

◆全流域生态环境治理◆

氮磷水平对细基江蓠氮、磷吸收及生长的影响*

付家想^{1,2}, 潘科³, 黄凌风⁴, 蓝文陆^{2**}, 黎明民², 李天深²

(1. 广西科学院广西红树林研究中心, 广西红树林保护与利用重点实验室, 广西北海 536007; 2. 广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 广西北海 536000; 3. 深圳大学高等研究院, 广东深圳 518000; 4. 厦门大学环境与生态学院, 福建厦门 361102)

摘要:为了解氮(N)、磷(P)水平对细基江蓠(*Gracilaria tenuistipitata*)植物营养生理生态特征的影响,以亚热带大型海藻细基江蓠为原材料,研究不同N、P浓度条件下细基江蓠的生长,净化吸收N、P及其之间的相互关系。结果表明:细基江蓠的相对生长速率随着N、P浓度的增加而升高,但藻体增重幅度跟营养盐浓度不成正比,在N和P初始浓度分别为 $160 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时增幅最大,N、P水平和N/P明显影响细基江蓠的生长。在低N、P浓度条件下细基江蓠对N、P的去除率更高, P_4 组($N = 64 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $P = 4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率高达96.8%,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除率也表现出类似特征。细基江蓠在高N/P组对P的去除率高,在低N/P组对N的去除率高,N、P胁迫对细基江蓠的营养盐去除率有明显影响。各实验组中细基江蓠对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收速率随着初始营养盐浓度的增加而升高,分别在 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 初始浓度为 $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,无机氮($\text{NO}_3^-\text{-N} : \text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度比为1:1)初始浓度为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时吸收速率最大。适应富营养环境的细基江蓠倾向于按Redfield比吸收N、P,偏离Redfield比则对细基江蓠的生长有明显的抑制效应。细基江蓠对N、P高去除率的特性使其成为富营养化水质修复的潜在优良种类。

关键词:细基江蓠 氮 磷 相对生长速率 吸收速率 去除率

中图分类号:X171.1 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2022)03-0522-10

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20220720.015

近年来,人类生产、生活,尤其是近海养殖活动过量投饵给水环境带来空前压力,水体富营养化、生态环境恶化已成为一大环境难题^[1],其主要原因是氮(N)、磷(P)含量的急剧增加。利用生物滤器大型藻类修复水质成为解决问题的关键,大型海藻不仅能从

周围环境中大量吸收N、P营养元素^[1-3]及重金属元素,还能提高水体溶解氧水平,调节水体pH值,从而改善水生环境。N、P是初级生产者生长的营养基础^[2],在营养盐贫乏水域,加富N、P会显著促进藻体对其吸收,然而N、P对藻类生长的影响较复杂,与藻

收稿日期:2021-09-09

* 广西科技计划项目(桂科AA17129001)和广西红树林保护与利用重点实验室开放基金项目(GKLMC-200504)资助。

【作者简介】

付家想(1989-),男,工程师,主要从事海洋生态学研究。

【**通信作者】

蓝文陆(1980-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事营养盐、富营养化、浮游植物等海洋生态方面的研究,E-mail:dr.lan@139.com。

【引用本文】

付家想,潘科,黄凌风,等.氮磷水平对细基江蓠氮、磷吸收及生长的影响[J].广西科学,2022,29(3):522-531.

FU J X, PAN K, HUANG L F, et al. Effects of Nitrogen and Phosphorus Levels on Nitrogen and Phosphorus Absorption and Growth of *Gracilaria tenuistipitata* [J]. Guangxi Sciences, 2022, 29(3): 522-531.

类生长的环境因子、氮源和磷源种类、生长速率、碳代谢、底物酶活性和 N/P 等因素有关^[3-5]。对限制性营养要素的吸收能力是藻类大量繁殖的关键,适宜的 N/P 有利于浮游植物的生长繁殖,反之会造成营养结构失调、种群结构改变,甚至引发藻华灾害。大量研究证实,黄海绿潮灾害频发与海水中营养盐过量密切相关^[6,7]。自 20 世纪 60 年代国外学者首次提出 Redfield 比^[8](即维系海洋藻类正常生长所需的适宜 N/P 为 16/1)后,关于 N、P 限制对大型藻类生长影响的研究^[9-16]已有不少。研究发现,N、P 差异显著会影响大型海藻江蓠属(*Gracilaria*)的生长状况和生理特征,例如,钱鲁闽等^[13]明确了不同形态的 N、N/P 会影响菊花江蓠(*Gracilaria lichenoides*)对 P 的吸收,当 N/P 为 10/1 时吸收速率最佳;杨芳^[14]发现位于东兴、北海和深圳湾 3 个海区的细基江蓠(*G. tenuistipitata*)繁枝变型对不同形态 N 的富集能力存在差异,当 N 浓度为 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,藻体硝酸还原酶(Nitrate Reductase, NR)、超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)活性最高;许忠能等^[15]发现细基江蓠繁枝变种吸收的 N/P 随环境 N/P 的不同而变化,当 N 浓度一定时环境 N/P 对细基江蓠繁枝变种吸收 N 的速率无显著影响;李恒等^[16]研究发现,当 N 浓度为 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,真江蓠(*G. asiatica*)和脆江蓠(*G. chouae*)对氮的平均吸收速率最大,且脆江蓠对硝酸盐和磷酸盐有更好的去除效果。

目前 N、P 对大型海藻江蓠属的胁迫研究仅见菊花江蓠、细基江蓠繁枝变型、脆江蓠^[15]、真江蓠^[16]等,对细基江蓠的研究主要集中在繁育、生物学特性以及与其他藻类相生相克效应^[17]方面,有关细基江蓠在不同 N、P 水平下的植物营养生理生态研究尚缺乏。本研究以 Redfield 比^[18]为理论依据,研究在不同 N、P 营养条件下细基江蓠对营养盐的吸收特性及对自身生长的影响,以期利用大型海藻吸收 N、P,降低水体富营养水平,改善近岸海域水环境质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 藻种

细基江蓠(*G. tenuistipitata*)的采集与保存:实验所用细基江蓠采自广西北海市金海湾潮间带。选择生长状态良好、长势相近的藻体,并用海水冲洗除去杂藻、污泥及其他附着生物,室内暂养。

暂养条件:每 1 L 海水添加 10 mL f/2 培养液,

海水为经高温(121°C , 20 min)消毒且过 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜的自然海水(pH 值为 8.1, 盐度为 28.3),暂养温度($20 \pm 1^\circ\text{C}$),光照强度 3 000 - 4 000 lx,光照周期 14L:10D。暂养期间每 3 d 更换一次海水且 24 h 充气,以保证营养盐混合均匀并使藻体保持悬浮状态,暂养时间为 1 周。

实验用细基江蓠的准备:取长势良好的细基江蓠接种至未加 N 源、P 源的 f/2 培养液中饥饿培养 48 h,其他培养条件同上。

1.2 N、P 浓度设置

不同 N/P 实验:设置无机氮($\text{NaNO}_3 : \text{NH}_4\text{Cl} = 1 : 1, \text{C} : \text{C}$)浓度分别为 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (N_0)、 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (N_{40})、 $160 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (N_{160})、 $320 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (N_{320}) 4 个处理组,各处理组无机磷(NaH_2PO_4)浓度均为 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,每个处理组各设置 3 个重复,共 12 组。其余营养元素按照 f/2 培养基的比例添加。

不同 N、P 浓度实验:固定 Redfield 比 N/P = 16/1,设置 5 组不同 N、P 浓度,各处理组设置 3 个平行,共 15 组。N 源、P 源和其他营养盐元素与不同 N/P 实验设置相同。具体的 N、P 浓度设置见表 1。

表 1 不同 N、P 浓度条件下 N、P 浓度设置

Table 1 Setting of N and P concentrations under different N and P concentrations

组别 Group	N ($\text{NaNO}_3 : \text{NH}_4\text{Cl} = 1 : 1, \text{C} : \text{C}, \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	P ($\text{NaH}_2\text{PO}_4, \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)
P ₄	64	4
P ₆	96	6
P ₁₀	160	10
P ₁₆	256	16
P ₂₅	400	25

1.3 实验管理

细基江蓠的生长,N、P 吸收实验采用静水系统在室内进行,选择暂养一周且饥饿处理 48 h 的健康藻体作为实验材料。为保证藻体活性,尽量减少实验藻体创口并选择截取部位一致的藻段进行实验。用 1 L 的培养瓶添加 900 mL 高温高压(121°C , 100 kPa)消毒的不同 N、P 人工海水培养液,取湿重 0.5 g 左右的藻段,用干净滤纸吸去藻体表面的水分后称量藻体的初始质量(湿重),置于培养瓶中开始实验。实验共持续 8 d,前 6 d 每天下午 17:00 取样,藻体需用干净滤纸吸去藻体表面的水分后称量湿重,同时用虹吸法取 50 mL 实验培养液,经 $0.45 \mu\text{m}$ 醋酸纤维滤膜过滤后置于 -20°C 条件下冷冻保存,待测其 NH_4^+

N、NO₃⁻-N、PO₄³⁻-P 浓度。第 6-8 天每 2 d 取一次样。实验条件同暂养条件。

1.4 测定方法

PO₄³⁻-P 浓度使用营养盐自动分析仪(AA3, SEAL Analytical, 德国)测定, NO₃⁻-N 浓度采用铈-镉还原法测定, NH₄⁺-N 采用次溴酸钠氧化法测定^[12]。

细基江篱对营养盐的吸收速率 v 计算公式^[14]如下:

$$v = \frac{C_{t-1} \times V_{t-1} - C_t \times V_t}{W \times t}, \quad (1)$$

式中: v 为营养盐的吸收速率($\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$), C_{t-1} 、 V_{t-1} 为每次取样时间间隔的起始培养液中营养盐的浓度和体积, C_t 、 V_t 为每次取样时间间隔结束时培养液中营养盐的浓度和体积, t 为培养时间(h), W 为藻体湿重(g)。

细基江篱对营养盐的去除率 r 计算公式如下:

$$r = \frac{C_0 \times V_0 - C_t \times V_t}{C_0 \times V_0} \times 100\%,$$

式中: r 为营养盐的去除率, C_0 、 V_0 为实验开始前培养液中营养盐的浓度和体积, C_t 、 V_t 为每次取样时培养液中营养盐的浓度和体积。

称量前先用纸巾吸去藻体表面的水分, 再用精确度为 0.001 g 的电子分析天平称量藻体湿重。藻体相对生长速率(Relative Growth Rate, RGR, 以湿重计, $\% \cdot \text{d}^{-1}$) 计算公式^[15]如下:

$$\text{RGR} = \frac{\ln(W_t/W_0)}{t} \times 100, \quad (2)$$

式中: W_0 是藻体初始湿重, W_t 是 t 时刻藻体湿重。

静态培养下的大型海藻对营养盐的吸收过程可以用一级动力学方程来描述^[12], 公式^[19]如下:

$$\frac{S_e}{S_0} = e^{-kt}, \quad (3)$$

式中: S_0 为初始 N、P 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), S_e 为 t 时刻 N、P 浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), t 为时间(d), k 为 N、P 去除率常数。

1.5 数据处理

实验数据为 3 个平行样的平均值, 用 Origin 9.0 软件处理拟合, 用 SPSS 19.0 进行数据统计分析、差异性检验, 用 one-way ANOVA 及 Duncan 多重比较检验组间差异(以 $P < 0.05$ 为差异显著性标准)。

2 结果与分析

2.1 不同 N、P 组合处理对细基江篱生长的影响

图 1 和图 2 展示了不同 N、P 组合条件下细基江篱的生长情况, 不同 N、P 组合的细基江篱湿重及其相对生长速率具有明显差异。细基江篱在各处理组的生长趋势基本一致, 藻体湿重在实验阶段随着实验时间延长而增加(图 1)。由图 1(a)可知, 在不同 N/P 下 N₁₆₀ 组(N 初始浓度为 $160 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)藻体湿重增量比最大, 达 48.3%, 显著高于其他 3 个实验组($P < 0.01$); N₀ 组(N 初始浓度为 0)藻体湿重增幅最小, 仅为 12.7%。由图 2(a)可知, 不同 N/P 条件下各处理组间的藻体平均相对生长速率大小依次为 $N_{160} > N_{320} > N_{40} > N_0$, N₄₀ 组与 N₃₂₀ 组无显著差异($P > 0.05$), 其他组各组间差异显著($P < 0.05$)。

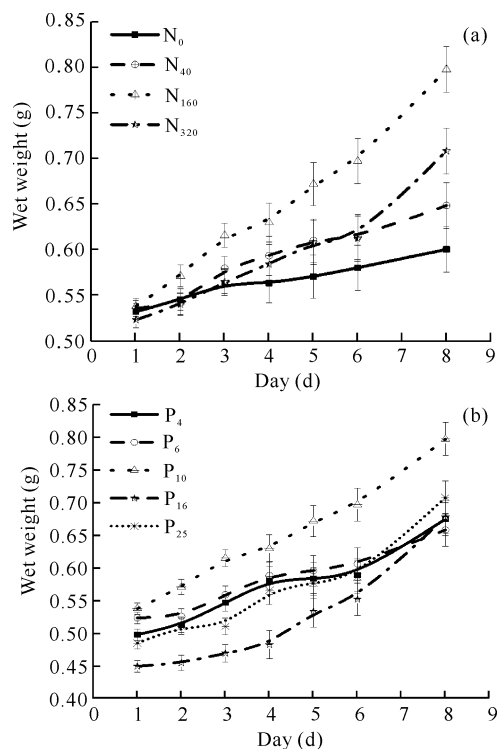
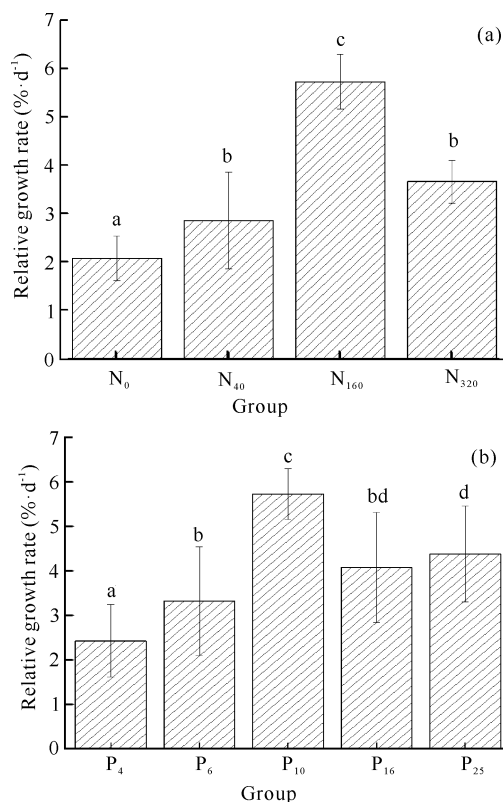


图 1 不同 N、P 水平下细基江篱藻体湿重随时间的变化

Fig. 1 Variation of wet weight of *G. tenuistipitata* with time under different N and P levels

由图 1(b)可知, 在不同 N、P 浓度条件下, P₁₀ 组藻体增重比最高, 达 50.8%; P₆ 组藻体增重比最低, 为 25.7%; P₄ 组、P₆ 组、P₂₅ 组间差异不显著, P₁₆ 组在培养的整个阶段, 藻体湿重增长率持续增加。由图 2(b)可知, 不同 N、P 浓度条件下各组藻体相对生长



Different letters indicate significant differences between groups ($P < 0.05$)

图2 不同N、P浓度下细基江菮的相对生长速率

Fig. 2 Relative growth rate of *G. tenuistipitata* under different concentrations of N and P

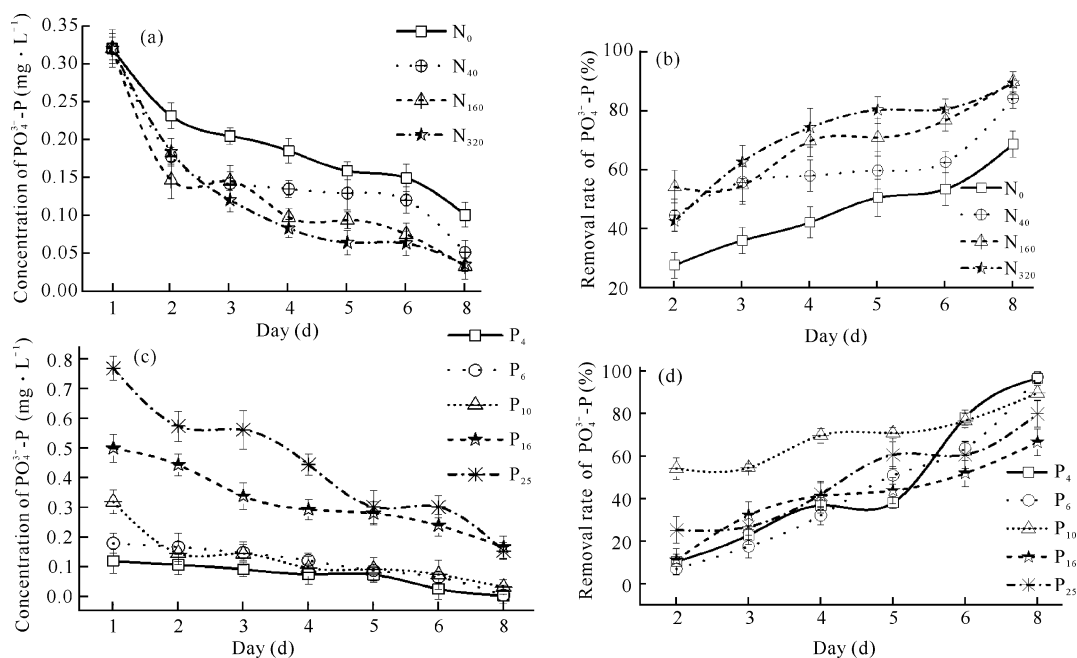


图3 不同N、P水平下 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度、去除率随时间的变化

Fig. 3 Variation of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ concentration and removal rate with time under different levels of N and P

速率表现为 $P_{10} > P_{25} > P_{16} > P_6 > P_4$, P_6 组与 P_{16} 组、 P_{16} 组与 P_{25} 组无显著性差异 ($P > 0.05$), 其他组各组间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 细基江菮对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除

由图 3(a) 和图 3(b) 可知, 不同 N/P 下随时间变化, 各组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度均显著下降; N_{160} 组和 N_{320} 组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率均在 85% 以上, 各组去除率 N_{160} (90.7%) $> N_{320}$ (89.2%) $> N_{40}$ (76.5%) $> N_0$ (68.7%); 实验开始后 1 d 内各组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度下降显著, N_{160} 组对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率就达到 54.2%, 但中后期细基江菮对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除较缓和, N_{320} 组对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除仍然是一个相对快速的过程, 到第 8 天时两组 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度均下降到 $0.031 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右; 各处理组对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除均表现出 0-2 d 时去除快, 2-6 d 时去除平稳, 6-8 d 时去除加速的特征。

由图 3(c) 和图 3(d) 可知, 不同 N、P 浓度条件下, 各处理组细基江菮对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率均较高, 其中 P_4 组、 P_6 组去除率在 95% 以上; 实验前中期 (2-5 d), P_{10} 组对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率显著高于其他各组, 实验后期 (6-8 d) 低 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度组 P_4 组、 P_6 组、 P_{10} 组对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 依然保持着较高的去除率, 其中 P_4 组在第 8 天时去除率高达 96.8%。

一级动力学方程模拟细基江蕨对 PO_4^{3-} -P 去除的拟合结果见表 2, 初始 PO_4^{3-} -P 浓度为 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时细基江蕨的平均去除率常数 k 为 0.2913 ± 0.025 ($R^2 = 0.8189$), 显著高于其他实验组 ($P < 0.01$)。其他实验组对 PO_4^{3-} -P 的去除率较接近, 在不同初始 PO_4^{3-} -P 浓度下波动不大, 平均 k 值为 $0.14 - 0.16$, 无显著性差异。

表 2 在不同初始 P 浓度下细基江蕨去除 P 的一级动力学拟合结果

Table 2 The first-order kinetic fitting results of P removal by *G. tenuistipitata* under different initial P concentrations

初始 PO_4^{3-} -P 浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Initial PO_4^{3-} -P concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率常数($\bar{x} \pm \text{SD}$) Removal rate constant ($\bar{x} \pm \text{SD}$)	R^2
4	0.1552 ± 0.038^a	0.6691
6	0.1455 ± 0.035^a	0.6988
10	0.2913 ± 0.025^b	0.8189
16	0.1355 ± 0.017^a	0.8251
25	0.1611 ± 0.016^a	0.8700

Note: Different letters indicate significant differences between groups ($P < 0.05$)

PO_4^{3-} -P 初始浓度对细基江蕨的 PO_4^{3-} -P 吸收速率影响显著 ($P < 0.01$), 吸收速率随着初始 PO_4^{3-} -P 浓度的升高而增大(图 4), 在 PO_4^{3-} -P 水平较低时, PO_4^{3-} -P 初始浓度对 P 吸收速率影响不大 ($P > 0.05$)。当 PO_4^{3-} -P 浓度高于 $6 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时对 P 吸收速率的影响较明显 ($P < 0.05$), 其中 PO_4^{3-} -P 浓度为 $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时细基江蕨对 PO_4^{3-} -P 有最大吸收速率为 $0.41 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

2.3 细基江蕨对 NO_3^- -N 的去除

由图 5(a)和图 5(b)可知, 不同 N/P 下第 1 天内各实验组 NO_3^- -N 浓度下降幅度有显著差异 ($P <$

0.05); N_{40} 组、 N_{160} 组、 N_{320} 组对 NO_3^- 的去除率分别为 50.0% 、 21.5% 、 37.2% 。不同 N、P 浓度实验中, NO_3^- -N 浓度和去除率的变化趋势与不同 N/P 实验相似。由图 5(c)和图 5(d)可知, 实验第 1 天细基江蕨对 NO_3^- -N 的去除率表现为 $\text{P}_{25} > \text{P}_{16} > \text{P}_4 > \text{P}_6 > \text{P}_{10}$, 前 5 d 去除率明显增加, 第 5 天之后增加幅度较小, P_{10} 组第 8 天去除率最高达到峰值, 为 83.9% 。

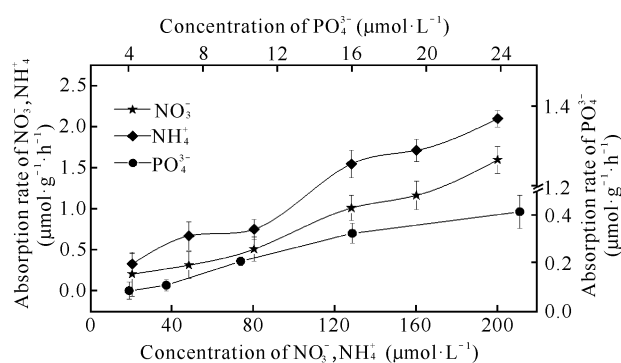
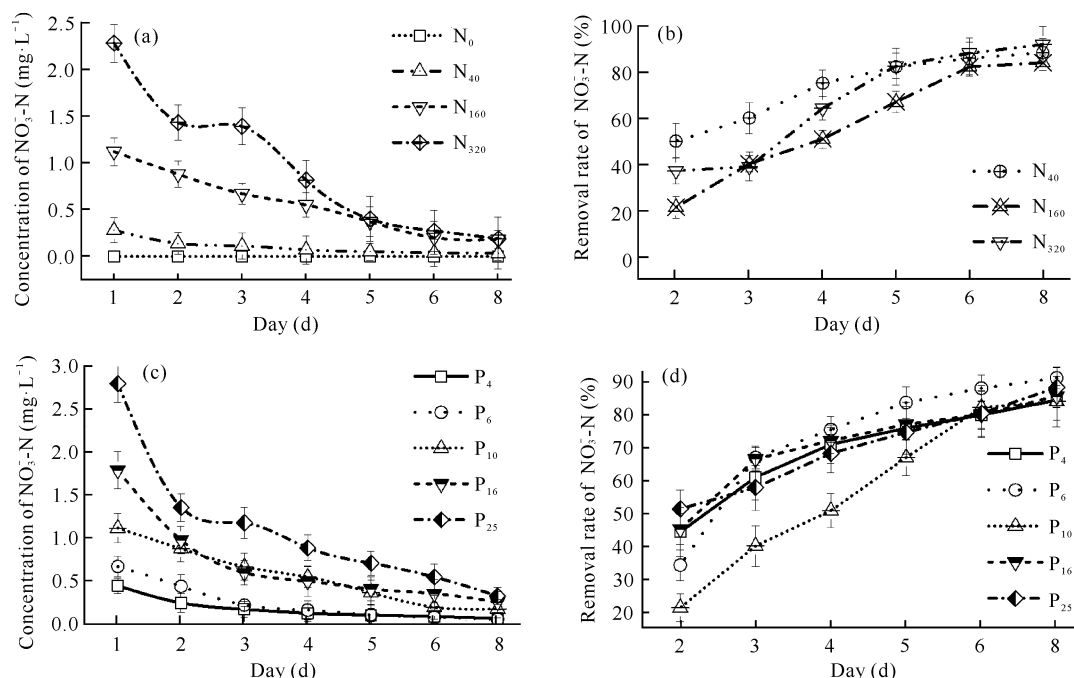


图 4 不同初始 PO_4^{3-} -P、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 水平下细基江蕨 N、P 吸收速率

Fig. 4 Uptake rates of *G. tenuistipitata* under different initial PO_4^{3-} -P, NH_4^+ -N, NO_3^- -N levels

由表 4 可知, 当初始 NO_3^- -N 浓度为 $128 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $160 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 k 值差异不显著 ($P > 0.05$), k 值在 NO_3^- 浓度为 $48 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时去除率常数出现拐点, 此时对 NO_3^- -N 的去除率常数最大, 为 0.3893 ± 0.025 ($R^2 = 0.8737$)。

细基江蕨对 NO_3^- -N 的吸收速率表现与对 PO_4^{3-} -P 吸收速率相似, 即随着初始 NO_3^- -N 浓度的升高而增大(图 4)。 NO_3^- -N 初始浓度在 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $48 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $80 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 组间, 以及 $128 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $160 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 组间吸收速率差异不显著 ($P > 0.05$), NO_3^- -N 浓度为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时吸收速率出现峰值 $1.59 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 4)。

图5 不同N、P水平下 NO_3^- -N浓度、去除率随时间的变化Fig. 5 Variation of NO_3^- -N concentration and removal rate with time under different N and P levels表4 在不同初始 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N浓度下细基江菮去除N的一级动力学拟合结果Table 4 The first-order kinetic fitting results of N removal by *G. tenuistipitata* under different initial NO_3^- -N, NH_4^+ -N concentrations

初始 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 浓度 ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) Initial NO_3^- -N, NH_4^+ -N concentration ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	去除率常数 ($\bar{x} \pm \text{SD}$) Removal rate constant ($\bar{x} \pm \text{SD}$)	R^2
20	NO_3^- : 0.327 4 \pm 0.011 ^b	0.968 3
	NH_4^+ : 0.376 7 \pm 0.022 ^a	0.876 5
48	NO_3^- : 0.389 3 \pm 0.025 ^a	0.873 7
	NH_4^+ : 0.335 1 \pm 0.016 ^b	0.952 8
80	NO_3^- : 0.202 6 \pm 0.021 ^c	0.883 2
	NH_4^+ : 0.364 5 \pm 0.024 ^a	0.952 3
128	NO_3^- : 0.305 6 \pm 0.017 ^b	0.905 6
	NH_4^+ : 0.336 7 \pm 0.023 ^a	0.871 1
160	NO_3^- : 0.263 4 \pm 0.029 ^{bc}	0.853 5
	NH_4^+ : 0.324 6 \pm 0.030 ^a	0.910 7
200	NO_3^- : 0.292 0 \pm 0.033 ^{bc}	0.930 3
	NH_4^+ : 0.314 3 \pm 0.019 ^b	0.835 2

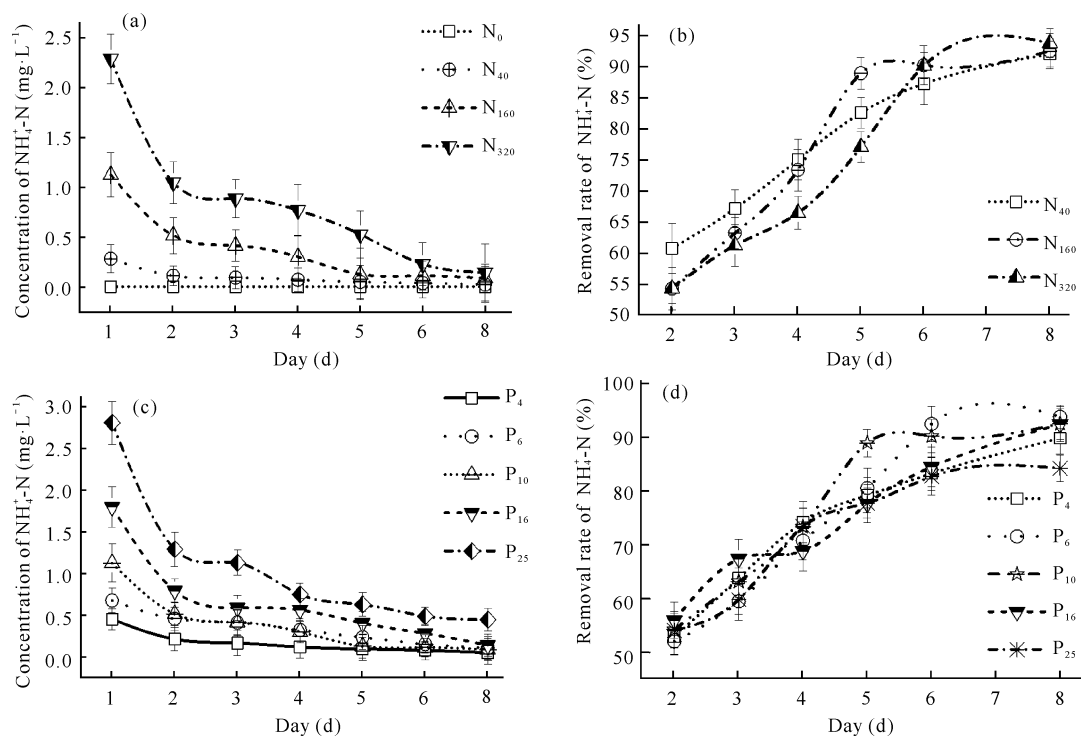
Note: Different letters indicate significant differences between groups ($P < 0.05$)

2.4 细基江菮对 NH_4^+ -N的去除

各实验组 NH_4^+ -N的浓度随着时间延长均大幅下降,见图6(a)和图6(b), N_{40} 组、 N_{160} 组和 P_4 组、 P_6 组、 P_{10} 组在实验结束时 NH_4^+ -N浓度基本接近0。由图6(c)和图6(d)可知,除 P_{25} 组外其余实验组的 NH_4^+ -N去除率均达到90%以上,整体上各实验组 NH_4^+ -N去除率差异不明显;细基江菮对 NH_4^+ -N的去除率变化趋势与 NO_3^- -N相似,去除率在第5天之前增加很快,第5天后增加幅度放缓。

由表4可知,在不同N、P浓度下,除 NH_4^+ -N浓度为48 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 组外,其余各组 NH_4^+ -N去除率常数差异性不显著($P > 0.05$),各组间 NH_4^+ -N去除率常数 k 总体波动不明显。

NH_4^+ -N初始浓度在20 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和48 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 组间、48 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和80 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 组间,以及128 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和160 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 组间时对 NH_4^+ -N吸收速率差异不显著(图4, $P > 0.05$)。随着 NH_4^+ -N初始浓度增加,细基江菮在 NH_4^+ -N初始浓度为48–80 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时吸收速率变缓,初始浓度为200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时吸收速率出现峰值,达2.1 $\mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

图6 不同N、P水平下 NH_4^+ -N浓度、去除率随时间的变化Fig. 6 Variation of NH_4^+ -N concentration and removal rate with time under different initial N and P levels

3 讨论

3.1 N、P环境对细基江蓠生长的影响

本研究结果表明,在不同的营养盐水平下细基江蓠都能够较好地生长和吸收N、P。在经过2 d饥饿处理后长达8 d的实验过程中,即使在氮缺乏的 N_0 组,细基江蓠仍保持生长,生长率达到 $2\% \cdot \text{d}^{-1}$ 。这可能是细基江蓠在获得性外源P的刺激下启动液泡等营养储备库中的N源补充藻体生长对N的需求。如邹定辉等^[20]研究发现藻细胞可以大量吸收 NO_3^- 并将其存储在液泡或胞质内,使细胞内氮营养盐水平浓缩 10^5 倍以上。李枫^[11]研究发现低氮高磷可促进龙须菜(*Asparagus schoberioides*)的生长,并且与低氮低磷相比,低氮高磷处理提高了龙须菜的光化学效率,这表明海藻有适应氮限制的内在机制。本实验结果表明细基江蓠存在营养盐储存机制,并具有较强的储备营养能力,因此能够在外源性N、P缺乏时利用储备库中的营养盐存活并保持一定的生长率。

本研究结果还显示,在不同N/P下, N_{160} 组(N/P为16/1)细基江蓠生长率最高,藻体湿重增幅达48.3%,显著高于其他3个实验组($P < 0.01$),N/P也与Redfield比值(16/1)^[18]一致。对多种藻类的研究^[21,22]表明,不同N/P对藻类的生长影响显著,N/P

差异会对藻细胞的生长、胞内物质的合成与积累产生较大影响。对藻类的营养生理研究发现,适应于富营养化水质的硅藻等在Redfield比值附近生长状态最佳,在介质营养盐充足情况下,中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)和威氏海链藻(*Thalassiosira weissflogii*)所需的N/P组成接近16/1,而蓝藻、甲藻等适于寡营养环境的微藻更能适应N/P偏离Redfield比值的环境^[23],米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*)在N/P为80/1的条件下比生长速率最大^[24],可见N/P对不同种类海藻的影响还与他们对营养环境长期适应密切相关。细基江蓠主要生长在富含N、P冲淡水汇入的河口等近岸海区,本研究所用的细基江蓠也是采集于富营养化的潮间带海区,能适应富营养的环境,研究结果表明N/P对细基江蓠生长有显著影响,适应富营养环境的细基江蓠倾向于按Redfield比将所吸收N、P用于自身组织生长,偏离Redfield比则对细基江蓠的生长有明显的抑制效应。

3.2 N、P环境对细基江蓠吸收N、P的影响

本研究结果显示,无论是在固定P浓度而N浓度不同的实验中,还是在固定N/P的不同N、P浓度实验中, PO_4^{3-} -P、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N浓度在实验过程中均明显降低,且细基江蓠对 PO_4^{3-} -P、 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N的吸收速率均随着初始营养盐浓度的增加

而增加,表明细基江蕨对 N、P 具有较高的吸收效率。在实验初始阶段的第 1-2 天,细基江蕨对 N、P 的去除率就已经很高,这可能与在实验前 2 d 的饥饿处理有关,在饥饿预培养阶段,藻体只能利用胞内 N 营养库的 N 源来维持必要的生长,在营养盐的突然刺激下,饥饿藻体转而对介质中的营养要素进行超吸收或过饱和吸收。江蕨属的圆扁江蕨(*Gracilaria tseto-rii*) 在实验初期的 8 h 内就可以吸收 2 倍于其组织总含 N 量的 NH_4^+ -N, 6 h 内吸收的 N 可供应其在 N 限制的海区生活两周^[25]。大型藻类能将超吸收的营养素储存在液泡等场所形成营养库以备环境恶劣时利用^[26-28]。因此同属江蕨属的细基江蕨对 N、P 具有高去除率,尤其当介质中 N、P 含量陡增时,极大地刺激藻体对氮磷的吸收能力,因此可作为富营养化水质修复的潜在理想物种。

在 PO_4^{3-} -P 浓度为 $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、N 初始浓度为 $0-320 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,虽然在整个实验过程中,细基江蕨对 PO_4^{3-} -P 去除率表现出与湿重增长率相似的变化规律: $N_{160} > N_{320} > N_{40} > N_0$,但是在第 3-6 天, N_{320} 组对 PO_4^{3-} -P 的吸收和去除率高于 N_{160} 组,细基江蕨对 PO_4^{3-} -P 的吸收和去除率随着 N 浓度的升高而升高,与细基江蕨的生长情况却不尽相同,相似的情况也出现在 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的吸收过程中。通过比较发现,在该组实验中细基江蕨对 P 的高吸收去除效率主要出现在高 N 浓度即高 N/P 组,而对 N 的吸收去除效率峰值则主要出现在低 N 浓度即低 N/P 组。Redfield 定律认为 N/P 超过 16/1 时 P 被认为是限制性因素,N/P 小于 10/1 时 N 为限制性因素^[18],因此在 N_{320} 组(N/P 为 32/1)因受 P 胁迫的刺激,细基江蕨可能倾向于吸收储存更多的 P,在 N_{40} 组(N/P 为 4/1)因受 N 胁迫的刺激会选择吸收并储存更多的 N。这些被藻细胞额外吸收的 N、P,可能会优先存储于液泡等场所而不是被立即用于合成组织等的生长^[27,28],从而导致出现对 N、P 吸收的去除状况与细基江蕨的生长状况不完全一致的现象。由此可见 N/P 即氮磷胁迫对细基江蕨对营养盐的去除率有显著影响,细基江蕨更倾向于优先吸收受胁迫的营养要素。

3.3 细基江蕨去除 N、P 的能力

N、P 营养盐是海水集约化养殖系统中造成水体富营养化、危害养殖对象的主要因子,目前利用大型海藻去除养殖废水中 N、P 已成为国内外的研究热点,学者们一致认为利用大型海藻进行水质修复是净

化水体、延缓水体富营养化的重要措施之一^[29-31]。在江蕨属的相关报道中,在 25℃ 条件下菊花江蕨特定生长速率为 $2.3\% \cdot \text{d}^{-1} - 3.02\% \cdot \text{d}^{-1}$ ^[32],25℃ 时脆江蕨相对生长速率约为 $2.6\% \cdot \text{d}^{-1}$ ^[15];但金玉林等^[33]发现 26℃ 时脆江蕨相对生长速率在 5% 以上。分析本研究中细基江蕨的生长数据得知,细基江蕨吸收的营养盐主要用于生长,特定生长率为 $(5.74 \pm 0.42)\% \cdot \text{d}^{-1}$,高于同类报道中的数值。本研究结果显示,在最佳 N/P 下细基江蕨在培养后期(第 8 天)对培养液中 PO_4^{3-} -P 的去除率均可达 96.8%,对 NO_3^- -N 的去除率为 83.9%,对 NH_4^+ -N 的去除率为 94.9%,显著高于许忠能等^[15] 研究中细基江蕨繁枝变种对 NH_4^+ -N(40.7%)、和 NO_3^- -N(28.5%) 的去除率,也高于吴翔宇等^[34] 关于芋根江蕨在 28 d 时对 NH_4^+ -N(26.5%) 和 NO_3^- -N(65.7%) 的去除率。由此可见,细基江蕨可用于净化水质,具有作为生物滤器的潜在可能性。

参考文献

- [1] CORREDOR J E, HOWARTH R W, TWILLEY R R, et al. Nitrogen cycling and anthropogenic impact in the tropical interamerican seas [J]. *Biogeochemistry*, 1999, 46(1/3): 163-178.
- [2] CRAWFORD N M. Nitrate: Nutrient and signal for plant growth [J]. *The Plant Cell*, 1995, 7(7): 859-868.
- [3] DORTCH Q. The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 61: 183-201.
- [4] SMAYDA T J. Harmful algal blooms: Their ecophysiology and general relevance to phytoplankton blooms in the sea [J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, 42(5): 1137-1153.
- [5] JOHANSSON N, GRANIELI E. Influence of different nutrient conditions on cell density, chemical composition and toxicity of *Prymnesium parvum* (Haptophyta) in semi-continuous cultures [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1999, 239(2): 243-258.
- [6] 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.
- [7] 吴晓文, 李瑞香, 徐宗军, 等. 营养盐对浒苔生长影响的围隔生态实验 [J]. *海洋科学进展*, 2010, 28(4): 538-544.
- [8] 张欢, 刘德富, 张佳磊, 等. 两种不同氮磷比下的藻类生长曲线 [J]. *湖北工业大学学报*, 2017, 32(4): 75-79.
- [9] 张莹, 李宝珍, 屈建航, 等. 斜生栅藻对低浓度无机磷去

- 除和生长情况的研究[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2661-2665.
- [10] 王菁, 裘丽萍, 孟顺龙, 等. 氮磷比对鱼腥藻和普通小球藻生长竞争的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(5): 316-320.
- [11] 李枫. 营养盐和培养密度对龙须菜的生理影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [12] 南春容, 王铁杆, 张鹏, 等. 南麂列岛铜藻氮磷吸收特征研究[J]. 上海海洋大学学报, 2014, 23(5): 706-711.
- [13] 钱鲁闽, 徐永健, 王永胜. 营养盐因子对龙须菜和菊花江蕨氮磷吸收速率的影响[J]. 台湾海峡, 2005, 24(4): 546-552.
- [14] 杨芳. 三个细基江蕨繁枝变种种群的生长和氮营养特征研究[D]. 南宁: 广西大学, 2014.
- [15] 许忠能, 林小涛, 林继辉, 等. 营养盐因子对细基江蕨繁枝变种氮、磷吸收速率的影响[J]. 生态学报, 2002, 22(3): 366-374.
- [16] 李恒, 李美真, 徐智广, 等. 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[J]. 中国水产科学, 2012, 19(3): 462-470.
- [17] 李娟, 黄凌风, 郭丰, 等. 细基江蕨对氮、磷营养盐的吸收及其对赤潮发生的抑制作用[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2007, 46(2): 221-225.
- [18] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. American Scientist, 1958, 46(3): 205-221.
- [19] 李秀辰, 张国琛, 崔引安, 等. 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.
- [20] 邹定辉, 夏建荣. 大型海藻的营养盐代谢及其与近岸海域富营养化的关系[J]. 生态学杂志, 2011, 30(3): 589-595.
- [21] 丁刚, 于晓清, 詹冬梅, 等. 不同氮、磷浓度及配比对鼠尾藻幼苗生长的影响[J]. 水产科学, 2014, 33(4): 219-222.
- [22] 胡绵好, 袁菊红, 向律成, 等. 不同氮磷比对多年生水生植物生长特性影响的研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(11): 2487-2493.
- [23] 刘皓, 高永利, 殷克东, 等. 不同氮磷比对中肋骨条藻和威氏海链藻生长特性的影响[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(6): 92-97.
- [24] 孙军, 刘东艳, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比率对青岛大扁藻、新月柱鞘藻和米氏凯伦藻生长影响及其生存策略研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2122-2126.
- [25] LOMAS M W, GLIBERT P M. Interactions between NH_4^+ and NO_3^- uptake and assimilation: Comparison of diatoms and dinoflagellates at several growth temperatures [J]. Marine Biology, 1999, 133(3): 541-551.
- [26] 徐智广. 2种大型经济海藻对海水中营养盐供应的生理响应[D]. 汕头: 汕头大学, 2007.
- [27] 金秋, 金则新, 奚立民. 不同 N、P 营养盐水平对孔石莼克制赤潮异弯藻效果的影响[J]. 科技通报, 2012, 28(3): 32-37.
- [28] 李赵嘉, 曾昭春, 贾佩峤, 等. 大型海藻对氮磷吸收能力的初步研究[J]. 河北渔业, 2014(1): 1-4, 11.
- [29] 吕冬伟, 刘欢, 田鹏华, 等. 大型海藻孔石莼对海水中不同形态氮盐和磷酸盐的吸收研究[J]. 山东农业科学, 2019, 51(3): 68-72, 76.
- [30] 廖秀睿, 李曦, 柳睿杰. 曲褶刚毛藻在对虾养殖尾水无机氮盐净化中的应用[J]. 海南热带海洋学院学报, 2021, 28(2): 1-5.
- [31] 杜欣欣, 刘福利, 袁艳敏, 等. 极北海带幼苗对氮、磷和铁营养元素需求的研究[J]. 水产科学, 2021, 40(1): 81-88.
- [32] 范皖苏. 菊花江蕨 (*Gracilaria lichevoides*) 对环境因子的适应性及其营养体低温保种技术初步研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2011.
- [33] 金玉林, 吴文婷, 陈伟洲. 不同温度和盐度培养条件对脆江蕨生长及生化组分影响[J]. 南方水产科学, 2012, 8(2): 51-57.
- [34] 吴翔宇, 黄良夫, 杨守国, 等. 芋根江蕨对对虾养殖水体氮磷的去除效果[J]. 现代农业科技, 2021(8): 178-179.

Effects of Nitrogen and Phosphorus Levels on Nitrogen and Phosphorus Absorption and Growth of *Gracilaria tenuistipitata*

FU Jiexiang^{1,2}, PAN Ke³, HUANG Lingfeng⁴, LAN Wenlu², LI Mingmin², LI Tianshen²

(1. Guangxi Key Laboratory of Mangrove Protection, Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Academy of Sciences, Beihai, Guangxi, 536007, China; 2. Marine Environmental Monitoring Center of Guangxi, Beihai, Guangxi, 536000, China; 3. Institute for Advanced Study, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong, 518000, China; 4. College of the Environment and Ecological Science, Xiamen University, Xiamen, Fujian, 361102, China)

Abstract: In order to understand the effects of nitrogen (N) and phosphorus (P) levels on the nutritional, physiological and ecological characteristics of *Gracilaria tenuistipitata*, the subtropical macro-algae *G. tenuistipitata* was used as raw material to study the growth, purification and absorption of N, P and their relationship under different N and P concentrations. The results showed that the relative growth rate of *G. tenuistipitata* increased with the increase of N and P concentrations, but the gain range of algal weight was not proportional to the concentration of nutrient. The gain range was the largest when the initial concentrations of N and P was $160 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ and $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. N, P levels and the ratio of N/P significantly affected the growth of *G. tenuistipitata*. *G. tenuistipitata* had a higher removal rate when N and P concentrations were low. The removal rate for $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was as high as 96.8% in group P₄ (N = $64 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, P = $4 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). The removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ also showed similar characteristics. The removal rate of P was high when N/P ratio was high, while the rate of N was high when N/P was low. Nutrient removal rate of *G. tenuistipitata* was significantly affected by N and P stress. The absorption rates of *G. tenuistipitata* to $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in each experimental group increased with the increase of initial nutrient concentration. The maximum absorption rate was obtained when the initial concentration of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ was $25 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ and the initial concentration of inorganic nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N} : \text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration ratio was 1 : 1) was $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively. *G. tenuistipitata* adapted to eutrophic environment tended to absorb N and P according to Redfield ratio, and deviation from Redfield ratio had obvious inhibitory effect on the growth of *G. tenuistipitata*. *G. tenuistipitata* may be potentially used for the restoration of eutrophic water quality due to their high removal rates of nitrogen and phosphorus.

Key words: *Gracilaria tenuistipitata*; nitrogen and phosphorus; relative growth rate; absorption rate; removal rate

责任编辑:陆 雁



微信公众号投稿更便捷

联系电话:0771-2503923

邮箱:gxxk@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxk.ijournal.cn/gxxk/ch>