

无机氮浓度及其配比对细基江蓠繁枝变型生长及生化组成的影响

黄鹤忠, 孙菊燕, 申 华, 王永玲

(苏州大学 生命科学学院, 水产科学研究所, 江苏 苏州 215123)

摘要: 在实验室条件下分别研究了 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓度及其配比对细基江蓠繁枝变型 (*Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia) 生长及生化组成的影响。结果表明, 过低的 NO_3^- -N 浓度 (0, 10 $\mu\text{mol/L}$) 或过高的 NO_3^- -N 浓度 (60, 80 $\mu\text{mol/L}$)、过低的 NH_4^+ -N 浓度 (0, 2.5 $\mu\text{mol/L}$) 或过高的 NH_4^+ -N 浓度 (10, 20, 40 $\mu\text{mol/L}$)、过低的 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 比值 (1/35, 1/7) 或过高的 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 比值 (3/7, 4/7) 条件下, 江蓠均表现为生长速率明显减慢 ($P < 0.05$)、藻体内藻红素 (PE)、叶绿素 a、蛋白质含量显著降低 ($P < 0.05$); 而分别在 NO_3^- -N 20 $\mu\text{mol/L}$ 、 NH_4^+ -N 5 $\mu\text{mol/L}$ 、 NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 2/7 (TIN 20 mol/L) 的条件下, 江蓠可获得最快生长速率和最高的 PE、叶绿素 a、蛋白质含量以及最低的碳水化合物/蛋白质比值。

关键词: 无机氮; 细基江蓠繁枝变型 (*Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia); 生长; 生化组成

中图分类号: Q946 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2006)09-0023-05

在自然条件下, 海藻的生长和海藻体内的化学组成既受光照、温度及盐度等因子的调节, 又受到海水中营养盐水平的制约, 氮是藻类生长繁殖所必需的主要营养元素之一, 在许多海区氮成了藻类生长的限制因子^[1]。氮在海洋中的形态较多, 除溶解的无机态 (NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+) 和有机态 (PON、DON), 还存在着气态的 N_2 、 N_2O 和 NH_3 , 其中 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 是海藻生长繁殖所利用的最主要的氮源。细基江蓠繁枝变型是红藻门江蓠属中一种重要的产琼胶红藻, 不但具有巨大的潜在经济利用价值, 而且因其具有适应广、生长快、营养储存库大等特点, 在海藻生物修复富营养化水域、防止海区赤潮等方面具有独特的应用价值。然而, 国内外有关 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 不同浓度及其配比对细基江蓠繁枝变型生长及生化组成影响方面的研究尚未见报道。作者对此做了研究, 以期为江蓠栽培的营养环境调控及其资源利用提供有益参数。

1 材料与方法

1.1 材料

实验用细基江蓠繁枝变型 (*Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang et Xia) 取自南通市某海水养殖池塘, 选择健康藻体, 用镊子仔细除去表面附着的杂藻, 最后用大量消毒海水冲洗以后, 放在室内水族箱扩大培养, 海水经煮沸消毒后添加 PES 加富培养基。培养条件为 $22 \pm 1^\circ\text{C}$, 光照强度 4 000 lx, 光周期 12L : 12D, 盐度 21 (自然海水经蒸馏水稀释), pH 为 8.0。在正式开始分组实验前, 将江蓠在煮沸消毒后

收稿日期: 2005-10-20; 修回日期: 2006-03-10

基金项目: 江苏省社会发展基金资助项目 (BS2002016)

作者简介: 黄鹤忠, (1962-), 男, 江苏海门人, 副教授, 在读博士, 从事水生生物生理生态研究, 电话: 0512-62276802,

E-mail: suda-shui@163.com, huanghz@suda.edu.cn

的天然海水中(不加 PES)培养 10 d 至培养液中 N 消耗尽后,用于正式实验用水,同时,藻体色泽逐渐变淡黄色,使藻体呈饥饿状态。分组后在各自硝态氮浓度下先预培养 4 h 并更换培养液后,正式开始生长、生理和生化等实验。

1.2 生长实验的设计与测定方法

实验设置了 6 个硝态氮(NO_3^- -N)浓度组(0, 10, 20, 40, 60, 80 $\mu\text{mol/L}$), 每组分别设 3 个平行, 各组氮以外的其它营养成分一律采用 *f/2* 营养盐, 其它实验环境条件同扩大培养条件, 采用 250 mL 烧杯(200 mL 培养液), 每个烧杯中加入相同部位的江蓠 0.5 g, 每天更换培养液, 培养 10 d。用滤纸吸干藻体表面的水分, 称湿质量; 藻体于 70 $^{\circ}\text{C}$ 恒温干燥 48 h 干质量。用下列公式计算特定生长率 $R_{\text{SG}}=[(W_t / W_0)^{1/t}-1] \times 100\%$, 其中 W_0 为初始江蓠的鲜质量, W_t 为实验结束时江蓠的鲜质量, t 为实验持续的天数。

1.3 生化组分实验的设计与测定方法

江蓠的分组和培养方法同上, 培养 3 d 后按以下方法测定藻体内藻红素(PE)、叶绿素 a、碳水化合物及蛋白质的含量。

藻红素含量测定, 用纯水快速冲洗藻体, 用滤纸吸干水分, 取 0.15 g(湿质量)加 2 mL 0.1 mol/L 磷酸缓冲液(pH6.5), 小研钵冰浴匀浆, 台式离心机低温 (4 $^{\circ}\text{C}$) 4 000 r/min 离心 20 min, 沉淀用于叶绿素 a 的分析, 取上清液以磷酸缓冲液为空白, 测 565 nm 处的光密度。藻红素(PE)含量的计算用下列公式^[2]: $c(\text{PE})=12.4 \times A_{565} \times V_e / (I \times W_d \times 1000)$, 其中 $c(\text{PE})$ 为藻红素浓度(mg/g); 12.4 为藻红素吸收系数的倒数(mg/L); A_{565} 为 565 nm 处的光密度值; V_e 为萃取液的体积(3 mL); I 为比色皿光径(cm); W_d 为藻体的干质量。

叶绿素 a 含量测定, 参考 Moran 等^[3]方法, 将上述沉淀物加入 3 mL N,N-二甲基甲酰胺(DMF), 4 $^{\circ}\text{C}$ 萃取 24 h, 4 000 r/min 离心 10 min, 以 DMT 为空白, 测 625、647、664 和 750 nm 处的光密度, 750 nm 处的光密度用于校正其它物质的吸收值。计算叶绿素 a(Chla)含量的公式为: $\text{Chla}=(12.65A_{664}-2.99A_{647}-0.04A_{625}) \times V_e / (I \times W_d \times 1000)$, 其中 Chla 为叶绿素 a 浓度(mg/g); A_{565} 、 A_{647} 、 A_{625} 分别是 625、647 和 664 nm 处的光密度值; V_e 为萃取液的体积(3 mL); I 为比色皿光径 (cm); W_d 为藻体的干质量。。

碳水化合物含量采用硫酸法^[4]测定, 碳水化合物的含量($\%$)= $C \times V / W \times 1000 \times a$, 其中 C 为葡萄糖标准曲

线中查得的值(μg); V 为样品提取液体积(mL); a 为显色时取样品液量(mL); W 为样品质量(g)。

蛋白质含量测定, 取 0.2 g 藻(湿重), 冰浴研磨, 离心, 考马斯亮蓝法测定^[5]。样品中蛋白质的含量($\mu\text{g/g}$)= $C \times V_t / V_1 \times W_f \times 1000$, 其中 C 为查得的小牛血清标准曲线值(μg); V_t 为提取液总体积(mL); W_f 为样品鲜质量(g); V_1 为测定时加样量(mL)。

碳水化合物和蛋白质的含量均以占干质量的%表示。

1.4 统计分析

将所有测定数据用 SPSS10.0 软件包按单因子方差统计方法分析各组间生长和生化指标的差异显著性。

2 结果

2.1 不同 NO_3^- -N 浓度对江蓠生长及生化组成的影响

由表 1 可以看出, 在 NO_3^- -N 浓度为 0 $\mu\text{mol/L}$ 时, 其 SGR 最低, 为 0.81%, 江蓠生长缓慢; NO_3^- -N 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 时, 江蓠的 R_{SG} 为 7.61%, 显著高于其他各组($P < 0.05$); NO_3^- -N 浓度 ≤ 20 $\mu\text{mol/L}$ 时, 江蓠 R_{SG} 随着 NO_3^- -N 浓度的增加而逐渐升高($P < 0.05$); 而当 NO_3^- -N 浓度 ≥ 20 $\mu\text{mol/L}$ 时, 江蓠 R_{SG} 随着 NO_3^- -N 浓度的增加而显著降低($P < 0.05$)。由表 1 还可以看出, 江蓠体内藻红素、叶绿素 a 的含量随水体中 NO_3^- -N 浓度的变化规律是一致的, 其藻红素和叶绿素 a 含量由高到低所对应的环境 NO_3^- -N 浓度依次为 20=40>60>80>10>0($\mu\text{mol/L}$) ($P < 0.05$)。表 1 还显示, 江蓠体内蛋白质和碳水化合物的含量随水体中 NO_3^- -N 浓度的变化规律恰好相反, 水体中 NO_3^- -N 浓度为 20 $\mu\text{mol/L}$ 时江蓠体内蛋白质含量最高而碳水化合物的含量最低($P < 0.05$); 水体中 NO_3^- -N 浓度为 0 $\mu\text{mol/L}$ 时江蓠体内碳水化合物的含量最高而蛋白含量最低($P < 0.05$)。

2.2 不同 NH_4^+ -N 浓度对江蓠生长及生化组成的影响

由表 2 显示, 江蓠 R_{SG} 、藻红素含量、叶绿素 a 含量、蛋白质含量及碳水化合物含量随 NH_4^+ -N 浓度的变化规律与随 NO_3^- -N 浓度的变化规律(表 1)基本相同, 江蓠 R_{SG} 、由高到低随 NH_4^+ -N 浓度的变化规律依此为: 5>10>20>2.5=40>0($\mu\text{mol/L}$) ($P < 0.05$)。

表 1 不同 NO₃⁻-N 浓度对江蕨生长及生化组成的影响

Tab.1 The growth and biochemical constituents of the *Gracilaria* at different levels of NO₃⁻-N

含量	硝氮浓度(μmol/L)					
	0	10	20	40	60	80
R _{sg} (%)	0.81±0.19 ^c	5.06±0.13 ^d	7.68±0.23 ^a	7.04±0.21 ^b	6.53±0.12 ^c	5.17±0.13 ^d
藻红素(mg/g)	6.03±0.10 ^e	9.32±0.11 ^d	13.60±0.12 ^a	13.36±0.08 ^a	12.41±0.09 ^b	10.23±0.06 ^c
Chla(mg/g)	2.12±0.12 ^e	2.87±0.31 ^d	4.03±0.15 ^a	3.90±0.08 ^a	3.59±0.03 ^b	3.21±0.11 ^c
蛋白质(%)	12.01±0.16 ^f	15.14±0.14 ^e	17.32±0.21 ^a	16.03±0.23 ^b	14.30±0.18 ^d	13.21±0.24 ^e
碳水化合物(%)	51.26±0.16 ^a	47.91±0.24 ^e	44.11±0.21 ^f	45.70±0.16 ^e	47.06±0.11 ^d	49.31±0.21 ^b
碳水化合物/蛋白质	4.27	3.16	2.55	2.85	3.29	3.73

注：同一行数据右上角不同小写字母表示有显著差异(P<0.05)，表2,3同。

水体 NH₄⁺-N 浓度为 5 和 10 μmol/L 时江蕨体内藻红素、叶绿素 a 的含量显著高于其他各浓度组(P<0.05)；水体 NH₄⁺-N 浓度为 5 μmol/L 时，江蕨体内蛋白质的含量在各组中最高而碳水化合物的含量为最低(P<0.05)。

表 2 不同 NH₄⁺-N 浓度对江蕨生长及生化组成的影响

Tab.2 The growth and biochemical constituents of the *Gracilaria* at different levels of NH₄⁺-N

含量	铵氮浓度(μmol/L)					
	0	2.5	5	10	20	40
R _{sg} (%)	0.81±0.21 ^c	4.01±0.20 ^d	6.52±0.17 ^a	5.58±0.16 ^b	4.74±0.17 ^c	3.88±0.15 ^d
藻红素(mg/g)	6.11±0.13 ^c	8.30±0.11 ^b	9.61±0.13 ^a	9.23±0.11 ^a	8.35±0.07 ^b	6.22±0.05 ^c
Chla(mg/g)	2.09±0.17 ^d	2.57±0.27 ^c	3.53±0.14 ^a	3.51±0.26 ^a	3.07±0.13 ^b	2.53±0.12 ^c
蛋白质(%)	13.17±0.13 ^c	14.81±0.24 ^b	15.96±0.17 ^a	14.65±0.25 ^b	14.57±0.14 ^b	11.32±0.26 ^d
碳水化合物(%)	49.75±0.14 ^a	47.62±0.31 ^b	43.72±0.25 ^e	45.94±0.13 ^d	46.46±0.18 ^c	47.34±0.23 ^b
碳水化合物/蛋白质	3.78	3.22	2.71	3.14	3.19	4.18

2.3 不同 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 对江蕨生长及生化组成的影响

从表 3 可知，随着水体 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 比值的逐渐增加，江蕨 R_{sg}、藻红素含量、叶绿素 a 含量、蛋

白质含量均呈现先升高后下降的趋势。当 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 为 2/7 时，江蕨 R_{sg}、藻红素含量、叶绿素 a 含量、蛋白质含量最高且均显著地高于其他

表 3 不同 NH₄⁺-N/NO₃⁻-N 比值对江蕨生长及生化组成的影响(n=3)

Tab.3 The growth and biochemical constituents of the *Gracilaria* at different levels of NH₄⁺-N/NO₃⁻-N

含量	铵氮/硝氮比				
	1/35	1/7	2/7	3/7	4/7
R _{SG} (%)	7.20±0.13 ^c	7.88±0.13 ^b	8.41±0.11 ^a	7.13±0.13 ^c	6.17±0.12 ^d
藻红素(mg/g)	13.62±0.09 ^e	14.43±0.10 ^b	15.25±0.11 ^a	11.54±0.08 ^d	11.26±0.07 ^d
Chla(mg/g)	4.02±0.15 ^c	4.53±0.15 ^b	4.96±0.09 ^a	3.89±0.07 ^c	3.01±0.09 ^d
蛋白质(%)	17.45±0.17 ^c	18.34±0.15 ^b	19.72±0.20 ^a	17.33±0.16 ^c	14.27±0.19 ^d
碳水化合物(%)	45.83±0.12 ^e	44.14±0.18 ^d	46.75±0.15 ^b	46.91±0.24 ^b	49.35±0.31 ^a
碳水化合物/蛋白质	2.63	2.41	2.37	2.71	3.46

各组($P<0.05$); 而当 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 为 4/7 时, 则上述指标均为最低。由表 3 显示, 江蓠体内碳水化合物含量对水体中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 比值变化的响应规律与蛋白质含量等的响应规律有所不同, 江蓠体内碳水化合物含量最高或最低所对应的水体中 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 值分别为 4/7 ($P<0.05$)和 1/7 ($P<0.05$)。

3 讨论

从本实验结果可以看出, 水体中不同 NH_4^+-N 浓度、 NO_3^--N 浓度和 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 对江蓠生长及生化组成具有显著影响。江蓠分别在 NO_3^--N 20 $\mu\text{mol/L}$ 、 NH_4^+-N 5 $\mu\text{mol/L}$ 、 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 2/7 (TIN 20 mol/L) 的营养环境条件下, 可获得最快生长速率和最大的 PE、叶绿素 a、蛋白质含量以及最低的碳水化合物/蛋白质比值。水体中过高或过低的 NH_4^+-N 浓度、 NO_3^--N 浓度和 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 均不利于江蓠生长, 同时藻体内藻红素(PE)、叶绿素 a 和蛋白质的含量相应降低, 而江蓠体内碳水化合物含量和碳水化合物/蛋白质随之增高。这与邱昌恩等^[6]在高 N 条件下(4.500~30.000 g/L)培养的绿球藻(*Chlorococcum* sp.)生长减缓甚至停滞, 并且绿球藻 Chla+Chlb 的含量呈逐渐减少趋势的结果相似。

江蓠在单独以 NH_4^+-N 为氮源时的最大 R_{sg} 为 6.52%(NH_4^+-N 5 $\mu\text{mol/L}$), 比单独以 NO_3^--N 为氮源时的最大 R_{sg} 7.68% (NO_3^--N 20 $\mu\text{mol/L}$)低 15.10%, 更比混合铵硝氮源时的最大 R_{sg} 8.41% ($\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 为 2/7, TN 20 $\mu\text{mol/L}$)低了 22.47%, 与颜天等^[7,8]报道的 NH_4^+-N (550 $\mu\text{mol}/\text{dm}^3$)使微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)、海洋原甲藻(*Prorocentrum mican*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、海洋角管藻(*Cerataulina pelagica*)和微小细柱藻(*Leptocylindrus minimus*) 停止生长^[7,8] 的情形和张清春等^[9]报道在氮饥饿条件下加入硝酸钠能显著促进微小亚历山大藻(*Alexandrium tamarense*)的生长, 而高浓度的氯化铵对微小亚历山大藻有一定的毒性效应, 表现为生长停滞的研究结果相似。高浓度 NH_4^+-N 会抑制藻类生长的原因可能是高浓度的 NH_4^+-N 处理使植物的耗氧量增加 41%, 推测把 NH_4^+ 从胞内运出细胞时要耗费巨大的能量^[11]; 可以推测, 水体 NH_4^+-N 含量的升高, 对江蓠会形成氨逆境胁迫, 产生氨害, 从而影响了江蓠的正常生理活动, 使生长减慢, 作者在供氮种类和水平对江蓠抗

氧化酶活性影响的研究中也得到了证实(另文报道)。

适宜比例的铵硝氮混合氮源相比单一的 NO_3^--N 或 NH_4^+-N 氮源而言, 不但更有利于江蓠的生长, 而且其体内藻红素和蛋白质含量较高, 同时碳水化合物/蛋白质比值较低, 暗示在适合的混合铵硝氮源条件下江蓠体内氮代谢途径有利于通过合成谷酰胺途径进行解毒^[12]并向蛋白质方向转化。由于细基江蓠蛋白质含量在一定程度上反映了其体内色素含量和酶水平^[10], 因而, 水体适宜的氮营养供应有利于海藻体内光合色素的形成和生理活性酶等蛋白质的含量的提高。

尽管江蓠对 NH_4^+-N 的吸收速率要比 NO_3^--N 大, 并存在优先吸收 NH_4^+-N 的现象^[13], 但是单一的 NH_4^+-N 或高比例的 $\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{NO}_3^--\text{N}$ 反而比单一 NO_3^--N 供应更不利于江蓠的光合色素积累和生长, 这可能是由于 NO_3^--N 是海洋溶解态无机氮(DIN) 中最主要的组成成分, 存在的量通常远高于 NH_4^+-N 及 NO_2^--N 。大量研究表明, 硝酸盐是许多海区藻类生长的主要原料, 藻类可利用周围环境中的硝酸盐作为氮源, 经过一系列酶的还原作用, 将硝酸盐一步步转化为氨氮后, 作为合成有机物质的原料^[14]。本实验结果也证明, 尽管许多大型海藻对环境中营养盐的变动产生了很好的适应性, 它们在外界营养盐丰富的情况下对其吸收的最大速率远远大于维持最大生长速率所需要的氮, 从而积累了丰富的体内营养库以备环境中营养盐不足时用于生长的需求^[13], 而非立即全部用于体内的代谢和生长。

参考文献:

- [1] Carpenter E J, Capone D G. Nitrogen in the Marine Environment[M]. New York: Academic Press, 1983. 487 – 512.
- [2] 戴维斯 C, J. 海洋植物学[M]. 厦门大学植物生态学研究室译. 厦门: 厦门大学出版社, 1989. 258.
- [3] Moran R. Formulae for determination of Chlorophyllous pigments extracted with N, N-dimethylformamide[J]. *Plantphysiol*, 1982, 69: 1 376 – 1 381.
- [4] Dubios M K. Colorimetric method for determination of sugar and related substances[J]. *Anlyt Chem*, 1956, 28: 350 – 356.
- [5] 邹崎. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000, 129.
- [6] 邱昌恩, 况琪军, 刘国祥, 等. 不同氮浓度对绿球藻生长

- 及生理特性的影响[J]. 中国环境科学, 2005, **25**(4): 408 – 411.
- [7] 颜 天, 周名江, 邹景忠, 等. 香港及珠江口海域有害赤潮发生机制初步探讨[J]. 生态学报, 2001, **21**(10): 1. 634 – 1. 641.
- [8] YAN Tian , ZHOU Ming-jiang , QIAN Pei-yuan. The effect of nitrogen substrates on growth of several redtide species[J]. *Acta Oceanologica Sinica* , 2002 , **21**(3): 461-467.
- [9] 张青春, 于仁诚, 周名江, 等. 不同氮源对微小亚历山大藻生长和毒素产生的影响[J]. 海洋学报(中文版), 2005, **27**(6): 138 – 145.
- [10] 刘静雯, 董双林. 光照和温度对细基江蓠繁枝变型的生长及生化组成影响[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, **31**(3): 332 – 338.
- [11] Serio F, Elia A, Signore A, Santamaria P. Influence of nitrogen form on yield and nitrate content of subirrigated early potato[J]. *J Sci Food Agric*. 2004, 84: 1 428 – 1 432.
- [12] Rios-Gonzalez K, Erdei L, Lips SH. The activity of antioxidant enzymes in maize and sunflower seedlings as affected by salinity and different nitrogen sources[J]. *Plant Sci*, 2002, 162: 923 – 930.
- [13] 许忠能, 林小涛, 林继辉, 等. 营养盐因子对细基江蓠繁枝变种氮、磷吸收速率的影响.生态学报, 2002, **22**(3): 366 – 374.
- [14] Leanne Joseph , Tracy A , Villareal , et al. A high sensitivity nitrate reductase assay and its application to vertically migrating Rhizosoleniamats[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1997,12: 95 – 104.

Effects of different inorganic nitrogen sources and concentrations on the growth and biochemical constituents of *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang *et* Xia

HUANG He-Zhong, SUN Jv-Yan, SHEN Hua, WANG Yong-Ling

(Institute of Life Science, Suzhou University, Fisheries Research Institute of Suzhou University, Suzhou 215123, China)

Received: Oct., 20, 2005

Key words: inorganic nitrogen, *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang *et* Xia, growth, biochemical constituent

Abstract: In order to investigate the effects of different inorganic nitrogen sources and concentrations on the growth and the biochemical constituents in macroalgae, *Gracilaria tenuistipitata* var. *liui* Zhang *et* Xia was cultured with varied nitrogen sources (NO_3^- -N, NH_4^+ -N and NH_4^+ -N/ NO_3^- -N) and at different concentrations in laboratory. The results showed that *Gracilaria* growth was inhibited considerably ($P < 0.05$) and the contents of PE, Chl-a and protein were respectively lower than those of control ($P < 0.05$) when NO_3^- -N concentrations were 0, 10, 60 and 80 $\mu\text{mol/L}$, or when NH_4^+ -N concentrations were 0, 2.5, 10, 20 and 40 $\mu\text{mol/L}$, or when levels of NH_4^+ -N/ NO_3^- -N were 1/35, 1/7, 3/7 and 4/7. At suitable nitrogen environment (NO_3^- -N 20 $\mu\text{mol/L}$, NH_4^+ -N 5 $\mu\text{mol/L}$, NH_4^+ -N/ NO_3^- -N 2/7 and TIN 20 $\mu\text{mol/L}$), the *Gracilaria* showed the best growth and the highest levels of PE, Chl-a and protein and the lowest value of carbohydrate/protein ratio compared with other groups ($P < 0.05$), respectively.

(本文编辑: 梁德海)