

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2012.00462

不同营养盐浓度对 3 种大型红藻氮、磷吸收及其生长的影响

李恒^{1,2}, 李美真¹, 徐智广¹, 王翔宇¹, 曹婧²

1. 山东省海水养殖研究所 藻类中心实验室, 山东 青岛 266002;

2. 中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266100

摘要: 在实验室条件下, 以 3 种大型红藻真江蓠(*Gracilaria asiatica*)、脆江蓠(*Gracilaria chouae*)和蜈蚣藻(*Grateloupia filicina*)为实验材料, 研究不同营养盐浓度下这 3 种海藻对氮、磷的吸收和生长情况。结果表明, 3 种大型海藻对水体中硝酸盐和磷酸盐的吸收效果明显, 并符合一级动力学方程。比较前 24 h 对氮的平均吸收速率, 真江蓠和脆江蓠在 50 $\mu\text{mol/L}$ 组出现最大值, 分别为 0.739 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 和 0.648 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 蜈蚣藻在 20 $\mu\text{mol/L}$ 组出现最大值 0.614 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$; 比较前 24 h 对磷的吸收速率, 真江蓠和脆江蓠在 1.0 $\mu\text{mol/L}$ 组出现最大值, 分别为 0.015 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 和 0.018 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$, 蜈蚣藻在 0.7 $\mu\text{mol/L}$ 组出现最大值 0.016 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。结合去除速率常数来看, 脆江蓠对硝酸盐和磷酸盐有更好的去除效果。营养盐的起始浓度对脆江蓠、真江蓠和蜈蚣藻的生长具有明显的影响。在所有的实验浓度下, 8 d 后的湿重均为脆江蓠增加最大, 蜈蚣藻增加最小; 并且改变硝酸盐的浓度比改变磷酸盐的浓度更能刺激蜈蚣藻的生长。

关键词: 真江蓠; 脆江蓠; 蜈蚣藻; 吸收动力学; 相对增长率

中图分类号: X171

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2012)03-0462-09

近年来, 中国近海水域富营养化日趋严重, 已对近海环境造成极大破坏。究其来源, 一方面由于城市及工业用水排放的逐年增多, 另一方面来自于高速发展的近海养殖业产生的污染。防治水体富营养化的根本措施在于控制和减少海水中氮(N)、磷(P)等营养物质的负荷^[1]。而国内外众多研究普遍表明, 在大部分海区藻类生长以硝酸盐作为主要 N 源^[2], 磷酸盐作为主要 P 源, 因此大型海藻能够快速吸收环境中的营养盐, 在满足自身生长需要的同时, 也可以起到去除水体中过剩营养盐、减少水体污染的作用, 此外还能实现养殖污染物的资源化利用。Kraemer 等^[3]研究发现, 紫菜(*Porphyra amplissima*)在体内 N、P 含量很高的情况下也能保持较高的 N、P 吸收速率, 并快速生长, 大大提高其去污能力; 刘静雯等^[4]利用多瓶

法和干扰法相结合的技术研究了细基江蓠(*Gracilaria tenuistipitata*)和孔石莼(*Ulva pertusa* Kjellman)对氨氮的吸收; 徐姗楠等^[5]利用网箱内栽培江蓠的混合生态养殖模式, 对养殖区的富营养化海水进行修复, 取得较好的效果。目前有关大型海藻与海洋环境的相互关系研究, 已引起国内外学者的广泛关注, 对大型海藻的研究和开发利用, 已经在国际上蓬勃发展起来。

真江蓠(*Gracilaria asiatica*)、脆江蓠(*Gracilaria chouae*)和蜈蚣藻(*Grateloupia filicina*)都属于红藻中具有较高经济价值的种类, 具有生长快、分布广的特点, 可以食用、药用, 同时也是制造琼胶的重要原料。本研究比较了在不同营养盐浓度下这 3 种海藻对 N、P 的吸收特点以及不同营养盐浓度对其生长的影响, 以期为其作为生物修复种群的

收稿日期: 2011-07-10; 修订日期: 2011-10-12.

基金项目: 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(200905019-2, 200905020-2); 山东省科技攻关计划项目(2009GG10005012).

作者简介: 李恒(1980-), 男, 实验师, 主要从事海洋生态学研究. E-mail: liheng@ouc.edu.cn

通信作者: 李美真, 研究员, 主要从事海藻生物学及生物修复技术研究. E-mail: li-meizhen@163.com

实际应用以及进一步的人工养殖提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料与预培养

真江蓠和蜈蚣藻取自山东青岛小麦岛海域, 脆江蓠取自福建宁德罗源湾海域人工栽培区。选择健康藻体, 用过滤海水清洗并仔细去除表面附着物, 转入光照培养箱内进行预培养。培养液使用过滤灭菌海水(取自山东青岛小麦岛海域), 培养温度为 20℃, 光照强度 70 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 光照周期为 12L:12D。每 2 天更换 1 次培养液。

1.2 实验设计

1.2.1 不同硝酸盐浓度下大型海藻生长实验 选择健康一致的藻体作为实验材料。实验温度、光照等同预培养阶段。取 (1 ± 0.005) g(湿重)的藻体置于 1 L 的锥形瓶中, 初始培养液体积为 700 mL, 每个条件设置 3 个平行样。培养液采用高温灭菌的过滤海水[其中硝酸盐浓度为 (10.118 ± 0.201) $\mu\text{mol}/\text{L}$ 、磷酸盐浓度为 (0.209 ± 0.003) $\mu\text{mol}/\text{L}$], 添加氮(硝酸盐)的初始浓度梯度分别为 0、10、20、30、50 $\mu\text{mol}/\text{L}$, 除氮外其他元素均采用 f/2 配方加富。实验共进行 8 d, 各实验组每隔 24 h 取样 1 次(6 d 后每隔 48 h 取样 1 次), 每次取样时称量藻体湿重, 并取 10 mL 培养液用 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜过滤, 滤液于 -20℃ 冷冻保存, 待测定其营养盐含量。

1.2.2 不同磷酸盐浓度下大型海藻生长实验 磷酸盐的起始浓度梯度分别为 0、0.2、0.4、0.7、1.0 $\mu\text{mol}/\text{L}$, 除磷酸盐外其他营养元素均采用 f/2 配方加富。其余实验条件及取样方法同 1.2.1。

1.3 样品分析及数据处理

硝酸盐和磷酸盐浓度用营养盐自动分析仪(QUAARO, Bran-Luebbe, 德国)进行测定, 其中磷酸盐的检测限为 0.020 $\mu\text{mol}/\text{L}$, 变异系数 0.2%; 硝酸盐的检测限为 0.030 $\mu\text{mol}/\text{L}$, 变异系数 0.3%。吸收速率的计算公式如下^[6]:

$$U = (C_0 - C_t) \times V / (t \times G)$$

式中: U 为营养盐的吸收速率, C_0 为实验结束时对照培养液中营养盐浓度, C_t 为实验结束时实验

组培养液中的营养盐浓度, V 为所用培养液体积, t 为实验时间, G 为添加海藻的湿重。

藻体湿重是在拭干藻体表面附着的水分后用精确度为 0.1 mg 的电子天平进行称量。藻体湿重相对生长率(relative growth rate, RGR, %/d)的计算公式如下^[7]:

$$\text{RGR} = \ln(W_t / W_0) / t \times 100$$

式中: W_0 是初始湿重, W_t 是 t 时刻的湿重。

文中数据在 Origin8.0 软件下进行拟合, 在 SPSS12.0 软件下进行统计分析, 用 one-way ANOVA 检验组间差异, 以 0.05 作为差异的显著性水平。

2 结果与分析

2.1 不同 N、P 浓度下藻体对 N、P 的吸收

到实验结束时, 各浓度组培养液中的 N 均被完全吸收或接近 0 点。在不添加 N 的组中, 72 h 后真江蓠和脆江蓠对 N 的去除率分别为 90.7 % 和 98.4%; 而当添加的 N 浓度达到 50 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 时, 72 h 后两种藻对 N 的去除率分别仅为 76.7% 和 83.8%。蜈蚣藻相对变化较大, 24 h 后的去除率即达到 78.5%, 约为同浓度下其他两种藻的 2 倍, 而在高浓度组中去除率却低于其他两种藻。由此可见单位藻体在单位时间内对硝酸盐的吸收能力有限, 当水体中 N 浓度增大时, 相同培养时间内, 去除率逐渐降低。静态培养下营养盐的变化可采用一级动力学方程^[8]进行描述, 拟合结果见表 1。比较去除速率常数 k 可以看出, 真江蓠和脆江蓠对 N 的去除能力较为接近, 在各浓度下波动不大, 并随初始 N 浓度升高大致呈下降趋势。蜈蚣藻 k 值在初始 N 浓度 10 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 组达到最大值, 但随 N 浓度升高 k 值开始快速下降。

选取 3 种藻前 24 h 之内对 N 的吸收速率进行比较, 从图 1 可以看出, 真江蓠和脆江蓠对 N 的吸收速率随着各组 N 浓度的升高而升高, 最大吸收速率均发生在最高 N 浓度组(N5), 分别为 0.739 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和 0.648 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$; 并且真江蓠的吸收速率除未添加 N 组外, 均大于相同 N 浓度下的脆江蓠。蜈蚣藻则与前两种藻不同, 随着初始 N 浓度增大, 其吸收速率显著上升, 明显高于

表 1 真江蓠、脆江蓠和蜈蚣藻在不同初始 N 浓度下对 N 的吸收一级动力学拟合结果

Tab. 1 Kinetics characteristics of nitrogen uptake for *Gracilaria asiatica*, *Gracilaria chouae* and *Grateloupia filicina* in different initial nitrogen concentrations according to the first-order kinetic equation

n=3; $\bar{x} \pm SD$

藻种 macroalgae species	初始营养盐浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) C_0 initial nutrient concentration	去除速率常数/ h^{-1} k removal rate constant	R^2
真江蓠 <i>Gracilaria asiatica</i>	10.419±0.044	0.031±0.002	0.9988
	20.066±0.036	0.024±0.000	0.9995
	29.893±0.150	0.026±0.000	0.9995
	39.855±0.017	0.021±0.000	0.9995
	59.138±0.098	0.021±0.000	0.9997
脆江蓠 <i>Gracilaria chouae</i>	9.598±0.156	0.048±0.003	0.9995
	20.825±0.071	0.025±0.001	0.9989
	30.874±0.098	0.021±0.000	0.9998
	42.151±0.130	0.021±0.000	0.9998
	59.654±0.205	0.022±0.001	0.9994
蜈蚣藻 <i>Grateloupia filicina</i>	9.010±0.059	0.028±0.001	0.9998
	23.707±0.235	0.129±0.006	0.9991
	32.548±0.686	0.048±0.003	0.9951
	41.145±0.391	0.015±0.000	0.9784
	62.991±0.041	0.015±0.001	0.9967

其他两种藻($P<0.05$), 在 N3 组出现最大吸收速率 $0.614\ \mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$; 而当 N 浓度继续增大, 蜈蚣藻的吸收速率又开始快速下降, 且低于其他两种藻 ($P<0.05$)。

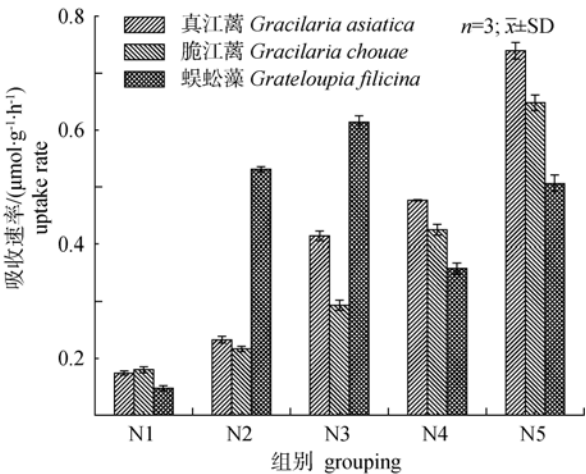


图 1 不同 N 浓度下真江蓠、脆江蓠和蜈蚣藻的吸收速率

N1–N5 依次代表初始 N 浓度分别为 0、10、20、30、50 $\mu\text{mol}/\text{L}$ 。

Fig.1 Nitrogen uptake rates of *Gracilaria asiatica*, *Gracilaria chouae* and *Grateloupia filicina* under different initial nitrogen concentrations

N1–N5 stand for groups with initial nitrogen concentration of 0, 10, 20, 30 and 50 $\mu\text{mol}/\text{L}$, respectively.

在各浓度下 3 种藻对 P 的吸收态势与对 N 的吸收态势较为相似, 在 144 h 后去除率均能达到 90%以上。其中蜈蚣藻波动范围更大, 在 P 初始浓度为 $0.4\ \mu\text{mol}/\text{L}$ 的组中, 24 h 后的去除率即可达到 76.4%; 而在 $1.0\ \mu\text{mol}/\text{L}$ 组中, 24 h 后的去除率仅为 31.9%。脆江蓠波动相对较小; 在 P 初始浓度为 $0.7\ \mu\text{mol}/\text{L}$ 的组中, 24 h 后的去除率为 59.0%; 在未添加 P 组, 24 h 后的去除率为 33.2%。由表 2 可见, 真江蓠各浓度下的去除速率常数 k 波动不大, 但比另外两种藻明显偏低。脆江蓠和蜈蚣藻的 k 值均呈现先随 P 浓度升高而升高, 随后又下降的特点。

从图 2 中可以看出, 真江蓠和脆江蓠对 P 的前 24 h 吸收速率同样随着初始 P 浓度的升高而升高, 最大吸收速率均发生在最高 N 浓度组(P5), 分别为 $0.015\ \mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 和 $0.018\ \mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$; 但两种藻对 P 的吸收与对 N 的吸收完全相反, 除去未添加 P 组外, 脆江蓠的吸收速率均大于相同浓度下的真江蓠。蜈蚣藻对 P 的吸收速率随着 P 浓度的升高先增大后减小, 也与对 N 的吸收特点相似, 在 P4 组($0.7\ \mu\text{mol}/\text{L}$)中出现最大吸收速率, 为 $0.016\ \mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ 。

表 2 真江蓠、脆江蓠和蜈蚣藻在不同起始 P 浓度下对 P 的吸收一级动力学拟合结果

Tab.2 Kinetics characteristics of phosphate uptake for *Gracilaria asiatica*, *Gracilaria chouae* and *Grateloupia filicina* in different initial phosphate concentrations according to the first-order kinetic equation

藻种 macroalgae species	初始营养盐浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) C_0 initial nutrient concentrations	去除速率常数/ h^{-1} k removal rate constant	$n=3; \bar{x} \pm \text{SD}$
			R^2
真江蓠 <i>Gracilaria asiatica</i>	0.209 $\pm$ 0.001	0.022 $\pm$ 0.001	0.9947
	0.382 $\pm$ 0.003	0.018 $\pm$ 0.000	0.9977
	0.537 $\pm$ 0.003	0.016 $\pm$ 0.000	0.9983
	0.758 $\pm$ 0.003	0.018 $\pm$ 0.000	0.9996
	1.030 $\pm$ 0.006	0.019 $\pm$ 0.000	0.9993
脆江蓠 <i>Gracilaria chouae</i>	0.213 $\pm$ 0.001	0.017 $\pm$ 0.004	0.9985
	0.419 $\pm$ 0.001	0.031 $\pm$ 0.001	0.9992
	0.658 $\pm$ 0.001	0.033 $\pm$ 0.000	0.9996
	0.847 $\pm$ 0.008	0.035 $\pm$ 0.001	0.9958
	1.191 $\pm$ 0.009	0.027 $\pm$ 0.000	0.9980
蜈蚣藻 <i>Grateloupia filicina</i>	0.204 $\pm$ 0.002	0.026 $\pm$ 0.000	0.9989
	0.412 $\pm$ 0.005	0.053 $\pm$ 0.002	0.9977
	0.684 $\pm$ 0.004	0.077 $\pm$ 0.001	0.9997
	0.883 $\pm$ 0.008	0.037 $\pm$ 0.002	0.9986
	1.213 $\pm$ 0.002	0.019 $\pm$ 0.001	0.9997

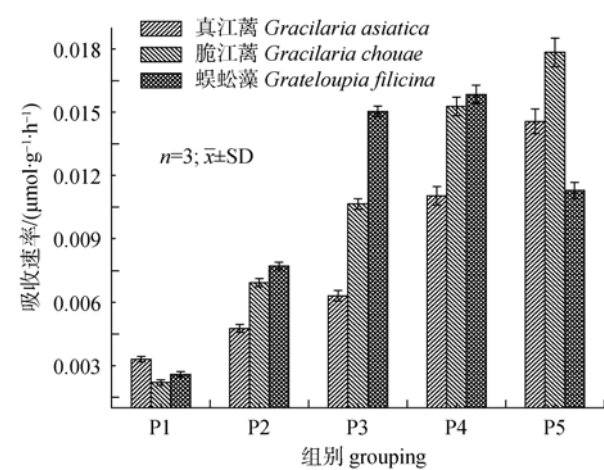


图 2 不同 P 浓度下真江蓠、脆江蓠和蜈蚣藻的吸收速率

P1-P5 依次代表初始 P 浓度分别为 0、0.2、0.4、0.7、1.0 $\mu\text{mol/L}$.

Fig.2 The uptake rates of phosphate in *Gracilaria asiatica*, *Gracilaria chouae* and *Grateloupia filicina* under the different initial phosphate concentrations

P1-P5 stand for groups with initial phosphate concentrations of 0, 0.2, 0.4, 0.7 and 1.0 $\mu\text{mol/L}$, respectively.

2.2 不同 N、P 浓度下藻体的生长

由图 3 可见, 在不同初始 N 浓度下, 脆江蓠的生长趋势基本一致, 藻体湿重在整个实验阶段随时间延长持续增加, 且均处于快速增长阶段。

至培养结束时, 脆江蓠初始 N 浓度最高的组(50 $\mu\text{mol/L}$)湿重增加量最大, 达到 54.6%(图 3e), 而在初始 N 浓度次高的组(40 $\mu\text{mol/L}$)湿重增加量最小, 为 44.4%(图 3d), 不同 N 浓度下平均增重率为 49.0%。真江蓠在实验初期(0~4 d)与脆江蓠的生长趋势大致相似, 处于快速增长阶段, 但各组增长幅度均低于脆江蓠; 实验后期(4~8 d)进入缓慢增长期。与脆江蓠不同的是, 真江蓠在不添加 N 的组湿重增加量最大, 达到 37.3%(图 3a), 而在初始 N 浓度为 10 $\mu\text{mol/L}$ 的组湿重增量最小, 为 17.9%(图 3b)。不同 N 浓度下真江蓠的增重率平均为 26.8%, 明显低于脆江蓠。蜈蚣藻在各浓度下的湿重增加量是 3 种藻当中最低的, 生长趋势也与其他两种藻较为不同, 在培养的第 1 天出现快速增长, 随后进入缓慢生长期。并且随着初始 N 浓度的增高, 蜈蚣藻在培养第 1 天的增长量也随之增大, 第 1 天结束时, 高浓度组中蜈蚣藻的湿重甚至超过其他两种藻。蜈蚣藻的湿重增加量随初始 N 浓度的增加而增大, 在 50 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下增重率最高, 为 28.7%(图 3e), 在 0 $\mu\text{mol/L}$ 浓度下增重最小, 为 6.7%(图 3a), 不同 N 浓度下平均增

重率为 16.4%。对比 3 种藻在不同 N 浓度下的生长情况可以看出, 两种江蓠的增重率与初始 N 浓度无相关性($P>0.05$), 而蜈蚣藻的生长率则与初始 N 浓度成正相关关系($P<0.05$)。

从图 4 中可以看出, 在不同 P 初始浓度下, 脆江蓠的湿重也呈现出随时间持续增长的趋势, 并且随着初始 P 浓度的增大, 其增长幅度也随之增大。至培养结束时, 脆江蓠在初始 P 浓度最大的

组($1.0 \mu\text{mol/L}$)增重最大, 达到 57.3%(图 4e), 不添加 P 的组增重最小, 为 32.6%(图 4a), 不同 P 浓度下脆江蓠的湿重平均增加 45.8%。真江蓠在实验初期增长较快, 在低浓度组中其湿重超过相同时间脆江蓠的湿重; 当培养进入第 4 天以后, 真江蓠的湿重开始进入生长平台期, 增长变缓, 使得在实验结束时的湿重低于脆江蓠。真江蓠的湿重在初始 P 浓度为 $0.4 \mu\text{mol/L}$ 时增量最大, 为

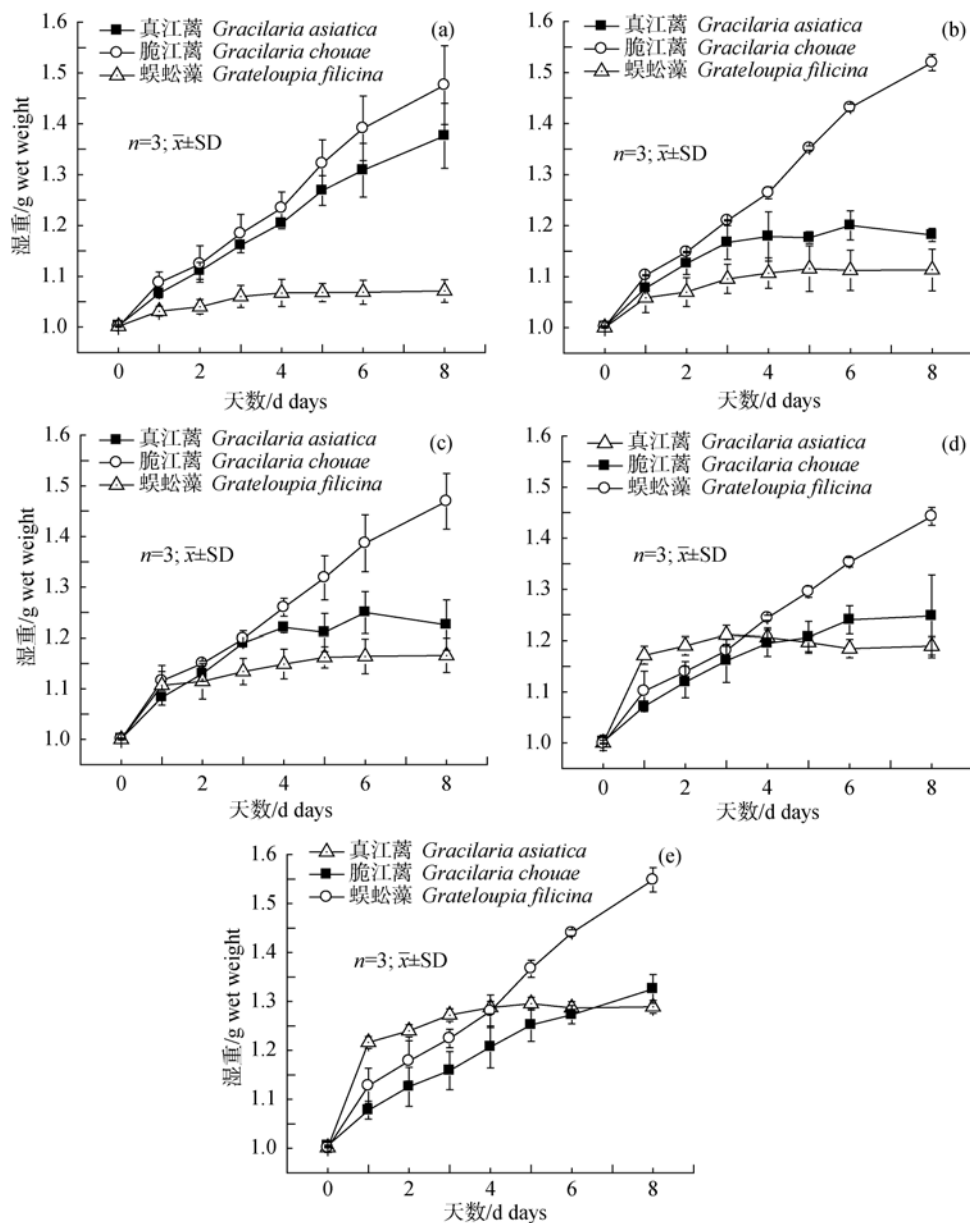


图 3 不同硝酸盐浓度下真江蓠、脆江蓠和蜈蚣藻湿重随时间的变化

a, b, c, d 和 e 代表的硝酸盐浓度分别为 0、10、20、30、50 $\mu\text{mol/L}$ 。

Fig.3 The variation of wet weight of *Gracilaria asiatica*, *Gracilaria chouae* and *Grateloupia filicina* under different initial nitrate concentrations

a, b, c, d and e stand for the groups with initial nitrate concentrations of 0, 10, 20, 30 and 50 $\mu\text{mol/L}$, respectively.

35.5%(图 4c), 当初始 P 浓度最大(1.0 $\mu\text{mol/L}$)时, 真江蓠的增重最小, 为 27.2%(图 4e), 不同 P 浓度下真江蓠的湿重平均增长 31.5%。蜈蚣藻在不同 P 浓度下的增长趋势与其在不同 N 浓度下的增长趋势较为相似, 也是在培养开始时湿重增加较快, 而随后出现了生长的平台期, 只是随着 P 浓度的增高, 到达平台期的时间不断后移。另外蜈蚣藻的湿重增加量也随着初始 P 浓度的增大而增加,

最高浓度组增重 23.5%(图 4e), 最低浓度组增重 17.3%(图 4a), 不同 P 浓度下平均增重为 21.3%。

从图 5 中可以看到, 在 N、P 两组实验中, 3 种藻在各实验浓度下的相对生长速率(RGR)由高到低均依次为脆江蓠、真江蓠、蜈蚣藻。脆江蓠在不同 P 浓度下的相对生长速率变化范围为 3.5~5.6 %/d, 并且随添加 P 浓度增大呈增大的趋势; 而在不同 N 浓度中的相对生长速率无明显变

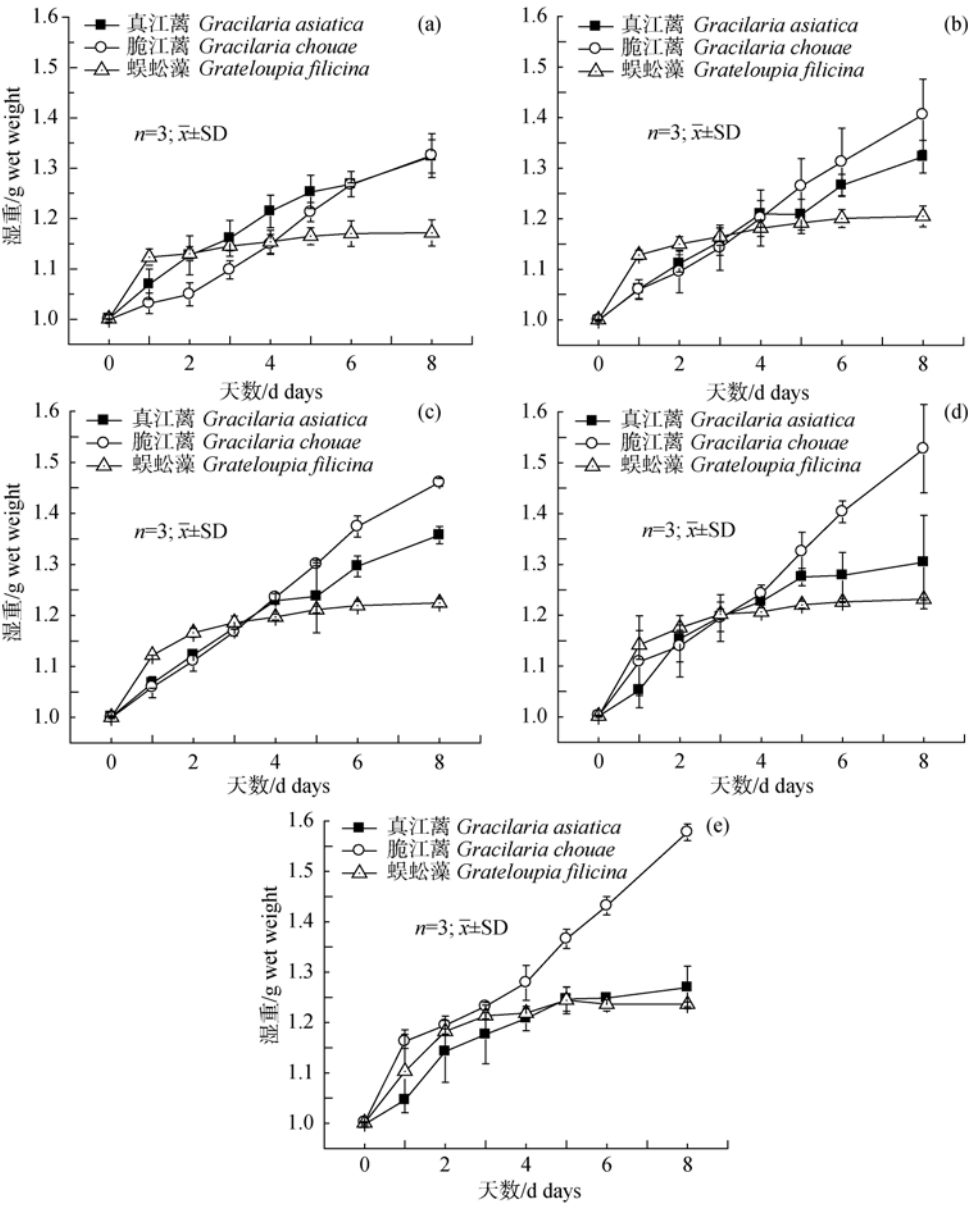


图 4 不同 P 浓度下真江蓠、脆江蓠和蜈蚣藻湿重随时间的变化

a, b, c, d 和 e 代表磷酸盐初始浓度分别为 0.2、0.4、0.7、1.0 $\mu\text{mol/L}$.

Fig.4 The variation of wet weight of *Gracilaria asiatica*, *Gracilaria chouae* and *Grateloupia filicina* in different initial phosphate concentrations
a, b, c, d and e stand for groups with initial phosphate concentrations of 0, 0.2, 0.4, 0.7 and 1.0 $\mu\text{mol/L}$, respectively.

化规律,且波动范围较小,为 4.6~5.4%/d。真江蕨的相对生长速率在不同 N 浓度下随 N 浓度的增加而增大(除去不添加 N 的组),变化范围为 2.0~3.5%/d;但其相对生长速率随 P 浓度的升高却呈现下降趋势,且整体波动范围较小,为 3.0~3.8%/d。蜈蚣藻的相对生长速率与 N 和 P 的浓度均呈现正相关,并且在不同 N 浓度下相对生长速率变化较大,为 0.8~3.2%/d;而在不同 P 浓度下波动范围较小,为 2.0~2.6%/d。

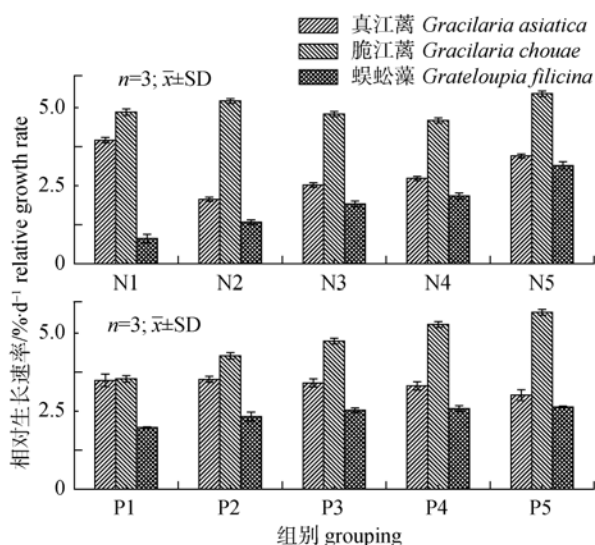


图 5 不同 N、P 初始浓度下真江蕨、脆江蕨和蜈蚣藻的相对生长率

其中横坐标 N1~N5 依次代表初始 N 浓度分别为: 0、10、20、30、50 $\mu\text{mol/L}$, P1~P5 依次代表初始 P 浓度分别为: 0、0.2、0.4、0.7、1.0 $\mu\text{mol/L}$ 。

Fig.5 The relative growth rate of *Gracilaria asiatica*, *Gracilaria chouae* and *Grateloupia filicina* in different initial nutrient concentrations
N1~N5 stand for groups with initial nitrogen concentrations of 0, 10, 20, 30 and 50 $\mu\text{mol/L}$, respectively. P1~P5 stand for groups with initial phosphate concentrations of 0, 0.2, 0.4, 0.7 and 1.0 $\mu\text{mol/L}$, respectively.

3 讨论

3.1 不同 N、P 浓度对 3 种大型藻 N、P 吸收的影响

在恒化培养条件下,大型海藻对营养盐的吸收速率和外界营养盐浓度之间一般遵循米氏动力学方程^[9]。但有研究表明,大型海藻对营养盐的吸收可分为 3 个阶段,即起始的短期快速吸收,内部营养盐控制的吸收(稳定吸收阶段)以及外界营养盐控制的吸收,这是由于处于饥饿以及半饥饿

状态的海藻在实验初期存在短期的快速吸收,用来补充藻体内营养库的亏空;在接下来的稳定吸收阶段,内部充盈的营养库对相应的营养盐吸收产生反馈抑制作用;最后是由环境中营养盐浓度控制的吸收阶段^[4]。温珊珊等^[10]也发现这种阶段吸收的现象。本研究结果也印证了这一规律。秦传新等^[11]和何洁等^[12]用一级反应动力学方程来描述大型海藻对于营养盐的静态吸收,并对去除效率进行了比较。本实验中真江蕨、脆江蕨和蜈蚣藻去除 N、P 的过程可以用一级反应动力学方程很好地拟合,说明这 3 种大型海藻对水体中的硝酸盐和磷酸盐有较好的去除效果。其中蜈蚣藻在部分浓度下去除率较高,是因为与其他两种藻相比,其具有更大的表面积,更有利于吸收环境中的营养盐;而脆江蕨和真江蕨的去除率更为稳定。

钱鲁闽等^[13]研究发现,菊花江蕨(*Gracilaria confervoides*)在环境 N 浓度升高到 30 $\mu\text{mol/L}$ 时达到其最大吸收速率 0.458 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$;许忠能等^[14]研究了细基江蕨繁枝变种在 N 浓度 50 $\mu\text{mol/L}$ 时,吸收速率为 0.865 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$,这与本研究中真江蕨和脆江蕨的最大吸收速率较为接近。大量研究表明,藻体对 N、P 的吸收速率随着营养液中 N、P 浓度的升高而加快^[15-17],这是因为 N、P 浓度的上升,使得藻体利用 N、P 的一系列生理过程的底物浓度升高,因而在一定范围内其同化作用增加。本实验中真江蕨与脆江蕨的吸收速率变化与此是一致的。温珊珊等^[10]研究了 N 浓度 100~500 $\mu\text{mol/L}$ 范围内真江蕨的吸收速率,最高可以达到 159.40 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$,说明真江蕨的吸收速率仍有随着 N 浓度增高而增加可能。藻体内的反应动力学也是影响藻体对营养盐吸收的一个重要因素,主要由藻体自身来进行调节,反映出不同的藻类对营养盐有着不同的吸收速率。本实验中,真江蕨对 N 的吸收速率要高于脆江蕨,而对 P 的吸收速率则是脆江蕨更高。

王萍等^[18]对繁枝蜈蚣藻的 N、P 吸收进行研究,结果显示其对 N、P 的吸收随营养盐浓度升高而增加,与前文提到的说法一致。而本研究中蜈蚣藻在初始 N 浓度为 30、50 $\mu\text{mol/L}$ 和初始 P 浓

度为 $1.0 \mu\text{mol/L}$ 组中均出现吸收速率下降的现象, 结合其生长情况分析, 在这几组实验过程中个别小枝末端出现“白化”现象, 导致实验末期蜈蚣藻湿重均出现下降(图3、图4), 而其他组中均未出现类似情况, 其具体原因仍需进一步研究。

3.2 不同 N、P 浓度对3种大型藻生长的影响

N 是海藻蛋白质组成的重要成分, 被藻体吸收后可用于合成氨基酸和藻红蛋白等; P 亦是海藻不可缺少的成分, 能促进海藻生殖细胞的形成和促进酶的活动与转化。现有研究表明, 海水中营养盐含量的变化对藻类的生长具有重要的影响^[19-20]。从本研究结果可以看出, N、P 含量变动显著影响真江蓠、脆江蓠和蜈蚣藻的生长, 并且海藻种类不同, 对营养盐变动在生长上的反应也有所不同。

真江蓠和脆江蓠在不同硝酸盐浓度下第1天的生长率没有显著差异, 而蜈蚣藻在第1天的生长则明显受到初始硝酸盐浓度的影响。当初始硝酸盐浓度低于 $30 \mu\text{mol/L}$ 时, 在培养的第1天内3种大型海藻的质量无明显差别; 当初始硝酸盐浓度高于 $30 \mu\text{mol/L}$ 后, 培养第1天蜈蚣藻的生长率明显高于两种江蓠。这反映出环境中硝酸盐浓度的改变能够较大程度刺激蜈蚣藻的生长。另外在所有的实验条件下, 培养结束时脆江蓠的湿重都要大于真江蓠和蜈蚣藻, 由此推测脆江蓠对 N 的转化率更高。

添加不同浓度磷酸盐, 在相同实验条件下, 实验结束时也是脆江蓠的湿重最大, 并且这一现象在磷酸盐初始浓度为 0.7 、 $1.0 \mu\text{mol/L}$ 的组更为明显。与硝酸盐实验不同的是, 实验室结束时脆江蓠的湿重随着初始磷酸盐浓度的增大而增加, 这说明增加磷酸盐浓度更能促进脆江蓠的生长。对于真江蓠来说, 当初始添加的磷酸盐浓度高于 $0.7 \mu\text{mol/L}$ 后, 结束时的湿重呈现出降低的趋势。与硝酸盐实验不同的是, 在不同的磷酸盐条件下, 蜈蚣藻第1天的生长率变化并不大, 并且培养结束时蜈蚣藻的湿重也低于硝酸盐实验, 这都说明对蜈蚣藻来说, 改变硝酸盐的浓度比改变磷酸盐

的浓度更能刺激其生长。

参考文献:

- [1] 杨宇峰, 费修绶. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望[J]. 青岛海洋大学学报: 自然科学版, 2003, 33(1): 53-57.
- [2] Leanne J, Tracy A, Villareal, et al. A high sensitivity nitrate reductase assay and its application to vertically migrating *Rhizosolenia* mats[J]. *Aquat Microb Ecol*, 1997, 12: 95-104.
- [3] Kraemer G P, Carmona P R, Chopin T, et al. Evaluation of the bioremediatory potential of several species of the red alga *Porphyra* using short-term measurements of nitrogen uptake[J]. *J Appl Phycol*, 2004, 16: 489-97.
- [4] 刘静雯, 董双林. 氮饥饿细基江蓠繁枝变型和孔石莼氮素的吸收动力学特征[J]. 海洋学报, 2004, 26(2): 95-102.
- [5] 徐姗姗, 温珊珊, 吴望星, 等. 真江蓠(*Gracilaria verrucosa*)对网箱养殖海区的生态修复及生态养殖匹配模式[J]. 生态学报, 2004, 28(4): 1466-1475.
- [6] 刘建国, 路克国, 林伟, 等. 温度、氮浓度和氮磷比对长心卡帕藻(*Kappaphycus alvarezii*)吸收氮速率的影响[J]. 海洋与湖沼, 2008, 39(5): 529-535.
- [7] Mansilla A, Palacios M, Navarro N P, et al. Growth and survival performance of the gametophyte of *Gigartina skottsbergii* (Rhodophyta, Gigartinales) under defined nutrient conditions in laboratory culture[J]. *J Appl Phycol*, 2008, 20: 889-896.
- [8] 李秀辰, 张国琛. 孔石莼对养鲍污水的静态净化研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(1): 173-176.
- [9] 郑彩璐, 赵卓, 王丽娜. 大型海藻对主要营养盐的吸收研究进展[J]. 现代生物医学进展, 2009, 9(21): 4140-4141.
- [10] 温珊珊, 张寒野, 何文辉, 等. 真江蓠对氨氮去除效率与吸收动力学研究[J]. 水产学报, 2008, 32(5): 794-803.
- [11] 秦传新, 刘长发, 张立勇. 孔石莼和角叉菜对硝酸氮、磷的吸收及其生化组成变化[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(6): 41-46.
- [12] 何洁, 刘瑀, 张立勇, 等. 三种大型海藻吸收营养盐的动力学研究[J]. 渔业现代化, 2010, 30(1): 1-5.
- [13] 钱鲁闽, 徐永健, 焦念志. 环境因子对龙须菜和菊花心江蓠 N、P 吸收速率的影响[J]. 中国水产科学, 2006, 13(2): 257-262.
- [14] 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[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 366-374.
- [15] 姜宏波, 田相利, 董双林, 等. 不同营养盐因子对鼠尾藻氮、磷吸收速率的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学

- 版, 2007, 37(s1): 175–180.
- [16] 姜宏波, 田相利, 董双林, 等. 鼠尾藻生长、藻体成分及其生境的初步研究[J]. 海洋湖沼通报, 2009(2): 59–66.
- [17] 钱鲁闽, 徐永健, 王永胜. 营养盐因子对龙须菜和菊花江篱氮磷吸收速率的影响[J]. 台湾海峡, 2005, 24(4): 546–552.
- [18] 王萍, 桂福坤, 吴常文. 营养盐因子对孔石莼和繁枝蜈蚣藻氮、磷吸收的影响[J]. 水产科学, 2010, 129(4): 208–211.
- [19] 郭翰林, 董双林, 董云伟. 温度及其波动对孔石莼生长及光合作用的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2006, 36(6): 941–945.
- [20] 王巧晗, 董双林, 田相利, 等. 盐度日节律性连续变化对孔石莼生长和生化组成的影响[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2007, 37(6): 911–915.

Effect of nutrient supply on nitrogen and phosphorus uptake and growth in three species of macroalgae

LI Heng^{1, 2}, LI Meizhen¹, XU Zhiguang¹, WANG Xiangyu¹, CAO Jing²

1. Algae Research Centre, Mariculture Institute of Shandong Province, Qingdao 266002, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

Abstract: We conducted a series of conditional experiments using *Gracilaria asiatica*, *G. chouae*, and *Grateloupia filicina* to determine the effects of nutrient supply on nitrogen and phosphorus uptake and macroalgae growth. All the three macroalgae responded rapidly to changes in the supply of nitrogen and phosphorus. The uptake curves yielded a first-order kinetic equation. At 50 $\mu\text{mol/L}$ nitrogen, *G. asiatica* and *G. chouae* exhibited maximum uptake rates of 0.739 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ and 0.648 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ respectively. At 20 $\mu\text{mol/L}$ nitrogen, *G. filicina* exhibited a maximum uptake rate of 0.614 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$. At a level of 1.0 $\mu\text{mol/L}$ phosphorus, *G. asiatica* and *G. chouae* exhibited maximum uptake rates of 0.015 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$ and 0.018 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$, respectively. At 0.7 $\mu\text{mol/L}$ phosphorus, *G. filicina* exhibited a maximum uptake rate of 0.016 $\mu\text{mol}/(\text{g}\cdot\text{h})$. Our results suggest that *G. chouae* is more efficient at removing nitrogen and phosphorus than the other two species. The greatest increase in wet weight occurred in *G. chouae* and the lowest was in *G. filicina*. Changes in the supply of nitrogen had a stronger influence than changes in phosphorus on the growth of *G. filicina*.

Key words: *Gracilaria asiatica*; *Gracilaria chouae*; *Grateloupia filicina*; uptake kinetics; relative growth rate

Corresponding author: LI Meizhen. E-mail: li-meizhen@163.com