity of glycosaminoglycans from Jinjiang oyster *Crassostrea rivularis* [J]. Mod Food Sci Technol, 2014, 30(12): 16–24.
- [9] 胡雪琼, 吴红棉, 林志明, 等. 毛蚶糖胺聚糖的理化性质及其对小鼠免疫脏器影响的初步研究[J]. 现代食品科技, 2008, 24(8): 763–766.
- HU XQ, WU HM, LIN ZM, *et al.* Preliminary study on physicochemical property of glycosaminoglycan from *Area suhcrenatelisehke* and its effects on immune organs of mice [J]. Mod Food Sci Technol, 2008, 24(8): 763–766.
- [10] 刘勇军, 李江滨, 候敢, 等. 翡翠贻贝提取物对小鼠抗疲劳作用的研究[J]. 食品研究与开发, 2006, 27(2): 126–129.
- LIU YJ, LI JB, HOU G, *et al.* The study of anti-fatigue effects of emerald mussel extracts in mice [J]. Food Res Dev, 2006, 27(2): 126–129.
- [11] 李萌, 杜国威, 刘赛, 等. 牡蛎糖胺聚糖小鼠体内抗病毒作用的试验研究[J]. 中国海洋药物, 2008, 27(2): 50–52.
- LI M, DU GW, LIU S, *et al.* Experimental study on antiviral effect of oyster glycosaminoglycan in mice [J]. Chin Mari Med, 2008, 27(2): 50–52.
- [12] 刘倩, 范秀萍, 吴红棉, 等. 尖紫蛤糖胺聚糖抑制肿瘤细胞生长作用的研究[J]. 现代食品科技, 2012, 28(4): 396–399.
- LIU Q, FAN XP, WU HM, *et al.* Inhibition effect of glycosaminoglycan from *Sanguinolaria acutas* on the growth of tumor cells [J]. Mod Food Sci Technol, 2012, 28(4): 396–399.
- [13] 胡雪琼, 吴红棉, 范秀萍, 等. 珠母贝糖胺聚糖抗肿瘤作用初步研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(22): 315–319.
- HU XQ, WU HM, FAN XP, *et al.* Primary study on the antitumor effect of glycosaminoglycan extracted from *Pinctada martensii* Dunder [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(22): 315–319.
- [14] 李江滨, 袁希福, 候敢, 等. 贻贝多糖对小鼠酒精性肝损伤的影响[J]. 食品科技, 2009, 34(4): 188–190.
- LI JB, YUAN XF, HOU G, *et al.* Effects of mussel polysaccharide on alcoholic hepatic injury in mice [J]. Food Sci Technol, 2009, 34(4): 188–190.
- [15] 汤梦瑶, 王海波, 祁艳霞, 等. 蛤类多糖的研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2018, 33(1): 130–136.
- TANG MY, WANG HB, QI YX, *et al.* Research progress of polysaccharides from clam: A review [J]. J Dalian Ocean Univ, 2018, 33(1): 130–136.
- [16] 程知庆, 沈和定, 姚理想, 等. 贝类多糖的生物活性研究现状及药用价值[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(24): 17–19.
- CHENG ZQ, SHEN HD, YAO LX, *et al.* Biological activity status and medicinal value of shellfish polysaccharide [J]. Anhui Agric Sci, 2015, 43(24): 17–19.
- [17] DUBOIS M, GILLES KA, HAMILTON JK, *et al.* Colorimetric method for determination of sugars and related substances [J]. Anal Chem, 1956, 28: 350–356.
- [18] 周春晖, 周丹丹, 刘婷婷, 等. 高效凝胶色谱法测定猴头菇多糖分子量及含量[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(21): 123–127.
- ZHOU CH, ZHOU DD, LIU TT, *et al.* Determination of molecular weight and content of *Hericium erinaceus* polysaccharide by high performance gel chromatography [J]. Food Res Dev, 2016, 37(21): 123–127.
- [19] 陈燕文, 李玉娟, 宋梦璐, 等. PMP柱前衍生化-HPLC法分析玛咖多糖的单糖组成[J]. 当代化工, 2017, (8): 1513–1516.
- CHEN YW, LI YJ, SONG ML, *et al.* Analysis on monosaccharide composition of maca polysaccharide by PMP pre-column derivatization-HPLC [J]. Contemp Chem Ind, 2017, (8): 1513–1516.
- [20] 王雪艳. 龙眼多糖的提取纯化及其抗氧化活性研究[D]. 厦门: 集美大学, 2009.
- WANG XY. Study on extraction, purification and anti-oxidative activity of polysaccharides from Longan fruit [D]. Xiamen: Jimei University, 2009.
- [21] CHEN F, HUANG G. Extraction and antioxidant activities of cushaw polysaccharide [J]. Int J Biol Macromol, 2018, 120: 1646–1649.
- [22] 王伟, 朱利娜, 史俊友, 等. 青海沙棘果粉抗氧化活性的研究[J]. 中国野生植物资源, 2014, 33(1): 24–27.
- QIANG W, ZHU LN, SHI JY, *et al.* Study on antioxidant activity of fruit powder from Qinghai's *Hippophae rhamnoides* L. [J]. Chin Wild Plant Res, 2014, 33(1): 24–27.
- [23] 葛雪筠, 周德健, 王斌, 等. 响应面法优化中性蛋白酶提取苦竹花多糖及多糖性质分析[J]. 食品科学, 2017, 38(14): 193–199.
- GE XY, ZHOU DJ, WANG B, *et al.* Optimization of neutroproteinase-assistant extraction of polysaccharide from the stroma of *Shiraiabambusicola* Henn by response surface analysis and characterization of the extracted polysaccharide [J]. Food Sci, 2017, 38(14): 193–199.
- [24] 刘涛, 王清, 夏新奎, 等. 响应面法优化地骨皮多糖提取工艺[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2019, 38(2): 53–56.
- LIU T, WANG Q, XIA XK, *et al.* Optimization of extraction technology of polysaccharides from *Cortex Lycii* by response surface methodology [J]. J Xihua Univ (Nat Sci Ed), 2019, 38(2): 53–56.
- [25] VAZQUEZ G, FREIRE MS, SANTOS J, *et al.* Optimization of polyphenols extraction from chestnut shell by response surface methodology [J]. Waste Biomass Valor, 2010, 1(1): 219–255.
- [26] MURALIDHAR RV, CHIRUMAMILA RR, MARCHANT R, *et al.* A

- response surface approach for the comparison of lipase production by *Candida cylindracea* using two different carbon sources [J]. Biochem Eng J, 2001, 9(1): 17–23.
- [27] 李志. 牡蛎多糖的分离纯化及生物学活性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- LI Z. The extraction, purification and biologic activity of ostreidae polysaccharise [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- [28] 刘志昌, 王海波, 洪滨, 等. 海洋贝类多糖的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(11): 4231–4238.
- LIU ZC, WANG HB, HONG B, *et al.* Progress of polysaccharides isolated from marine shellfish [J]. J Food Saf Qual, 2017, 8(11): 4231–4238.
- [29] 张唐伟, 杨乐, 柳青海, 等. 地木耳多糖的抗氧化性与抑菌作用[J]. 食品与生物技术学报, 2011, 30(6): 868–873.
- ZHANG TW, YANG L, LIU QH, *et al.* Antioxidant and antimicrobial activities of *Nostoc commune* polysaccharides [J]. J Food Sci Biotechnol, 2011, 30(6): 868–873.
- [30] 刘玉婷, 李井雷. 多糖体外抗氧化活性研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(6): 214–219.
- LIU YT, LI JL. Advances in research on antioxidant activity of polysaccharides *in vitro* [J]. Food Res Dev, 2019, 40(6): 214–219.
- [31] 钟城城, 曲有乐, 陈萌. 厚壳贻贝多糖的提取工艺优化及体外生物活性研究[J]. 食品科学, 2014, 35(10): 107–114.
- ZHONG CC, QU YL, CHEN M. Optimized extraction and bioactivity *in vitro* of polysaccharides from *Mytilus coruscus* [J]. Food Sci, 2014, 35(10): 107–114.
- [32] 郭雷, 许福泉, 樊鑫桐, 等. 青蛤多糖的提取工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(21): 10–14.
- GUO L, XU FQ, FAN XT, *et al.* Extraction process and antioxidant activities of polysaccharides from *Cyclina sinensis* [J]. Food Res Dev, 2014, 35(21): 10–14.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



王 涛, 主要研究方向为食品加工与安全。

E-mail: 302859031@qq.com



金 桥, 博士, 副教授, 主要研究方向为海洋生物资源开发利用。

E-mail: jinqiao43@dlou.edu.cn