

坛紫菜多酚提取工艺及体外抗氧化与抑菌活性研究

The extraction process of polyphenols from *Porphyra haitanensis* and their antioxidant and antimicrobial activities *in vitro*

陈洪彬^{1,2} 宋露露¹ 金瑾萱¹ 程永强^{2,3}

CHEN Hong-bin^{1,2} SONG Lu-lu¹ JIN Jin-xuan¹ CHENG Yong-qiang^{2,3}

(1. 泉州师范学院海洋与食品学院, 福建 泉州 362002; 2. 福建省海洋藻类活性物质与功能开发重点实验室, 福建 泉州 362002; 3. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

(1. College of Oceanology and Food Sciences, Quanzhou Normal University, Quanzhou, Fujian 362002, China; 2. Fujian Province Key Laboratory for the Development of Bioactive Material from Marine Algae, Quanzhou, Fujian 362002, China; 3. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

摘要:以四水坛紫菜为原料,优化超声波辅助提取坛紫菜多酚工艺,评价其体外抗氧化和抑菌活性。采用单因素考察液料比、超声时间和乙醇浓度对坛紫菜多酚含量的影响,并利用响应面分析法优化提取工艺。结果表明:坛紫菜多酚提取最佳工艺条件为液料比 35:1 (mL/g)、超声时间 43 min、乙醇浓度 66%,该条件下坛紫菜多酚含量为 (6.85±0.13) mg GAE/g;体外抗氧化试验表明,坛紫菜多酚对 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除率的 IC₅₀ 值分别为 (36.54±0.75), (16.07±0.32) μg/mL, ORAC 值为 (1 005.1±11.8) μmol TE/g;体外抑菌试验表明,坛紫菜多酚对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽胞杆菌和藤黄八叠球菌的最小抑菌浓度分别为 1,1,1,2 mg/mL。

关键词:坛紫菜;多酚;超声波辅助;抗氧化活性;抑菌活性

Abstract: The Optimization of the extraction of polyphenols from *Porphyra haitanensis* and their antioxidant and antimicrobial activities *in vitro* were studied. The effects of liquid-material ratio, ultrasonic times and ethanol concentration on the contents of polyphenols from *P. haitanensis* were investigated. Moreover, the response surface analysis method was applied to determine the optimization of the extraction. The results showed that the optimum condition for the ultrasonic-assisted extraction of polyphenols was as follows: liquid-material ratio 35:1 (mL/g), ultrasonic times 43 min

基金项目:福建省中青年教育科研项目(编号:JA15390);泉州市科技计划项目(编号:2015Z135);福建省大学生创新创业训练计划项目(编号:201610399032);福建省海洋藻类活性物质与功能开发重点实验室开放课题(编号:2017FZSK07)

作者简介:陈洪彬(1989—),男,泉州师范学院讲师,在读博士研究生。E-mail: yummyway@qq.com

收稿日期:2018-05-13

and ethanol concentration 66%. Under the optimum condition, the contents of polyphenols was (6.85±0.13) mg GAE/g. The research of their antioxidant activity *in vitro* showed that the polyphenols had the scavenging capabilities of DPPH and ABTS radicals, and their IC₅₀ were (36.67±0.75) and (16.07±0.32) μg/mL, respectively. The value of oxygen radical absorbance capacity (ORAC) was (1 005.1±11.8) μmol TE/g. Meanwhile, their antimicrobial activity *in vitro* showed that the polyphenols could inhibit the growth of tested microorganisms including *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus*, *Bacillus subtilis* and *Sarcina lutea*, and their minimal inhibitory concentrations were 1, 1, 1, 2 mg/mL, respectively.

Keywords: *Porphyra haitanensis*; polyphenols; ultrasonic-assisted; antioxidant activity; antimicrobial activity

坛紫菜(*Porphyra haitanensis*)又名紫菜、乌菜,是中国浙江、福建和广东沿海主要养殖的大型藻类^[1]。根据 2016 年中国渔业统计分析,2015 年中国养殖紫菜约 1.16×10⁵ t,其中福建养殖约 5.3×10⁴ t,占中国总产量近 50%^[2],但每年用于鲜食或加工的均为前 2~3 次收割的紫菜,末水残次坛紫菜基本被废弃,占总量 10%以上。坛紫菜富含膳食纤维和蛋白质,营养和药用价值极高,提取低值坛紫菜中的有效活性成分可以提高其附加值,减少资源浪费和环境污染,为紫菜深加工拓宽新渠道。

海藻多酚主要是海藻植物中的间苯三酚衍生物或其聚合物,具有抗氧化、抑菌、增强机体免疫等多种生理活性^[3-4]。福建的紫菜资源丰富,有关紫菜有效活性成分的研究主要集中在多糖^[5-7]、多肽^[8-9]方面,有关多酚类的研究还处在起步阶段。Kazłowska 等^[10]研究表明,紫菜多酚通过提高巨噬细胞中一氧化氮的含量来抵抗体外炎症的发生。

李锋等^[11]对坛紫菜多酚进行分离纯化,发现坛紫菜多酚除了具有较强的体外抗氧化能力,还可以抑制皮肤皮肤的紫外线伤害。也有研究^[12]发现,紫菜多酚提取物能显著抑制中国对虾冷藏过程中微生物的增殖作用,保持较好的冷藏对虾品质。李颖畅等^[13]和钟明杰等^[14]分别采用超声波和微波辅助提取紫菜多酚,可以较好地提高紫菜多酚的提取率。超声波辅助提取法因其机械效应和热效应,具有高提取率、低能量和可有效保护活性成分的生理作用等优势,在活性物质提取方面被广泛应用^[13,15]。目前,有关超声波辅助提取坛紫菜多酚研究较少,对坛紫菜多酚的体外抗氧化活性评价以清除DPPH自由基和羟基自由基能力为主^[11,14,16],方式较为单一,而有关坛紫菜多酚的抑菌活性评价鲜见报道。本试验以福建养殖的坛紫菜为原料,利用超声波辅助提取坛紫菜多酚,在预试验的基础上,考察液料比、超声时间和乙醇浓度对坛紫菜多酚含量的影响,通过响应面法优化坛紫菜多酚的提取工艺参数;采用DPPH自由基和ABTS自由基清除能力及氧自由基吸收能力(ORAC)来系统评价坛紫菜多酚体外抗氧化活性,采用大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、枯草芽胞杆菌和藤黄八叠球菌来系统评价其体外抑菌活性,为坛紫菜多酚的利用提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材料、仪器与试剂

坛紫菜:石狮古浮四水坛紫菜,烘干粉碎至80目,备用(含水量为 $4.58\% \pm 0.11\%$);

多功能酶标仪:Infinite 200 PRO型,瑞士帝肯集团公司;

紫外可见分光光度计:T6型,北京普析通用仪器有限责任公司;

分析天平:CP224C型,奥豪斯仪器上海有限公司;

万能粉碎机:ZN-02型,北京兴时利仪器有限公司;

高速冷冻离心机:GL-20G-II型,上海安亭科学仪器厂;

全自动菌落计数器:SupcreG6R型,杭州迅数科技有限公司;

隔水式恒温培养箱:GHP-9050型,上海一恒科学仪器有限公司;

双频数控超声波清洗器:KQ-300VDE型,昆山市超声仪器有限公司;

1,1-二苯基苦基苯肼(DPPH):分析纯,美国西格玛奥德里奇公司;

FL荧光素钠、AAPH、Trolox、2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐(ABTS)、过硫酸钾等:分析纯,德国克雷贝尔公司;

没食子酸、福林酚、无水碳酸钠、无水乙醇、牛肉膏、蛋白胨、氯化钠、琼脂粉等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 试验方法

1.2.1 坛紫菜多酚提取工艺

坛紫菜→粉碎→过筛(80目)→超声辅助提取→离心(8 000 r/min,30 min)→坛紫菜多酚提取液

1.2.2 多酚含量的测定 参考陈洪彬等^[15]的方法,以没食子酸计,用mg GAE/g表示(烘干后粉末重量)。

1.2.3 坛紫菜多酚体外抗氧化活性和抑菌活性的测定

(1) DPPH自由基清除率:参照文献^[15]。

(2) ABTS自由基清除率:参照文献^[17]。

(3) 氧自由基吸收能力:参照文献^[18]。

(4) IC_{50} 值:参照文献^[15]。

(5) 抑菌效果:采用打孔法评价,用自动菌落计数联用仪记录抑菌圈的直径。

1.2.4 单因素和响应面试验设计

(1) 液料比:在超声时间40 min、乙醇浓度60%的条件下,分别考察不同液料比[20:1,30:1,40:1,50:1,60:1(mL/g)]对坛紫菜多酚含量的影响,重复3次,取平均值。

(2) 超声时间:在液料比30:1(mL/g)、乙醇浓度60%的条件下,分别考察不同超声时间(10,20,30,40,50 min)对坛紫菜多酚含量的影响,重复3次,取平均值。

(3) 乙醇浓度:在液料比30:1(mL/g)、超声时间40 min的条件下,分别考察不同乙醇浓度(20%,40%,60%,80%,100%)对坛紫菜多酚含量的影响,重复3次,取平均值。

(4) 响应面试验:在单因素试验的基础上,以液料比、超声时间、乙醇浓度为试验因素,以坛紫菜多酚含量为评价指标,设计三因素三水平响应面试验优化坛紫菜多酚超声波辅助提取工艺条件。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 液料比 由图1可知,随着液料比的增加,坛紫菜多酚含量呈先升高后降低的趋势。在液料比为30:1(mL/g)时,坛紫菜多酚含量最高,为 (6.80 ± 0.04) mg GAE/g,之后坛紫菜多酚含量有所下降。这是因为液料比过低不利于坛紫菜多酚的溶出,而较高的液料比将溶出更多杂质,影响多酚的溶出,同时也增加后续浓缩成本。本研究多酚含量的变化趋势与李颖畅等^[13]的研究结果类似。因此,选择液料比为30:1(mL/g)。

2.1.2 超声时间 由图2可知,随着超声时间的延长,坛紫

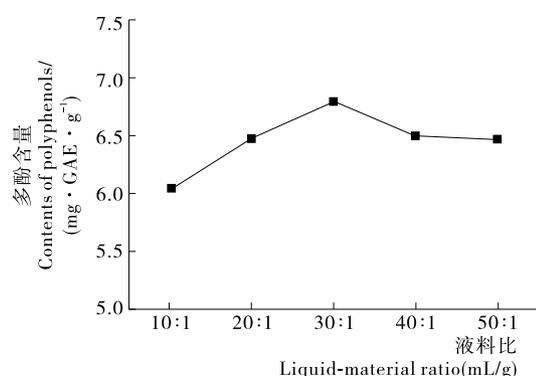


图1 液料比对坛紫菜多酚含量的影响

Figure 1 Effects of liquid-material ratio on the contents of polyphenols from *Porphyra haitanensis*

菜多酚含量升高。在超声 10~30 min 时,坛紫菜多酚含量增加快速,之后缓慢升高,到超声 40 min 时,坛紫菜多酚含量达到最大值,之后趋于稳定。这是因为超声达到一定时间后,坛紫菜多酚已基本溶出,再延长超声时间,已经无法再有多酚溶出。该多酚含量的变化趋势与陈洪彬等^[15]的类似。因此,选择超声时间为 40 min。

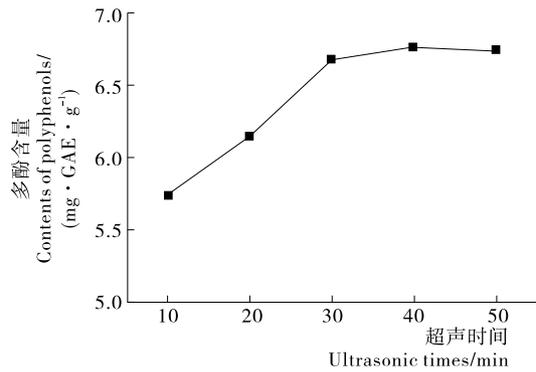


图 2 超声时间对坛紫菜多酚含量的影响

Figure 2 Effects of ultrasonic times on the contents of polyphenols from *Porphyra haitanensis*

2.1.3 乙醇浓度 由图 3 可知,乙醇浓度对坛紫菜多酚含量的影响较大。随着乙醇浓度增加,坛紫菜多酚含量整体呈先升高后下降的趋势。乙醇浓度在 20%~60% 时,超声辅助提取的坛紫菜多酚含量快速升高,乙醇浓度在 60% 时,坛紫菜多酚含量达到最大值,为(6.81±0.06) mg GAE/g,之后坛紫菜多酚含量快速下降,当乙醇浓度达到 100% 时,坛紫菜仅有少量多酚被超声浸出。这可能是海藻中的多酚类物质以间苯三酚及其衍生物为主^[3],水溶性较高,过高的乙醇浓度不利于多酚物质的溶出。因此,选择乙醇浓度为 60%。

2.2 响应面法优化设计

2.2.1 试验设计与结果分析 根据单因素试验结果,以坛紫菜多酚含量作为响应值。根据 Box-Behnken 中心组合原理进行响应面设计,试验因素水平表见表 1,试验设计与结果见表 2。

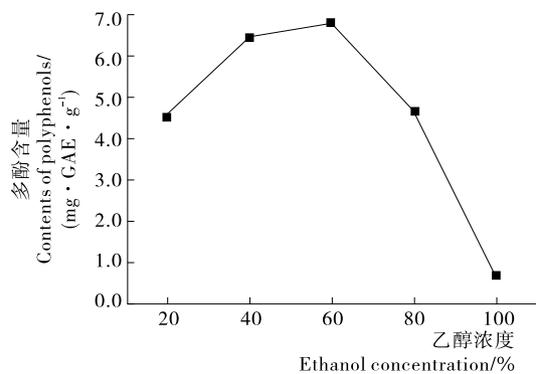


图 3 乙醇浓度对坛紫菜多酚含量的影响

Figure 3 Effects of ethanol concentration on the contents of polyphenols from *Porphyra haitanensis*

表 1 因素和水平表

| 水平 | A 液料比(mL/g) | B 超声时间/min | C 乙醇浓度/% |
|----|-------------|------------|----------|
| -1 | 20:1 | 30 | 40 |
| 0 | 30:1 | 40 | 60 |
| 1 | 40:1 | 50 | 80 |

表 2 坛紫菜多酚提取响应面试验设计及结果

| 序号 | A | B | C | 多酚含量/(mg GAE · g ⁻¹) |
|----|----|----|----|----------------------------------|
| 1 | -1 | -1 | 0 | 5.37 |
| 2 | 1 | -1 | 0 | 5.73 |
| 3 | -1 | 1 | 0 | 6.19 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 6.71 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 5.10 |
| 6 | 1 | 0 | -1 | 6.27 |
| 7 | -1 | 0 | 1 | 6.42 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 6.44 |
| 9 | 0 | -1 | -1 | 4.44 |
| 10 | 0 | 1 | -1 | 5.69 |
| 11 | 0 | -1 | 1 | 6.34 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 6.40 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 6.78 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 6.83 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 6.57 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 6.77 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 6.64 |

利用 Design-Expert 8.05 软件对响应面试验结果进行分析,得到以坛紫菜多酚含量(Y)为响应值的回归方程:

$$Y = 6.71 + 0.26A + 0.39B + 0.51C + 0.04AB - 0.29AC - 0.30BC - 0.18A^2 - 0.52B^2 - 0.47C^2 \quad (1)$$

为检验回归方程中各因素对紫菜多酚提取量的影响程度以及有效性,对式(1)中的回归方程进行方差分析,结果见表 3。由表 3 可知,回归模型 $P = 0.0008 < 0.01$, 达到极显著水平,失拟项 $P = 0.2975 > 0.05$, 不显著,说明该回归方程合适并有效;变异系数 $C.V.\% = 3.67 < 10.00$, 精密性为 $12.630 > 4.000$, 说明该试验重复性较好;相关系数 $R^2 = 0.9999$, 校正决定系数 $R_{adj}^2 = 0.8885$, 说明该回归方程拟合度较高。因此,利用该模型来优化坛紫菜多酚提取工艺是可行的。

对各项方差的进一步分析可知,3 个因素对坛紫菜多酚含量的影响顺序为:乙醇浓度 > 超声时间 > 料液比。其中, B、C、B² 和 C² 项对坛紫菜多酚含量的影响达到极显著水平, A、AC 和 BC 项达到显著水平。在 $\alpha = 0.05$ 显著水平下将不显著项进行剔除,得到优化后的回归方程:

$$Y = 6.63 + 0.26A + 0.39B + 0.51C - 0.29AC - 0.30BC - 0.53B^2 - 0.48C^2 \quad (2)$$

表 3 方差分析[†]

Table 3 ANOVA of the constructed regression model

| 项目 | 平方和 | 自由度 | 均方 | F 值 | P 值 | 显著性 |
|----------------|---------|-----|---------|-------|---------|-----|
| 模型 | 6.967 0 | 9 | 0.774 2 | 15.16 | 0.000 8 | ** |
| A | 0.530 7 | 1 | 0.530 7 | 10.39 | 0.014 6 | * |
| B | 1.211 0 | 1 | 1.211 0 | 23.72 | 0.001 8 | ** |
| C | 2.102 0 | 1 | 2.102 0 | 41.17 | 0.000 4 | ** |
| AB | 0.006 5 | 1 | 0.006 5 | 0.13 | 0.731 7 | |
| AC | 0.339 5 | 1 | 0.339 5 | 6.65 | 0.036 6 | * |
| BC | 0.351 3 | 1 | 0.351 3 | 6.88 | 0.034 3 | * |
| A ² | 0.140 0 | 1 | 0.140 0 | 2.74 | 0.141 7 | |
| B ² | 1.157 0 | 1 | 1.157 0 | 22.65 | 0.002 1 | ** |
| C ² | 0.916 8 | 1 | 0.916 8 | 17.96 | 0.003 9 | ** |
| 残差 | 0.357 4 | 7 | 0.051 0 | | | |
| 失拟项 | 0.202 1 | 3 | 0.067 3 | 1.74 | 0.297 5 | 不显著 |
| 纯误差 | 0.155 3 | 4 | 0.038 8 | | | |
| 总和 | 7.325 0 | 16 | | | | |

[†] * 表示差异显著, $P < 0.05$; ** 表示极差异显著, $P < 0.01$; $R^2 = 0.999 9$, $R_{adj}^2 = 0.888 5$, $C.V. \% = 3.67$, $Adeq Precision = 12.630$ 。

2.2.2 试验因素间的交互作用 对表 3 进一步分析,发现乙醇浓度与液料比、超声时间的交互项对坛紫菜多酚含量的影响达到显著水平($P < 0.05$),其中乙醇浓度与超声时间之间对坛紫菜多酚含量的交互影响最大。为更直观说明交互影响作用,对交互项作响应曲面图和等高线图。由图 4 可以看

出,乙醇浓度和超声时间之间的响应面曲面坡度陡峭,等高线图呈扁平椭圆状,说明乙醇浓度和超声时间之间具有较强的交互作用,对坛紫菜多酚含量的影响大。

2.2.3 最佳工艺参数 进一步分析响应面分析回归方程,得到坛紫菜多酚提取最优工艺参数为:液料比 35.06 : 1 (mL/g)、超声时间 43.08 min、乙醇浓度 65.86%,此时超声辅助提取坛紫菜多酚的理论含量为 6.91 mg GAE/g。为检验响应面结果的可靠性,对最优工艺参数进行验证实验($n = 3$),根据实际操作情况,将验证条件修正为液料比 35 : 1 (mL/g)、超声时间 43 min、乙醇浓度 66%,此时提取的坛紫菜多酚含量为(6.85±0.13) mg GAE/g。

2.2.4 体外抗氧化和抑菌活性评价 根据响应面优化工艺结果,制备坛紫菜多酚,采用 DPPH 自由基和 ABTS 自由基清除能力及氧自由基吸收能力(ORAC)评价该坛紫菜多酚的体外抗氧化活性,以抗坏血酸为阳性对照,结果见表 4 和图 5。由表 4 可知,坛紫菜多酚具有一定的抗氧化活性,其多酚含量与 DPPH 自由基、ABTS 自由基清除率呈线性正相关性。坛紫菜多酚的 DPPH 自由基清除率 IC_{50} 值为(36.54±0.75) $\mu\text{g/mL}$,是阳性对照抗坏血酸的 2.33 倍,说明它的体外抗氧化效果低于同浓度下的抗坏血酸;坛紫菜多酚的 ABTS 自由基清除率 IC_{50} 值为(16.07±0.32) $\mu\text{g/mL}$,略弱于同浓度下抗坏血酸的[抗坏血酸 ABTS 自由基 IC_{50} 值为(11.96±0.26) $\mu\text{g/mL}$]。根据图 5,按文献[17]的计算方法,得到坛紫菜多酚的氧自由基吸收能力值为(1 005.1±11.8) $\mu\text{mol TE/g}$,说明坛紫菜多酚具有较高的抗氧化能力。

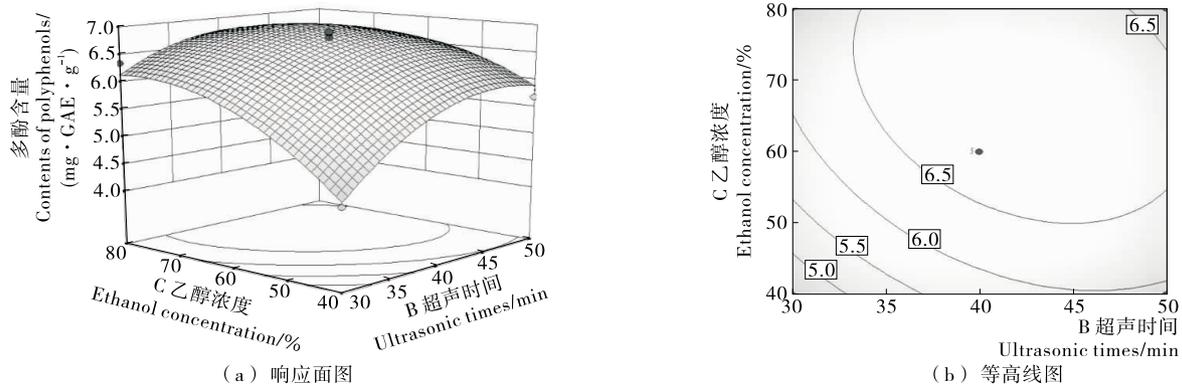


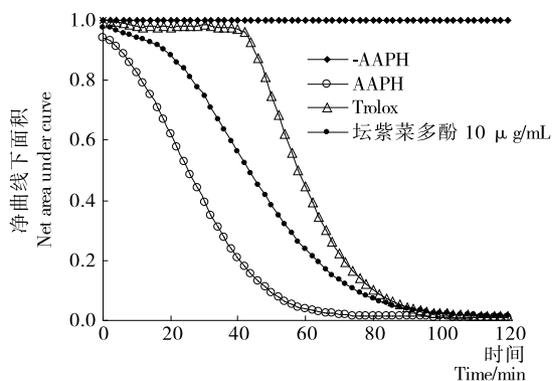
图 4 乙醇浓度和超声时间对坛紫菜多酚含量的交互影响

Figure 4 Interaction effects of ethanol concentration and ultrasonic times on the contents of polyphenols from *Porphyra haitanensis*

表 4 坛紫菜多酚和抗坏血酸的 DPPH 自由基、ABTS 自由基清除率 IC_{50} 值

Table 4 IC_{50} values for DPPH free radical, ABTS free radical of polyphenols from *Porphyra haitanensis* and ascorbic acid

| 评价指标 | 评价对象 | 回归方程 | R^2 | $IC_{50}/(\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1})$ |
|----------|-------|---------------------------|---------|--|
| DPPH 自由基 | 坛紫菜多酚 | $y = 0.898 6 x + 17.109$ | 0.990 6 | 36.54 ± 0.75 |
| | 抗坏血酸 | $y = 2.157 7 x + 16.073$ | 0.995 2 | 15.71 ± 0.18 |
| ABTS 自由基 | 坛紫菜多酚 | $y = 2.783 5 x + 5.322 8$ | 0.991 6 | 16.07 ± 0.32 |
| | 抗坏血酸 | $y = 3.604 6 x + 6.933 4$ | 0.996 3 | 11.96 ± 0.26 |

图 5 紫菜粗多酚和水溶性 V_E 溶液荧光衰减曲线Figure 5 The attenuation curve of fluorescence intensity of *Porphyra haitanensis* polyphenol and Trolox表 5 不同浓度坛紫菜多酚的体外抑菌效果[†]Table 5 Bacteriostasis effects of different concentrations of polyphenols from *Porphyra haitanensis* in vitro

| 紫菜浓度/ (mg · L ⁻¹) | 抑菌圈直径/mm | | | |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 大肠杆菌 | 金黄色葡萄球菌 | 枯草杆菌 | 藤黄八叠球菌 |
| 0.5 | — | — | — | — |
| 1.0 | 8.11±0.04 | 8.12±0.04 | 8.13±0.06 | — |
| 2.0 | 8.22±0.08 | 8.24±0.06 | 8.33±0.03 | 8.12±0.07 |
| 4.0 | 8.54±0.08 | 8.59±0.06 | 8.71±0.07 | 8.20±0.06 |
| 8.0 | 9.10±0.11 | 8.88±0.06 | 8.96±0.06 | 8.32±0.02 |

† 牛津杯内径 6 mm, 外径 8 mm。

的紫菜多酚相比含量要高,可能是微波辐射破坏多酚的结构。同时,本研究结果与李颖畅等^[13]采用超声波辅助提取的紫菜多酚含量基本一致,说明利用超声波辅助提取紫菜多酚的方法可靠,为低值坛紫菜制备多酚的工业化生产提供技术参数。通过体外抗氧化和抑菌试验,发现坛紫菜多酚具有较强的抗氧化活性和抑菌活性,是一种潜在的天然抗氧化和抑菌物质,但有关它的抗氧化、抑菌活性及其他生物活性和构效关系有待进一步深入研究。

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.
- [2] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴: 2016[Z]. 北京: 中国农业出版社, 2016: 33-34.
- [3] EOM S H, KIM Y M, KIM S K. Antimicrobial effect of phlorotannins from marine brown algae[J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(9): 3 251-3 255.
- [4] KANNAN RR R, ADEROGBA M A, NDHLALA A R, et al. Acetylcholinesterase inhibitory activity of phlorotannins isolated from the brown alga, *Ecklonia maxima* (Osbeck) Papenfuss[J]. Food Research International, 2013, 54(1): 1 250-1 254.
- [5] 陈美珍,徐景燕,潘群文,等. 末水残次坛紫菜的营养成分及多糖组成分析[J]. 食品科学, 2011, 32(20): 230-234.
- [6] 穆凯峰,吴永沛. 坛紫菜多糖的分离纯化及其组成分析[J]. 中国食品学报, 2011, 11(1): 159-164.
- [7] 谢飞,曹纯洁,陈美珍,等. 响应面试验优化末水坛紫菜多糖除

蛋白工艺及其抗氧化活性[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 77-84.

[8] 雷桂洁,苏国成,江晓颖,等. 复合酶二次酶解法制备紫菜多肽原液及其 ACE 抑制活性的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(11): 141-146.

[9] 王茵,苏永昌,吴靖娜,等. 紫菜多肽降血脂及抗氧化作用的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(16): 334-337.

[10] KAZŁOWSKA K, HSU T, HOU C C, et al. Anti-inflammatory properties of phenolic compounds and crude extract from *Porphyra dentata* [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2010, 128(1): 123-130.

[11] 李锋,李清仙,程志远,等. 坛紫菜多酚抗氧化及抑制 UVB 致 HSF 细胞氧化损伤作用[J]. 食品科学, 2017, 38(17): 190-197.

[12] 李颖畅,王亚丽,吕艳芳,等. 紫菜多酚提取物对冷藏中国对虾品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(5): 210-215.

[13] 李颖畅,张笑,吕艳芳,等. 响应面优化超声波辅助提取紫菜多酚[J]. 中国食品学报, 2014, 14(9): 82-89.

[14] 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.

[15] 陈洪彬,杨敏,宋露露,等. 龙须菜多酚提取工艺优化及其体外抗氧化活性[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 139-143.

[16] 李颖畅,王亚丽,刘明爽,等. 不同处理方式对紫菜多酚清除氧自由基的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(10): 138-141.

[17] LI Xi-can, LIN Jing, GAO Yang-xiang, et al. Antioxidant activity and mechanism of *Rhizoma Cmicifugae* [J]. Chemistry Central Journal, 2012, 6(1): 140.

[18] 赵健,宋亮楠,刘薇,等. ORAC 法测定保健食品抗氧化能力的体内外实验对比分析[J]. 食品科学, 2011, 32(15): 103-108.

3 结论

本研究利用超声波辅助提取四水坛紫菜中的多酚,以多酚含量为评价指标,通过单因素和响应面试验确定坛紫菜多酚最佳提取工艺条件为液料比 35:1 (mL/g)、超声时间 43 min、乙醇浓度 66%,在此条件下,坛紫菜多酚含量为 (6.85±0.13) mg GAE/g,与钟明杰等^[14]采用微波辅助提取