

菊芋多糖锌的制备及其抗氧化活性评价

张雅施, 李文文, 宗爱珍, 左兆河, 郑振佳, 张斌

Preparation and Antioxidant Activity Evaluation of Jerusalem Artichoke Polysaccharide-Zn Complex

ZHANG Yashi, LI Wenwen, ZONG Aizhen, ZUO Zhaohe, ZHENG Zhenjia, and ZHANG Bin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070113>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大米胚芽锌多糖制备及其抗氧化活性

Preparation and antioxidant activity of rice germ Zn²⁺-polysaccharide

食品工业科技. 2017(14): 238-243 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.14.046>

柚子菊芋果蔬发酵饮料的制备及其抗氧化活性

Fermented beverage of shaddock and jerusalem artichoke preparation and its antioxidant activity analysis

食品工业科技. 2017(19): 136-141 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.19.026>

两种方法制备玉竹多糖工艺优化及抗氧化活性比较

Optimization of Two Kinds of Preparation Process of Polysaccharide from *Polygonatum odoratum* and Antioxidant Activity Comparison

食品工业科技. 2018, 39(13): 218-222 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.13.038>

胭脂果多糖提取工艺优化及其抗氧化活性分析

Optimization of Extraction Process of Polysaccharide from *Padus napaulensis* and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2020, 41(4): 139-145 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.04.024>

酶法提取地桃花多糖的工艺优化及其抗氧化活性

Optimization of Enzymatic Extraction Process of Polysaccharide from *Urena lobata* L. and Its Antioxidant Activity

食品工业科技. 2018, 39(23): 222-226,299 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.23.039>

芡实皮渣多糖的提取工艺优化及体外抗氧化活性研究

Optimization Extraction Process of Polysaccharide from the Pericarp Residues of *Euryale ferox* and Its Antioxidant Activity *in Vitro*

食品工业科技. 2020, 41(22): 142-149 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020020291>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张雅施, 李文文, 宗爱珍, 等. 菊芋多糖锌的制备及其抗氧化活性评价 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 251–259. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070113

ZHANG Yashi, LI Wenwen, ZONG Aizhen, et al. Preparation and Antioxidant Activity Evaluation of Jerusalem Artichoke Polysaccharide-Zn Complex[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 251–259. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070113

· 工艺技术 ·

菊芋多糖锌的制备及其抗氧化活性评价

张雅施¹, 李文文¹, 宗爱珍², 左兆河³, 郑振佳¹, 张 斌^{1,*}

(1. 山东农业大学食品科学与工程学院, 山东省高等学校食品营养与健康重点实验室, 山东泰安 271018;
2. 山东省农业科学院农产品加工与营养研究所, 山东济南 250100;
3. 山东益得来生物科技有限公司, 山东泰安 271024)

摘 要: 本文以菊芋多糖和硫酸锌为原料制备菊芋多糖锌, 在单因素实验的基础上结合响应面法优化菊芋多糖锌的制备工艺, 并考察了多糖和多糖锌的体外抗氧化活性。结果表明, 菊芋多糖锌最优制备工艺为: 菊芋多糖与硫酸锌质量比为 32:1、反应时间 60 min、反应温度 50 ℃、反应 pH 8.50, 此条件下螯合率为 87.06%±0.28%。体外抗氧化活性结果表明, 在 0.3~2.7 mg/mL 浓度范围内, 菊芋多糖和菊芋多糖锌复合物均具有较好的体外抗氧化性能, 菊芋多糖锌对 DPPH 自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基和 ABTS⁺ 自由基的最大清除能力分别为 23.42%、13.47%、29.36% 和 18.50%。该研究结果可为菊芋多糖锌功能食品和营养补充剂的开发提供理论基础。

关键词: 菊芋, 多糖, 锌, 工艺优化, 抗氧化活性

中图分类号: TS201.4

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2023)12-0251-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022070113

本文网刊:



Preparation and Antioxidant Activity Evaluation of Jerusalem Artichoke Polysaccharide-Zn Complex

ZHANG Yashi¹, LI Wenwen¹, ZONG Aizhen², ZUO Zhaohe³, ZHENG Zhenjia¹, ZHANG Bin^{1,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Shandong Agricultural University, Key Laboratory of Food Nutrition and Healthy in Universities of Shandong, Taian 271018, China;
2. Institute of Agro-Foods Sciences and Technology, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, China;
3. Shandong Yidelai Biotechnology Co., Ltd., Taian 271024, China)

Abstract: Jerusalem artichoke polysaccharide (JAP)-Zn complex was prepared using JAP and ZnSO₄ as raw materials, and single factor and response surface methodology methods were applied for the optimization preparation process of JAP-Zn complex. Besides, the antioxidant activities *in vitro* of JAP and JAP-Zn complex were investigated. The optimal preparation process of the JAP-Zn complex was as follows: The weight ratio of JAP and ZnSO₄ was 32:1, the reaction time was 60 min, the reaction temperature was 50 ℃, and the reaction pH was 8.50. Under these conditions, the chelation rate was 87.06%±0.28%. The results of antioxidant activity *in vitro* showed that both JAP and JAP-Zn complex exhibited excellent antioxidant activity in the concentration range of 0.3~2.7 mg/mL. The maximum scavenging capacity of JAP-Zn complex on the maximum scavenging rates of DPPH free radical, hydroxyl free radical and superoxide anion free radical, ABTS⁺ free radical was 23.42%, 13.47%, 29.36% and 18.50%, respectively. The results would provide a theoretical basis for the development of functional foods and nutritional supplements for JAP and JAP-Zn complex.

Key words: Jerusalem artichoke; polysaccharide; zinc; process optimization; antioxidant activity

收稿日期: 2022-07-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2019YFD1002704)。

作者简介: 张雅施 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 17861506605@163.com。

* 通信作者: 张斌 (1991-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 农产品加工, E-mail: zbin@sdau.edu.cn。

菊芋又称洋姜、姜不辣,为菊科向日葵属多年生草本植物,具有耐寒、耐旱、耐贫瘠、抗病虫害等优势,可在未经开发的荒漠、滩涂和盐碱地广泛种植^[1]。同时,菊芋是一种极具开发潜力的野生资源,有通便、消肿、降血糖、降血脂等多种功效^[2-4]。菊芋的多种生物活性归因其富含多糖、脂肪酸、萜类、酚酸类等多种成分,其中多糖含量最为丰富,约占其鲜重的14%~19%^[4]。菊芋多糖主要由D-呋喃果糖经 $\beta(2\rightarrow1)$ 糖苷键连接而成^[5],具有调节血糖血脂^[6-9]、增强免疫力^[10]、抗菌^[11]、促进体内矿物元素吸收^[12-13]等功能。近年来,由于多糖安全、高生物相容性和成本低的特点被广泛应用于口服功能成分、营养元素或者益生菌的纳米载体^[14-15]。也有一些研究证明,经过化学修饰后的多糖有更好的生物活性,例如硒多糖、铬多糖、锌多糖以及铁多糖等^[16-20]。

锌是生物体所必需的微量元素之一,是体内多种酶合成的重要组成部分^[21-22]。缺锌容易出现机体免疫低下、生长缓慢、贫血、营养不良、佝偻病、生殖能力减弱等症状^[23-24]。传统补锌剂多为无机锌,生物利用率低,对胃肠道刺激较大^[25]。多糖中含有多个羟基基团,可与锌离子以配位键结合形成多糖锌或者通过包埋形式靶向递送锌离子到达肠道^[26-28]。与无机锌相比,多糖锌生物利用率提高,胃肠道刺激减小,能更高效、更安全地被人体吸收利用^[29-31]。目前已合成的多糖锌主要有生姜皮多糖锌^[32]、南瓜皮多糖锌^[33]、罗耳阿太菌多糖锌^[34]、孔石莼多糖锌^[35]、金针菇多糖锌^[36]等,有关菊芋多糖锌的制备及其抗氧化活性的研究尚未见报道。

本研究以菊芋多糖与硫酸锌为原料制备菊芋多糖锌,采用单因素和响应面法优化菊芋多糖锌的制备工艺,并研究其体外抗氧化活性,为新型补锌剂的开发提供理论参考和依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

菊芋干切片 河北石家庄晋州;硫酸锌、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠 均为分析纯,天津市凯通化学试剂有限公司;盐酸(优级纯)、氢氧化钠(分析纯) 天津市科密欧化学试剂有限公司;浓硝酸 优级纯,苏州晶瑞化学股份有限公司;锌标准储备液(1000 $\mu\text{g/mL}$)

国家检验认证有限公司;1,1-2 二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH) 化学纯,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;硫酸亚铁 化学纯,博山化学试剂厂;水杨酸

分析纯,上海源叶生物科技有限公司;ABTS 上海麦克林科技有限公司;过硫酸钾 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;Tris-HCl 缓冲液、邻苯三酚 北京索莱宝科技有限公司;透析袋(500、2000 Da)

怡康科贸生物试剂耗材实验有限公司。

7800 型电感耦合等离子体质谱仪(inductively coupled plasma mass spectrometer, ICP-MS) 美国安捷伦;Avanti J-15R 型冷冻高效台式离心机 美国

贝克曼库尔特有限公司;SECURA224-ICN 型电子天平 赛多利斯仪器(北京)有限公司;S210 型 pH 计

梅特勒-托利多仪器有限公司;DKZ-2B 型水浴恒温振荡器 上海一恒科技仪器有限公司;FD-304 冷冻干燥机 济南骏德仪器有限公司;全波长酶标仪 广州伯齐生物科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 菊芋多糖锌的制备 参考 Li 等^[37]方法提取菊芋多糖,并通过 Seavage 法脱除蛋白和卢晓明^[38]方法脱除果胶成分,经浓缩、透析、醇沉后获得菊芋多糖。参照黄靖等^[39]研究,采用硫酸锌法制备菊芋多糖锌。将菊芋多糖和硫酸锌分别溶于水,将两种溶液等体积混匀,设计不同的反应质量比、反应时间、反应温度和反应 pH 后于恒温水浴振荡器中进行反应,反应结束后加入 4 倍体积无水乙醇,醇沉,10000 r/min 离心 10 min,取沉淀复溶,用截留分子量为 500 Da 的透析袋透析 72 h,真空冷冻干燥得菊芋多糖锌。

1.2.2 多糖含量测定

1.2.2.1 标准曲线的绘制 分别取 0.1 mg/mL 葡萄糖标准溶液 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 于试管中,用超纯水补齐至 2 mL,然后分别加入 1.0 mL 5% 苯酚溶液,震荡摇匀,立即加入 5 mL 浓硫酸,放入沸水加热 15 min,取出冷却至室温,在 490 nm 处测其吸光度。以标准品浓度(X)为横坐标、吸光度(Y)为纵坐标,绘制标准曲线,得到标准曲线方程: $Y=0.0757X+0.0495$, $R^2=0.9992$ 。

1.2.2.2 多糖含量的测定 采用苯酚-硫酸法测定多糖含量^[40]。将菊芋多糖配制为 0.1 mg/mL 的多糖溶液。取 0.5 mL 样品于试管中,加入 1.5 mL 超纯水,1.0 mL 5% 苯酚溶液,5 mL 浓硫酸,立即摇匀,放入沸水加热 15 min,取出冷却至室温,在 490 nm 处测其吸光度。将测得的吸光度带入标准曲线,计算菊芋多糖含量。

1.2.3 整合率的测定

1.2.3.1 锌标曲的绘制 取 1 mL 锌标准溶液(1 mg/mL)用 2% 硝酸定容至 100 mL 容量瓶中制备 10 mg/L 的锌标准中间液。分别移取 1、2、4、6、8、10 mL 锌标准中间液用 2% 硝酸定容至 100 mL,制备 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/L 的锌标准系列溶液。以 ICP-MS 测定待测元素和内标元素的信号为响应值,得到标准曲线方程: $Y=0.9801X+0.0142$, $R^2=0.9998$,式中:Y 为比率;X 为锌离子浓度, $\mu\text{g/L}$ 。

1.2.3.2 整合率的计算 参照李文文等^[32]的方法计算整合率,精确移取一定体积制备完全的多糖锌混合液,然后加入 4 倍体积的无水乙醇,醇沉,离心,吸取上清液用 2% 硝酸稀释,用 ICP-MS 测定锌离子的整合率。整合率计算公式如下:

$$\text{整合率}(\%) = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \times 100$$

式中: H_1 表示混合液中锌离子的初始浓度, $\mu\text{g/mL}$; H_2 表示上清液中锌离子的浓度, $\mu\text{g/mL}$ 。

1.2.4 单因素实验 分别选取多糖与硫酸锌质量比、反应时间、反应温度、反应 pH 四个因素进行单因素实验,以螯合率为考察指标,考察以上四个因素对螯合率的影响。

1.2.4.1 多糖与硫酸锌质量比对螯合率的影响 取 0.2 g/L 的硫酸锌溶液,分别按多糖与硫酸锌的质量比为 15:1、20:1、25:1、30:1、35:1 等体积混合,调整 pH 为 6,于 60 °C 反应 60 min,按照 1.2.3.2 方法计算多糖-锌的螯合率。

1.2.4.2 反应时间对螯合率的影响 取 0.2 g/L 的硫酸锌溶液,按多糖与硫酸锌的质量比为 25:1 等体积混合、反应温度为 60 °C,反应 pH 为 6,分别反应 30、60、90、120、150 min,按照 1.2.3.2 方法计算多糖-锌的螯合率。

1.2.4.3 反应温度对螯合率的影响 取 0.2 g/L 的硫酸锌溶液,按多糖与硫酸锌的质量比为 25:1 等体积混合、反应时间为 60 min、反应 pH 为 6,分别在 30、40、50、60、70 °C 的条件下进行反应,按照 1.2.3.2 方法计算多糖-锌的螯合率。

1.2.4.4 反应 pH 对螯合率的影响 取 0.2 g/L 的硫酸锌溶液,按多糖与硫酸锌的质量比为 25:1 等体积混合、反应温度为 60 °C、反应时间为 60 min,分别在反应 pH 为 5、6、7、8、9 的条件下进行反应,按照 1.2.3.2 方法计算多糖-锌的螯合率。

1.2.5 响应面试验 以单因素实验为基础,以菊芋多糖与硫酸锌的质量比、反应时间、反应温度、反应 pH 为自变量,以螯合率为响应值,进行响应面试验设计。采用 Design-Expert 8.0.6.1 统计分析软件建立 Box-Behnken 模型进行回归分析,来确定菊芋多糖螯合锌的最优工艺条件。响应面试验设计因素与水平见表 1。

表 1 响应面试验因素水平表
Table 1 Factors and Levels of response surface test

水平	因素			
	A多糖和硫酸锌 质量比	B反应时间 (min)	C反应温度 (°C)	D反应pH
-1	25:1	30	40	7
0	30:1	60	50	8
1	35:1	90	60	9

1.2.6 体外抗氧化活性测定

1.2.6.1 DPPH 自由基清除能力测定 采用 DPPH 比色法测定样品的 DPPH 自由基清除能力^[41]。分别吸取 1.0 mL 不同浓度(0.3、0.9、1.5、2.1、2.7 mg/mL)的多糖和多糖锌溶液与 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液等体积混合,震荡摇匀,避光静置 30 min,在 517 nm 波长处测定各样品的吸光值。DPPH 自由基清除率的计算公式如下:

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

式中: A_1 为反应完样品的吸光值, A_2 为样品溶液自身的吸光值, A_0 为空白对照的吸光值。

1.2.6.2 羟基自由基清除能力测定 采用水杨酸法测定样品的羟基自由基清除能力^[42]。在试管中分别加入 1 mL 不同浓度(0.3、0.9、1.5、2.1、2.7 mg/mL)的多糖和多糖锌溶液,并依次向试管中加入 1 mL 9 mmol/L 硫酸亚铁溶液和 1 mL 9 mmol/L 水杨酸溶液,摇匀静置 5 min,再加入 1 mL 8.8 mmol/L 过氧化氢溶液启动反应,混合均匀,在 37 °C 下静置 30 min,在 510 nm 波长处测定各样品的吸光值。羟基自由基清除率的计算公式如下:

$$\text{羟基自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

式中: A_1 为反应完样品的吸光值, A_2 为样品溶液自身的吸光值, A_0 为空白对照的吸光值。

1.2.6.3 超氧阴离子自由基清除能力测定 采用邻苯三酚自氧化法测定样品的超氧阴离子自由基清除能力^[42]。将 4.5 mL 50 mmol/L 的 Tris-HCl 缓冲液(pH8.2)分别与 1 mL 不同浓度(0.3、0.9、1.5、2.1、2.7 mg/mL)的多糖和多糖锌溶液混匀,25 °C 静置 20 min,并在该温度下加入 100 μL 30 mmol/L 的邻苯三酚溶液,混匀,反应 5 min 后立即加入 1 mL 8 mmol/L 的盐酸溶液终止反应,在 320 nm 波长下测各样品的吸光值。超氧阴离子自由基清除率的计算公式如下:

$$\text{超氧阴离子自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

式中: A_1 为反应完样品的吸光值, A_2 为样品溶液自身的吸光值, A_0 为空白对照的吸光值。

1.2.6.4 ABTS⁺自由基清除能力测定 按照 Wootton-beard 等^[43]的方法测定样品对 ABTS⁺自由基的清除能力。配制 ABTS⁺溶液,用磷酸盐缓冲液(pH7.4)将 ABTS⁺溶液稀释至吸光值为 0.70 $\pm$ 0.02 的溶液备用。在试管中分别加入 0.1 mL 不同浓度(0.3、0.9、1.5、2.1、2.7 mg/mL)的多糖和多糖锌溶液与 2 mL 稀释好的 ABTS⁺溶液,混匀,避光静置 5 min,在 734 nm 波长下测定各样品的吸光值。ABTS⁺自由基清除率的计算公式如下:

$$\text{ABTS}^+\text{自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

式中: A_1 为反应完样品的吸光值, A_2 为样品溶液自身的吸光值, A_0 为空白对照的吸光值。

1.3 数据处理

试验设计 3 次平行,数据以平均值 $\pm$ 标准偏差(Mean $\pm$ SD)表示,差异的显著性采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)结合 SPSS 25.0 软件的 Tukey's

检验进行评估, $P < 0.05$ 为有显著性差异。采用 Origin 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 多糖提取率及多糖含量的测定

经过热水浸提得到菊芋多糖的提取率为 25.41%。根据葡萄糖标准曲线测得菊芋多糖中多糖含量为 84.54%。

2.2 单因素实验结果

2.2.1 菊芋多糖与硫酸锌质量比对螯合率的影响 由图 1 可知, 菊芋多糖与硫酸锌质量比在 20:1~30:1 范围内, 螯合率显著增加 ($P < 0.05$); 当质量比为 30:1 时, 螯合率达到最大值为 73.95%; 当质量比超过 30:1 时, 螯合率不再发生显著变化。推测原因为在一定范围内, 随着多糖与硫酸锌质量比增加, 多糖分子与锌离子接触并发生配位反应的机会增加, 使得螯合率上升^[44]。随着质量比的增加, 溶液黏稠度增大, 结合位点暴露减少, 多糖与锌离子结合基本稳定^[45]。因此, 菊芋多糖与硫酸锌质量比选择为 30:1。

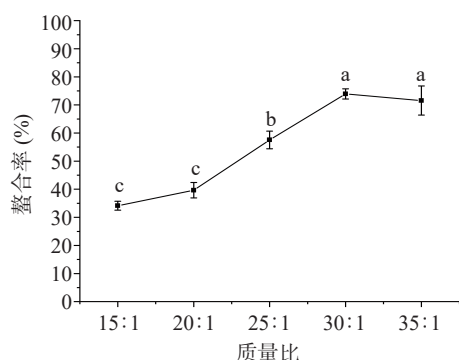


图 1 菊芋多糖与硫酸锌质量比对螯合率的影响

Fig.1 Effect of the weight ratio of Jerusalem artichoke polysaccharide and $ZnSO_4$ on chelation rate

注: 小写字母不同者表示差异达显著水平 ($P < 0.05$); 图 2~图 4 同。

2.2.2 反应时间对螯合率的影响 由图 2 可知, 当反应时间为 60 min 时, 螯合率达到最大值为 60.00%; 当反应时间超过 60 min 时, 随着反应时间的增加, 螯合率缓慢下降, 推测原因为随着时间的延长, 体系稳定性降低, 出现缓慢解离现象, 导致螯合率下降^[34]。因此, 反应时间选择为 60 min。

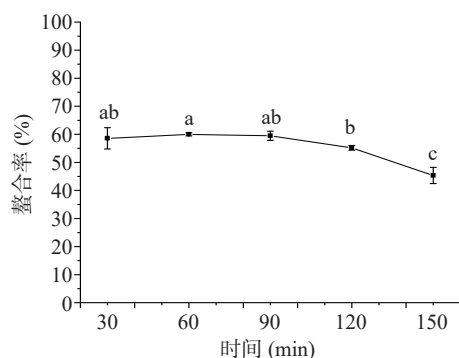


图 2 反应时间对螯合率的影响

Fig.2 Effect of reaction time on chelation rate

2.2.3 反应温度对螯合率的影响 由图 3 可知, 反应温度在 30~50 °C 范围内, 螯合率显著增加 ($P < 0.05$); 在 50 °C 时, 螯合率达到最大值为 46.59%; 当反应温度高于 50 °C 时, 螯合率下降, 推测原因为反应温度在一定范围内升高会增加菊芋多糖分子的平均动能, 促进分子运动, 有利于菊芋多糖分子与锌离子结合, 螯合率升高。但高温易破坏菊芋多糖的结构, 分子热运动过于激烈, 多糖与锌离子结合速度低于解离速度, 导致螯合率下降^[46]。因此, 反应温度选择为 50 °C。

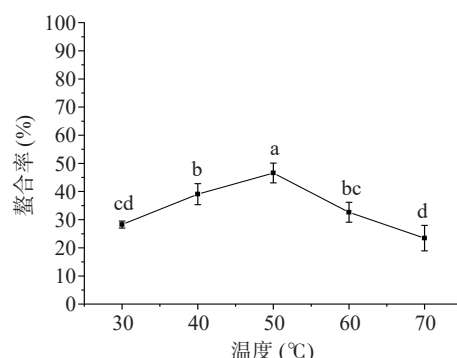


图 3 反应温度对螯合率的影响

Fig.3 Effect of reaction temperature on chelation rate

2.2.4 反应 pH 对螯合率的影响 由图 4 可知, 反应 pH 在 5~8 范围内, 螯合率显著增加 ($P < 0.05$); 当 pH 为 8 时, 螯合率达到最大值为 80.42%。推测原因为偏酸性条件下, H^+ 会与锌离子发生竞争关系, 减少了锌离子和多糖的接触机会^[47]; 在过碱条件下, 锌离子容易生成沉淀, 使锌离子损失, 导致螯合率下降^[33]。因此, 反应 pH 选择为 8。

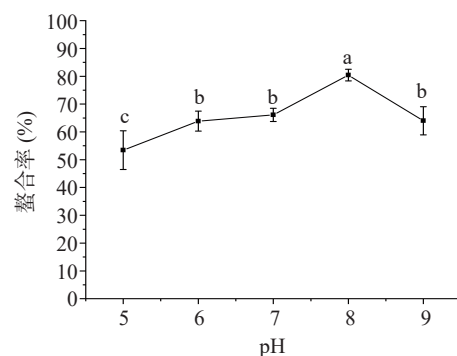


图 4 反应 pH 对螯合率的影响

Fig.4 Effect of reaction pH on chelation rate

2.3 响应面试验结果

2.3.1 回归方程的建立与方差分析 由 Design Expert 8.0.6.1 软件对实验数据进行回归分析, 得到的响应面分析结果如表 2 所示, 建立菊芋多糖与硫酸锌质量比(A)、反应时间(B)、反应温度(C)、反应 pH(D)四个因素与响应值螯合率(Y)的回归方程为: $Y = 84.86 + 5.54A + 2.17B - 2.59C + 6.73D - 3.31AB + 5.95AC - 2.86AD + 2.06BC - 3.12BD + 3.60CD - 6.43A^2 - 6.67B^2 - 8.81C^2 - 5.70D^2$ 。为验证该回归方程的有效性, 对其进行方差分析。

表 2 响应面试验结果
Table 2 Response surface test results

实验号	A质量比	B时间(min)	C温度(℃)	D pH	螯合率(%)
1	30:1	60	50	8	83.65
2	35:1	60	50	9	83.36
3	30:1	60	50	8	84.00
4	35:1	60	50	7	76.70
5	30:1	30	40	8	69.82
6	30:1	60	40	7	72.17
7	25:1	60	60	8	55.93
8	30:1	60	50	8	87.94
9	25:1	60	50	7	57.65
10	35:1	60	40	8	69.25
11	25:1	90	50	8	71.78
12	30:1	90	50	7	68.82
13	25:1	60	50	9	75.75
14	30:1	30	50	9	80.25
15	35:1	60	60	8	78.21
16	30:1	90	40	8	73.65
17	35:1	30	50	8	79.25
18	25:1	30	50	8	63.12
19	30:1	60	50	8	85.48
20	35:1	90	50	8	74.67
21	30:1	90	50	9	77.02
22	30:1	30	50	7	59.57
23	30:1	60	60	7	55.88
24	30:1	60	60	9	76.62
25	30:1	30	60	8	62.23
26	30:1	90	60	8	74.30
27	30:1	60	50	8	83.23
28	30:1	60	40	9	78.52
29	25:1	60	40	8	70.78

如表 3 所示,对回归模型进行方差分析,该模型差异性显著($P<0.01$),失拟项不显著($P>0.05$),决定系数 R^2 为 0.9640,校正后决定系数 R^2_{Adj} 为 0.9281,说明该回归方程拟合度和可信度均较高,可利用此模型对螯合率进行预测。

表 3 回归模型方差分析
Table 3 Analysis of variance of regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	差异值
模型	2205.13	14	157.51	26.81	<0.0001	显著
A	367.75	1	367.75	62.61	<0.0001	**
B	56.33	1	56.33	9.59	0.0079	**
C	80.19	1	80.19	13.65	0.0024	**
D	543.11	1	543.11	92.46	<0.0001	**
AB	43.82	1	43.82	7.46	0.0162	*
AC	141.73	1	141.73	24.13	0.0002	**
AD	32.72	1	32.72	5.57	0.0333	*
BC	16.97	1	16.97	2.89	0.1112	
BD	38.94	1	38.94	6.63	0.0220	*
CD	51.77	1	51.77	8.81	0.0102	*
A ²	268.01	1	268.01	45.63	<0.0001	**
B ²	288.94	1	288.94	49.19	<0.0001	**
C ²	503.93	1	503.93	85.79	<0.0001	**
D ²	210.41	1	210.41	35.82	<0.0001	**
残差	82.24	14	5.87			
失拟项	67.50	10	6.75	1.83	0.2935	不显著
绝对误差	14.73	4	3.68			
总和	2287.37	28				

注:** $P<0.01$,差异极显著;* $P<0.05$,差异显著。

由表 3 可知,一次项 A、B、C、D,交互项 AC,二次项 A²、B²、C²、D²,对螯合率的影响极显著($P<0.01$),交互项 AB、AD、BD、CD 对螯合率影响显著($P<0.05$),说明该四因素与响应值并非简单的线性关系,交互项 BC 对螯合率影响不显著,可将其从回归模型中删除。因此,最终确定回归模型为 $Y=84.86+5.54A+2.17B-2.59C+6.73D-3.31AB+5.95AC-2.86AD-3.12BD+3.60CD-6.43A^2-6.67B^2-8.81C^2-5.70D^2$ 。

2.3.2 响应面图分析 根据应用统计分析软件拟合得到三维图可直观展示两个自变量的交互作用。反应质量比、反应时间、反应温度、反应 pH 四个因素两两之间交互作用对螯合率影响效果见图 5。三维图均为开口向下的凸形曲面,AB、AC、AD、BD、CD 图形陡峭,判断 AB、AC、AD、BD、CD 交互作用显著;在 BC 交互作用中三维图形平缓,判断 BC 交互作用相对不显著。表 3 可知,AB、AC、AD、BD、CD 项的 P 值分别为 0.0162(<0.05)、0.0002(<0.05)、0.0333(<0.05)、0.0220(<0.05)、0.0102(<0.05),三维图与 P 值代表的交互作用对响应值影响程度一致。

2.3.3 验证实验结果 由回归模型方程计算可知,当 $A=31.79:1$ 、 $B=58.83$ 、 $C=50.79$ 、 $D=8.54$ 时, Y 出现极大值,即当多糖与硫酸锌质量比为 31.79:1、反应时间为 58.83 min、反应温度为 50.79 ℃、pH 为 8.54 时,预测螯合率最大值为 87.51%。为方便操作,选择以下参数进行验证实验:多糖与硫酸锌质量比为 32:1、反应时间为 60 min、反应温度为 50 ℃、反应 pH 为 8.50。在此条件下进行验证实验所得螯合率为 87.06%±0.28%,与预测值相差 0.45%,说明该工艺稳定可靠,可用于生产实践。根据响应面优化实验所得的最优条件制备菊芋多糖锌,并将菊芋多糖锌进行透析处理,除去游离的锌离子,然后冷冻干燥后得到菊芋多糖锌,并用于后续体外抗氧化活性评价。

2.4 体外抗氧化活性测定结果

2.4.1 DPPH 自由基清除能力测定 由图 6 可知,在 0.3~2.7 mg/mL 范围内,随着菊芋多糖和菊芋多糖锌浓度的增加,菊芋多糖和菊芋多糖锌对 DPPH 自由基的清除能力显著增强($P<0.05$),说明菊芋多糖锌不仅可以作为一种新型的锌补充剂,还具有多糖的 DPPH 自由基清除能力。其中,在 2.7 mg/mL 时,菊芋多糖和菊芋多糖锌的 DPPH 自由基清除率达到最大,分别为 26.92% 和 23.42%。DPPH 乙醇溶液能够提供一对孤对电子,因此易被含氢供体化合物还原,DPPH 溶液被还原后,其溶液表现为紫色逐渐变浅,抗氧化剂的抗氧化活性越强吸光度就越低。菊芋多糖的 DPPH 自由基清除率均优于菊芋多糖锌($P<0.05$),推测原因可能是锌的引入导致构象发生改变或者结合多糖上的羟基导致氢供体减少^[48]。

2.4.2 羟基自由基清除能力测定 由图 7 所示,在

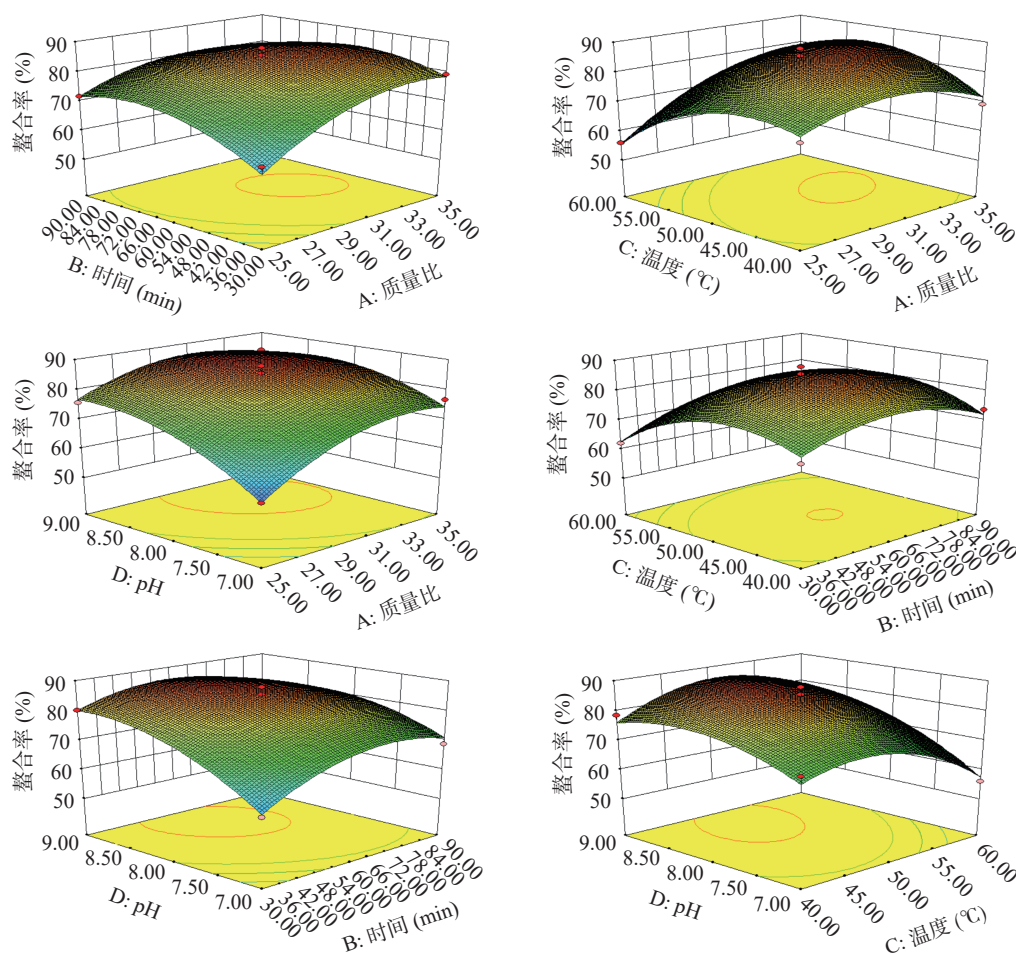


图5 各因素交互作用对菊芋多糖锌螯合能力影响的响应面图

Fig.5 Response surface diagram of the interaction of various factors on the chelating ability of Jerusalem artichoke polysaccharide-Zn complex

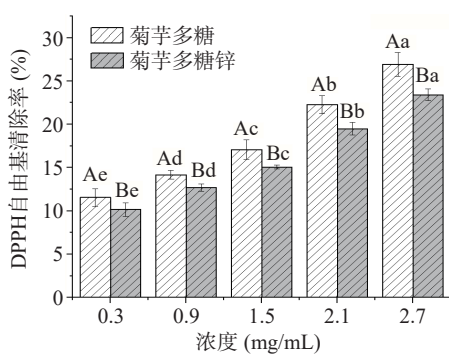


图6 菊芋多糖和菊芋多糖锌对DPPH自由基的清除能力

Fig.6 DPPH free radical scavenging ability of Jerusalem artichoke polysaccharide and Jerusalem artichoke polysaccharide-Zn complex

注: 大写字母不同表示相同浓度下组间差异显著($P<0.05$), 小写字母不同表示同一样品组内不同浓度间差异显著($P<0.05$); 图7~图9同。

0.3~2.7 mg/mL 范围内, 菊芋多糖和菊芋多糖锌分别对羟基自由基的清除能力与质量浓度呈正比例关系, 表明除补锌效果外, 菊芋多糖锌还具有多糖的羟基自由基清除能力。2.7 mg/mL 时, 菊芋多糖和菊芋多糖锌的羟基自由基清除率达到最大, 分别为 14.15% 和 13.47%。多糖碳氢链上的氢原子能与羟基自由基结

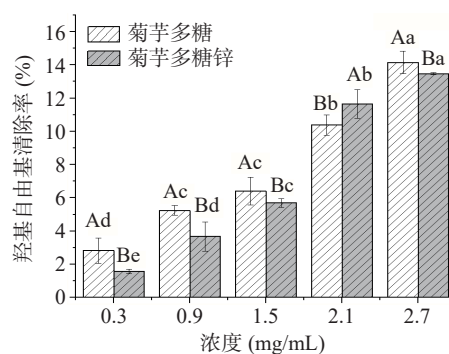


图7 菊芋多糖和菊芋多糖锌对羟基自由基的清除能力

Fig.7 Hydroxyl radical scavenging ability of Jerusalem artichoke polysaccharide and Jerusalem artichoke polysaccharide-Zn complex

合生成水, 达到清除羟基自由基的目的, 菊芋多糖锌清除羟基自由基的能力下降可能与菊芋多糖锌中氢供体减少有关^[48-49]。

2.4.3 超氧阴离子自由基清除能力测定 如图8所示, 在 0.3~2.1 mg/mL 范围内, 随着浓度的增加, 菊芋多糖和菊芋多糖锌对超氧阴离子自由基的清除能力显著增强($P<0.05$), 2.1 mg/mL 时菊芋多糖锌对超氧阴离子自由基的清除率最大, 为 29.36%; 在 2.7 mg/mL 时, 菊芋多糖对超氧阴离子自由基清除率继续增

加,达到 32.21%。菊芋多糖锌的清除率则下降到 23.99%。结果表明菊芋多糖锌具有较好的抗氧化活性,但是同时兼具补锌效果和抗氧化效果的最佳浓度需要进一步的探究。

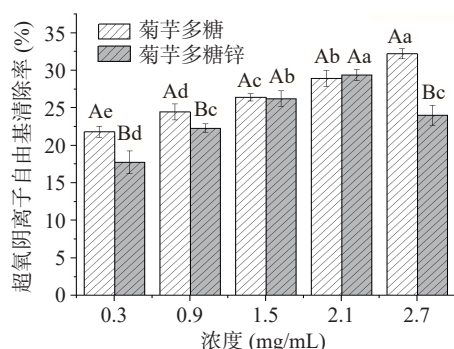


图 8 菊芋多糖和菊芋多糖锌对超氧阴离子自由基的清除能力

Fig.8 Superoxide anion radical scavenging ability of Jerusalem artichoke polysaccharide and Jerusalem artichoke polysaccharide-Zn complex

2.4.4 ABTS⁺自由基清除能力测定 由图 9 可知,在 0.3~2.7 mg/mL 范围内,菊芋多糖和菊芋多糖锌对 ABTS⁺自由基清除能力与质量浓度呈正比例关系。2.7 mg/mL 时,菊芋多糖和菊芋多糖锌对 ABTS⁺自由基清除率达到最大,分别为 14.77% 和 18.50%。相同浓度下,菊芋多糖锌对 ABTS⁺自由基清除能力显著优于菊芋多糖($P<0.05$),这可能是因为高浓度下的多糖能够将反应性自由基转化为稳定状态,并通过向自由基提供电子来终止自由链反应^[45]。微量元素锌也是一种抗氧化剂,多糖和锌离子能够相互协同,增强对 ABTS⁺自由基的清除作用^[34]。

3 结论

采用响应面法对菊芋多糖锌的制备工艺进行优化,确定最优工艺为多糖与硫酸锌质量比为 32:1、反应时间 60 min、反应温度 50 °C、pH8.50,螯合率为 87.06%。抗氧化活性测定结果表明:菊芋多糖锌不仅可以作为一种良好的锌补充剂外,还具有良好的体外抗氧化活性。除了 2.7 mg/mL 浓度下,菊芋多糖锌的超氧阴

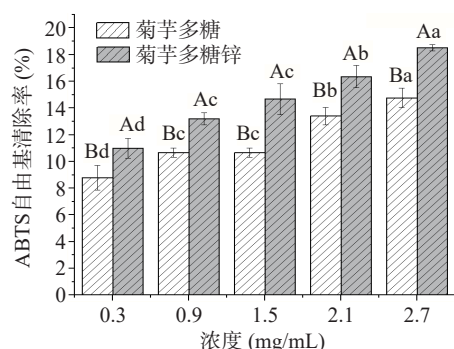


图 9 菊芋多糖和菊芋多糖锌对 ABTS⁺自由基的清除能力

Fig.9 ABTS⁺ free radical scavenging ability of Jerusalem artichoke polysaccharide and Jerusalem artichoke polysaccharide-Zn complex

离子自由基略有下降外,其他的浓度条件下,菊芋多糖和菊芋多糖锌的抗氧化活性呈剂量关系。在 0.3~2.7 mg/mL 浓度下,最佳的菊芋多糖锌对 DPPH 自由基、羟基自由基、超氧阴离子自由基和 ABTS⁺自由基的清除能力分别为 23.42%、13.47%、29.36% 和 18.50%。本研究为菊芋多糖、菊芋多糖锌开发功能性保健食品提供理论基础。

参考文献

- [1] 王彩月,田康明. 菊芋酶解制备低聚果糖糖浆的工艺优化及功能评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 270-277. [WANG C Y, TIAN K M. Optimization of enzymatic hydrolysis of Jerusalem artichoke to produce fructo oligofructose syrup and its function evaluation[J]. Food Industry Technology, 2023, 44(2): 270-277.]
- [2] 姬妍茹,张正海,杨庆丽,等. 黑菊芋多糖的润肠通便和调节肠道菌群作用[J]. 现代食品科技, 2022, 38(7): 33-39. [JI Y R, ZHANG Z H, YANG Q L, et al. Effects of black Jerusalem artichoke polysaccharide on moistening intestines and regulating intestinal flora[J]. Modern Food Technology, 2022, 38(7): 33-39.]
- [3] 刘亚萍,高文鸽,梁隽杰,等. 菊粉复配灵芝多糖对 2 型糖尿病大鼠的降血糖作用[J]. 食品工业科技, 2019, 40(20): 310-315,324. [LIU Y P, GAO W G, LIANG J J, et al. Hypoglycemic effect of inulin combined with ganoderma lucidum polysaccharide on type 2 diabetes mellitus rats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(20): 310-315,324.]
- [4] 李玲玉,孙晓晶,郭富金,等. 菊芋的化学成分、生物活性及其利用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(16): 213-218. [LI L Y, SUN X J, GUO F J, et al. Study on the chemical and bioactive compounds and applications of Helianthus tuberosus L.[J]. Food Research and Development, 2019, 40(16): 213-218.]
- [5] 向岑,荣耀,迟明,等. 菊粉生物学作用及机制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(19): 212-218,224. [XIANG C, RONG Y, CHI M, et al. Advances in research on biological activity and mechanisms of inulin[J]. Food Research and Development, 2020, 41(19): 212-218,224.]
- [6] 田敏,宗爱珍,刘丽娜. 菊芋菊糖的特性及应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(7): 14-16. [TIAN M, ZONG A Z, LIU L N. Research progress on characteristics and application of inulin from Jerusalem artichoke[J]. Grain and Oil, 2022, 35(7): 14-16.]
- [7] 黄晓东,王艳春,李晓光,等. 菊芋多糖对 2 型糖尿病大鼠胰岛细胞形态与功能影响[J]. 中国公共卫生, 2018, 34(3): 365-368. [HUANG X D, WANG Y C, LI X G, et al. Influences of Jerusalem artichoke polysaccharide on morphology and function of islet cells of type II diabetes rats[J]. Chinese Journal of Public Health, 2018, 34(3): 365-368.]
- [8] YANG J P, ZHANG S, SU M H, et al. Cholesterol-lowering effects of dietary pomegranate extract and inulin in mice fed an obesogenic diet[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2018, 52: 62-69.
- [9] LI K, ZHANG L, XUE J, et al. Dietary inulin alleviates diverse stages of type 2 diabetes mellitus via anti-inflammation and modulating gut microbiota in db/db mice[J]. Food & Function, 2019, 10(4): 1915-1927.
- [10] XIAO L, GONG C, DING Y, et al. Probiotics maintain intestinal secretory immunoglobulin A levels in healthy formula-fed infants: A randomised, double-blind, placebo-controlled study[J]. Beneficial Microbes, 2019, 10(7): 729-739.
- [11] BEISNER J, LOUISA F A, VALENTINA K V, et al. Prebi-

- otic inulin and sodium butyrate attenuate obesity-Induced intestinal barrier dysfunction by induction of antimicrobial peptides[J]. *Frontiers in Immunology*, 2021, 12: 678360.
- [12] GUO X L, TANG R Y, YANG S Y, et al. Rutin and its combination with inulin attenuate gut dysbiosis, the inflammatory status and endoplasmic reticulum stress in paneth cells of obese mice induced by high-fat diet[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 2651.
- [13] MASSOT-CLADERA M, AZAGRE-BORONAT I, FRANCH A, et al. Gut health-promoting benefits of a dietary supplement of vitamins with inulin and acacia fibers in rats[J]. *Nutrients*, 2020, 12(8): 2196.
- [14] 韩艳珍, 单铁英, 李伟, 等. 口服枸杞多糖对小鼠肝纤维化组织基质金属蛋白酶-2 及基质金属蛋白酶-2 抑制剂水平影响的实验研究[J]. *陕西医学杂志*, 2021, 50(3): 276-279. [HAN Y Z, SHAN T Y, LI W, et al. Effect of *Lycium barbarum* polysaccharide on the levels of MMP-2 and TIMP-2 in mice with liver fibrosis[J]. *Shaanxi Medical Journal*, 2021, 50(3): 276-279.]
- [15] 王欢, 赵永亮, 安星亮, 等. 银耳多糖-壳寡糖纳米复合体系构建及其对 BSA 释放特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(14): 125-132. [WANG H, ZHAO Y L, AN X L, et al. Construction of tremella fuciformis polysaccharide-chitosan oligosaccharide polyelectrolyte nanocomposite system and influence of its release properties[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(14): 125-132.]
- [16] 刘思美, 赵鹏, 张婷婷, 等. 地黄硒多糖的合成、表征及免疫活性分析[J]. *中国中药杂志*, 2022, 47(11): 2938-2946. [LIU S M, ZHAO P, ZHANG T T, et al. Synthesis, characterization and immunoactivity analysis of rehmannia glutinosa seleno-polysaccharides[J]. *Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2022, 47(11): 2938-2946.]
- [17] ZHANG W, LI L Y, MA Y, et al. Structural characterization and hypoglycemic activity of a novel pumpkin peel polysaccharide-chromium (III) complex[J]. *Foods*, 2022, 11(13): 1821.
- [18] DING X, WU X Y, ZHANG Z, et al. Characterization, optimization of preparation process of an *Inonotus obliquus* polysaccharide-zinc (II) complex and its antioxidant activities[J]. *Biotechnology & Biotechnology Equipment*, 2021, 35(1): 1274-1283.
- [19] LI W F, MA H H, YUAN S, ZHANG X F. Production of pyracantha polysaccharide-iron(III) complex and its biologic activity[J]. *Molecules*, 2021, 26(7): 1949.
- [20] Jia Y N, LI N N, WANG Q R, et al. Effect of Fe (III), Zn (II), and Cr (III) complexation on the physicochemical properties and bioactivities of corn silk polysaccharide[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 189: 847-856.
- [21] 尹晓彤, 郎俊凤, 张钦凤. 儿童厌食症患者健康状况研究[J]. *泰山医学院学报*, 2017, 38(4): 361-364. [YIN X T, LANG J F, ZHANG Q F, et al. Study on the health status of children with anorexia[J]. *Journal of Taishan Medical College*, 2017, 38(4): 361-364.]
- [22] 施磊, 蒋晨依, 吴望舒, 等. 锌转运体对男性(雄性)生殖作用的研究进展[J]. *国际生殖健康/计划生育杂志*, 2019, 38(4): 318-322, 327. [SHI L, JIANG C Y, WU W S, et al. Research advances on the role of zinc transporter in male reproduction[J]. *Journal of International Reproductive Health/Family Planning*, 2019, 38(4): 318-322, 327.]
- [23] 寇金霞. 儿童铁、锌等微量元素检测对儿童保健的影响研究[J]. *广东微量元素科学*, 2017, 24(6): 14-16. [KOU J X. Study on the effects of trace element detection of children's iron and zinc on children's health care[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2017, 24(6): 14-16.]
- [24] DUAN M P, LI T, LIU B, et al. Zinc nutrition and dietary zinc supplements[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 12: 1-16.
- [25] 先宏, 张莉, 宋曙辉, 等. 海藻多糖锌配合物的组成及其对 THP-1 细胞耗氧的影响[J]. *营养学报*, 2018, 40(3): 261-265, 271. [XIAN H, ZHANG L, SONG S H, et al. Composition of seaweed polysaccharides zinc complex and its effect on oxygen consumption of THP-1 cells[J]. *Journal of Nutrition*, 2018, 40(3): 261-265, 271.]
- [26] 胡香玉, 刘艳. 关于菊糖改性的专利技术综述[J]. *河南科技*, 2021, 40(24): 97-99. [HU X Y, LIU Y. Review of patented technology on modification of inulin[J]. *Henan Science and Technology*, 2021, 40(24): 97-99.]
- [27] WANG L, LI X. Preparation, physicochemical property and *in vitro* antioxidant activity of zinc-*Hohenbuehelia serotina* polysaccharides complex[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 121: 862-869.
- [28] ZHAO S W, LI B, CHEN G T, et al. Preparation, characterization, and anti-inflammatory effect of the chelate of *Flammulina velutipes* polysaccharide with Zn[J]. *Food and Agricultural Immunology*, 2016, 28(1): 162-177.
- [29] HOLEN J P, JOHNSTON L J, URRIOLOA P E, et al. Comparative digestibility of polysaccharide-complexed zinc and zinc sulfate in diets for gestating and lactating sows[J]. *Journal of Animal Science*, 2020, 98(4): 79.
- [30] REN L P, LI J J, XIAO Y Y, et al. Polysaccharide from *Lycium barbarum* L. leaves enhances absorption of endogenous calcium, and elevates cecal calcium transport protein levels and serum cytokine levels in rats[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 33: 227-234.
- [31] 唐晓琳. 壳寡糖螯合锌对昆明小鼠生长发育和繁殖性能的影响[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2013. [TANG X L. Effect of chitosan oligosaccharide-Zinc on growth and reproduction performance of kunming mice [D]. Dalian: Liaoning Normal University, 2013.]
- [32] 李文文, 王丹, 董淑君, 等. 生姜皮多糖锌的制备及体外模拟消化研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(18): 185-191. [LI W W, WANG D, DONG S J, et al. Preparation and *in vitro* simulated digestion of zinc polysaccharide from ginger peel[J]. *Food Industry Technology*, 2022, 43(18): 185-191.]
- [33] 董淑君, 张禧庆, 刘旭龙, 等. 南瓜皮多糖锌的制备及生物利用率研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(18): 200-207. [DONG S J, ZHANG X Q, LIU X L, et al. Preparation and bioavailability of pumpkin peel polysaccharide zinc[J]. *Food Industry Technology*, 2022, 43(18): 200-207.]
- [34] 董金满, 李鸿梅, 李炳东. 罗耳阿太菌多糖锌的制备及其抗氧化活性研究[J]. *食品工业*, 2018, 39(6): 22-26. [DONG J M, LI H M, LI B D. Preparation and antioxidant activities of *Athelia rolfsii* polysaccharide-zinc[J]. *The Food Industry*, 2018, 39(6): 22-26.]
- [35] 汤陈鹏, 吕峰, 王蓉琳. Box-Behnken 响应面法优化孔石莼多糖络合锌工艺[J]. *渔业研究*, 2018, 40(5): 366-373. [TANG C P, LV F, WANG R L. Optimization technology of *Ulva pertusa* polysaccharides complexing zinc by Box-Behnken design[J]. *Journal of Fisheries Research*, 2018, 40(5): 366-373.]
- [36] 赵姝雯, 夏宇, 陈贵堂, 等. 金针菇多糖-Zn²⁺螯合物对 L929 肿瘤细胞的增殖抑制作用及其抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2016, 37(5): 202-207. [ZHAO S W, XIA Y, CHEN G T, et al. Effect of *flammulina velutipes* polysaccharide-Zn²⁺ chelate on suppres-

- sion of L929 tumor cell proliferation and its antioxidant activity[J]. *Food Science*, 2016, 37(5): 202–207.]
- [37] LI L Y, QIU Z C, DONG H J, et al. Structural characterization and antioxidant activities of one neutral polysaccharide and three acid polysaccharides from the roots of *Arctium lappa* L.: A comparison[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 182: 187–196.
- [38] 卢晓明. 黑蒜低聚糖的产生规律及功能作用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017. [LU X M. Study on the production law and function of oligosaccharides from black garlic[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017.]
- [39] 黄靖, 邹辉, 王未, 等. 肉苁蓉多糖锌的制备、表征及抗氧化活性[J]. *化学研究*, 2015, 26(6): 584–589. [HUANG J, ZOU Y, WANG W, et al. Preparation, characterization and antioxidant activity of *Cistanche tubulosa* Zn²⁺-polysaccharide complex[J]. *Chemical Research*, 2015, 26(6): 584–589.]
- [40] 曹慧馨. 黑木耳多糖的制备及其抗氧化活性的研究[D]. 长春: 长春大学, 2021. [CAO H X. Study on preparation and antioxidant activity of *Auricularia auricula* polysaccharides [D]. Changchun: Changchun University, 2021.]
- [41] SHEN S G, JIA S R, WU Y K, et al. Effect of culture conditions on the physicochemical properties and antioxidant activities of polysaccharides from nostoc *Flagelliforme*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 198: 426–433.
- [42] CHEN F, HUANG G L. Extraction and antioxidant activities of *cushaw* polysaccharide[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120: 1646–1649.
- [43] WOOTTON-BEARD P C, MORAN A, RYAN L. Stability of the total antioxidant capacity and total polyphenol content of 23 commercially available vegetable juices before and after *in vitro* digestion measured by FRAP, DPPH, ABTS and Folin-Ciocalteu methods[J]. *Food Research International*, 2011, 44(1): 217–224.
- [44] 顾冰飞, 赵圆圆, 陈义勇. 杏鲍菇多糖锌整合物的制备工艺及其抗氧化活性[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(4): 97–103. [GU B F, ZHAO Y Y, CHEN Y Y. Preparation technology of *Pleurotus eryngii* polysaccharides-zinc(II) chelate and its antioxidant activities[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(4): 97–103.]
- [45] 富天昕, 张舒, 盛亚男, 等. 绿豆多肽锌整合物的制备及其结构与体外消化的分析[J]. *食品科学*, 2020, 41(4): 59–66. [FU T X, ZHANG S, SHENG Y N, et al. Preparation, structure and *in vitro* digestion of mung bean polypeptide zinc chelate[J]. *Food Science*, 2020, 41(4): 59–66.]
- [46] 李兴艳, 张丙云, 尚永彪. 正交试验优化酵母多糖锌配合物的制备及其对尿素的吸附性能[J]. *食品科学*, 2013, 34(14): 57–62. [LI X Y, ZHANG B Y, SHANG Y B. Orthogonal experiment to optimize the preparation of yzymosan zinc complex and its adsorption performance for urea[J]. *Food Science*, 2013, 34(14): 57–62.]
- [47] 邹仕昱, 潘瑶, 陈璇, 等. 桑葚、蓝莓和红薯复配物的自由基清除能力研究[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(1): 51–57. [ZOU S Y, PAN Y, CHEN X, et al. Study on free radical scavenging ability of mulberry, blueberry and sweet potato complex[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2021, 21(1): 51–57.]
- [48] 吴雅清, 冷小鹏. 多糖体外抗氧化作用及其影响因素[J]. *广州化工*, 2018, 46(4): 4–9, 16. [WU Y Q, LENG X P. Antioxidant effect of polysaccharides *in vitro* and its influencing factors[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2018, 46(4): 4–9, 16.]
- [49] 赵建成, 刘慧燕, 方海田. 骏枣多糖的分离纯化、结构表征及抗氧化活性研究[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(23): 71–78. [ZHAO J C, LIU H Y, FANG H T. Study on isolation, purification, structural characterization and antioxidant activity of polysaccharide from *Zizyphus jujube* cv. junzao[J]. *Food Industry Technology*, 2022, 43(23): 71–78.]