

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2015.14516

## 碳源和氮源加富对脆江蓠生长及生化组分的影响

隋海东<sup>1,2</sup>, 毛玉泽<sup>1</sup>, 郭晓亮<sup>1,2</sup>, 沈淑芳<sup>1,2</sup>, 方建光<sup>1</sup>

1. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306;

2. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 山东 青岛 266071

**摘要:** 在实验室条件下研究了碳源(添加  $\text{CO}_2$ )和氮源(添加  $\text{NaNO}_3$ )加富对大型海藻脆江蓠(*Gracilaria chouae*)生长及其生化组成的影响。设置碳源加富(800  $\mu\text{L/L}$   $\text{CO}_2$ )和对照(400  $\mu\text{L/L}$   $\text{CO}_2$ ) 2 个碳源处理组, 氮源加富(100  $\mu\text{mol/L}$ 、300  $\mu\text{mol/L}$  和 500  $\mu\text{mol/L}$   $\text{NO}_3^- \text{-N}$ )和对照(10  $\mu\text{mol/L}$   $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ) 4 个氮源处理组, 每个处理 3 个重复。实验共进行 10 d, 测定不同处理组藻体的生长及可溶性总糖(SS)、可溶性蛋白质(SP)、藻红蛋白(PE)、叶绿素 a(Chla)、总碳(TC)和总氮(TN)含量的变化。结果表明, 碳源和氮源加富都会促进脆江蓠的生长, 在 800  $\mu\text{L/L}$   $\text{CO}_2$  和 100  $\mu\text{mol/L}$   $\text{NO}_3^- \text{-N}$  处理组, 脆江蓠的瞬时生长率(SGR)最大(11.70%/d); 高浓度  $\text{CO}_2$  会降低藻体 SP、PE 和 Chla 的含量, 但提高了 SS 的含量; 随着硝态氮浓度的增大, PE 和 SP 含量逐渐增加, 而 SS 含量逐渐降低, Chla 含量没有明显变化。藻体的 TN 含量随着硝态氮浓度的增加而逐渐提高, 而 TC 和 C/N 比值则呈现逐渐降低的趋势, 并且藻体的 TN 和 TC 含量呈现出显著的负相关关系( $P < 0.05$ )。本实验证实添加碳、氮会引起脆江蓠生长和生化组成的变化, 但其能耐受较高的  $\text{CO}_2$  浓度和氮浓度。

**关键词:** 脆江蓠;  $\text{CO}_2$ ;  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ; 加富; 生长; 生化组分

中图分类号: S968

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2015)05-0960-08

海洋酸化和海水富营养化是影响海洋生态系统的两个突出环境问题。据预测, 至 21 世纪末表层海水的 pH 将下降至 7.9 或 7.8<sup>[1]</sup>, 同时, 近海富营养化是海洋沿岸环境退化的主要原因<sup>[2]</sup>。大型海藻是海洋生态系统中重要的初级生产者, 酸化的海洋对大型海藻的生长、光合固碳和营养盐吸收等一系列生理活动都会产生影响; 另外, 针对海水富营养化, 国内外学者普遍认为养殖大型海藻是缓解和改善海域富营养化的有效措施之一<sup>[3-5]</sup>。

脆江蓠(*Gracilaria chouae*)属红藻门(Rhodophyta), 红藻纲(Rhodophyceae), 真红藻亚纲(Florideophycidae), 杉藻目(Gigartinales), 江蓠科(Gracilariaceae), 江蓠属, 为中国特有暖水性大型藻类, 自然分布于浙江和福建沿海, 生长在潮间带石沼中或潮下带砂石或贝壳上<sup>[6]</sup>。先后有学者

研究了脆江蓠的池塘栽培技术<sup>[7-8]</sup>, 环境因子对其生长、营养盐吸收和生化组成的影响<sup>[9-12]</sup>以及营养细胞的超微结构<sup>[13]</sup>。但是, 关于脆江蓠在海洋酸化和富营养化水平下, 尤其是碳、氮相互作用下的生理生态响应少见报道。本研究探讨了脆江蓠不同碳源(模拟海洋酸化环境)和氮源(模拟富营养化环境)条件下的生长和生理生化响应, 为其碳、氮胁迫下的生理生态学提供基础数据, 同时为其在海洋酸化条件下的生理响应及海水富营养化下的生物修复作用提供理论参考。

### 1 材料和方法

#### 1.1 材料

脆江蓠(*Gracilaria chouae*)于 2014 年 3 月 10 日采自福建人工筏式养殖区, 用泡沫箱包装, 低

收稿日期: 2014-12-11; 修订日期: 2015-01-28.

基金项目: 国家支撑计划项目(2011BAD13B02); 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目(U1406403); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项(201305043, 201205031).

作者简介: 隋海东(1988-), 男, 硕士, 主要从事大型藻类光合固碳研究. E-mail: shdln123@126.com.

通信作者: 毛玉泽, 研究员. E-mail: maoyz@ysfri.ac.cn

温下(4℃左右)运回黄海水产研究所实验室。选择健康一致藻体, 除去表面附着物, 经消毒海水冲洗后于透明塑料培养箱中暂养 4 d。培养水体为过滤灭菌的自然海水(pH 8.18, 盐度 32, 无机氮浓度 10  $\mu\text{mol/L}$ , 无机磷浓度 0.78  $\mu\text{mol/L}$ ), 培养温度为 (20±1)℃, 光照强度为 (100±10)  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , 光暗周期为 12L:12D, 24 h 充气, 每 2 d 换水 1 次。

## 1.2 实验设计

实验材料放在 3 L 锥形瓶中(装有 2.5 L 过滤灭菌的自然海水), 置于  $\text{CO}_2$  植物培养箱(武汉瑞华)中培养 10 d。培养过程中  $\text{CO}_2$  浓度设为两个梯度, 分别为对照(400  $\mu\text{L/L}$ )和加富(800  $\mu\text{L/L}$ ); 硝态氮( $\text{NaNO}_3$ )浓度梯度分别为对照(10  $\mu\text{mol/L}$ )和加富(100  $\mu\text{mol/L}$ 、300  $\mu\text{mol/L}$  和 500  $\mu\text{mol/L}$ ); 磷酸盐( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ )按照与硝酸盐 1:10 的比例添加, 每个处理设 3 个重复。藻体的培养密度为 1 g/L, 其他条件与暂养条件相同, 每 2 d 换 1 次水。培养结束后, 测定脆江蓠的生长及生化组分含量。

## 1.3 瞬时生长率(SGR)的测定

瞬时生长率的计算公式为:  $\text{SGR}(\%/d)=100\times(\ln W_t - \ln W_0)/t$ , 式中 SGR 为瞬时生长率(%/d),  $W_0$  为实验开始时藻体的湿重(g),  $W_t$  为实验结束时藻体的湿重(g),  $t$  为培养时间(d)。

## 1.4 生化组分的测定

藻体培养 10 d 后, 测定藻体的可溶性总糖(SS)、可溶性蛋白质(SP)、叶绿素 a(Chla)、藻红蛋白(PE)、总氮(TN)和总碳(TC)。SS 用蒽酮法测定<sup>[14]</sup>, SP 用考马斯亮蓝法测定<sup>[14]</sup>, Chla 参考 Wellburn 的方法<sup>[15]</sup>, PE 参考 Bryant 等的方法<sup>[16]</sup>, TN 和 TC 采用元素分析仪(德国 ELEMENTAR)测定。

## 1.5 数据处理

实验数据采用 Excel 2010 进行处理及统计分析。结果以平均值±标准差( $\bar{x}\pm\text{SD}$ )表示。采用 SPSS 17.0 进行显著性分析, 设置差异显著水平为 0.05。

# 2 结果与分析

## 2.1 藻体的生长

从图 1 可以看出, 在两种  $\text{CO}_2$  浓度条件下, 添加硝态氮都明显促进脆江蓠的生长,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$

浓度为 100  $\mu\text{mol/L}$  时 SGR 均最大, 分别为 10.05%/d 和 11.70%/d。硝态氮加富组脆江蓠 SGR 显著高于对照组( $P<0.05$ ), 但加富组之间 SGR 差异不显著( $P>0.05$ )。除对照组外(10  $\mu\text{mol/L}$ ), 加富  $\text{CO}_2$  显著提高了藻体的 SGR ( $P<0.05$ ), 3 个硝态氮浓度梯度组 SGR 分别为 16.42%、16.50%和 15.99%。

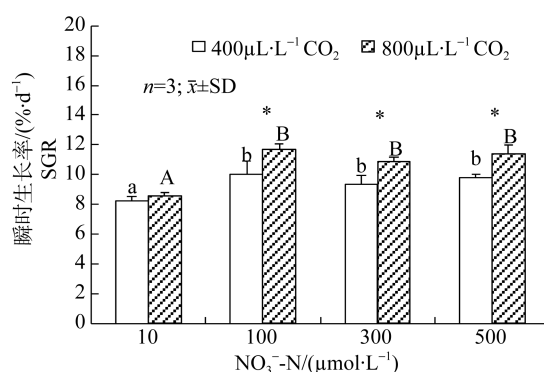


图 1 不同 C、N 浓度对脆江蓠生长率的影响

不同小(大)写字母表示  $\text{CO}_2$  体积分数为 400  $\mu\text{L/L}$ (800  $\mu\text{L/L}$ ) 下不同氮浓度间脆江蓠生长率差异显著( $P<0.05$ ); \*表示相同氮源水平下不同浓度  $\text{CO}_2$  处理组之间差异显著( $P<0.05$ )。

Fig. 1 The effects of different C and N concentration on the specific growth rate (SGR) of *Gracilaria chouae*. Different small (capital) letters indicated significant difference among different nitrogen concentration under the 400  $\mu\text{L/L}$  (800  $\mu\text{L/L}$ ) level of  $\text{CO}_2$  ( $P<0.05$ ), and \* indicated significant difference between different  $\text{CO}_2$  concentration under the same level of nitrogen ( $P<0.05$ ).

## 2.2 可溶性总糖和蛋白质含量

图 2 示不同碳、氮浓度对脆江蓠可溶性总糖含量(SS)的影响。在两种  $\text{CO}_2$  浓度下, 随着硝态氮浓度的增加, 藻体的 SS 都呈现逐渐降低的趋势, 并且差异显著( $P<0.05$ )。高  $\text{CO}_2$  浓度下, 硝态氮加富使藻体的 SS 含量下降, 由对照组的 22.38 mg/g 下降到 500  $\mu\text{mol/L}$  处理组的 17.28 mg/g, 下降了 22.79%。低  $\text{CO}_2$  浓度组, 藻体的 SS 含量变化趋势相同, 下降幅度略有降低, 为 19%。低浓度硝态氮水平下(对照组), 加富  $\text{CO}_2$  能显著提高藻体可溶性总糖含量( $P<0.05$ ), SS 含量提高了 11.49%, 而在 3 个硝态氮加富处理组中, SS 含量差异不显著, 但  $\text{CO}_2$  加富组藻体的 SS 含量略高于对照组。

碳、氮加富对藻体 SP 的影响见图 3。低  $\text{CO}_2$  浓度条件下(对照组), 硝态氮加富显著提高了藻

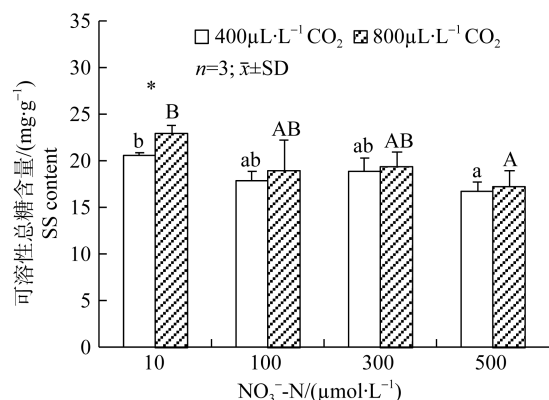


图 2 不同 C、N 浓度对脆江蓠可溶性总糖含量的影响  
不同小(大)写字母表示  $\text{CO}_2$  体积分数为  $400 \mu\text{L/L}$  ( $800 \mu\text{L/L}$ ) 下不同氮浓度间脆江蓠可溶性总糖含量差异显著 ( $P < 0.05$ ); \* 表示相同氮源水平下不同浓度  $\text{CO}_2$  处理组之间差异显著 ( $P < 0.05$ ).

Fig. 2 The effects of different C and N concentration on the content of soluble sugar (SS) in *Gracilaria chouae*  
Different small (capital) letters indicated significant difference among different nitrogen concentration under the  $400 \mu\text{L/L}$  ( $800 \mu\text{L/L}$ ) level of  $\text{CO}_2$  ( $P < 0.05$ ), and \* indicated significant difference between different  $\text{CO}_2$  concentration under the same level of nitrogen ( $P < 0.05$ ).

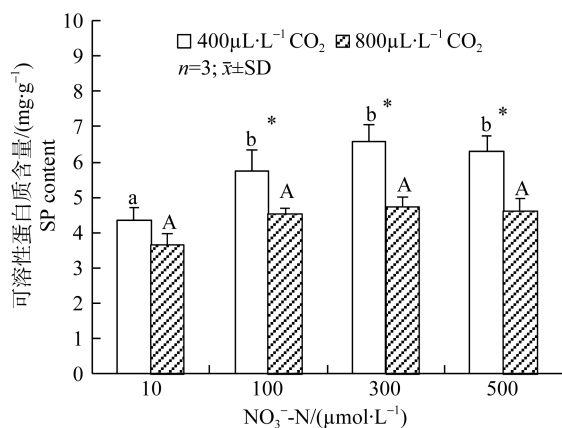


图 3 不同 C、N 浓度对脆江蓠可溶性蛋白质含量的影响  
不同小(大)写字母表示  $\text{CO}_2$  体积分数为  $400 \mu\text{L/L}$  ( $800 \mu\text{L/L}$ ) 下不同氮浓度间脆江蓠可溶性蛋白质含量差异显著 ( $P < 0.05$ ); \* 表示相同氮源水平下不同浓度  $\text{CO}_2$  处理组之间差异显著 ( $P < 0.05$ ).

Fig. 3 The effects of different C and N concentration on the content of soluble protein (SP) in *Gracilaria chouae*  
Different small (capital) letters indicated significant difference among different nitrogen concentration under the  $400 \mu\text{L/L}$  ( $800 \mu\text{L/L}$ ) level of  $\text{CO}_2$  ( $P < 0.05$ ), and \* indicated significant difference between different  $\text{CO}_2$  concentration under the same level of nitrogen ( $P < 0.05$ ).

体 SP 含量 ( $P < 0.05$ ),  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度在  $300 \mu\text{mol/L}$  时 SP 含量最高, 但 3 个加富组之间差异不显著

( $P > 0.05$ )。在高浓度  $\text{CO}_2$  水平下, 3 个硝态氮加富组的 SP 含量也高于对照组, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。在相同硝态氮浓度下, 加富  $\text{CO}_2$  能明显降低藻体 SP 的含量, 这种降低作用在硝态氮加富条件下差异显著 ( $P < 0.05$ ), 而在低浓度组(对照组)差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

### 2.3 叶绿素 a 和藻红蛋白含量

碳、氮加富对藻体 Chla 含量的影响如图 4 所示。碳、氮加富对藻体 Chla 含量都没有显著影响 ( $P > 0.05$ )。与对照组相比, 高浓度  $\text{CO}_2$  培养下藻体的叶绿素 a 含量有所降低。

从图 5 可以看出, 在两种  $\text{CO}_2$  浓度培养下, 随着硝态氮浓度的增加, PE 的含量都呈现逐渐增大的趋势。在低  $\text{CO}_2$  浓度水平培养下, 硝态氮处理对藻体的 PE 含量影响显著 ( $P < 0.05$ ), 但在高浓度  $\text{CO}_2$  水平培养下, 不同浓度的硝态氮处理对藻体的 PE 含量没有显著的影响 ( $P > 0.05$ )。在相同浓度硝态氮下, 高浓度  $\text{CO}_2$  使藻体的 PE 含量呈现出降低的趋势。

### 2.4 总氮和总碳含量

从表 1 可以看出, 在正常浓度  $\text{CO}_2$  水平下, 硝态氮处理对藻体的 TN 和 TC 含量影响显著 ( $P < 0.05$ ), TN 含量随着硝态氮浓度的增加呈现出逐渐增加的趋势, TC 含量和 C/N 比值则随着硝态氮浓度的增加呈现出逐渐减少的趋势, 在高浓度  $\text{CO}_2$  水平下也呈现出相同的规律。在正常  $\text{CO}_2$  条

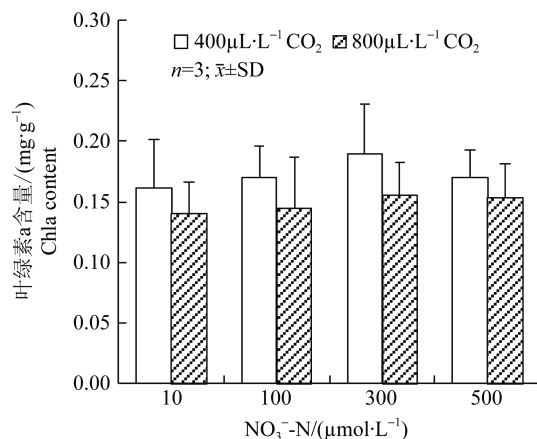


图 4 不同 C、N 浓度对脆江蓠叶绿素 a 含量的影响

Fig. 4 The effects of different C and N concentration on the content of chlorophyll a (Chla) in *Gracilaria chouae*

表 1 不同 C、N 浓度下脆江蓠的总氮和总碳含量及 C/N

Tab. 1 Total nitrogen, total carbon and C/N ratio of the *Gracilaria chouae* at different C and N concentration

| CO <sub>2</sub> 体积分数/(μL·L <sup>-1</sup> )<br>CO <sub>2</sub> concentration | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N 浓度/(μmol·L <sup>-1</sup> )<br>NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N concentration | 总氮/% TN                 | 总碳/% TC                  | C/N                     |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 400                                                                         | 10                                                                                                          | 2.43±0.15 <sup>a</sup>  | 27.93±0.98 <sup>a</sup>  | 11.50±0.53 <sup>b</sup> |
|                                                                             | 100                                                                                                         | 2.72±0.01 <sup>ab</sup> | 27.12±0.76 <sup>ab</sup> | 9.99±0.30 <sup>a</sup>  |
|                                                                             | 300                                                                                                         | 2.74±0.05 <sup>b</sup>  | 26.97±0.11 <sup>b</sup>  | 9.85±0.17 <sup>a</sup>  |
|                                                                             | 500                                                                                                         | 2.78±0.19 <sup>b</sup>  | 26.75±0.84 <sup>b</sup>  | 9.64±0.34 <sup>a</sup>  |
| 800                                                                         | 10                                                                                                          | 2.42±0.07 <sup>A</sup>  | 28.27±0.50 <sup>B</sup>  | 11.68±0.53 <sup>B</sup> |
|                                                                             | 100                                                                                                         | 2.59±0.03 <sup>B</sup>  | 26.49±0.66 <sup>A</sup>  | 10.25±0.34 <sup>A</sup> |
|                                                                             | 300                                                                                                         | 2.54±0.02 <sup>B</sup>  | 26.18±0.20 <sup>A</sup>  | 10.31±0.12 <sup>A</sup> |
|                                                                             | 500                                                                                                         | 2.63±0.04 <sup>B</sup>  | 26.06±0.75 <sup>A</sup>  | 9.93±0.15 <sup>A</sup>  |

注: 不同小(大)写字母表示 CO<sub>2</sub> 体积分数 400 μL/L (800 μL/L)下不同氮浓度间脆江蓠总氮、总碳和 C/N 比差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different small (capital) letters indicated significant difference among different nitrogen concentration under the 400 μL/L (800 μL/L) level of CO<sub>2</sub> ( $P<0.05$ ).

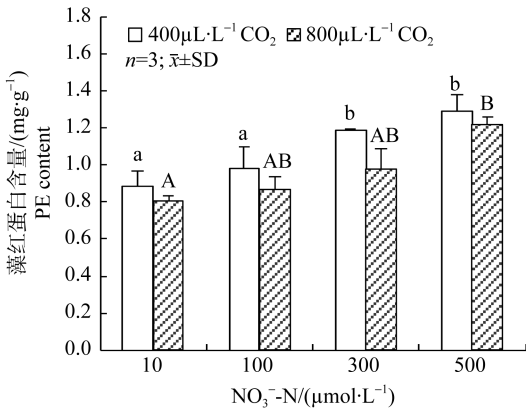


图 5 不同 C、N 浓度对脆江蓠藻红蛋白含量的影响

不同小(大)写字母表示 CO<sub>2</sub> 体积分数 400 μL/L (800 μL/L)下不同氮水平间脆江蓠藻红蛋白含量差异显著( $P<0.05$ )。

Fig. 5 The effects of different C and N concentration on the content of PE in *Gracilaria chouae*

Different small (capital) letters indicated significant difference among different nitrogen concentration under the 400 μL/L (800 μL/L) level of CO<sub>2</sub> ( $P<0.05$ ).

件下, 10 μmol/L、100 μmol/L 和 300 μmol/L 这 3 个处理组藻体的 TN 和 TC 含量呈现出高 N 低 C、低 N 高 C 的变化规律, 即 TN 和 TC 存在明显的负相关关系, 即  $y=-4.58x+39.57(r=-0.756, P=0.02<0.05)$ ; 在高浓度 CO<sub>2</sub> 条件, 包括 500 μmol/L 组在内的 4 个处理组藻体的 TN 和 TC 含量也存在明显的负相关关系, 即  $y=-9.03x+49.73(r=-0.75, P<0.05)$ 。

3 讨论

3.1 对生长的影响

研究表明, 大气 CO<sub>2</sub> 浓度加倍, 使得表层海

水的 CO<sub>2</sub> 浓度也随之加倍, 但是海水中 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 DIC 浓度增加量不到 10%, 因此, CO<sub>2</sub> 浓度升高对大型海藻的效应与其无机碳的利用机制有重要的关系<sup>[17]</sup>。对利用 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的海藻来说, CO<sub>2</sub> 浓度提高不会显著促进藻体生长, 如高浓度 CO<sub>2</sub> 对石莼的生长没有显著的影响<sup>[18]</sup>, 而对只利用 CO<sub>2</sub> 的海藻会明显促进其生长, 如高浓度 CO<sub>2</sub> 能明显促进羊栖菜(*Hizikia fusiforme*)的生长<sup>[19]</sup>。本研究中 CO<sub>2</sub> 加富能显著提高脆江蓠的生长速率, 这与江蓠属中的龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)情况类似<sup>[20]</sup>。脆江蓠具有非常高的 CO<sub>2</sub> 亲和能力(数据未发表), 主要通过利用 CO<sub>2</sub> 进行光合作用, 因此 CO<sub>2</sub> 浓度的提高能够促进脆江蓠的生长。

实验中硝态氮加富也显著提高了脆江蓠的生长速率, 这与江蓠属的其他藻类, 如龙须菜<sup>[21]</sup>和圆扁江蓠(*G. tikvahiae*)<sup>[22]</sup>在氮加富培养下的结果一致。硝态氮对照组中的藻体进行 CO<sub>2</sub> 加富培养, 其 SGR 与低 CO<sub>2</sub> 浓度培养下的藻体相近, 原因可能是氮盐不充足导致藻体内用于合成氨基酸的光合作用初级产物转向合成碳水化合物, 这样藻体就很难保持原来的碳和氮的平衡, 使藻体的生长受到限制<sup>[23]</sup>。在两种 CO<sub>2</sub> 浓度下, 3 个硝态氮加富处理组的 SGR 差异不显著( $P>0.05$ ), 在 300 μmol/L 和 500 μmol/L 处理组, 藻体的 SGR 并没有随着硝态氮浓度的增加而提高, 其原因可能是当硝态氮浓度为 100 μmol/L 时已经达到或超过了脆江蓠的最适营养盐浓度, 这与徐永健等<sup>[24]</sup>研究的龙须菜的

最适硝态氮浓度为 100  $\mu\text{mol/L}$  相似,但还需要通过进一步的实验来探讨。同时,在 300  $\mu\text{mol/L}$  和 500  $\mu\text{mol/L}$  两个高浓度组藻体仍然保持了较高的生长速率,说明脆江蓐具有很广的营养盐适应范围,可以很好地适应富营养化海区高 N 高 P 的环境,能够作为修复物种在富营养化海区进行人工养殖。

### 3.2 对生化组成的影响

$\text{CO}_2$  和硝态氮对脆江蓐的生化组成有重要影响。实验结果表明,藻体的 PE 和 SP 含量在  $\text{CO}_2$  加富培养下降低了,但氮加富却提高了它们的含量。SS 的变化规律正好与它们相反, $\text{CO}_2$  加富培养提高了藻体 SS 的含量,氮加富却导致其含量降低。Chla 含量与氮盐的浓度没有密切的联系,其含量比较稳定,但在  $\text{CO}_2$  加富培养下其含量呈现降低的趋势。本实验的结果与徐智广等<sup>[20]</sup>对龙须菜的研究结果基本相似,徐永健等<sup>[21]</sup>对龙须菜的色素变化进行了研究,同样得出了 Chla 含量与环境中的氮关系不密切的结论。

江蓐属海藻具有很大的氮储存库,PE 就是该氮储存库主要组成部分,它对外界的营养变化很敏感<sup>[25]</sup>,当外界氮水平很高时,多余的氮会被储备在 PE 中,PE 含量也随着外界氮浓度的增大而增加,因此,实验中 PE 的含量会随着硝态氮浓度的增大而提高。随着藻体内外氮盐浓度的提高,以氮为底物的氮代谢作用就会加强,促进可溶性蛋白的合成,从而提高其在藻体内的含量。与此同时,本研究还发现  $\text{CO}_2$  加富处理组,藻红蛋白和可溶性蛋白质的含量相比对照组偏低,其原因可能是  $\text{CO}_2$  加富提高了藻体的光合作用速率,促进其可溶性碳水化合物的积累,由于反馈作用,随着积累的进行,光合作用的初级产物不会持续转化为碳水化合物,而会作为碳骨架与氮合成氨基酸,并参与合成其他大分子化合物,为藻类生长提供所需的物质,这样就消耗了大量的氮与含氮化合物,藻红蛋白和可溶性蛋白含量就会降低。如果氮含量太高,就会过多地利用碳骨架合成一些含氮化合物,导致碳水化合物的积累量减少<sup>[23]</sup>。藻类中有一种“色素节约”现象,是藻体适应环境变

化的一种策略,藻类通过最大限度地降低光合中心色素含量,避免更多的光能传递到光系统中,减少能量的浪费<sup>[26]</sup>。实验中高  $\text{CO}_2$  培养条件使脆江蓐叶绿素 a 的含量呈现降低的趋势,可能是因为“色素节约”现象的存在,以帮助脆江蓐应对高  $\text{CO}_2$  条件下藻体过剩的能量。

测定藻体的 TN 和 TC 可以了解藻体生长水体的营养盐状况。Gagné 等<sup>[27]</sup>研究发现在营养盐丰富的季节,一种昆布属藻类 *Laminaria longicruris* 的 TN 含量增多,碳水化合物储量明显减少,而在营养盐比较匮乏的季节,藻体的 TN 含量逐渐减少,碳水化合物储量则明显增多。Nielsen 等<sup>[28]</sup>在研究一种海带属藻类 *Saccharina latissima* 生长的季节变化时,发现随着营养盐的季节变化,藻体的 TN 和 TC 含量呈现出此消彼长的趋势。实验中脆江蓐的 TN 和 TC 含量随着培养水体营养盐浓度的改变,也表现出相似的变化规律。C/N 比值常用来衡量藻体是否缺氮。江蓐的临界 C/N 比在 10~15,当比值大于 15,藻类生长可能受氮限制,比值低于 10,说明藻类已经开始贮存氮了。以这个为标准,实验中正常  $\text{CO}_2$  条件下除对照组外,其他各氮加富组藻体的 C/N 比值均小于 10,说明它们已经开始贮存氮了,并且说明它们生长的水体营养盐十分丰富;但在高  $\text{CO}_2$  条件下,除 500  $\mu\text{mol/L}$  处理组外,其他两个氮加富处理组 C/N 比值均大于 10,说明  $\text{CO}_2$  加富促进了藻体对营养盐的利用。在对龙须菜的研究中发现,高浓度  $\text{CO}_2$  能够提高硝酸还原酶的活性<sup>[20]</sup>,脆江蓐对营养盐利用能力的提高,可能和藻体硝酸还原酶活性的提高有关,其促进了藻体对营养盐的吸收。

### 参考文献:

- [1] Caldeira K, Wickett M. Ocean model predictions of chemistry changes from carbon dioxide emissions to the atmosphere and ocean[J]. J Geophys Res, 2005, 110(C9): C09S04.
- [2] Lin R G, Zou J Z. The development and application of the pollution monitoring buoy in the marine environment pollution monitoring[J]. Marine Environment Science, 1997, 16(3): 72-76. [林荣根, 邹景忠. 近海富营养化的结果与对策[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(3): 72-76.]
- [3] Mao Y Z, Yang H S, Wang R C. Bioremediation capability

- of large-sized seaweed in integrated mariculture ecosystem: A review[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2005, 12(2): 225–231.[毛玉泽, 杨红生, 王如才. 大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用[J]. 中国水产科学, 2005, 12(2): 225–231.]
- [4] Chen J F, Zhao J, Guo F, et al. Study on bioremediation effects of *Porphyra yezoensis* on eutrophic condition in the seawaters of Jiaozhou Bay wetland[J]. Progress in Fishery Sciences, 2012, 33(1): 93–101.[陈聚法, 赵俊, 过峰, 等. 条斑紫菜对胶州湾湿地浅海富营养化状况的生物修复效果[J]. 渔业科学进展, 2012, 33(1): 93–101.]
- [5] Tang K X, You X P, Lin Y S, et al. A study on bioremediation of eutrophication of mariculture waters by *Gracilaria lemaneiformis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(11): 3044–3051.[汤坤贤, 游秀萍, 林亚森, 等. 龙须菜对富营养化海水的生物修复[J]. 生态学报, 2005, 25(11): 3044–3051.]
- [6] Xia B M. Flora Algarum Marinarum Sinicarum; Rhodophyta Ahnfeltiales Gigartinales Rhodymeniales[M]. Beijing: Science Press, 1999: 41–42.[夏邦美. 中国海藻志: 红藻门 伊谷藻目 杉藻目 红皮藻目[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 41–42.]
- [7] Hu F G, Wang Z G, Wang X Y, et al. Studies on pond cultivation techniques of *Gracilaria bursapastoris*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2011, 32(5): 67–73.[胡凡光, 王志刚, 王翔宇, 等. 脆江蓠池塘栽培技术[J]. 渔业科学进展, 2011, 32(5): 67–73.]
- [8] Li X S, Zhong Z H, Xu J T, et al. The growth and photosynthetic performance in sea weed *Gracilaria chouae* in a pond in summer[J]. Fisheries Science, 2014, 33(4): 223–226.[李信书, 钟志海, 徐军田, 等. 夏季池塘养殖脆江蓠的生长与光合特性[J]. 水产科学, 2014, 33(4): 223–226.]
- [9] Lu X, Li M Z, Xu Z G, et al. Impact of light intensity on growth and levels of photosynthetic pigments of *Gracilaria chouae*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2013, 34(1): 145–150.[卢晓, 李美真, 徐智广, 等. 光照对脆江蓠生长及光合色素含量的影响[J]. 渔业科学进展, 2013, 34(1): 145–150.]
- [10] Zhan D M, Li M Z, Wang X Y, et al. Effects of temperature and illumination on uptake of  $\text{NH}_4^+$ -N and  $\text{PO}_4^{3-}$ -P by sea weed *Gracilaria chouae*[J]. Fisheries Science, 2011, 30(12): 774–776.[詹冬梅, 李美真, 王翔宇, 等. 温度和光照对脆江蓠吸收  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 的影响[J]. 水产科学, 2011, 30(12): 774–776.]
- [11] Jin Y L, Wu W T, Chen W Z. Effects of different temperature and salinity on growth and biochemical constituents of *Gracilaria chouae*[J]. South China Fisheries Science, 2012, 8(2): 51–57.[金玉林, 吴文婷, 陈伟洲. 不同温度和盐度条件对脆江蓠生长及其生化组分的影响[J]. 南方水产科学, 2012, 8(2): 51–57.]
- [12] Lu X, Li M Z, Wang Z G, et al. Effects of different temperature and illumination intensity on growth and biochemical constituents of *Gracilaria chouae*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(6): 1236–1243.[卢晓, 李美真, 王志刚, 等. 光照和温度对脆江蓠的生长和生化组成的影响[J]. 中国水产科学, 2014, 21(6): 1236–1243.]
- [13] Zheng Y. Ultrastructural studies on vegetative cells of *Gracilaria bursa-pastoris* (Gmel.) silva[J]. Journal of Fujian Teachers University: Natural Science, 1988, 14(4): 67–70.[郑怡. 脆江蓠营养细胞超微结构的研究[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 1988, 14(4): 67–70.]
- [14] Zhang L J, Fan J J. Experimental Course of Plant Physiology[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2007: 8.[张立军, 樊金娟. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2007: 8.]
- [15] Alan R. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution[J]. J Plant Physiol, 1994, 144(3): 307–313.
- [16] Thomas A, John van der M, Randall S. Light-harvesting system of the red alga *Gracilaria tikvahiae* 1[J]. Plant Physiol, 1983, 73(2): 353–360.
- [17] Bowes G. Facing the inevitable: Plants and increasing atmospheric  $\text{CO}_2$ [J]. Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol, 1993, 44: 309–332.
- [18] Zou D H, Gao K S, Ruan Z X. Effects of elevated  $\text{CO}_2$  concentration on photosynthesis and nutrients uptake of *Ulua lactuca*[J]. Journal of Ocean University of Qingdao: Natural Science, 2001, 31(6): 877–882.[邹定辉, 高坤山, 阮祚禧. 高  $\text{CO}_2$  浓度对石莼光合作用及营养盐吸收的影响[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2001, 31(6): 877–882.]
- [19] Zou D. Effects of elevated atmospheric  $\text{CO}_2$  on growth, photosynthesis and nitrogen metabolism in the economic brown seaweed, *Hizikia fusiforme* (Sargassaceae, Phaeophyta)[J]. Aquaculture, 2005, 250(3–4): 726–735.
- [20] Xu Z G, Zou D H, Zhang X, et al. Effects of increased atmospheric  $\text{CO}_2$  and N supply on growth, biochemical compositions and uptake of nutrients in *Gracilaria lemaneiformis*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3752–3759.[徐智广, 邹定辉, 张鑫, 等.  $\text{CO}_2$  和硝氮加富对龙须菜 (*Gracilaria lemaneiformis*) 生长、生化组分和营养盐吸收的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3752–3759.]
- [21] Xu Y J, Qian L M, Wang Y S. Effects of nitrogen nutrients on growth rate and pigment composition of *Gracilaria*

- lemaniformis*[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2006, 25(2): 222–228.[徐永健, 钱鲁闽, 王永胜. 氮素营养对龙须菜生长及色素组成的影响[J]. 台湾海峡, 2006, 25(2): 222–228.]
- [22] Xu Y J, Qian L M, Jiao N Z. Nitrogen nutritional character of *Gracilaria* as bioindicators and restoral plants of eutrophication[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2004, 11(3): 276–280.[徐永健, 钱鲁闽, 焦念志. 江蓠作为富营养化指示生物及修复生物的氮营养特性[J]. 中国水产科学, 2004, 11(3): 276–280.]
- [23] Hang X H, Wen Z C, Wu C Y. Effect of ammonium-nitrogen on growth and chemical composition of *Gracilaria sjoestedtii* Kylin[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1989, 20(6): 493–501.[黄晓航, 温宗存, 吴超元. 铵氮对龙须菜含氮化合物和碳水化合物组成的影响[J]. 海洋与湖沼, 1989, 20(6): 493–501.]
- [24] Xu Y J, Qian L M, Wei W, et al. Studies on nutrient kinetics characteristics of two species seaweeds (Rhodophyta) at outdoor natural conditions[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(2): 161–165.[徐永健, 钱鲁闽, 韦玮, 等. 两种大型海藻自然环境下的营养动力学研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(2): 161–165.]
- [25] Kursar T, Alberte R. Photosynthetic unit organization in a red alga: relationships between light-harvesting pigments and reaction centres[J]. Plant Physiol, 1983, 72(2): 409–414 .
- [26] Gordillo F, Figueroa F, Niell F. Photon and carbon use efficiency in *Ulva ridida* at different CO<sub>2</sub> and N levels[J]. Planta, 2003, 218(2): 315–322.
- [27] Gagné J, Mann K, Chapman A. Seasonal patterns of growth and storage in *Laminaria longicruris* in relation to differing patterns of availability of nitrogen in the water[J]. Mar Biol, 1982, 69(1): 91–101.
- [28] Nielsen M, Krause-Jensen D, Thinggaard R, et al. Growth dynamics of *Saccharina latissima* (Laminariales, Phaeophyceae) in Aarhus Bay, Denmark, and along the species' distribution range[J]. Mar Biol, 2014, 161(9): 2011–2022.

## Effects of carbon and nitrogen enrichment on growth and biochemical composition in *Gracilaria chouae*

SUI Haidong<sup>1,2</sup>, MAO Yuze<sup>2</sup>, GUO Xiaoliang<sup>1,2</sup>, SHEN Shufang<sup>1,2</sup>, FANG Jianguang<sup>2</sup>

1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Qingdao 266071, China

**Abstract:** Ocean acidification and eutrophication are two prominent problems that affect marine ecosystems in many aspects. Ocean acidification affects a series of physiological activities of macroalgae, which serve as important primary producers in marine ecosystems with regard to growth, photosynthetic carbon, and nutrient absorption. Moreover, it is globally acknowledged that seaweed cultivation is an effective way to ease the pressure of offshore eutrophication.

*Gracilaria chouae* (Rhodophyta, Rhodophyceae, Florideophycidae, Gigartinales, Gracilariaceae) is distributed in warm water along the coast of Zhejiang and Fujian Provinces. It grows in stone bogs in the intertidal zone, and sandstone and shells in the subtidal zone. *Gracilaria chouae* is approximately 20–40 cm long with a rufous color and cylindrical fronds. The ecological effects of *G. chouae* are remarkable; for example, *G. chouae* has been used to improve pond water quality, because it absorbs N and P when it is growing. Moreover, it shows high economic value as both raw agar material and abalone feed. The majority of research on *G. chouae* has been about pond cultivation techniques, growth, uptake of nutrient and biochemical composition, and ultrastructure of vegetative cells. However, there are few reports on the interaction effects of C and N on its eco-physiological characteristics. This study investigated the growth and biochemical composition of *G. chouae* in response to different C sources (a model of ocean acidification) and N sources (a model of eutrophication).

*Gracilaria chouae* was exposed to two C concentrations of 800  $\mu\text{L/L}$   $\text{CO}_2$  (enhanced) and 400  $\mu\text{L/L}$   $\text{CO}_2$  (as control), and four N concentrations of 100  $\mu\text{mol/L}$ , 300  $\mu\text{mol/L}$ , and 500  $\mu\text{mol/L}$   $\text{NO}_3^-$ -N (enhanced), and 10  $\mu\text{mol/L}$   $\text{NO}_3^-$ -N (as the control), with three replicates for each group. The culture density of *G. chouae* was 1 g/L. The algae were cultured under 100  $\mu\text{mol}$  (photons)/(m<sup>2</sup>·s) illuminated by incandescent tubes for 12L : 12D photoperiod at 20°C. The culture seawater was continuously aerated and renewed every 2 days. Differences in seaweed growth, soluble sugar (SS), soluble protein (SP), phycoerythrin (PE), chlorophyll a (Chla), total nitrogen (TC), and total carbon (TN) were measured 10 days after being exposure to different conditions. The results indicated that enhanced C and N were proposed to increase seaweed growth, and the special growth rate reached its peak (11.70%/d) in the 800  $\mu\text{L/L}$   $\text{CO}_2$  and 100  $\mu\text{mol/L}$   $\text{NO}_3^-$ -N treatments. Moreover, high  $\text{CO}_2$  levels induced decrease of SP, PE, and Chla contents, whereas SS content increased. With density increase of  $\text{NaNO}_3$ , PE and SP gradually increased, SS gradually reduced, and Chla had no significant change ( $P>0.05$ ). TN increased, but TC and C/N decreased with increasing  $\text{NaNO}_3$ . TN and TC had significant negative correlations in *G. chouae* ( $P<0.05$ ). These results showed that ocean acidification promotes *G. chouae* growth and directly affects its physiological and biochemical characteristics. The growth rate of *G. chouae* stayed high under high N and P conditions. Therefore, *G. chouae* can be considered a suitable bioremediation species for artificial culture in regions that experience eutrophication.

**Key words:** *Gracilaria chouae*;  $\text{CO}_2$ ;  $\text{NO}_3^-$ -N; enrichment; growth; biochemical composition

**Corresponding author:** MAO Yuze. E-mail: maoyz@ysfri.ac.cn