

海藻多糖的单糖组成对体外抗氧化活性的影响

冯书珍, 卢宇凤, 刘南英, 徐 畅, 谢广燕, 冯学珍*

广西科技大学, 柳州 545006

摘要:比较广西北部湾石莼(*Ulva lactuca* L.)、海带(*Laminaria japonica*)、裙带菜(*Undaria pinnatifida* Suringar)、紫菜(*Porphyra*)的单糖组成及抗氧化活性的差异,揭示多糖结构与其体外抗氧化活性的关系。利用PMP柱前衍生化HPLC分析海藻多糖的单糖组成,采用羟自由基清除试验、超氧阴离子自由基清除试验及DPPH自由基清除试验指征其体外抗氧化活性,结果表明,4种海藻多糖的单糖组成在主成分空间分布离散,石莼及紫菜主要由葡萄糖组成,海带主要由甘露糖组成,裙带菜则主要由半乳糖组成;其体外抗氧化活性存在显著差异,裙带菜多糖对DPPH的清除能力(半抑制浓度 IC_{50} 值为 0.56 ± 0.02 mg/mL)显著高于其他3种海藻多糖;石莼、裙带菜与海带对羟自由基均有较强的清除活性,而紫菜多糖对羟自由基的清除能力较差(IC_{50} 值为 26.59 ± 0.98 mg/mL);石莼与裙带菜对超氧阴离子的清除活性较强,显著高于海带与紫菜,其中石莼显著高于裙带菜, IC_{50} 值分别为 1.61 ± 0.17 、 2.73 ± 0.06 mg/mL。相关性分析及冗余分析结果表明,对抗氧化活性影响较为显著的因子为葡萄糖(Glc)、核糖(Rib)、木糖(Xyl)($P < 0.01$)。

关键词:海藻;多糖提取;单糖组成;抗氧化性

中图分类号:Q946

文献标识码:A

文章编号:1001-6880(2019)1-0116-07

DOI:10.16333/j.1001-6880.2019.1.018

Effect of monosaccharide composition on antioxidant activity of algal polysaccharides

FENG Shu-zhen, LU Yu-feng, LIU Nan-ying, XU Chang, XIE Guang-yan, FENG Xue-zhen*

Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China

Abstract: To discuss the difference in monosaccharide composition and antioxidant activity among different algal polysaccharides, we analyzed the *Ulva lactuca* L., *Laminaria japonica*, *Undaria pinnatifida* Suringar and *Porphyra* of Beibu Gulf in Guangxi. The monosaccharide compositions were analyzed by HPLC applied to PMP precolumn derivation. The antioxidant activity of polysaccharides was indicated by the scavenging DPPH, hydroxyl ($\cdot OH$), and superoxide anions ($O_2^{\cdot -}$) activity from algae polysaccharide. Results indicated that four algal polysaccharides were significantly different in monosaccharide composition by PCA analysis. *Ulva lactuca* L. and *Porphyra* were mainly composed by Glucose, *Laminaria japonica* and *Undaria pinnatifida* Suringar was composed by Mannose and Galactose, respectively. The scavenging capacity of DPPH of *Undaria pinnatifida* Suringar (the hemi-inhibitory concentration IC_{50} was 0.56 ± 0.02 mg/mL) was significantly higher than that of *Ulva lactuca* L., *Laminaria japonica* and *Porphyra*. The scavenging ability for ($\cdot OH$) of *Porphyra* polysaccharide (IC_{50} was 26.59 ± 0.98 mg/mL) was significantly lower than that of *Ulva lactuca* L., *Laminaria japonica*, *Undaria pinnatifida* and *Suringar*. According to the scavenging superoxide anions ($O_2^{\cdot -}$) activity, *Ulva lactuca* L. was significantly higher than *Undaria pinnatifida* Suringar, and the value of IC_{50} of *Ulva lactuca* L. and *Undaria pinnatifida* Suringar were 1.61 ± 0.17 mg/mL and 2.73 ± 0.06 mg/mL, respectively. Besides, Pearson correlation analysis and redundancy analysis both showed that glucose (Glc), ribose (Rib), xylose (Xyl) significantly influenced the antioxidant activity of algae polysaccharide ($P < 0.01$).

Key words: algae; polysaccharide extraction; monosaccharide composition; antioxidant activity

收稿日期:2018-07-23

接受日期:2018-12-28

基金项目:广西高校中青年骨干教师基础能力提升项目(2017KY036

3);国家级大学生创新创业训练计划(201710594051);

自然科学基金项目(0318101307)

* 通信作者 Tel:86-772-2056094; E-mail:fengxuezhbest@163.com

海藻是海洋中有机物的原始生产者,已有大量研究表明,海藻中含有的多糖具有抗氧化^[1]、抗肿瘤^[2]、抑菌^[3]、抗病毒^[4]、降血脂^[5]、降血糖^[6]等广

泛生物活性。其中,江海燕等^[7]在广西涠洲岛采集马尾藻的研究中发现,其海藻多糖成分的抗氧化效果优于常用的食品抗氧化剂(如 BHA、BHT 和 PG),具有显著的体外抗氧化活性。马军等^[8]对三亚周边海域海藻的研究指出,不同的海藻多糖的体外抗氧化活性存在显著差异;而引起这种差异的主要原因,Wang 等^[9]研究表明,多糖的活性与其化学结构是有着密切关系的,其中,单糖组成的分析是研究多糖的结构、性质等的基本内容^[10]。目前对海藻多糖的化学结构及生物活性的研究,多集中于单一类型^[7,11],将同一海域不同海藻类型的多糖进行差异分析并试图解析活性与结构之间关系的研究还较少。

本研究依托广西北部湾海域,以典型海藻类型-石莼(绿藻门)、海带、裙带菜(褐藻门)和紫菜(红藻门)为研究对象,采用苯酚-硫酸法测定其多糖含量,并用 PMP 柱前衍生化高效液相色谱法测定单糖组成,通过清除 DPPH 自由基、羟自由基($\cdot\text{OH}$)、超氧阴离子(O_2^-)自由基的能力指征多糖的抗氧化活性;明确以下两个问题:①不同海藻多糖的单糖组成及体外抗氧化活性的差异;②单糖组成与体外抗氧化活性之间的关系,旨在为海藻多糖的功效评价及多糖结构与活性之间的关系研究提供基础,进而为广西北部湾褐藻多糖在药物方面的应用研究提供参考。

1 材料与仪器

三氟乙酸(TFA)、乙酸铵、乙腈(Merck,德国),1-苯基-3-甲基-5-吡啶啉酮(PMP)分析纯(Sigma,美国);D-葡萄糖、D-木糖、D-半乳糖、D-甘露糖、核糖、D-鼠李糖等标准品(国药集团化学试剂有限公司);其他试剂均为分析纯(国药集团化学试剂有限公司)。

紫外分光光度计(北京普析通用仪器有限公司),冷冻干燥机(上海精宏实验设备有限公司),高效液相色谱仪(Agilent Technologies Inc.,美国),数码超声波清洗机(上海之佳仪器制造有限公司),全波长扫描酶标仪(Thermo Fisher Scientific,美国)。

2 实验方法

2.1 海藻样品的采集与鉴定

于2018年1月取自广西北部湾海域(20° 54' 10" -21° 40' 30" N, 109° 05' 20" -109° 11' 35" E),经大连海洋大学邢坤副教授依次鉴定为绿藻门石莼属黑石礁石莼(*Ulva lactuca* L.)、褐藻门海带属海带(*Laminaria japonica*)、褐藻门裙带菜属裙带菜(*Undaria pinnatifida* Suringar)、红藻门紫菜属紫菜(*Porphyra*)。以蒸馏水反复冲洗海藻表面及基部的泥沙等杂物,沥干后以无水乙醇固封,并干燥、粉碎、过筛

后置于干燥器中备用。

2.2 海藻多糖含量及单糖组成研究

2.2.1 海藻多糖样品的制备及含量测定

取预处理过的海带 5 g,加蒸馏水 250 mL,水浴 70 °C 中超声 40 min,除去滤渣,取上清液 5 000 rpm 离心 10 min,上清液减压浓缩,加无水乙醇 4 °C 静置过夜;第二天离心,沉淀用无水乙醇和丙酮(各洗 3 次),干燥得海带粗多糖;粗多糖采用酶法结合 Sevag 法除蛋白^[11],多糖含量采用苯酚-硫酸法测定^[11]。

2.2.2 海藻多糖的单体组成分析

参照韩威、冯学珍等^[12,13]方法,略做修改。色谱柱为 Diamonsil C₁₈ 色谱柱(5 μm, 4.6 × 250 mm),流动相由 A、B 两种溶液体系组成:A 为乙酸铵缓冲溶液(0.05 mol/L, pH = 5.5),B 相为乙腈;梯度模式:时间梯度为 0 ~ 10 ~ 25 ~ 30 min,流动相组成中,溶液 B 随时间梯度占体积分数为 0% ~ 18% ~ 25% ~ 30%。柱温 30.0 °C,流速 1.0 mL/min;波长 250 nm,进样量 10 μL。单糖混合标准溶液与海藻多糖按冯学珍^[13]等的方法进行柱前衍生化后进行 HPLC 分析;其中,单糖混合标准溶液为甘露糖(mannose, Man)、L-鼠李糖(rhamnose, Rha)、D-葡萄糖(Glucose, Glc)、D-半乳糖(galactose, Gal)、D-木糖(xylopyranose, Xyl)、核糖(ribose, Rib)标准品,分别配成 0.05 mol/L,同等体积混合。

2.3 海藻多糖抗氧化活性的研究

2.3.1 对 DPPH 的清除作用

参照冯学珍等^[14]方法,略作修改。分别取 500 μL 不同质量浓度(0.3、0.5、1.0、3.0、5.0 mg/mL)的海藻多糖水溶液,加入 500 μL 浓度为 0.04 mg/mL 的 DPPH· 溶液,混匀后室温避光反应 30 min,在全波长扫描酶标仪 517 nm 处测定其吸光值(A)。对照组用 500 μL 无水乙醇溶液代替 DPPH 乙醇溶液,空白组用 500 μL 去离子水代替多糖溶液,不同浓度的维生素 C(Vc)替代多糖样品作为阳性对照。

$$\text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}}\right) \times 100\%$$

2.3.2 对 $\cdot\text{OH}$ 的清除作用

参照张婧涵等^[15]方法,稍做修改。取 1 mL 不同质量浓度的多糖溶液(0.3、0.5、1.0、3.0、5.0 mg/mL)于试管中,向各管中加入 300 μL 硫酸亚铁(FeSO_4)溶液(6 mmol/L)和 300 μL 水杨酸溶液(6 mmol/L),混匀后,加入 0.1% 的过氧化氢溶液 300 μL 启动反应,混匀,37 °C 水浴 30 min 后在全波长扫描酶标仪 510 nm 条件下测定吸光度值。以去离子

水代替多糖溶液做空白,不同浓度的 Vc 替代多糖样品作为阳性对照。

$$\text{清除率}(\%) = (A_{\text{空白}} - \frac{A_{\text{样品}}}{A_{\text{空白}}}) \times 100\%$$

2.3.3 对 O₂⁻ 的清除作用

参照陈玫等^[16]及韩少华等^[17]方法,稍做修改。向各管中加入 900 μL 的磷酸盐缓冲液(50 mmol/L, pH = 8.2),在 25 °C 下水浴 20 min,向各试管中加入 200 μL 不同质量浓度的多糖溶液(0.3、0.6、1.0、3.0、5.0 mg/mL),其中空白组以去离子水代替多糖溶液,然后加入 25 mmol/L 的邻苯三酚溶液 80 μL,混匀后于 25 °C 水浴中反应 5 min,加入 80 mmol/L HCL 200 μL 终止反应,并摇匀,反应 3 min,7 000 rpm 离心 3 min,在全波长扫描酶标仪 420 nm 处测定吸光度值。其中,以去离子水代替多糖溶液作为空白,以相应溶剂代替邻苯三酚作为对照,不同浓度的 Vc 替代多糖样品作为阳性对照。3 次重复取均值。

$$\text{清除率}(\%) = (1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{对照}}}{A_{\text{空白}}}) \times 100\%$$

2.4 数据分析

采用 Excel 2010、Origin 8.0、SPSS (SPSS 20.0 Windows, SPSS Inc, Chicago, USA)、Canoco 5.0 对数据进行统计分析与作图,根据统计结果计算海藻多

糖体外抗氧化活性的半数清除或抑制浓度(IC₅₀),并计算标准误差,结果以“平均值 ± 标准差($\bar{x} \pm SD$)”表示;分别对海藻多糖的单糖组成及体外抗氧化活性进行单因素方差分析(One-way ANOVA,置信水平 95%、99%),处理间的多重比较用 S-N-K 法;基于单糖组成进行主成分分析(Principal Component Analysis, PCA);以单糖组成及体外抗氧化活性为变量做 Pearson 相关性分析;以单糖组成作为自变量对体外抗氧化活性进行冗余分析(Redundancy analysis; RDA 分析),其通过蒙特卡罗检验(Monte Carlo Test)对其变量进行自动筛选,遴选显著影响因子。

3 结果与讨论

3.1 海藻多糖的含量

广西北部湾四种海藻样品中其多糖含量差异较大,其中,海带多糖的含量高达 50% 以上,显著高于石莼、裙带菜及紫菜的多糖含量;紫菜多糖的含量则低于 10%。多糖提取率(%)和含量(%)的计算式分别为:

$$\text{多糖提取率} = \frac{\text{提取多糖量}}{\text{海藻干重}} \times 100\%$$

$$\text{多糖含量} = \frac{\text{苯酚-硫酸法测定多糖量}}{\text{称取多糖量}} \times 100\%$$

表 1 多糖提取率及含量

Table 1 Extraction rate and content of polysaccharides

藻类 Algae	提取率 Extraction rate (%)	含量 Content (%)
石莼 <i>Ulva lactuca</i> L.	32.12 ± 0.85a	12.86 ± 0.13c
海带 <i>Laminaria japonica</i>	15.57 ± 0.36b	53.53 ± 1.20a
裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i> Suringar	16.72 ± 0.28b	37.21 ± 0.63b
紫菜 <i>Porphyra</i>	17.59 ± 0.41b	8.28 ± 0.09d

注:不同小写字母表示不同海藻多糖 IC₅₀ 间具有显著差异(P < 0.05),下同。

Note: Different lowercase letters indicated the significant difference among IC₅₀ of algae (P < 0.05), the same below.

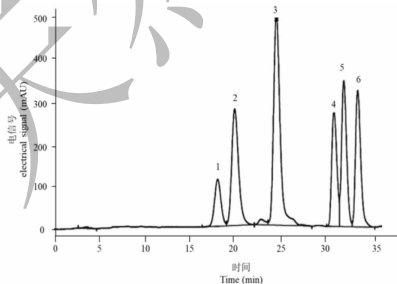


图 1 6 种单糖标准品混合物高效液相色谱图

Fig. 1 HPLC of six monosaccharide standard mixtures

注:1.甘露糖;2.核糖;3.鼠李糖;4.葡萄糖;5.半乳糖;

Note: 1. Mannose; 2. Ribose; 3. Rhamnose; 4. Glucose; 5. Galactose;

6. Xylopyranose

3.2 海藻多糖的单糖组成

3.2.1 标准单糖的 PMP 衍化分析

各单糖标准品的混合标样衍生化,并进行 HPLC 分析,结果见图 1。由图 1 可知各单糖标准品的 PMP 衍生物实现了良好的分离。

3.2.2 各种单糖标准品的线性关系

分别取各单糖的标准溶液 10、25、50、100、150 μL 稀释至 500 μL 进行 HPLC 分析。根据各单糖的质量浓度对应的峰面积进行线性回归分析,进而获得各单糖的回归方程。结果表明,6 种单糖标准品在相应浓度范围内线性关系均较好,结果如表 2。

表 2 6 种单糖的线性范围和回归方程

Table 2 Linear range and regression equations of six monosaccharides

单糖 Monosaccharides	回归方程 Regression equations	相关系数 Correlation coefficient
甘露糖 Mannose	$y = 6.39 \times 10^4 x + 186.41$	0.9994
葡萄糖 Glucose	$y = 1.29 \times 10^5 x + 370.18$	0.9956
核糖 Ribose	$y = 2.01 \times 10^5 x - 777.01$	0.9906
半乳糖 Galactose	$y = 1.72 \times 10^5 x - 812.49$	0.9952
鼠李糖 Rhamnose	$y = 3.44 \times 10^5 x - 2089.5$	0.9946
木糖 Xylopyranose	$y = 1.60 \times 10^5 x - 488.19$	0.9987

3.2.3 海藻多糖组分的水解产物 PMP 衍生物分析

同单糖标准品衍生物的色谱图(图 1)进行对照分析,可以确定石莼与紫菜多糖含有甘露糖(Man)、

鼠李糖(Rha)、葡萄糖(Glc)、半乳糖(Gal)、木糖(Xyl)、核糖(Rib)等6种单糖;海带多糖含有甘露糖(Man)、葡萄糖(Glc)、半乳糖(Gal)、木糖(Xyl)、核糖(Rib)等5种单糖;裙带菜多糖含有甘露糖(Man)、半乳糖(Gal)、木糖(Xyl)、核糖(Rib)等4种单糖。进一步对照各标准单糖的线性回归方程(表2)进行摩尔比的计算可知,石莼及紫菜主要由葡萄糖组成,海带主要由甘露糖组成,裙带菜则主要由半乳糖组成(表3)。

根据表2进而对海藻多糖的单糖组成进行主成分分析可知图2,单糖组成相同的石莼多糖与紫菜多糖在主成分空间分布虽相对比较接近,但由于摩尔比差异较大,因此仍能较好的分开;海带、裙带多糖的单糖组成与石莼与紫菜多糖显著不同,相距较远,在主成分空间分布较为分散。

表 3 海藻多糖单糖组成及摩尔比

Table 3 Composition and molar ratio of monosaccharide of algal polysaccharides

海藻多糖 Algal polysaccharide	单糖组成 Monosaccharide composition	摩尔比 Molar ratio
石莼 <i>Ulva lactuca</i> L.	Man-Rha-Glc-Gal-Xyl-Rib	0.08:0.08:1.00:0.97:0.04:0.68
海带 <i>Laminaria japonica</i>	Man-Glc-Gal-Xyl-Rib	1.80:1.00:0.05:0.14:0.21
裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i> Suringar	Man-Gal-Xyl-Rib	0.22:1.00:0.03:0.25
紫菜 <i>Porphyra</i>	Man-Rha-Glc-Gal-Xyl-Rib	0.09:0.20:1.00:0.02:0.04:0.01

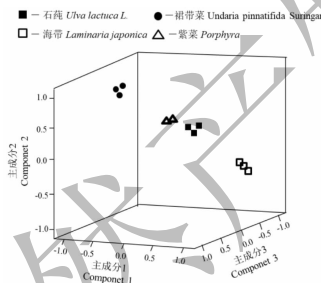


图 2 海藻多糖单糖组成的主成分投影

Fig. 2 Principal component projection of the algal polysaccharides

3.3 海藻多糖抗氧化活性的差异分析

3.3.1 对 DPPH 自由基的清除能力

广西北部湾四种海藻多糖(石莼、海带、裙带菜和紫菜)对 DPPH 的清除活性均随浓度增加而升高;IC₅₀值越小,其抗氧化活性的能力越好(下同)。其中裙带菜的清除活性表现良好,IC₅₀为 0.56 ± 0.02 mg/mL,抗氧化活性优于其他 4 种多糖(P < 0.05,表 4),质量浓度达到 5.0 mg/mL 时清除率达

到 86.9% (图 3)。其次为海带,IC₅₀为 1.22 ± 0.02 mg/mL,当质量浓度为 5.0 mg/mL 时,其清除率可达到 86.2% 左右,与有裙带菜持平的趋势。再次为紫菜,IC₅₀为 2.39 ± 0.06 mg/mL,抗氧化活性显著高于石莼 4.72 ± 0.09 mg/mL(P < 0.05)。

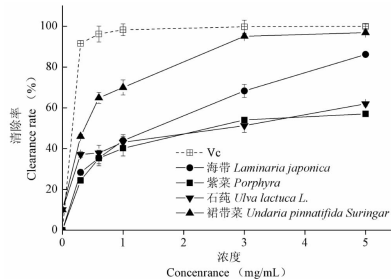


图 3 不同海藻多糖对 DPPH 的清除能力

Fig. 3 Scavenging capacity of different algal polysaccharides on DPPH

3.3.2 对羟基自由基的清除能力

四种海藻多糖清除 ·OH 的活性与多糖浓度存在不同程度的依赖关系,但紫菜较为异常,其在质量

浓度低于 1.0 mg/mL 时,清除率随浓度增加而快速升高,达到峰值 35% 左右,此后浓度继续升高,清除·OH 的活性不再升高,基本维持在 20% 左右,这说明紫菜对·OH 的清除能力有限(图 4)。石莼、海带和裙带菜对·OH 的清除能力显著优于紫菜多糖,IC₅₀ 分别为 1.36 ± 0.11、1.23 ± 0.1、1.28 ± 0.07 mg/mL(表 4),当石莼、海带和裙带菜多糖浓度为 5.0 mg/mL 时,清除率接近 100%,与维生素 C 的清除率基本持平。

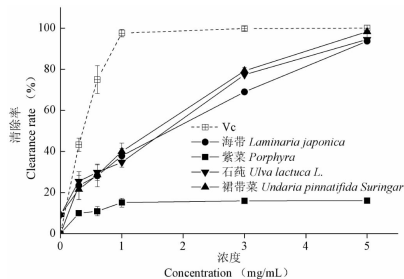


图 4 不同海藻多糖对羟基自由基的清除能力

Fig. 4 Scavenging capacity of different algal polysaccharides on hydroxyl radical

3.3.3 对超氧阴离子的清除能力

四种海藻多糖对超氧自由基清除活性均随多糖浓度的增加而有不同程度的升高(图 5),石莼多糖的半抑制浓度(IC₅₀)为 1.61 ± 0.17 mg/mL(表 4),抗氧化活性显著高于其他三种海藻($P < 0.05$)。当质量浓度达到 5.0 mg/mL 时,裙带菜对超氧阴离子的清除率与石莼基本持平,为 65% 左右;当质量浓度超过 3.0 mg/mL 时,紫菜对超氧阴离子的清除率渐渐高于海带;且都明显低于维生素 C(图 5)。

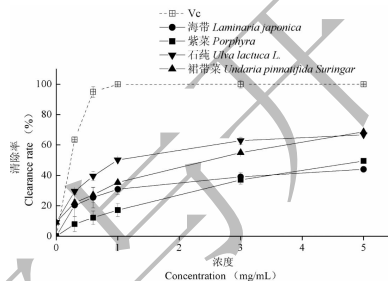


图 5 不同海藻多糖对超氧阴离子的清除能力

Fig. 5 Scavenging capacity of different algal polysaccharides on superoxide anion

表 4 不同海藻多糖对自由基清除的半抑制浓度(IC₅₀)

Table 4 IC₅₀ for free radical-scavenging capacity

海藻多糖 Algal polysaccharide	DPPH	IC ₅₀ (mg/mL)	
		羟自由基 Hydroxyl radical	超氧阴离子 Superoxide anion
石莼 <i>Ulva lactuca</i> L.	4.72 ± 0.09e	1.36 ± 0.11b	1.61 ± 0.17b
海带 <i>Laminaria japonica</i>	1.22 ± 0.02c	1.23 ± 0.15b	6.32 ± 0.11e
裙带菜 <i>Undaria pinnatifida</i> Suringar	0.56 ± 0.02b	1.28 ± 0.07b	2.73 ± 0.06c
紫菜 <i>Porphyra</i>	2.39 ± 0.06d	26.59 ± 0.98c	5.36 ± 0.18d
维生素 C Vitamin c	0.07 ± 0.00a	0.35 ± 0.00a	0.24 ± 0.00a

3.4 海藻多糖的单糖组成对抗氧化活性的影响

3.4.1 相关性分析

Pearson 相关性分析结果表明(表 5),褐藻多糖清除 DPPH 的半抑制浓度与单糖组成中鼠李糖(Rha)、半乳糖(Gal)呈显著负相关关系,与葡萄糖(Glc)、木糖(Xyl)呈显著正相关关系($P < 0.01$);清除超氧阴离子的半抑制浓度与甘露糖(Man)呈显著负相关关系($P < 0.01$);清除羟自由基的半抑制浓度仅与核糖(Rib)呈显著正相关关系($P < 0.01$)。

结合海藻多糖的单糖组成及体外抗氧化活性分析可知,即便是单糖组成类似,但摩尔比差异较大,也会导致体外抗氧化活性的显著差异。如石莼与紫

菜的单糖组成类似,但由于其中半乳糖(Gal)、核糖(Rib)的摩尔比差异较大,导致石莼清除 DPPH 自由基的能力显著低于紫菜,石莼清除羟自由基的能力显著高于紫菜。倪力军等对黄芪、麻黄、甘草等 8 种中药材多糖的初步研究中发现,Xyl 与 Glc 可能有助于提高多糖的抗氧化活性^[10],与本研究结果相同。

3.4.2 冗余分析

RDA 分析结果表明(图 6),广西北部湾四种藻类多糖能较好的分开;蒙特卡罗指数表明,对抗氧化活性影响较为显著的因子为葡萄糖(Glc)、核糖(Rib)、木糖(Xyl)($P < 0.01$)。冗余分析进一步说

表5 海藻多糖抗氧化活性与单糖组成的相关系数 ($n = 12$)Table 5 Correlation analysis between antioxidant activity and monosaccharide composition of algae polysaccharide ($n = 12$)

	1/IC ₅₀			单糖组成 Monosaccharide composition					
	DPPH	O ₂ ^{·-}	·OH [·]	Man	Rib	Rha	Glc	Gal	Xyl
DPPH	1	-0.193	0.399	0.002	-0.546	-0.817 **	0.928 **	-0.904 **	0.779 **
O ₂ ^{·-}		1	0.379	-0.775 **	-0.484	0.543	0.485	0.172	0.302
·OH [·]			1	-0.062	0.895 **	-0.445	-0.336	0.358	0.221
Man				1	0.227	0.563	0.357	0.418	-0.187
Rib					1	-0.400	-0.379	0.616 *	0.001
Rha						1	0.959 **	-0.511	0.479
Glc							1	-0.694 *	0.701 *
Gal								1	-0.772 **
Xyl									1

注: ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; 下同。

Note: ** $P < 0.01$; * $P < 0.05$; the same below.

明了,海藻多糖的体外抗氧化活性与单糖组成密切相关。但,多糖体外抗氧化活性并非由单一因素决定,可能是多种因素共同作用的结果^[18]。本研究中,单糖组成对抗氧化活性的第1轴的解釋率为64.7%,第2轴的解釋率为28.1%,第一轴与第二轴的总解釋率为92.8%;说明影响体外的抗氧化活性的因子,除单糖组成外,可能还有其他因素,如:分子量及其分子结构等^[8]。

的因子为葡萄糖(Glc)、核糖(Rib)、木糖(Xyl);但影响体外的抗氧化活性的因子,除单糖组成外,可能还有其他因素有待进一步的研究。

参考文献

- Bao Y, Zhao MM, Shi J, et al. Effect of ultrasonic treatment on the recovery and DPPH radical scavenging activity of polysaccharides from longan fruit pericarp [J]. Food Chem, 2008, 106: 685-690.
- Liu QY, Meng QY, Liu ZH. Progress in the study on anti-tumor effect of seaweed polysaccharides [J]. Chin J Mar Drug (中国海洋药物), 2003, 4: 45-48.
- Usov A, Smirnova GP, Klochkova NG. Algae polysaccharides 55 polysaccharide composition of some brown Kamchatka algae [J]. Bioorganicheskaja Khimiia, 2001, 27: 444.
- Li HM, Du Y, Min CJ, et al. Antioxidant and antimicrobial properties of polysaccharide from houttuynia cordata leaf [J]. Nat Prod Res Dev (天然产物研究与开发), 2017, 29: 1745-1751.
- Zhao H, Xiao Z, Chen ZH, et al. Research progress on the hypolipidemic effect of marine bioactive substances [J]. Farm Products Processing (农产品加工), 2017, 1: 92-96.
- Liu N, Sun Y, Zeng S, et al. Research progress on bioactive substances and its biological activity of algae [J]. Food Safe Qual Detec Technol (食品安全质量检测学报), 2015, 6: 2875-2879.
- Jiang HY, Wu SC, Cen YZ. Nutrient component analysis of six kinds of economic algae in Zhanjiang sea area [J]. Guangzhou Chem Ind (广州化工), 2011, 7: 105-108.

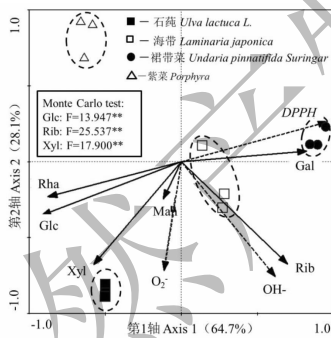


图6 海藻多糖抗氧化活性与单糖组成的冗余分析图

Fig. 6 RDA ordination diagram of antioxidant activity and monosaccharide composition

4 结论

广西北部湾四种海藻多糖的含量及单糖组成含量具有较大差异,且其清除 DPPH、超氧离子及羟自由基的活性强度不同;单糖组成类似的多糖样品,由于各单体间的摩尔比差异较大,其体外抗氧化活性也存在显著差异;海藻多糖的体外抗氧化活性与单糖组成密切相关,其中,对抗氧化活性影响较为显著