

坛紫菜多酚工艺优化及降血糖和抗氧化活性研究

Optimization of polyphenols process and their hypoglycemic and antioxidant activities of *Porphyra haitanensis*

陈晓晨¹ 杜希萍^{1,2,3,4} 周莉鹃¹

CHEN Xiao-chen¹ DU Xi-ping^{1,2,3,4} ZHOU Li-juan¹

伍菱^{1,2,3,4} 李志朋^{1,2,3,4} 杨远帆^{1,2,3,4}

WU Ling^{1,2,3,4} LI Zhi-peng^{1,2,3,4} YANG Yuan-fan^{1,2,3,4}

(1. 集美大学海洋食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省食品微生物与酶工程重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 厦门市食品与生物工程技术研究中心, 福建 厦门 361021; 4. 厦门南方海洋研究中心海藻资源化利用与深加工重点实验室, 福建 厦门 361021)

(1. College of Ocean Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen, Fujian 361021, China; 2. Key Laboratory of Food Microbiology and Enzyme Engineering Technology of Fujian Province, Xiamen, Fujian 361021, China; 3. Research Center of Food Biotechnology of Xiamen City, Xiamen, Fujian 361021, China; 4. Key Laboratory of Systemic Utilization and In-depth Processing of Economic Seaweed, Xiamen, Fujian 361021, China)

摘要:目的:优化坛紫菜多酚的提取工艺,开发天然降血糖食品。方法:采用 Box-Behnken 响应面法优化坛紫菜多酚的提取工艺,α-葡萄糖苷酶的抑制活性评价不同采收期坛紫菜多酚的降血糖活性,并基于 DPPH 自由基和 ABTS⁺ 自由基清除率及 ORAC 值评价其抗氧化活性。结果:坛紫菜多酚最佳的提取工艺为液料比($V_{\text{乙醇溶液}} : m_{\text{坛紫菜}}$) 51 : 1 (mL/g),乙醇体积分数 56%,超声时间 51 min,在此条件下,提取的坛紫菜多酚含量为 5.027 mg/g。不同采收期坛紫菜多酚对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用呈浓度依赖性,其中四水坛紫菜多酚对 α-葡萄糖苷酶的抑制活性最强;不同采收期坛紫菜多酚均具有抗氧化活性,其中四水坛紫菜多酚抗氧化活性最强。结论:四水坛紫菜多酚含量高、对 α-葡萄糖苷酶活性抑制作用强、抗氧化能力强,是开发天然降血糖食品和抗氧化剂的优良食源。

关键词:坛紫菜;多酚;降血糖;α-葡萄糖苷酶;抗氧化;采收期;提取工艺优化

Abstract: Objective: This study aimed to optimize the extraction process of *Porphyra haitanensis* polyphenols to develop natural

hypoglycemic foods. **Methods:** The Box-Behnken response surface method was used to optimize the extraction process of *P. haitanensis* polyphenols. The α-glucosidase inhibition activity was applied to evaluate the hypoglycemic activity of *P. haitanensis* polyphenols at different harvest periods, and the antioxidant activities of them were evaluated based on DPPH, ABTS⁺ radical scavenging rate and ORAC value. **Results:** The optimal extraction process conditions were liquid-solid ratio ($V_{\text{ethanol}} : m_{P. haitanensis}$) 51 : 1, ethanol concentration 56% and ultrasonication time 51 min. Under the control of these conditions, the extracted content of polyphenols was 5.027 mg/g. The inhibition of α-glucosidase activity by *P. haitanensis* polyphenols was in a concentration-dependent manner, and the inhibition by the fourth-harvest-period polyphenols was significantly higher than other harvest periods polyphenols. *P. haitanensis* polyphenols at different harvest periods showed antioxidant activity, and the antioxidant activity of the fourth-harvest-period polyphenols was strongest. **Conclusion:** The high polyphenol contents, strong inhibition of α-glucosidase activity and strong antioxidant capacity of the fourth-harvest-period makes it an excellent food source for developing natural hypoglycemic foods and antioxidants.

Keywords: *Porphyra haitanensis*; polyphenols; hypoglycemia; α-glucosidase; antioxidant activity; different harvest periods; extraction process optimization

基金项目:福建省自然科学基金(编号:2021J01833);国家自然科学基金重点项目(编号:22038012)

作者简介:陈晓晨,女,集美大学在读硕士研究生。

通信作者:杜希萍(1978—),女,集美大学教授,博士。

E-mail: xipingdu@jmu.edu.cn

收稿日期:2022-08-02 **改回日期:**2022-12-25

坛紫菜(*Porphyra haitanensis*)属红藻类红毛菜科,

是中国重要的大型经济海藻,广泛种植于福建、浙江和广东等沿海城市,年产量占全国 70% 以上^[1-2]。坛紫菜的产量较大、生长周期较长,具有“分茬”采收的特点,首次采收的紫菜称作“头水坛紫菜”,之后依次称作二水、三水坛紫菜等。据报道^[3],不同海域和不同采收期的坛紫菜在蛋白质、脂肪、灰分等营养物质方面均存在一定的差异,头水坛紫菜的营养价值最高,口感最好,售价也最高^[4]。随着采收期的延长,坛紫菜的营养价值降低,口感变差,商业价值降低,常被养殖户遗弃,造成环境污染和资源浪费^[5]。因此,对采收后期坛紫菜的应用和开发受到国内广大研究者的关注^[6]。

坛紫菜多酚具有抗氧化、抑菌、降血糖和抗肿瘤等多种活性功能^[7]。 α -葡萄糖苷酶是一种位于小肠黏膜上的水解酶,能够将二糖转化成能被小肠吸收的单糖,从而引发餐后血糖升高。研究表明,多酚可以通过抑制 α -葡萄糖苷酶的活性^[8-9],延迟碳水化合物分解和葡萄糖的吸收,从而有效调节糖尿病患者餐后血糖的浓度^[10]。除此之外,多酚类化合物还可以通过清除自由基发挥降血糖作用,通过抑制机体的氧化反应,让自由基维持在稳定状态,保护机体免受氧化损伤^[10]。目前,不同采收期坛紫菜多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性、抗氧化作用的研究尚未见报道。

研究拟以坛紫菜为原料,采用超声波辅助法提取坛紫菜多酚,研究乙醇体积分数、超声时间、液料比 3 个因素对多酚提取的影响,结合响应面法优化坛紫菜多酚的提取工艺条件,进一步研究不同采收期坛紫菜的多酚含量及对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用和抗氧化作用,以期对不同采收期坛紫菜在天然降血糖食品及抗氧化剂领域的高值化利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

坛紫菜干制品(头水、二水、三水和四水):市售;

α -葡萄糖苷酶、4-硝基苯- α -D-葡萄糖苷(p -NPG):美国 Sigma 公司;

没食子酸、无水乙醇、福林酚、2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(ABTS):国药集团化学试剂有限公司;

2,2'-偶氮二异丁基咪二盐酸盐(AAPH)、水溶性维生素 E(Trolox)、荧光素钠、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH):上海源叶生物科技有限公司;

无水碳酸钠:西陇化工股份有限公司。

1.2 仪器与设备

高速万能粉碎机:JP-500C 型,郑州科丰仪器设备有限公司;

电子天平:EL104 型,梅特勒托利多科技(中国)有限公司;

高频率数控超声波清洗器:KQ5200DE 型,昆山市超

声仪器有限公司;

高速冷冻离心机:5810R 型,艾本德中国有限公司;

循环水式多用真空泵:SHB-III 型,郑州长城科工贸有限公司;

旋转蒸发器:RE-52AA 型,上海亚荣生化仪器厂;

微孔板恒温振荡器:TS200 型,杭州瑞诚仪器有限公司;

微孔板分光光度计:Epoch2T 型,美国伯腾仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 坛紫菜多酚提取 将坛紫菜用粉碎机粉碎,过 60 目筛,干燥避光保存备用。准确称取 1 g 坛紫菜粉末,按一定液料比加入一定体积分数的乙醇溶液,在超声功率 800 W 条件下提取一段时间,8 000 r/min 离心 20 min,上清液即为坛紫菜多酚提取液,提取 3 次。低压真空浓缩除去乙醇溶剂,浓缩液冷冻干燥,得到坛紫菜多酚样品,−20 °C 贮藏备用。

1.3.2 单因素试验 按照 1.3.1 的提取方法,以液料比 [$V_{\text{乙醇溶液}} : m_{\text{坛紫菜}}$ 分别为 30 : 1, 40 : 1, 50 : 1, 60 : 1, 70 : 1 (mL/g)]、乙醇体积分数(40%, 50%, 60%, 70%, 80%)、超声时间(30, 40, 50, 60, 70 min)为考察因素,以多酚含量为指标,探索最适的坛紫菜多酚提取条件。

1.3.3 响应面试验 在单因素试验的基础上,根据 Box-Behnken 中心组合试验设计原理,设计三因素三水平的响应面分析方法,优化超声波辅助提取坛紫菜多酚的工艺参数。

1.3.4 坛紫菜多酚含量测定 采用 Folin 法^[7],根据标准曲线回归方程和式(1)计算坛紫菜的多酚含量(以没食子酸计)。

$$y = \frac{c \times V}{1\,000 \times m}, \quad (1)$$

式中:

c ——多酚的质量浓度, $\mu\text{g/mL}$;

V ——提取液体积, mL;

m ——样品质量, g;

y ——坛紫菜中的多酚含量, mg/g。

1.3.5 多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用

(1) 制备紫菜多酚样品:根据响应面优化得到的最佳提取条件,制备大量不同采收期的坛紫菜多酚提取液,低压真空浓缩除去乙醇溶剂,浓缩液冷冻干燥,得到坛紫菜多酚样品,−20 °C 贮藏备用。

(2) 多酚对 α -葡萄糖苷酶抑制活性测定:将不同采收期的坛紫菜多酚样品用超纯水分别稀释成不同质量浓度(25, 50, 100, 200 mg/mL)的样品溶液。参考 Qi 等^[11]的方法并略作修改。向 96 孔板中分别加入 20 μL 样品, 20 μL 2 U/mL 的 α -葡萄糖苷酶溶液和 112 μL 的磷酸缓冲溶液(pH 6.8),孵育后加入 20 μL 2.5 mmol/L p -NPG,再次孵育后加入 80 μL 0.2 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液终止反

应。按式(2)计算 α -葡萄糖苷酶的抑制率。

$$I = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_3 - A_4}\right) \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

I —— α -葡萄糖苷酶的抑制率, %;

A_1 ——试验组(α -葡萄糖苷酶+样品)所测得的吸光值;

A_2 ——试验对照组(磷酸缓冲溶液+样品)所测得的吸光值;

A_3 ——空白组(α -葡萄糖苷酶+水)所测得的吸光值;

A_4 ——空白对照组(磷酸缓冲溶液+水)所测得的吸光值。

1.3.6 多酚的抗氧化活性测定

(1) DPPH 自由基清除能力:参考屠万倩等^[12]的方法。将冻干所得的不同采收期的坛紫菜多酚样品用超纯水分别稀释成不同质量浓度(0.025, 0.050, 0.125, 0.250, 0.500, 1.000, 2.000, 3.000 mg/mL)的样品溶液。按式(3)计算 DPPH 自由基的清除率。

$$C_{\text{DPPH}} = \left(1 - \frac{A_x - A_1}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

C_{DPPH} ——DPPH 自由基清除率, %;

A_x ——试验组(DPPH 溶液+样品)所测得的吸光值;

A_1 ——试验对照组(无水乙醇+样品)所测得的吸光值;

A_0 ——空白组(DPPH 溶液+水)所测得的吸光值。

(2) ABTS⁺ 自由基清除能力:参考 Shen 等^[13]的方法。将冻干所得的不同采收期的坛紫菜多酚样品用超纯水分别稀释成不同质量浓度(0.025, 0.050, 0.125, 0.250, 0.500, 1.000, 2.000, 3.000 mg/mL)的样品溶液。按式(4)计算 ABTS⁺ 自由基的清除率:

$$C_{\text{ABTS}^+} = \left(1 - \frac{A_x}{A_0}\right) \times 100\%, \quad (4)$$

式中:

C_{ABTS^+} ——ABTS⁺ 自由基清除率, %;

A_x ——试验组(ABTS⁺ 溶液+样品)所测得的吸光值;

A_0 ——空白组(ABTS⁺ 溶液+水)所测得的吸光值。

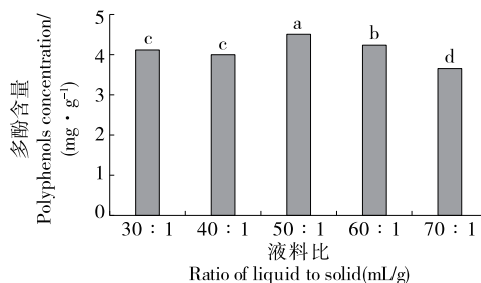
(3) 氧自由基吸收能力(ORAC):参考何丽芳等^[14]和陈雪^[15]的方法,样品对氧自由基的吸收能力以 Trolox 当量表示($\mu\text{mol Trolox/g}$)。

2 结果与分析

2.1 液料比对坛紫菜多酚提取的影响

由图 1 可知,随着液料比($V_{\text{乙醇溶液}} : m_{\text{坛紫菜}}$)的增加,多酚含量呈上升趋势,在液料比为 50 : 1 (mL/g)时多酚

含量达到最大,显著高于其他液料比($P < 0.05$),含量为 4.507 mg/g。液料比超过 50 : 1 (mL/g)后,多酚含量逐渐下降。结果表明,当液料比为 50 : 1 (mL/g)时,坛紫菜样品已完全溶解。过低或过高的液料比都会导致坛紫菜的多酚含量下降^[16]。因此,选择液料比 40 : 1, 50 : 1 和 60 : 1 (mL/g)为响应面设计的 3 个水平。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 1 液料比对坛紫菜多酚含量的影响

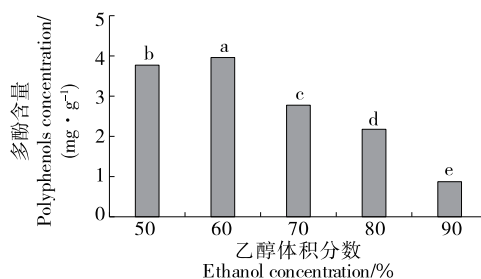
Figure 1 Effects of ratio of liquid to solid on the polyphenols content of *P. haitanensis*

2.2 乙醇体积分数对坛紫菜多酚提取的影响

由图 2 可知,多酚含量在乙醇体积分数为 60%时达到最大,显著高于其他乙醇体积分数的($P < 0.05$),含量为 3.960 mg/g。当乙醇体积分数超过 60%后,多酚含量显著下降($P < 0.05$),当乙醇体积分数为 90%时,多酚含量仅为 0.873 mg/g。造成这种现象的原因是在低浓度乙醇和水环境中,溶剂很容易进入细胞,而高浓度的乙醇会导致蛋白质变性,减少多酚的溶解,从而影响多酚提取含量^[17]。因此,选择乙醇体积分数 50%, 60%, 70%为响应面设计的 3 个水平。

2.3 超声时间对坛紫菜多酚提取的影响

由图 3 可知,超声时间为 50 min 时,坛紫菜的多酚含量最大,为 4.415 mg/g,显著高于其他时间提取的($P < 0.05$),超声时间超过 50 min 后,多酚含量显著下降($P < 0.05$),可能由于提取时间过长,对多酚造成了一定程度的氧化损伤,从而导致多酚含量降低^[18]。因此,选择超声时间 40, 50, 60 min 为响应面设计的 3 个水平。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 乙醇体积分数对坛紫菜多酚含量的影响

Figure 2 Effects of ethanol concentration on the polyphenols content of *P. haitanensis*

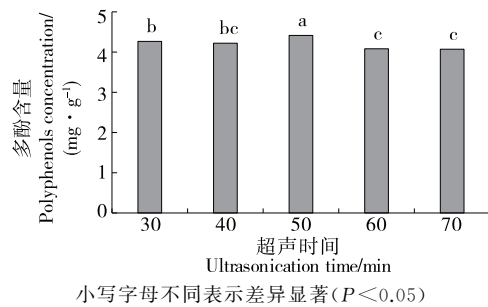


图3 超声时间对紫菜多酚含量的影响

Figure 3 Effects of ultrasonication time on the polyphenols content of *P. haitanensis*

2.4 响应面优化试验

根据单因素试验结果(表1),以多酚含量为响应值,进行响应面设计(表2),采用 Design-Expert 10 软件对试验结果进行多元回归拟合,得到多酚含量对液料比、乙醇体积分数和超声时间的二次多项回归模型:

$$Y = -15.632\ 0 + 0.304\ 6A + 0.418\ 7B + 0.040\ 6C - 0.000\ 7AB + 0.000\ 3AC + 0.001\ 7BC - 0.002\ 8A^2 - 0.004\ 2B^2 - 0.001\ 5C^2. \quad (5)$$

为检验回归方程的有效性和各因素对坛紫菜多酚含量的影响程度,对得到的回归模型进行方差分析,结果见表3。由表3可知,所建立的方程模型的显著性极高($P < 0.001$),失拟项 $F = 3.79, P = 0.115\ 3 > 0.05$,表明该模型方程与实际拟合度较好;试验中各因素对坛紫菜多酚含量的影响排序为: $B > C > A$;模型决定系数 $R^2 = 0.951\ 0$,校正决定系数 $R^2_{Adj} = 0.888\ 0 > 0.80$,变异系数 $CV = 2.89\% < 10\%$,表明该模型的拟合度较高,试验误差较小且可信度比较高。

通过对图4~图6中曲面的坡度和等高线的疏密进行分析可知,试验中各因素之间的交互作用对坛紫菜多酚含量影响的顺序为: $BC > AB > AC$,与方差分析的结果一致。

2.5 反应条件的优化及模型验证

运用 Design-Expert 10 软件分析得到坛紫菜多酚提取的最佳工艺条件为:液料比($V_{乙醇溶液} : m_{坛紫菜}$)51 : 1 (mL/g),乙醇体积分数56%,超声时间51 min,在该条件下,提取的坛紫菜多酚含量为5.027 mg/g。考虑仪器设备及试验便利,设定最佳工艺条件为液料比($V_{乙醇溶液} : m_{坛紫菜}$)50 : 1 (mL/g),乙醇体积分数56%,超声时间

表1 Box-Behnken 试验设计因素与水平

Table 1 Factor and levels of Box-Behnken experiment

水平	A 液料比(mL/g)	B 乙醇体积分数/%	C 超声时间/min
-1	40 : 1	50	40
0	50 : 1	60	50
1	60 : 1	70	60

表2 响应面设计及结果

Table 2 Results of response surface experiment

试验号	A	B	C	Y 多酚含量/(mg·g ⁻¹)
1	0	1	-1	3.774
2	1	0	1	4.693
3	0	1	1	4.459
4	0	0	0	5.028
5	0	0	0	4.811
6	-1	0	1	4.422
7	0	0	0	4.978
8	1	0	-1	4.572
9	-1	-1	0	4.577
10	0	0	0	4.933
11	1	1	0	3.829
12	0	-1	1	4.667
13	-1	0	-1	4.436
14	-1	1	0	3.942
15	1	-1	0	4.716
16	0	-1	-1	4.653
17	0	0	0	5.023

表3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	2.360	9	0.260	15.10	0.000 8	* *
A	0.021	1	0.021	1.23	0.303 2	
B	0.860	1	0.860	49.76	0.000 2	* *
C	0.081	1	0.081	4.67	0.067 4	
AB	0.018	1	0.018	1.06	0.337 4	
AC	0.005	1	0.005	0.26	0.624 5	
BC	0.110	1	0.110	6.50	0.038 1	*
A ²	0.320	1	0.320	18.42	0.003 6	* *
B ²	0.740	1	0.740	42.38	0.000 3	* *
C ²	0.092	1	0.092	5.33	0.054 3	
残差	0.120	7	0.017			
失拟项	0.090	3	0.030	3.79	0.115 3	
绝对误差	0.032	4	0.008			
总误差	2.480	16				

50 min,进行3次平行实验验证,结果测得坛紫菜的多酚含量为(5.203±0.057) mg/g,与预测结果接近,说明该模型的准确度较高,模型真实有效。

2.6 不同采收期坛紫菜的多酚含量

由图7可知,随着采收期的增加,坛紫菜中的多酚含量呈上升趋势。四水坛紫菜中的多酚含量最高,为6.19 mg/g;其次是头水坛紫菜与三水坛紫菜,多酚含量分别为5.89 mg/g和5.82 mg/g;二水坛紫菜的多酚含量

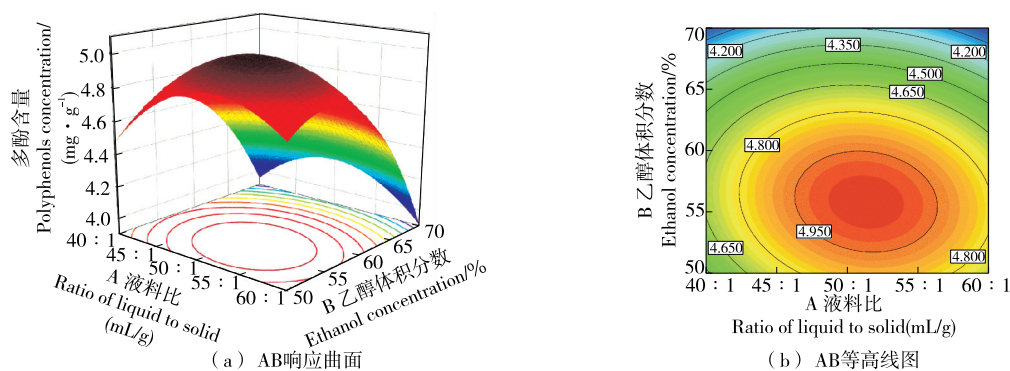


图 4 AB 交互作用

Figure 4 AB interaction

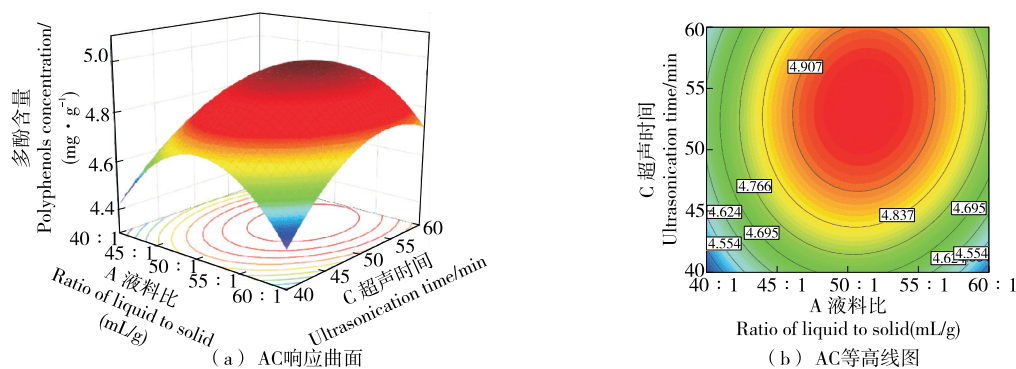


图 5 AC 交互作用

Figure 5 AC interaction

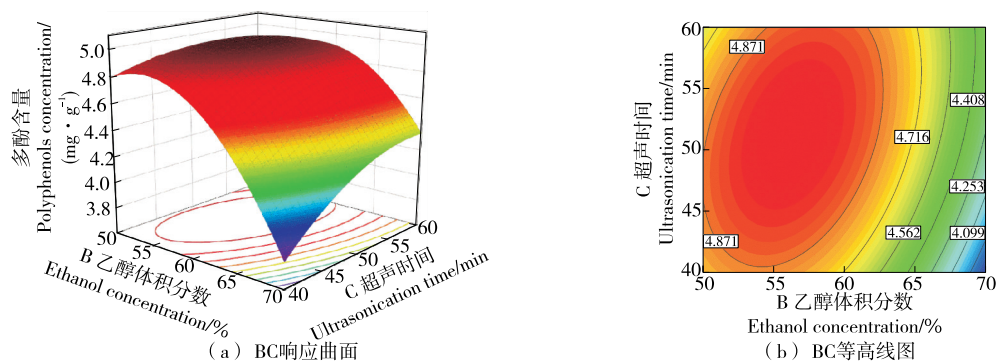


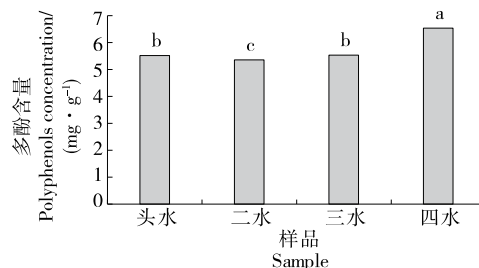
图 6 BC 交互作用

Figure 6 BC interaction

最低,为 5.30 mg/g,显著低于其他采收期。钟明杰等^[20]报道通过微波辅助提取的坛紫菜多酚含量为 4.40~4.77 mg/g,陈洪彬等^[7]研究发现坛紫菜的多酚含量为 6.10~6.85 mg/g,与此试验所测定的多酚含量相比略有差异,可能是由于坛紫菜的生长海域不同导致营养成分有所不同,多酚含量有所差异^[20]。综上,四水坛紫菜多酚含量最高,可选用四水坛紫菜提取多酚,促进四水坛紫菜的高值化利用。

2.7 坛紫菜多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用

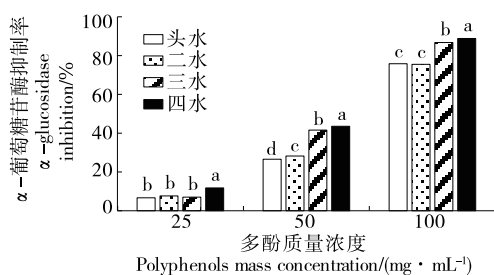
由图 8 可知,坛紫菜多酚提取物对 α -葡萄糖苷酶的活性具有明显的抑制作用,且呈浓度依赖性,随着多酚质



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图 7 不同采收期坛紫菜的多酚含量

Figure 7 Polyphenols content of *P. haitanensis* at different harvest periods



小写字母不同表示不同采收期差异显著 ($P < 0.05$)

图8 不同采收期坛紫菜多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性

Figure 8 The α -glucosidase inhibition of *P. haitanensis* polyphenols at different harvest periods

量浓度的增大,其抑制作用不断增强。当多酚质量浓度为100 mg/mL时,坛紫菜多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制活性均达到70%以上。不同采收期的坛紫菜多酚对 α -葡萄糖苷酶活性的抑制作用存在一定的差异,四水坛紫菜多酚的抑制活性最高,当多酚质量浓度为100 mg/mL时,抑制率为 $(88.84 \pm 0.80)\%$,显著高于其他采收期 ($P < 0.05$);其次是三水坛紫菜多酚,抑制率为 $(86.75 \pm 0.34)\%$;头水和二水坛紫菜多酚的抑制率差异不显著 ($P > 0.05$),分别为 $(75.81 \pm 0.35)\%$ 和 $(75.50 \pm 0.30)\%$ 。

2.8 坛紫菜多酚的抗氧化能力

2.8.1 DPPH 自由基的清除能力 由图9可知,坛紫菜多酚对DPPH自由基具有较强的清除能力,随着多酚质量浓度的增加,DPPH自由基清除率呈整体上升趋势。当多酚质量浓度为0~1 mg/mL时,4个采收期坛紫菜多酚对DPPH自由基的清除率呈快速上升趋势;质量浓度为2 mg/mL时,清除率略微下降;质量浓度在3 mg/mL时,清除率为42.58%~58.79%;当质量浓度>3 mg/mL时,清除率趋于稳定。四水坛紫菜多酚对DPPH自由基的清除率显著高于其他采收期 ($P < 0.05$)。

2.8.2 ABTS⁺ 自由基的清除能力 由图10可知,随着多酚质量浓度的增加,坛紫菜多酚对ABTS⁺自由基的清除能力呈上升趋势,当多酚质量浓度为5 mg/mL时,各采

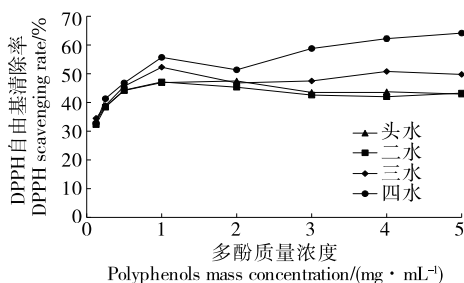


图9 不同采收期坛紫菜多酚对DPPH自由基的清除能力

Figure 9 DPPH scavenging rate of *P. haitanensis* polyphenols at different harvest periods

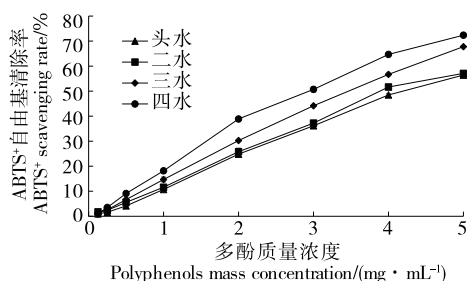
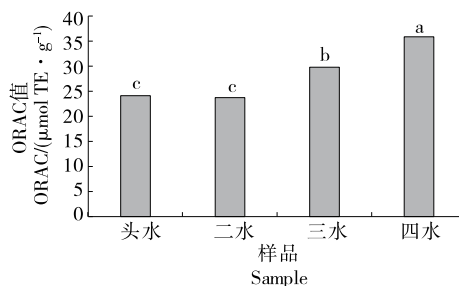


图10 不同采收期坛紫菜多酚对ABTS⁺自由基的清除能力

Figure 10 ABTS⁺ scavenging rate of *P. haitanensis* polyphenols at different harvest periods

收期坛紫菜多酚的ABTS⁺自由基清除率达到最大,与董玉婷等^[21]的研究结果基本一致。

2.8.3 氧自由基吸收能力 由图11可知,随采收期的增加,ORAC值呈上升趋势,四水坛紫菜多酚的ORAC值显著高于其他采收期 ($P < 0.05$),为 $(35.86 \pm 2.12) \mu\text{mol TE/g}$,其次是三水坛紫菜多酚,为 $(29.79 \pm 0.76) \mu\text{mol TE/g}$,头水坛紫菜多酚和二水坛紫菜多酚的ORAC值最低且无显著性差异 ($P > 0.05$),综上,四水坛紫菜多酚的抗氧化能力强于其他采收期坛紫菜多酚。



小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图11 不同采收期坛紫菜多酚的ORAC值

Figure 11 ORAC of *P. haitanensis* polyphenols at different harvest periods

3 结论

采用Box-Behnken响应面法优化确定了坛紫菜多酚的提取工艺,最优的工艺条件为:液料比($V_{\text{乙醇溶液}} : m_{\text{坛紫菜}}$)51:1 (mL/g),乙醇体积分数56%,超声时间51 min。在此条件下,提取的多酚含量为5.027 mg/g。在此工艺下提取的不同采收期的坛紫菜多酚,坛紫菜多酚含量不同,其中四水坛紫菜的多酚含量显著高于其他采收期;坛紫菜多酚对 α -葡萄糖苷酶的活性具有较强的抑制作用,其中四水坛紫菜多酚对 α -葡萄糖苷酶的抑制作用最强,并且其抗氧化能力也最强。因此,四水坛紫菜是开发天然降血糖食品和抗氧化剂的优良食源。后续将鉴定坛紫菜多酚中具有抑制 α -葡萄糖苷酶活性的物质并研究其在人体肠道中的吸收和转化。

参考文献

- [1] 韩莎莎, 黄臻颖, 沈照鹏, 等. 酶法降解坛紫菜多糖及其产物分析[J]. 食品科学, 2015, 36(21): 145-149.
HAN S S, HUANG Z Y, SHEN Z P, et al. Enzymatic degradation of polysaccharide from *Porphyra haitanensis* and analysis of its products[J]. Food Science, 2015, 36(21): 145-149.
- [2] 杨贤庆, 黄海潮, 潘创, 等. 紫菜的营养成分、功能活性及综合利用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 306-313.
YANG X Q, HUANG H C, PAN C, et al. Advances on nutrient components, biological activities and comprehensive utilization of *Porphyra* [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(5): 306-313.
- [3] 李水根. 福建省不同海域坛紫菜营养成分及重金属含量分析[J]. 渔业研究, 2020, 42(5): 453-462.
LI S Y. Analysis of nutrient composition and heavy metal content of *Porphyra haitanensis* in different sea areas of Fujian province[J]. Journal of Fisheries Research, 2020, 42(5): 453-462.
- [4] 陈胜军, 于娇, 胡晓, 等. 汕头地区不同采收期坛紫菜营养成分分析与评价[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 539-546.
CHEN S J, YU J, HU X, et al. Nutritional analysis and evaluation of *Porphyra haitanensis* in Shantou area at different harvesting stages [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2020, 34(3): 539-546.
- [5] 王小慧, 戚勃, 杨贤庆, 等. 响应面法优化末水坛紫菜蛋白酶解工艺及其酶解液抗氧化活性研究[J]. 南方水产科学, 2019, 15(2): 93-101.
WANG X H, QI B, YANG X Q, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis of protein in abandoned *Porphyra haitanensis* by response surface methodology and study on antioxidant activity of its hydrolysate [J]. South China Fisheries Science, 2019, 15(2): 93-101.
- [6] 胡晓, 于娇, 陈胜军, 等. 末水坛紫菜蛋白源抗氧化肽的制备、分离纯化与体外抗氧化活性[J]. 食品科学, 2020, 41(16): 37-44.
HU X, YU J, CHEN S J, et al. Preparation and purification of antioxidant peptide from *Porphyra haitanensis* protein and its antioxidant activities in vitro [J]. Food Science, 2020, 41(16): 37-44.
- [7] 陈洪彬, 宋露露, 金瑾萱, 等. 坛紫菜多酚提取工艺及体外抗氧化与抑菌活性研究[J]. 食品与机械, 2018, 34(9): 157-161.
CHEN H B, SONG L L, JIN J X, et al. The extraction process of polyphenols from *Porphyra haitanensis* and their antioxidant and antimicrobial activities in vitro [J]. Food & Machinery, 2018, 34(9): 157-161.
- [8] ZHANG Y, YAN Y, LI W, et al. Microwaving released more polyphenols from black quinoa grains with hypoglycemic effects compared with traditional cooking methods [J]. J Sci Food Agric, 2022, 102(13): 5 948-5 956.
- [9] MERVIC M, BIVAL ŠTEFAN M, KINDL M, et al. Comparative antioxidant, anti-acetylcholinesterase and anti- α -glucosidase activities of mediterranean *Salvia* species [J]. Plants (Basel), 2022, 11(5): 625.
- [10] 黄修晴, 初众, 房一明, 等. 植物多酚降血糖机制的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(18): 461-469.
HUANG X Q, CHU Z, FANG Y M, et al. Research progress on hypoglycemic mechanism of plant polyphenols [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(18): 461-469.
- [11] QI J, KIM S M. Alpha-glucosidase inhibitory activities of lutein and zeaxanthin purified from green alga *Chlorella ellipsoidea* [J]. Journal of Ocean University of China, 2018, 17(4): 983-989.
- [12] 屠万倩, 张留记, 夏曼玉, 等. 杜仲叶清除 DPPH 自由基力学特性及抗氧化活性成分筛选 [J]. 中国药学杂志, 2022, 57(4): 264-268.
TU W Q, ZHANG L J, XIA M Y, et al. DPPH kinetic characteristics and identification of antioxidant compounds in *Eucommia ulmoides* leaves [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2022, 57(4): 264-268.
- [13] SHEN Y B, ZHANG H, CHENG L L, et al. In vitro and in vivo antioxidant activity of polyphenols extracted from black highland barley [J]. Food Chemistry, 2016, 194: 1 003-1 012.
- [14] 何丽芳, 陈佩云, 刘最, 等. 红心火龙果原花青素超声辅助提取及其抗氧化活性 [J]. 衡阳师范学院学报, 2021, 42(6): 86-91.
HE L F, CHEN P Y, LIU Z, et al. On ultrasonic-assisted extraction and antioxidant activity of proanthocyanidins from red dragon fruits [J]. Journal of Hengyang Normal University, 2021, 42(6): 86-91.
- [15] 陈雪. 不同类型茶叶抗氧化功能的比较研究 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012: 36.
CHEN X. Study on anti-oxidant capacity of different tea [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012: 36.
- [16] ZHU S. Optimization of extraction of polyphenol from *Panax quinquefolius* L. using central composite design/response surface methodology [J]. Starch, 2021, 73(7/8): e2100020.
- [17] YANG Y C, LI J, ZU Y G, et al. Optimisation of microwave-assisted enzymatic extraction of corilagin and geraniin from *Geranium sibiricum* Linne and evaluation of antioxidant activity [J]. Food Chemistry, 2010, 122(1): 373-380.
- [18] YANG L, JIANG J G, LI W F, et al. Optimum extraction process of polyphenols from the bark of *Phyllanthus emblica* L. based on the response surface methodology [J]. J Sep Sci, 2009, 32(9): 1 437-1 444.
- [19] 钟明杰, 王阳光. 微波辅助提取紫菜多酚及抗氧化活性研究 [J]. 食品科技, 2010, 35(10): 204-207.
ZHONG M J, WANG Y G. Microwave-assisted extraction of polyphenols from laver and study of antioxidant capacity [J]. Food Science and Technology, 2010, 35(10): 204-207.
- [20] GRESSLER V, YOKOYA N S, FUJII M T, et al. Lipid, fatty acid, protein, amino acid and ash contents in four Brazilian red algae species [J]. Food Chemistry, 2010, 120(2): 585-590.
- [21] 董玉婷, 蔡宏浩, 李志朋, 等. 乳杆菌发酵提高坛紫菜 (*Porphyra haitanensis*) 的抗氧化和抑制糖脂代谢关键酶活性 [J]. 食品科学, 2022, 43(10): 162-171.
DONG Y T, CAI H H, LI Z P, et al. Effects of *Lactobacillus* fermentation on improvement of antioxidant activities and glycolipid metabolism key enzymes-inhibiting activities for *Porphyra haitanensis* [J]. Food Science, 2022, 43(10): 162-171.