

红毛菜与坛紫菜光合作用和品质的比较分析

林密^{1,2,3}, 许凯^{1,2,3}, 徐燕^{1,2,3}, 纪德华^{1,2,3}, 王文磊^{1,2,3},
陈昌生^{1,2,3}, 谢潮添^{1,2,3*}

(1.集美大学水产学院, 福建 厦门 361021; 2.福建省水产生物育种与健康养殖工程研究中心, 福建 厦门 361021;
3.农业部东海海水健康与养殖重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要:为研究两种经济红藻红毛菜(*Bangia fuscopurpurea*)和坛紫菜(*Pyropia haitanensis*)的光合作用和品质差异,选取一株野生型红毛菜CY和一株野生型坛紫菜NSD35作为实验材料,分别测定二者在相同培养条件下的关键光合参数和营养成分指标。结果显示:红毛菜的最大电子传递速率、净光合速率、藻红蛋白含量分别比坛紫菜高29.6%、96.8%、60.5%;必需矿质元素钾、钙、镁、铁、锌的含量分别比坛紫菜高59.5%、39.5%、34.1%、86.2%、68.4%;红毛菜的必需氨基酸和风味氨基酸含量都高于坛紫菜。此外,二者的呼吸速率、最大光量子产率、叶绿素a、总糖、总蛋白和碘含量没有显著差异。研究结果表明,与坛紫菜NSD35相比,红毛菜CY的光合速率更快,矿质元素积累能力更强,必需氨基酸和风味氨基酸含量更高。研究结果有助于了解红毛菜和坛紫菜的光合作用和品质特点,为开发红毛菜种质资源提供数据参考。

关键词:海洋生物学;红毛菜;坛紫菜;光合作用;营养成分;品质

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20230327002

中图分类号:P735

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2024)02-0276-08

红毛菜(*Bangia fuscopurpurea*)主要分布在北太平洋西部、北大西洋的温带和亚热带地区,在我国东海和南海沿岸也广为分布,其芳香独特,质甜味鲜,营养丰富,深受人民的喜爱,具有很高的食用和药用价值^[1],是市场上畅销的高档佳品,干品售价高达800元/kg以上^[2]。但由于受全球气候变化、敌害生物的侵蚀和人为滥采的影响,红毛菜自然资源日趋枯竭^[3]。坛紫菜(*Pyropia haitanensis*,也称*Neoporphyra haitanensis*)是我国两个主要紫菜栽培种之一,年产量占紫菜总产量的75%以上。紫菜与红毛菜同属于红毛菜科,这两个物种都分布在潮间带的岩礁上,相互竞争生长基质,紫菜栽培筏架上常常可以发现红毛菜^[4]。两者都属于光自养生物,能在无机环境中生长繁殖,通过吸收光能并以海水中的无机碳为碳源制造有机物。因此,红毛菜和坛紫菜的品质、产量和经济价值与其光合作用过程密切相关。

已经有大量研究分析了条斑紫菜(*Porphyra*

yezoensis)和坛紫菜的光合作用及应答环境变化的特点^[5-8]。叶绿素和藻胆蛋白等色素直接参与紫菜等红藻的光合作用^[9]。红毛菜、紫菜等红藻包含3种类型的藻胆蛋白:藻红蛋白(Phycocerythrin, PE)、藻蓝蛋白(Phycocyanin, PC)和别藻蓝蛋白(Allophycocyanin, APC)^[9-11]。色素(特别是藻红蛋白)含量对紫菜商品烤色影响较大^[4]。近期研究表明,藻胆蛋白和叶绿素a的比值决定了坛紫菜藻体颜色^[12]。虽然红毛菜和紫菜具有相似的分布特点,但红毛菜光合作用相关的研究较少,二者在光合作用上的差异也缺乏定量分析。

蛋白质是氨基酸的聚合物,在人类机体中发挥营养供给作用,人体每日需要消耗的蛋白质含量占日常所需总能量的20%以上^[13]。红藻是人类食谱中常见的海藻,其蛋白质和氨基酸的含量根据物种、环境条件、成熟度以及检测方法的差异占干物质的5%~47%不等^[14]。宣仕芬等研究表明,头水坛紫菜

收稿日期:2023-04-14

资助项目:福建省自然科学基金(2022J01801);农业部岗位科学家(GARS-50);国家自然科学基金(U21A20265)

作者简介:林密(1996—),男,硕士研究生;E-mail: 798364601@qq.com

* 通讯作者:谢潮添(1977—),男,教授;E-mail: ctxie@jmu.edu.cn

蛋白质含量达 39% 以上,氨基酸种类丰富,其中影响紫菜口感的天冬氨酸和谷氨酸含量占比较高^[15]。但却很少见到有关红毛菜蛋白质和氨基酸组成的相关报道。

矿物质元素在生命活动中执行许多必要功能,如构建组织、运输细胞,以及参与各种催化金属酶辅助因子的代谢过程^[16]。人体超过 95% 的矿物质元素摄入来自食物^[17],大型海藻富含人体必需的钾、钙、镁、铁、锌和碘等矿物质元素^[18]。因此,大型海藻在矿物质元素方面具有较高营养价值,但坛紫菜和红毛菜两种食用红藻在这些矿物质元素上的差异仍然有待进行定量分析。

综上所述,为了进一步开发红毛菜种质资源以及促进相关产业的发展,本研究对比分析了野生红毛菜和坛紫菜的光合作用特性以及品质相关指标的差异。

1 材料与与方法

1.1 实验材料

红毛菜野生叶状体(原叶体)品系 CY 采自福建赤屿岛,坛紫菜野生叶状体品系 NSD35 采自福建牛山岛。酶解两种藻的叶状体得到单细胞,最终获得纯化的自由丝状体并保存在种质资源库。实验前促熟丝状体,收集成熟丝状体放散的壳孢子,培养获得叶状体。培养条件为:光照强度 40 ~ 60 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,温度 $(21.0 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,光照周期 12 L:12 D,每隔 1 d 更换 50% 新鲜 PES(provasolis enrichment solution) 培养液。红毛菜与坛紫菜采用相同的环境条件培养 15 d,红毛菜野生型 CY 培养至 5 ~ 8 cm,坛紫菜 NSD35 培养至 24 ~ 27 cm。选取健康藻体用于实验。

1.2 叶绿素荧光参数

使用 Diving-PAM(Walz 公司,德国)测定经暗适应 15 min 后的新鲜藻体的最大光量子产率。藻体经暗适应 15 min 后,在 8 个光梯度下测定相对电子传输速率,用 GraphPad Prism 8.0.1 拟合曲线,拟合公式参照 Eilers 等的方法^[19]:

$$Y = x / (ax^2 + bx + c) \quad (1)$$

式(1)中:Y 表示相对电子传输速率($rETR$),x 代表光强 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$],参数 a、b、c 的拟合值用于计算最大 $rETR$ 、光饱和和光强和光响应曲线的初始斜率。

1.3 净光合速率和呼吸速率

净光合速率、呼吸速率采用黑白瓶法测定。将藻体称量鲜重后立即加入溶氧瓶中,瓶中充满消毒过的新鲜 PES 培养基。白瓶放置在与藻体培养相

同实验条件下,黑瓶用铝箔纸完全包裹后避光放置在相同环境条件下,不加入藻体的为空白瓶。培养时间为 4 h。使用自动电位滴定仪(G20, METTLER TOLEDO 公司,瑞士)测定溶解氧。净光合速率和呼吸速率单位为 $\text{mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$,表示每 g 新鲜藻体 1 h 内释放的 O_2 量(mg)。

1.4 叶绿素 a 和藻胆蛋白含量的测定

称取鲜重约 0.01 g 的藻体组织 8 份,其中 4 份在 105°C 下烘干,称量干重后计算含水率;另外 4 份于 90% 丙酮中充分研磨匀浆。用铝箔纸包裹后,室温下避光提取 24 h,使叶绿素充分融于丙酮。用 300 目筛绢网过滤研磨液, 4°C 下离心 (10 000 r/min) 20 min 后取上清液定容,用分光光度计测定上清液在 666、730 nm 波长处的吸光度(OD)值。叶绿素 a 含量的计算参照 Lichtenthaler 等^[20]的方法:

$$C_{\text{chl}a} = (A_{666} - A_{730}) \times 10V / [890(FW(1 - WC))] \quad (2)$$

式(2)中: $C_{\text{chl}a}$ 表示叶绿素 a 的含量 (mg/g), A_{666} 、 A_{730} 分别表示在 666、730 nm 波长的吸光度, V 代表研磨液体积 (mL), FW 代表称取的藻体鲜重 (g), WC 代表藻体的含水率 (%)。

藻胆蛋白的测定参考高洪峰^[21]的方法。先测定藻体含水率,再称取鲜重约 0.01 g 的藻体在磷酸盐缓冲液(0.05 mol/L , $\text{pH} = 6.8$) 中匀浆。将研磨液在避光和 -20°C 低温条件下冷冻,待完全冷冻后放置在避光的室温条件下解冻,反复冻融 6 次后在 4°C 下离心 (10 000 r/min) 20 min。轻取上清液,在 565、615、650、730 nm 波长下测定吸光度。利用以下公式计算藻胆蛋白含量:

$$C_{\text{PE}} = 0.123(A_{565} - A_{730}) - 0.068(A_{615} - A_{730}) + 0.015(A_{650} - A_{730})V / [FW(1 - WC)] \quad (3)$$

$$C_{\text{PC}} = 0.162(A_{565} - A_{730}) - 0.001(A_{615} - A_{730}) + 0.098(A_{650} - A_{730})V / [FW(1 - WC)] \quad (4)$$

$$C_{\text{APC}} = 0.123(A_{565} - A_{730}) - 0.006(A_{615} - A_{730}) + 0.004(A_{650} - A_{730})V / [FW(1 - WC)] \quad (5)$$

式(3)至(5)中: C_{PE} 表示藻红蛋白的含量 (mg/g), C_{PC} 表示藻蓝蛋白的含量 (mg/g), C_{APC} 表示别藻蓝蛋白的含量 (mg/g), A_{565} 、 A_{615} 、 A_{650} 、 A_{730} 分别表示在 565、615、650、730 nm 波长的吸光度, V 代表研磨液体积 (mL), FW 代表称取的藻体鲜重 (g), WC 代表藻体的含水率 (%)。

1.5 总蛋白、总糖含量的测定

总蛋白含量使用索莱宝公司(中国)BCA 蛋白测定试剂盒测定,方法参照试剂盒说明书。总蛋白测定原理是:在碱性条件下,蛋白质将 Cu^{2+} 还原为

Cu⁺, Cu²⁺ 与 BCA 试剂形成紫蓝色的络合物, 在 562 nm 处有最大吸收峰^[22]。总糖含量使用苏州科铭公司试剂盒测定, 测定原理是: 将总糖酸水解为还原糖, 在 NaOH 和 C₃H₈O₃ 存在下, DNS 试剂与还原糖共热后被还原成氨基化合物, 在过量 NaOH 碱性溶液中呈桔红色, 在 540 nm 处有最大吸收峰^[23]。

1.6 矿质元素的测定

矿质元素钾、钙、镁、铁、锌和碘的测定方法参照食品安全国家标准《食品中多元素的测定》^[24] 和食品安全国家标准《食品中碘的测定》^[25]。

1.7 总氨基酸含量的测定

氨基酸的测定方法参照食品安全国家标准《食品中氨基酸的测定》^[26]。称取 4 份 50~55 mg 干燥后的藻体组织研磨成粉末后转移至水解管中, 加入 20 mL 浓度为 6 mol/L 的 HCl, 在 110 °C 的烘箱中消解 24 h; 取出冷却至室温后用去离子水定容至 50 mL, 吸取 1 mL 至离心管中氮气吹干后加入 1 mL 超纯水溶解; 60 °C 干燥后加入 2 mL 浓度为 0.2 mol/L 的柠檬酸钠溶液溶解残留物, 0.22 μm 滤膜过滤后使用 LA8080 氨基酸自动分析仪(日立 LA8080, 日本)上机测定。

1.8 数据分析

以上实验均进行 4 次生物学重复。用统计分析软件 IBM SPSS Statistics 23.0 和 Excel 对实验数据进行统计分析, 并用 t 检验比较不同物种间的数据差异。P<0.05 表示差异显著, P<0.01 表示极显著差异, 用 GraphPad Prism 8.0.1 作图呈现数据分析结果。

2 结果与分析

2.1 光合作用和呼吸作用

由光响应曲线(图 1)计算拟合参数(表 1)。如表 1 所示, 红毛菜的最大电子传递速率为(26.3±2.3)** , 极显著高于坛紫菜(20.3±1.4, P<0.01); 二者

的光饱和和光强没有显著差异(P>0.05); 红毛菜的初始斜率显著高于坛紫菜(P<0.05)。

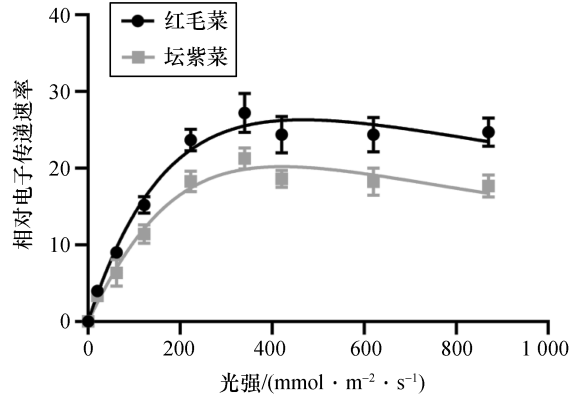


图 1 红毛菜和坛紫菜在 9 种光强下的光响应曲线
Fig. 1 Light response curves of *B. fuscopurpurea* and *P. haitanensis* under nine light intensities

表 1 红毛菜和坛紫菜光响应曲线的拟合参数

Tab. 1 Light response curve-fitted parameters derived from Fig. 1 for *B. fuscopurpurea* and *P. haitanensis*

| 物种 | 最大电子传递速率 | 光饱和和光强 /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹) | 初始斜率 |
|-----|------------|---|----------|
| 红毛菜 | 26.3±2.3** | 147.4±29.5 | 0.2±0.0* |
| 坛紫菜 | 20.3±1.4** | 165.2±44.9 | 0.1±0.0* |

注: “*”表示红毛菜和坛紫菜差异显著, P<0.05; “**”表示差异极显著, P<0.01, 下同。

红毛菜的净光合速率为(6.1±1.2)mg/(g·h), 极显著高于坛紫菜(3.1±0.5)mg/(g·h) (P<0.01)。红毛菜和坛紫菜的呼吸速率分别为(-0.6±0.1)、(-0.4±0.2)mg/(g·h), 最大光量子产率分别为(0.6±0.0)和(0.6±0.0), 二者的呼吸速率和最大光量子产率均没有显著差异(P>0.05, 图 2)。

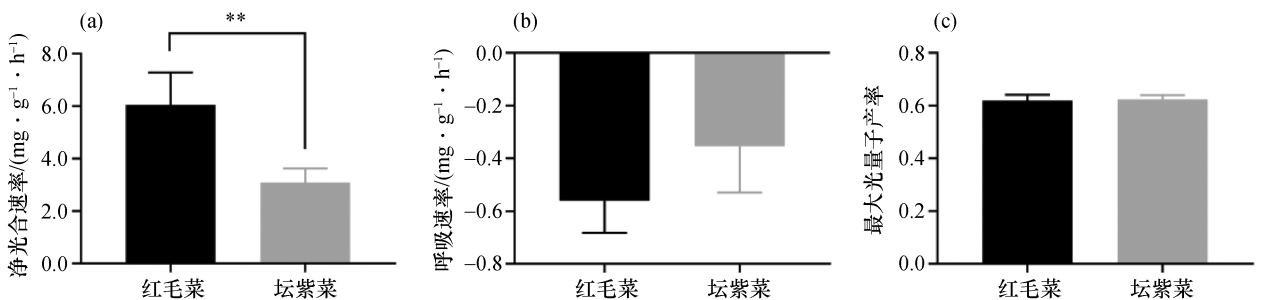


图 2 红毛菜和坛紫菜的净光合速率、呼吸速率和最大光量子产率

Fig. 2 Net photosynthetic rate, respiration rate and maximum light quantum yield of *B. fuscopurpurea* and *P. haitanensis*

“**”表示红毛菜和坛紫菜差异极显著, P<0.01。

2.2 叶绿素 a、藻胆蛋白、总蛋白和总糖含量

红毛菜的藻红蛋白含量为(81.7±11.5) mg/g,显著高于坛紫菜(50.9±13.1) mg/g($P<0.05$),叶绿素 a 和其他藻胆蛋白含量没有显著差异。红毛菜的藻红蛋白/叶绿素 a 比率为 11.9±1.7,极显著高于坛紫菜(6.7±1.7, $P<0.01$),别藻蓝蛋白/叶绿素 a 比率

为 2.2±0.5,显著高于坛紫菜(1.5±0.3, $P<0.05$,图 3)。红毛菜和坛紫菜的总糖含量分别为(374.5±57.3)、(455.9±72.8) mg/g,总蛋白含量分别为(454.9±33.2)、(435.2±90.8) mg/g,二者均没有显著差异($P>0.05$,图 4)。

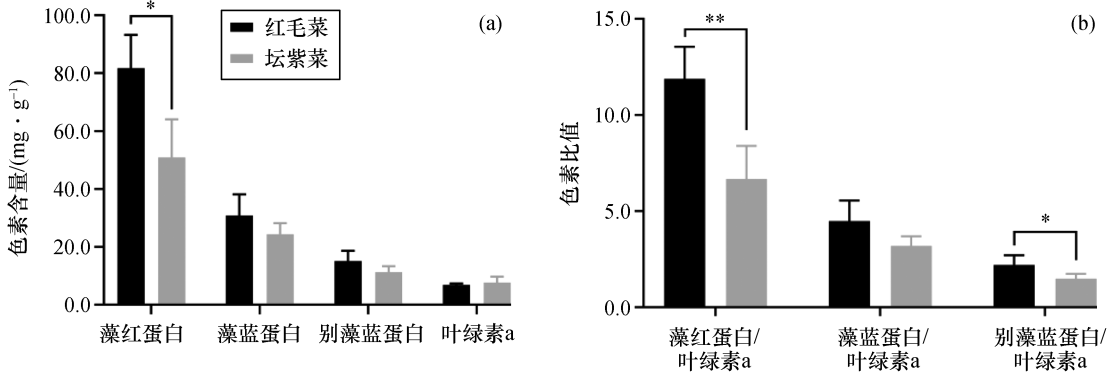


图 3 红毛菜和坛紫菜的色素含量和比值

Fig. 3 Pigment contents and ratios of *B. fuscopurpurea* and *P. haitanensis*

“*”表示红毛菜和坛紫菜差异显著, $P<0.05$;“**”表示差异极显著, $P<0.01$ 。

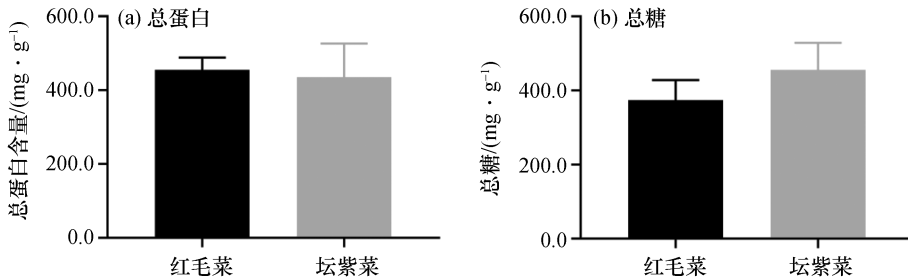


图 4 红毛菜和坛紫菜的总蛋白和总糖含量

Fig. 4 Total protein and total sugar content of *B. fuscopurpurea* and *P. haitanensis*

2.3 矿质元素含量

如表 2 所示,两种藻的 6 种矿质元素含量从高到低排列顺序相同,均为钾元素含量最高,镁元素含量其次。红毛菜的钾、镁、钙、铁和锌含量均显著高于坛紫菜,分别比坛紫菜高 59.5% ($P<0.01$)、34.1% ($P<0.05$)、39.5% ($P<0.05$)、86.2% ($P<0.01$) 和 68.4% ($P<0.01$)。红毛菜和坛紫菜的碘含量没有显著差异($P>0.05$)。

续表

表 2 红毛菜和坛紫菜的矿质元素含量

Tab. 2 Mineral element contents of *B. fuscopurpurea* and *P. haitanensis*

| 矿质元素 | 含量/(mg·kg ⁻¹) | |
|------|---------------------------|-----------------|
| | 红毛菜 | 坛紫菜 |
| 镁 | 6 397.5±1 196.5 * | 4 772.5±137.9 * |
| 钙 | 1 607.5±368.9 * | 1 152.5±51.2 * |
| 铁 | 192.7±33.5 ** | 103.5±9.7 ** |
| 碘 | 110.3±25.4 | 127.0±30.0 |
| 锌 | 29.3±4.0 ** | 17.4±1.1 ** |

| 矿质元素 | 含量/(mg·kg ⁻¹) | |
|------|---------------------------|---------------------|
| | 红毛菜 | 坛紫菜 |
| 钾 | 42 975.0±2 656.3 ** | 26 950.0±1 791.6 ** |

2.4 氨基酸含量

如表 3 所示,红毛菜的总氨基酸(TAA)含量为(366.9±10.7) mg/g,显著高于坛紫菜(303.3±16.7) mg/g,而红毛菜和坛紫菜的必需氨基酸(EAA)含量分别为(159.1±2.8)、(138.3±7.3) mg/g,占总氨基

酸的 43.4% 和 45.6%。其中,除丝氨酸和亮氨酸二者无显著差异外($P>0.05$),红毛菜的其他氨基酸含量均显著高于坛紫菜。红毛菜的天冬氨酸、苏氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、胱氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、酪氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸、精氨酸和脯氨酸含量分别比坛紫菜高 13.2% ($P<0.01$)、21.0% ($P<0.01$)、30.4% ($P<0.01$)、18.9% ($P<0.01$)、18.3% ($P<0.01$)、37.3% ($P<0.01$)、13.5% ($P<0.01$)、24.6% ($P<0.01$)、10.2% ($P<0.01$)、97.6% ($P<0.01$)、35.2% ($P<0.05$)、12.6% ($P<0.01$)、5.8% ($P<0.05$)、15.1% ($P<0.01$)、20.5% ($P<0.01$)。如表 4 所示,除亮氨酸外,红毛菜必需氨基酸评分均极显著高于坛紫菜($P<0.01$)。两种红藻均未检出色氨酸(Try)。红毛菜总必需氨基酸评分略优于 FAO/WHO 模式,极显著高于坛紫菜($P<0.01$)。这些结果说明红毛菜和坛紫菜氨基酸含量和组成差异较大。

表 3 红毛菜和坛紫菜的氨基酸含量

Tab. 3 Amino acid contents of *B. fuscopurpurea* and *P. haitanensis*

| 氨基酸 | 含量/(mg · g ⁻¹) | |
|------------|----------------------------|--------------|
| | 红毛菜 | 坛紫菜▷ |
| 天冬氨酸(Asp) | 37.5±0.8** | 33.2±1.9** |
| 苏氨酸(Thr)# | 19.8±0.4** | 16.4±0.7** |
| 丝氨酸(Ser) | 19.7±0.5 | 17.9±1.0 |
| 谷氨酸(Glu) | 42.8±2.0** | 32.8±1.9** |
| 甘氨酸(Gly) | 22.1±0.5** | 18.6±0.8** |
| 丙氨酸(Ala) | 40.9±0.9** | 34.6±2.1** |
| 胱氨酸(Cys) | 3.2±0.2** | 2.4±0.0** |
| 缬氨酸(Val)# | 23.1±0.2** | 20.4±0.9** |
| 蛋氨酸(Met)# | 8.4±0.1** | 6.8±0.8** |
| 异亮氨酸(Ile)# | 13.9±0.2** | 12.6±0.6** |
| 亮氨酸(Leu)# | 29.3±0.6 | 27.6±1.3 |
| 酪氨酸(Tyr) | 27.6±0.6** | 14.0±1.5** |
| 苯丙氨酸(Phe)# | 16.9±2.2* | 12.5±1.7* |
| 赖氨酸(Lys)# | 19.1±0.4** | 17.0±0.5** |
| 组氨酸(His)## | 5.4±0.1** | 5.1±0.2** |
| 精氨酸(Arg)## | 23.0±0.4** | 20.0±1.0** |
| 脯氨酸(Pro) | 14.0±0.4** | 11.7±0.6** |
| 必需氨基酸(EAA) | 159.1±2.8** | 138.3±7.3** |
| 总氨基酸(TAA) | 366.9±5.9** | 303.3±16.8** |

注:“#”为必需氨基酸,“##”为半必需氨基酸;“▷”表示坛紫菜 NSD35 氨基酸含量引自赵蕊^[27]。

表 4 红毛菜和坛紫菜必需氨基酸的 FAO/WHO 模式评分^[28]

Tab. 4 Comparison of FAO/WHO model scores of *B. fuscopurpurea* and *P. haitanensis*

| 必需氨基酸组成 | FAO/WHO 模式 | 红毛菜氨基酸评分 | 坛紫菜氨基酸评分 |
|---------|------------|-------------|------------|
| Ile | 40 | 34.8±0.6** | 31.5±1.5** |
| Leu | 70 | 41.9±0.8 | 39.4±1.8 |
| Lys | 55 | 34.7±0.7** | 30.9±0.9** |
| Met+Cys | 35 | 33.1±0.7** | 26.3±2.1** |
| Phe+Tyr | 60 | 74.1±4.5** | 44.2±2.1** |
| Thr | 40 | 49.5±1.5** | 41.0±1.6** |
| Val | 50 | 46.2±0.4** | 40.8±1.7** |
| Try | 10 | — | — |
| TAA | 360 | 101.9±1.6** | 84.3±4.7** |

注:“—”表示未检出。

3 讨论

虽然红毛菜和坛紫菜具有相似的生态位,但本研究发现二者的光合作用具有显著差异。红毛菜和坛紫菜的光饱和光强和最大光量子产率没有显著差异,但前者的最大电子传递速率比坛紫菜高 29.6%。红毛菜的净光合速率约为坛紫菜的 2 倍,而呼吸速率没有显著差异,说明红毛菜的有机物积累速率高于坛紫菜。这些结果表明红毛菜相较于坛紫菜能够更有效地利用光能。藻胆体吸收的光能首先通过藻红蛋白转移到藻蓝蛋白,然后转移到别藻蓝蛋白,最后转移到反应中心叶绿素 a^[9,29]。本研究发现红毛菜的藻红蛋白含量和藻红蛋白/叶绿素 a 比率显著高于坛紫菜,这有助于红毛菜更好地吸收光能并往下传递。虽然与坛紫菜相比,红毛菜具有更高的净光合速率和最大电子传递速率,但是二者的总糖和总蛋白含量没有显著差异。总糖和总蛋白含量合计占两种红藻干物质 82.9% 以上。这种差异的原因之一是大型海藻的光合固碳与有机物积累并不完全对应^[30]。比如,在生长过程中,大型海藻将约 20% 的有机碳释放到环境中^[31]。

据报道,紫菜的必需氨基酸谱与豆科植物比较接近^[32]。Cerná^[33]发现红藻的必需氨基酸含量接近总氨基酸的一半,即 EAA/TAA 约为 40%~50%,这与本研究结果一致。本研究发现,红毛菜和坛紫菜的 EAA/TAA 比值分别为 43.4% 和 45.6%。以

FAO/WHO 模式为参照^[28]分析红毛菜和坛紫菜的必需氨基酸评分,发现红毛菜的氨基酸评分更高,表明红毛菜在必需氨基酸方面具有更高的营养价值。非必需氨基酸(NEAA)谷氨酸和天冬氨酸对于人体代谢循环发挥着重要作用^[34],二者是海藻鲜味的主要来源^[35-37]。在本研究中,红毛菜的天冬氨酸和谷氨酸分别比坛紫菜高 13.2%和 30.4%,表明红毛菜比坛紫菜的口感更好。此外,本研究发现,在相同培养条件下,红毛菜的必需矿质元素钾、钙、镁、铁和锌显著高于坛紫菜,但二者的碘含量没有显著差异。表明红毛菜在矿质元素含量上比坛紫菜更具有优势。

4 结论

本研究以具有相似生态位的坛紫菜为参照,比

较分析了红毛菜的光合作用和品质特点。结果表明,与坛紫菜相比,红毛菜的光合速率、藻红蛋白、5种矿质元素含量(钾、钙、镁、铁和锌)、风味氨基酸和必需氨基酸含量、以及氨基酸评分更高。此外,二者的呼吸速率、最大光量子产率、叶绿素 a、总糖、总蛋白和碘含量没有显著差异。综上,在相同培养条件下,红毛菜的光合作用效率高于坛紫菜,且营养成分更有优势。本研究结果有助于了解红毛菜和坛紫菜的光合作用和品质特点,为开发红毛菜种质资源提供数据参考。

参考文献:

- [1] 曾旻. 红毛菜工厂化养殖技术[J]. 水产养殖, 2022, 43(4): 67-69.
ZENG M. Industrial culture technology of *Bangia fuscopurpurea*[J]. Journal of Aquaculture, 2022, 43(4): 67-69.
- [2] 贾旭利, 刘彬, 陈德富, 等. 红毛菜陆基悬浮培养养殖的初步试验[J]. 渔业研究, 2022, 44(4): 356-364.
JIA X L, LIU B, CHEN D F, et al. Preliminary experiment on land-based suspension propagation aquaculture of *Bangia fuscopurpurea*[J]. Journal of Fisheries Research, 2022, 44(4): 356-364.
- [3] 黄春恺. 红毛菜的生物学特性[J]. 海洋渔业, 2002(4): 183-184.
HUANG C K. Biological characteristics of *Bangia fuscopurpurea*[J]. Marine Fisheries, 2002(4): 183-184.
- [4] 何培民, 张泽宇, 张学成, 等. 海藻栽培学[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
HE P M, ZHANG Z Y, ZHANG X C, et al. Seaweed cultivation[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [5] 李梦雅, 许凯, 唐小虹, 等. 海洋酸化对经济海藻坛紫菜叶状体的光照强度和温度适应范围的影响[J]. 应用海洋学学报, 2021, 40(3): 388-394.
LI M Y, XU K, TANG X H, et al. Effects of ocean acidification on the light and temperature adaptations of commercial seaweed *Pyropia haitanensis*[J]. Journal of Applied Oceanography, 2021, 40(3): 388-394.
- [6] WANG Y, XU K, WANG W, et al. Physiological differences in photosynthetic inorganic carbon utilization between gametophytes and sporophytes of the economically important red algae *Pyropia haitanensis*[J]. Algal Research, 2019, 39: 101436.
- [7] BAO M, WANG J, XU T, et al. Rising CO₂ levels alter the responses of the red macroalga *Pyropia yezoensis* under light stress[J]. Aquaculture, 2019, 501: 325-330.
- [8] ZHANG T, LI J F, MA F, et al. Study of photosynthetic characteristics of the *Pyropia yezoensis* thallus during the cultivation process[J]. Journal of Applied Phycology, 2014, 26(2): 859-865.
- [9] GANTT E, GRABOWSKI B, CUNNINGHAM F X Jr. Antenna systems of red algae: phycobilisomes with photosystem II and chlorophyll complexes with photosystem I[M]//GREEN B R, PARSON W W. Light-harvesting antennas in photosynthesis. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003: 307-322.
- [10] BLOUIN N A, BRODIE J A, GROSSMAN A C, et al. Porphyra: a marine crop shaped by stress[J]. Trends in Plant Science, 2011, 16(1): 29-37.
- [11] 吕彩真, 欧光南. 红毛菜藻红蛋白的提取及稳定性研究[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2002, 7(1): 15-19.
LÜ C Z, OU G N. Extraction and stability of Phycoerythrin (PE) in *Bangia fusco-purpurea*[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2002, 7(1): 15-19.
- [12] 连跃斌, 许凯, 王文磊, 等. 坛紫菜色素突变体产生原因的初步研究[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2020, 25(3): 161-170.
LIAN Y B, XU K, WANG W L, et al. Preliminary studies on the formation of pigment mutants of *Pyropia haitanensis*[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2020, 25(3): 161-170.
- [13] MRCS G W B, PHD K S. Basic metabolism III: protein[J]. Basic Science, 2006, 24(4): 115-120.
- [14] ITO K, HORI K. Seaweed: chemical composition and potential food uses[J]. Food Reviews International, 1989, 5(1): 101-144.
- [15] 宣仕芬, 朱煜康, 孙楠, 等. 不同采收期坛紫菜感官品质及蛋白组成分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 291-296.
XUAN S F, ZHU Y K, SUN N, et al. Sensory quality and protein composition analysis of *Porphyra haitanensis* in different harvest periods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(14): 291-296.
- [16] MIŠURCOVÁ L, MACHŮ L, ORSAVOVÁ J. Seaweed minerals as nutraceuticals[M]//KIM S K. Advances in food and nutrition research. Amsterdam: Elsevier, 2011: 371-390.

- [17] SIAHAAN E A, PANGESTUTI R, KIM S K. Seaweeds: valuable ingredients for the pharmaceutical industries[M]// RAMPELOTTO P H, TRINCONE A. Grand challenges in marine biotechnology. Cham: Springer International Publishing, 2018: 49-95.
- [18] RUPEREZ P. Mineral content of edible marine seaweeds[J]. Food Chemistry, 2002, 79(1): 23-26.
- [19] EILERS P H C, PEETERS J C H. A model for the relationship between light intensity and the rate of photosynthesis in phytoplankton[J]. Ecological Modelling, 1988, 42(3/4): 199-215.
- [20] LICHTENTHALER H K, BUSCHMANN C. Chlorophylls and carotenoids: measurement and characterization by UV-VIS spectroscopy[J]. Current Protocols in Food Analytical Chemistry, 2001, 1(1): F4.3.1-F4.3.8.
- [21] 高洪峰. 不同生长期坛紫菜中藻胆蛋白的含量变化[J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(6): 645-648.
GAO H F. The variation in the contents of phycobiliproteins from *Porphyra haitanensis* collected in different growing stages[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1993, 24(6): 645-648.
- [22] 国家食品药品监督管理总局. 总蛋白测定试剂盒: YY/T 1444—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State Food and Drug Administration. Total protein test reagent: YY/T 1444—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [23] 任婧, 李景富, 张佳, 等. 基于 3, 5-二硝基水杨酸比色法建立一种快速测定总糖含量的方法[J]. 黑龙江科学, 2017, 8(10): 66-69.
REN J, LI J F, ZHANG J, et al. A method for rapid determination of total sugar content based on 3,5-dinitrosalicylic acid colorimetry[J]. Heilongjiang Science, 2017, 8(10): 66-69.
- [24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中多元素的测定: GB 5009.268—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National standard for food safety. Determination of multiple elements in food: GB 5009.268—2016[S]. Beijing: Standard Press of China, 2016.
- [25] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中碘的测定: GB 5009.267—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. National standard for food safety. Determination of iodine in food: GB 5009.267—2020[S]. Beijing: Standard Press of China, 2020.
- [26] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定: GB 5009.124—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, State Food and Drug Administration. National food safety standards. Determination of amino acids in food: GB 5009.124—2016[S]. Beijing: Standard Press of China, 2016.
- [27] 赵蕊. 坛紫菜优良新品系筛选及耐高温品系泛素化蛋白组学研究[D]. 厦门: 集美大学, 2022.
ZHAO R. Screening of new strains of *Pyropia haitanensis* and ubiquitylome study of a heat-tolerant strain[D]. Xiamen: Jimei University, 2022.
- [28] 马家海, 李水军, 纪焕红, 等. 红毛菜的氨基酸和脂肪酸分析[J]. 中国海洋药物, 2002, 21(5): 40-42.
MA J H, LI S J, JI H H, et al. An analysis of amino acids and fatty acids in *Bangia fuscopurpurea*[J]. Chinese Journal of Marine Drugs, 2002, 21(5): 40-42.
- [29] CHEN X, WU M H, YANG Q, et al. Preparation, characterization of food grade phycobiliproteins from *Pyropia haitanensis* and the application in liposome-meat system[J]. LWT, 2017, 77: 468-474.
- [30] PAINE E R, SCHMID M, BOYD P W, et al. Rate and fate of dissolved organic carbon release by seaweeds: a missing link in the coastal ocean carbon cycle[J]. Journal of Phycology, 2021, 57(5): 1 375-1 391.
- [31] CHEN S W, XU K, JI D H, et al. Release of dissolved and particulate organic matter by marine macroalgae and its biogeochemical implications[J]. Algal Research, 2020, 52: 102096.
- [32] FLEURENCE J. Seaweed proteins[J]. Trends in Food Science & Technology, 1999, 10(1): 25-28.
- [33] CERNÁ M. Seaweed proteins and amino acids as nutraceuticals[J]. Advances in Food and Nutrition Research, 2011, 64: 297-312.
- [34] MATANJUN P, MOHAMED S, MUSTAPHA N M, et al. Nutrient content of tropical edible seaweeds, *Euclima cottonii*, *Caulerpa lentillifera* and *Sargassum polycystum*[J]. Journal of Applied Phycology, 2009, 21(1): 75-80.
- [35] 武彦文, 欧阳杰. 氨基酸和肽在食品中的呈味作用[J]. 中国调味品, 2001, 26(1): 21-24.
WU Y W, OUYANG J. The taste effect of amino acids and peptides in food[J]. China Condiment, 2001, 26(1): 21-24.
- [36] MABEAU S, CAVALOC E, FLEURENCE J, et al. New seaweed based ingredients food industries[J]. International Food Ingredient, 1992(3): 51-56.
- [37] BIRCH G G, KEMP S E. Apparent specific volumes and tastes of amino acids[J]. Chemical Senses, 1989, 14(2): 249-258.

Comparative analysis of photosynthesis and quality of *Bangia fuscopurpurea* and *Pyropia haitanensis*

LIN Mi^{1,2,3}, XU Kai^{1,2,3}, XU Yan^{1,2,3}, JI Dehua^{1,2,3}, WANG Wenlei^{1,2,3},
CHEN Changsheng^{1,2,3}, XIE Chaotian^{1,2,3*}

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Engineering Research Center of Aquatic Breeding and Healthy Aquaculture, Xiamen 361021, China;

3. Key Laboratory of Healthy Mariculture for the East China Sea, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Xiamen 361021, China)

Abstract: To investigate the photosynthesis and quality differences of two commercial red algae *Bangia fuscopurpurea* and *Pyropia haitanensis*, a wild strain *B. fuscopurpurea* CY5 and a wild strain *P. haitanensis* NSD35 were selected for the study and the key photosynthetic parameters and nutritional composition were measured under the same growth conditions. Results showed that the maximum electron transfer rate, net photosynthetic rate, and phycoerythrin content of *B. fuscopurpurea* were 29.6%, 96.8% and 60.5% higher than those of *P. haitanensis*, respectively. The contents of potassium, calcium, magnesium, iron and zinc were 59.5%, 39.5%, 34.1%, 86.2% and 68.4% higher than those of *P. haitanensis*, respectively. The essential amino acid and flavor amino acid contents of *B. fuscopurpurea* were higher than those of *P. haitanensis*. In addition, there were no significant differences in respiration rate, maximum photochemical efficiency, chlorophyll *a*, total sugars, total protein and iodine content between the two species. It indicated that, compared with *P. haitanensis* NSD35, *B. fuscopurpurea* CY had faster photosynthetic rate, better accumulation of mineral elements and higher contents of essential and flavor amino acids. This study is helpful to understand the photosynthesis and quality characteristics of *B. fuscopurpurea* and *P. haitanensis* for data supplements and exploitations of *B. fuscopurpurea* germplasm resources.

Key words: marine biology; *Bangia fuscopurpurea*; *Pyropia haitanensis*; photosynthesis; nutrient composition; quality

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.20230327002

* Corresponding author (E-mail: ctxie@jmu.edu.cn)

(责任编辑:肖 静)