

文章编号:1000-0615(2008)05-794-10

## 真江蓠对氨氮去除效率与吸收动力学研究

温珊珊<sup>1</sup>, 张寒野<sup>2</sup>, 何文辉<sup>1</sup>, 张饮江<sup>1</sup>, 徐姗楠<sup>1</sup>, 何培民<sup>1</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 200090;

2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090)

**摘要:** 以真江蓠(*Gracilaria asiatica*)为实验材料,在实验室水平上测定了真江蓠培养密度对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除效率和吸收速率的影响,比较了真江蓠在氮半饥饿和氮饱和状态下的氨氮吸收动力学特征以及不同起始浓度 $\text{NH}_4\text{-N}$ 对其吸收速率的影响。结果表明:真江蓠密度为 $2\sim 24\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,5 h内随着藻体密度增大和实验时间延长,真江蓠去氨氮能力也增强。当藻体密度为 $24\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,真江蓠在5 h内去除氨氮效率最高,达到99.77%。各种藻体密度在起始阶段保持较高吸收速率( $30\sim 41\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ),随后藻体密度与吸收速率呈反比关系,其最低藻体密度组( $2\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ )在3 h和5 h吸收速率最大,分别为 $28.33\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $18.85\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。在起始浓度梯度实验中,氮半饥饿和氮饱和真江蓠吸收氨氮的最大吸收速率和半饱和常数在1 h均达到最高值,分别为 $116.47$ 、 $159.40\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $439.70$ 、 $913.61\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。之后随着培养时间的延长而降低。氮半饥饿和氮饱和真江蓠对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收差别不显著;当氨氮浓度为 $300\sim 500\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,氮半饥饿的真江蓠在起始1 h内有一个快速吸收阶段( $40.7\sim 102.1\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ),吸收速率与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度几乎成正比,此时不符合米氏动力学饱和方程,而在低N浓度下( $100\sim 200\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),藻体对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收则没有出现这种现象;随着培养时间延长,直到 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度达到一定限度时,吸收速率可达到一极大值而符合米氏动力学饱和方程。该研究结果为大规模栽培真江蓠净化水体和生态修复提供了理论依据。

**关键词:** 真江蓠;氨氮;吸收动力学;生态修复

**中图分类号:** Q 948; S 917

**文献标识码:** A

随着我国工农业经济的发展和人民生活水平提高,我国水质资源富营养化越来越严重,并导致海洋赤潮的频频发生。大型海藻在生长过程中可大量吸收C、N和P等营养元素,可以通过收获很容易地将营养元素从海洋中除去,因此海藻栽培在水生态系统碳循环和减缓富营养化方面有很重要的作用。真江蓠属于海藻中的红藻门江蓠科江蓠属。其分枝多、生长快,且用途广泛,为重要食品和工业重要原料。真江蓠不但可当新鲜蔬菜食用,还是鲍的极佳饵料;另外其含胶量高达16%~

28%,凝胶强度大,是饮料、食品行业的重要原料,还可以提取藻胆蛋白、制取海藻肥料等。利用真江蓠栽培吸收海水中的营养盐,既可以改善水质,又可以提供优质藻体蔬菜、优质琼胶质量,因此研究真江蓠生态修复作用具有重要意义。

近几十年来,国内外学者曾做过一系列关于紫菜、江蓠等海藻吸收水中营养盐、净化水体的研究<sup>[1-9]</sup>。目前,欧美等国家已注意到工业化养鱼存在的问题,正在发展鱼类/海藻综合循环水产养殖系统,利用大型海藻去除养殖系统中

收稿日期: 2007-11-15

资助项目: 上海市浦江人才计划项目(05PJ14086);上海市教委优势(重点)学科资助项目(Y1101)

作者简介: 温珊珊(1983-),女,江西吉安人,硕士研究生,从事海洋生态修复研究。E-mail: sswen@163.com

通讯作者: 何培民, Tel: 13371935272; E-mail: pmhe@shou.edu.cn

氨氮、硝态氮、活性磷等营养盐,同时还可以产生氧气,改善鱼类生活环境<sup>[10-13]</sup>。但实际上仍然有很多问题亟待解决,如大型海藻对介质中高营养盐浓度的吸收能力。因此研究高浓度营养盐条件下,海藻对营养盐吸收动力学对发展鱼类/海藻综合循环水产养殖系统具有一定重要意义。目前国内外关于真江菭的研究很少,仅是对其生理生化的初步研究,而关于真江菭的去富营养化研究仍未报道,为此本文展开了研究,通过研究真江菭对培养液中处于高浓度的氨氮的吸收动力学来探讨真江菭栽培对去营养化生态修复的前景,为今后利用真江菭净化开放海区水体和建立综合循环养殖系统、以及鱼藻混养的自净养殖体系提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

真江菭(*Gracilaria asiatica* Zhang et Xia)采集于浙江奉化象山港。选择健康藻体,清洗藻体并仔细去除表面附着物。培养液为加入 VES 营养液盐度 21 的海水,培养容器为三角烧瓶,培养温度为 20 °C,光强 60  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,光周期为 12 L:12 D。每 3 天加一次 VES 营养液,每 6 天换一次消毒海水。

### 1.2 实验方案

**藻体密度梯度实验** 将真江菭按湿重 0.5 g~6 g 的 9 个梯度称重,每组两个平行。吸收用的海水基准液(无机氮的浓度小于 5  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )经过滤、煮沸处理。培养容器为三角烧瓶(含 250 mL 的吸收介质),培养液中氮浓度为 200  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。吸收实验在光照培养箱中进行(温度、光照和盐度同预培养)。吸收实验开始时 1 h 测一次,之后每 2 小时测一次。共测量 5 h。于 60 °C 干燥至恒重后测其干重。

**起始浓度梯度实验** 将真江菭分别置于氮半饥饿和氮饱和的海水预培养 5 d,每 3 天换一次消毒海水。之后将处于氮半饥饿状态的真江菭用氮限制的新鲜海水冲洗干净,仔细除去表面所有附着物。吸收用的海水基准液(无机氮的浓度小于 5  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )经过滤、煮沸处理。培养容器为三角烧瓶(含 250 mL 的吸收介质),称取约 1.5 g 鲜重的两种真江菭(在藻体密度梯度实验中密度为 2  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  的藻体在吸收实验的起始时吸收速率

很低,所以在接下来的浓度梯度实验中,选择了居中的密度即 6  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  的藻体作为实验对象),分为氮饱和组与氮半饥饿组,每组两个平行。氮浓度梯度为 100~500  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的五组。吸收实验开始时 1 h 测一次,之后每 2 小时测一次。直到吸收基本停止为止。共测量 9 h。实验结束后于 60 °C 干燥至恒重后测其干重。

**氨氮的测定方法** 采用次溴酸盐氧化法<sup>[14]</sup>。

### 1.3 数据处理

**吸收速率**

$$V = [(C_{t-1} - C_t) \cdot V_{t-1}] / (t \cdot B) \quad (1)$$

式中, $V$  为吸收速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ); $C_{t-1}$ , $C_t$  分别为每次取样时间间隔的起始和结束时氨氮的浓度( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ); $V_{t-1}$  为每次取样时间间隔起始的培养液体积(L); $t$  为每次取样的时间间隔(h); $B$  为海藻的干重(g)。

**最大吸收速率( $V_{\text{max}}$ )和米氏常数( $K_m$ )**

**米氏动力学方程:**

$$V = V_{\text{max}} \cdot C / (K_m + C) \quad (2)$$

式中, $V$  为吸收速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ); $V_{\text{max}}$  为最大吸收速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ); $K_m$  为米氏常数( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ); $C$  为每次取样时间间隔的起始的氨氮浓度( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )。

**数据处理** 数据用单因子方差(ANOVA)

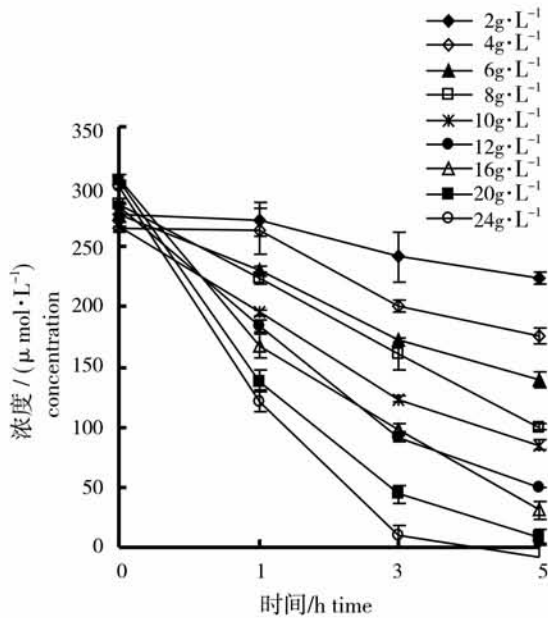
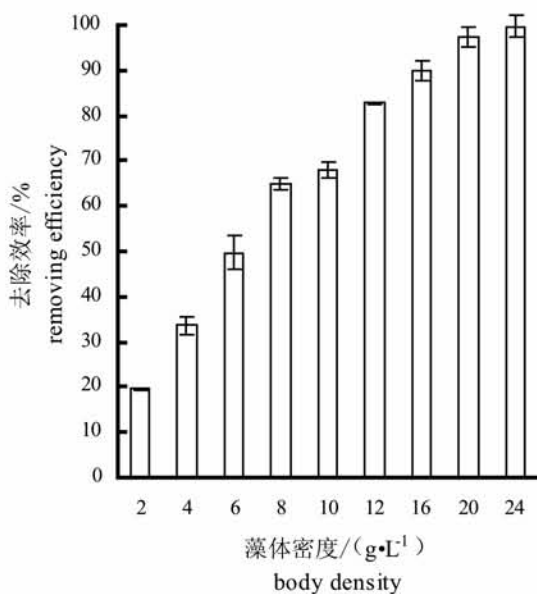
及 Duncan 多重比较进行分析处理,以  $P < 0.05$  作为差异显著水平,所得数据均以平均值  $\pm$  标准差表示。

## 2 结果

### 2.1 藻体密度对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 去除效率的影响

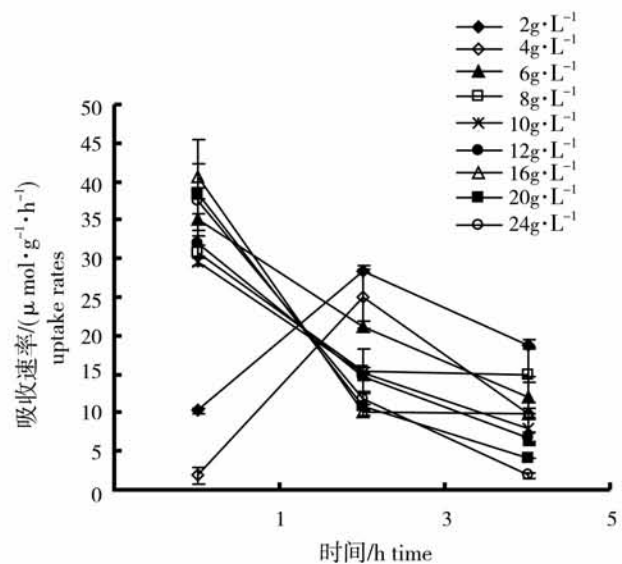
从图 1 可看出,在实验藻体密度范围内,藻体密度与  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度降低成正比例关系,同样实验时间越长, $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度降低幅度也越大。当藻体密度为 24  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,实验 5 h 后介质中  $\text{NH}_4\text{-N}$  的浓度几乎降为 0;而藻体密度只有 2  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,介质中  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度只降低了 20%。图 2 结果显示 24  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  藻体密度组的去除效率达到了 99.77%,而 2  $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  藻体密度组的去除效率仅为 19.6%。可见藻体密度越高、培养时间越长, $\text{NH}_4\text{-N}$  去除效率越高。

藻体吸收速率即为单位藻体重量吸收  $\text{NH}_4\text{-N}$  速率。从图 3 可以看出,藻体在各个时间段对

图1 藻体密度对水体  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度降低的影响Fig. 1 Effect of body density on the decrease of  $\text{NH}_4\text{-N}$  concentration in water图2 不同藻体密度的  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除效率Fig. 2  $\text{NH}_4\text{-N}$  removing efficiency under different body density

$\text{NH}_4\text{-N}$  吸收速率不一样。一般在第1小时, 各组具有较高的吸收速率 ( $30\sim 41 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , 其中  $16 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  密度组最高), 随着时间延长吸收速率下降, 但  $2 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $4 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  藻体密度组在第1 h 有例外, 其吸收速率只有  $2\sim 12 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

第3 h 和第5 h 时,  $2 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  最低藻体密度组藻体吸收速率最大, 分别高达  $28.33 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $18.85 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , 而最大藻体密度 ( $24 \text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 藻体吸收速率最低, 第3 h 和第5 h 分别只有  $11.70 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $1.90 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ 。可见在一定水体里, 各种藻体密度在开始时具有相同较高的吸收速率, 随后藻体密度与  $\text{NH}_4\text{-N}$  吸收速率成反比, 藻体密度越小, 藻体吸收速率越快。

图3 藻体密度对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收速率的影响Fig. 3 Effect of density on the  $\text{NH}_4\text{-N}$  uptake rate

## 2.2 $\text{NH}_4\text{-N}$ 最大吸收速率和半饱和常数与时间的关系

表1为在不同  $\text{NH}_4\text{-N}$  起始浓度下, 不同时间间隔内  $\text{NH}_4\text{-N}$  吸收动力学参数。从表1可看出, 最大吸收速率 ( $V_{\max}$ ) 和半饱和常数 ( $K_m$ ) 均随着吸收时间的延长而减小, 氮半饥饿的藻体对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的最大吸收速率由  $116.47$  降为  $24.29 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , 而半饱和常数则由  $439.70$  降为  $166.87 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在吸收实验起始的1 h 内, 最大吸收速率都达到峰值, 而在1~5 h 内开始降低, 5~9 h 基本达到较稳定的吸收阶段。通过半饱和常数 ( $K_m$ ) 的变化规律又能够说明真江藻对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收速率与介质中  $\text{NH}_4\text{-N}$  的浓度有关, 在较高  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度下吸收速率受短时间快吸收的影响很大; 而在低浓度的介质中, 吸收速率不受短时间快吸收的影响而保持相对的稳定。

表 1 不同时间间隔内  $\text{NH}_4\text{-N}$  吸收动力学参数Tab. 1 Estimated kinetic parameters for  $\text{NH}_4\text{-N}$  uptaking in different interval

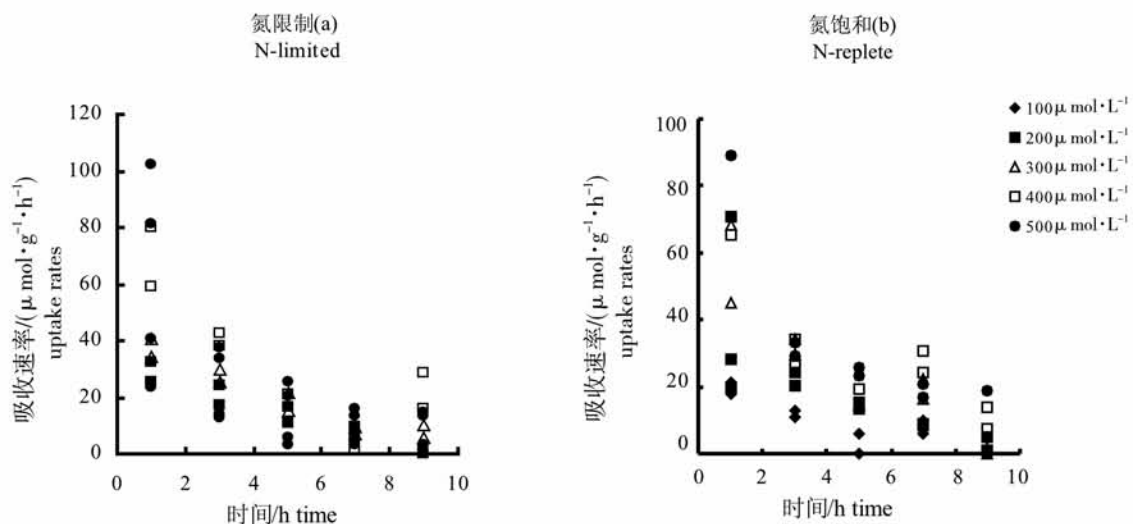
种类 type	吸收时间间隔(h) interval	最大吸收速率( $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) $V_{\text{max}}$	半饱和常数( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) $K_m$	R
氮半饥饿 N-limited	0~1	116.47 ± 37.31**	439.70 ± 372.12	0.81
	1~3	53.03 ± 10.71**	268.76 ± 43.95	0.95
	3~5	52.81 ± 21.52**	528.19 ± 375.26	0.98
	5~7	24.32 ± 13.54**	199.49 ± 210.07	0.95
	7~9	24.29 ± 0.83*	166.87 ± 25.39	0.99
氮饱和 N-replete	0~9	49.99 ± 3.35**	385.42 ± 115.73	0.97
	0~1	159.40 ± 31.70**	913.61 ± 341.84	0.94
	1~3	58.19 ± 2.39**	360.74 ± 36.74	0.97
	3~5	32.43 ± 2.08*	227.07 ± 54.51	0.98
	5~7	29.35 ± 2.97*	143.60 ± 51.24	0.88
	7~9	23.22 ± 6.45**	255.30 ± 118.69	0.91
	0~9	44.22 ± 3.86**	291.11 ± 23.24	0.93

\*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ 

用吸收速率对吸收时间作图(图 4-a, b), 曲线出现三个不同的吸收趋势: 在开始的大约 3 h 内(尤其是 1 h)吸收速率比较快, 最大的吸收速率达到  $102.1 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , 而在随后的 5 h 到 9 h 吸收速率相对变化较慢, 吸收速率为  $7.9 \sim 15.7 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ , 在 7 h 到 9 h 时吸收速率基本接近平缓。而在吸收实验的前 3 h 内, 氮半饥饿的藻体对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收速率要比氮饱和藻体的吸收速率快(图 4-a), 但这一差异在 5~9 h 基本上不显著了, 两种藻体对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收速率几乎相等, 而且趋于平缓。

处于氮限制状态下的真江菼, 在高浓度介质下对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收动力往往偏离米氏动力学

方程, 而表现出起始阶段的快速吸收现象。在最初的 1 h 内, 在介质 N 浓度为  $300 \sim 500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  中, 真江菼对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收速率很高 ( $40.7 \sim 102.1 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ), 呈现一个快吸收现象; 而在低 N 浓度下 ( $100 \sim 200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 藻体对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收则没有出现这种现象 ( $17.8 \sim 40.8 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )。其结果造成短时间内真江菼对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的最大吸收速率比最大生长速率高出很多, 而且最大吸收率 ( $V_{\text{max}}$ ) 随着吸收时间的延长逐渐降低。在这一过程中, 由此导致氮半饥饿藻体的吸收速率要明显比氮饱和和藻体高, 而随着吸收实验的进行这种现象就不明显了。

图 4 氮半饥饿(a)与氮饱和(b)真江菼对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的吸收速率随时间的变化Fig. 4 Changes of  $\text{NH}_4\text{-N}$  uptake rates for *Gracilaria asiatica* in N-limited (a) and N-replete (b) situation

### 2.3 NH<sub>4</sub>-N 起始浓度对真江菼 NH<sub>4</sub>-N 去除效率

图5为9h内NH<sub>4</sub>-N起始浓度对真江菼吸收速率的影响。在100~500 μmol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>-N浓度范围内,不同时间段中,NH<sub>4</sub>-N起始浓度越高,真江菼对NH<sub>4</sub>-N的吸收速率越快,此趋势在0~1h中特别明显。

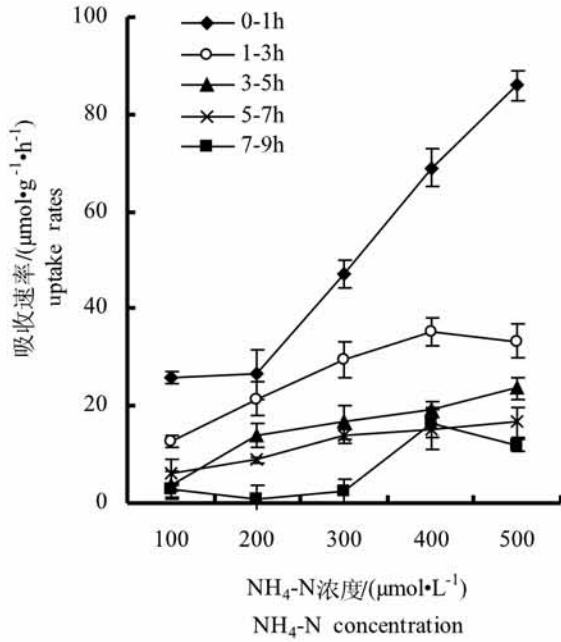


图5 NH<sub>4</sub>-N 起始浓度对吸收速率的影响  
Fig. 5 Effect of NH<sub>4</sub>-N concentration on the NH<sub>4</sub>-N concentration

真江菼对NH<sub>4</sub>-N去除效率与介质中NH<sub>4</sub>-N起始浓度也有联系。图6为9h内不同NH<sub>4</sub>-N起始浓度的藻体的NH<sub>4</sub>-N去除效率。从图6可看出,氮半饥饿和氮饱和藻体的NH<sub>4</sub>-N去除效率比较接近,在100~300 μmol·L<sup>-1</sup> NH<sub>4</sub>-N起始浓度范围内,起始浓度越低,NH<sub>4</sub>-N去除效率越高。如当介质N浓度为100 μmol·L<sup>-1</sup>,其NH<sub>4</sub>-N去除效率最高,达到89.34%。当介质N浓度为300~500 μmol·L<sup>-1</sup>范围内,其NH<sub>4</sub>-N去除效率保持在56.7%~67.4%之间,说明真江菼对高浓度NH<sub>4</sub>-N具有一定耐受力。

氮半饥饿和氮饱和真江菼对NH<sub>4</sub>-N的吸收差别不显著(P>0.05)。从图7中可以看出,当N浓度范围为400~500 μmol·L<sup>-1</sup>时存在一个吸收速率最大值,为102.1 μmol·g<sup>-1</sup>·h<sup>-1</sup>。真江菼对NH<sub>4</sub>-N的吸收速率与NH<sub>4</sub>-N浓度有关系。

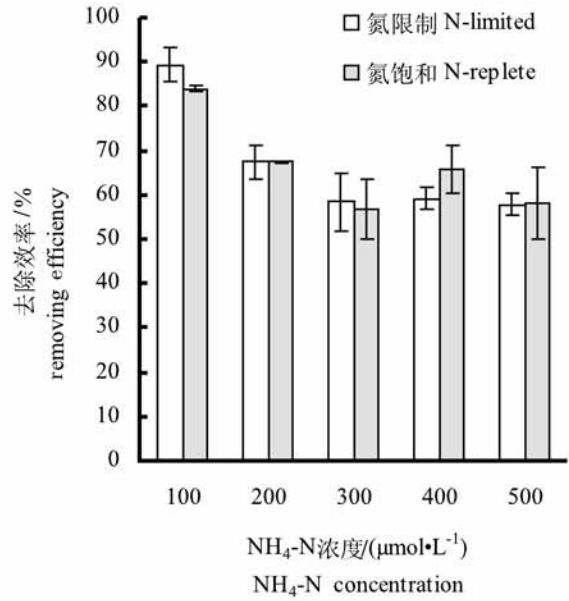


图6 不同起始浓度的藻体的NH<sub>4</sub>-N去除效率  
Fig. 6 NH<sub>4</sub>-N removing efficiency under different uptake rate

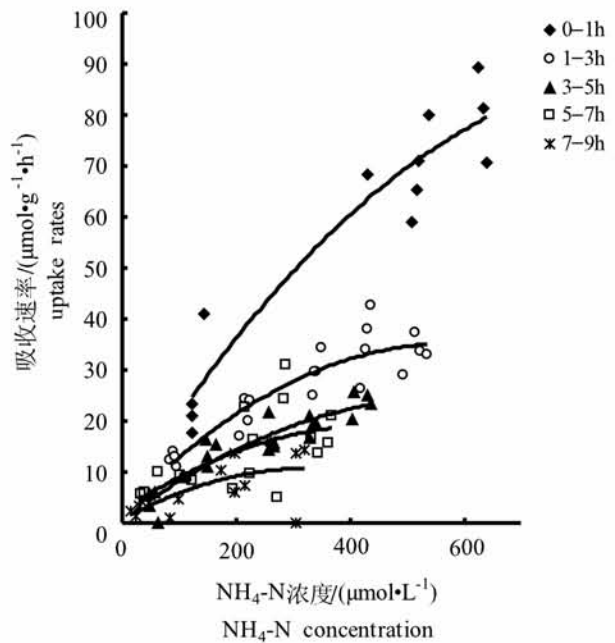


图7 不同NH<sub>4</sub>-N浓度下的吸收速率  
Fig. 7 NH<sub>4</sub>-N uptake rates in different NH<sub>4</sub>-N concentration

将氮半饥饿的藻体置于较高的NH<sub>4</sub>-N浓度中进行吸收实验时,在较短的起始时间内有一个迅速的快吸收阶段,吸收速率与NH<sub>4</sub>-N浓度几乎成正比,此时吸收动力学不符合米氏动力学饱和和方



程。随着实验的进行,  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度较高时, 吸收速度也随之升高, 但不显著, 直到  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度达到一定限度时, 吸收速率达到一极大值而符合米氏动力学饱和方程。

#### 2.4 真江蓠对 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的吸收动力学方程

离子的吸收速率随不同离子浓度处理的变化曲线符合方程  $y = ax^2 + bx + c$ , 其中  $y$  代表离子的吸收速率,  $x$  代表吸收液的浓度<sup>[15]</sup>。根据图 1 数据, 经计算机拟合, 得出 5 h 内不同藻体密度对  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度-时间吸收动力学方程, 结果见表 2 和表 3。其中表 3 为不同起始浓度的  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度-时间吸收动力学方程与相关因素。

表 2 不同藻体密度的  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度-时间吸收动力学方程与相关因素

Tab. 2 The kinetics equations of  $\text{NH}_4\text{-N}$  concentration-time and correlations in different density

藻体密度( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) density	吸收动力学方程式 kinetics equations	R
2	$y = 0.15x^2 - 12.32x + 280.27$	0.91
4	$y = 0.55x^2 - 22.45x + 271.64$	0.96
6	$y = 4.01x^2 - 47.25x + 276.20$	0.99
8	$y = 3.13x^2 - 51.49x + 281.06$	0.99
10	$y = 6.38x^2 - 67.15x + 262.77$	0.99
12	$y = 9.59x^2 - 93.41x + 278.58$	0.99
16	$y = 10.20x^2 - 101.66x + 290.54$	0.98
20	$y = 16.68x^2 - 138.58x + 289.75$	0.98
24	$y = 20.15x^2 - 158.70x + 286.60$	0.99

表 3 不同起始浓度的  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度-时间吸收动力学方程及相关因素

Tab. 3 The Kinetics equations of  $\text{NH}_4\text{-N}$  concentration-time and correlations in different concentration

藻体类型 type	$\text{NH}_4\text{-N}$ 起始浓度( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) $\text{NH}_4\text{-N}$ concentration	吸收动力学方程式 Kinetics equations	R
氮限制 N-limited	100	$y = 1.80x^2 - 27.76x + 123.21$	0.97
	200	$y = 2.69x^2 - 43.35x + 255.01$	0.99
	300	$y = 2.74x^2 - 49.20x + 387.75$	0.99
	400	$y = 3.73x^2 - 64.37x + 507.52$	0.98
	500	$y = 4.54x^2 - 78.41x + 622.19$	0.99
氮饱和 N-replete	100	$y = 1.04x^2 - 20.01x + 116.61$	0.98
	200	$y = 2.23x^2 - 39.34x + 257.15$	0.99
	300	$y = 3.61x^2 - 57.81x + 407.92$	0.98
	400	$y = 2.76x^2 - 60.72x + 501.76$	0.99
	500	$y = 4.13x^2 - 75.09x + 612.83$	0.98

### 3 讨论

江蓠是一种具有高效去除水体中氨氮的海藻, 且不同种具有不同的氨氮效率与去富营养化作用。罗勇胜等<sup>[16]</sup>研究了细基江蓠繁枝变种(*G. tenuistipitata* var *liui*)对对虾养殖场排水沟废水营养盐  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_2^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  和  $\text{PO}_4^{3-}$  的吸收降解效果, 通过比较得出最优密度组为  $30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 对  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{PO}_4^{3-}$  的相对降解率分别为 69.69% 和 92.62%; 毛玉泽等<sup>[17]</sup>研究了龙须菜对扇贝排泄氮、磷有较强的吸收作用, 对  $\text{NH}_4\text{-N}$  和  $\text{PO}_4\text{-P}$  的最大去除效率分别为 83.7% 和 70.4%; Hernández 等<sup>[8]</sup>实验表明, 在氮限制条件下江蓠

去除氮的效率最高可以达到 89.2%, 氮饱和条件下江蓠的去除氮效率则为 86.5%; 本实验中真江蓠在 5 小时内去除氨氮的效率可以达到 99.77%, 说明真江蓠去除氨氮效率显著高于细基江蓠繁枝变种和龙须菜。

大型海藻对  $\text{NH}_4\text{-N}$  吸收可分为三个阶段<sup>[18]</sup>: 起始短期的快吸收, 内部氮控制的吸收(同化阶段), 外界营养盐控制( $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度)的吸收。本实验也符合这一规律。这三个吸收阶段的形成是由于处于饥饿状态的海藻在吸收外界  $\text{NH}_4\text{-N}$  过程中体内不同氮之间的相互转换所致。在氮饥饿状态下起始阶段吸收的氮超过生长所需要的量, 这是大型海藻对外界环境中营养盐变化的适

应。李大鹏和林贞贤<sup>[19]</sup>研究进一步表明饥饿状态的龙须菜比正常培养和高营养盐培养下的龙须菜对  $\text{NH}_4\text{-N}$  表现出较强的超补偿吸收能力。

海藻 N 吸收速率与 N 浓度、培养时间、以及培养条件(包括温度、光照强度等)都有很重要关系。大型海藻 N 吸收速率与营养盐浓度之间的关系一般遵循米氏动力学方程:  $V = V_{\max} \cdot C / (K_m + C)$ 。但处于 N 饥饿状态以及半饥饿状态(本实验)的海藻在吸收实验初期并不完全遵守这一动力学方程,其存在短期快吸收现象。据研究表明这一现象的形成表明氮饥饿海藻的 N 吸收由体内不同的 N 库所调节,开始阶段的快吸收用于充盈由于氮饥饿而产生的 N 库亏空,而随后的稳定吸收则是由于充实的 N 库的反馈抑制了 N 的吸收速率,接着是由介质营养盐浓度控制的吸收,随着介质营养盐的消耗吸收速率下降。Tyler 和 McGlathery<sup>[20]</sup>进一步检测到 *G. vermiculophylla* 的同化速率为  $(32.3 \pm 7.2) \mu\text{mol N} \cdot \text{g dw}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ , 大约 67% 的平均日总吸收氮又被释放到水体中。

在一定范围内最大吸收速率随  $\text{NH}_4\text{-N}$  介质浓度的升高而增大<sup>[21-22]</sup>,许忠能和林继辉<sup>[21]</sup>认为在  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NH}_4\text{-N}$  介质浓度范围内,细基江蓠繁枝变种的氮吸收速率在总氮浓度为  $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时最大  $(2.58 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$ ;刘静雯和董双林<sup>[18]</sup>也得出同样结果,在饥饿状态和  $25^\circ\text{C}$  条件下细基江蓠繁枝变种对  $\text{NH}_4\text{-N}$  最大吸收速率的范围可高达  $35.0 \sim 230.0 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。而目前水产养殖水体中氨含量有时已高达  $250 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  甚至更高<sup>[23]</sup>,故本实验  $\text{NH}_4\text{-N}$  初始浓度选择了  $100 \sim 500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  范围,而真江蓠的吸收速率仍然随着  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度提高而增加,最大吸收速率可以达到  $23.22 \sim 159.40 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  (半饥饿状态和常温  $20^\circ\text{C}$  条件下),这对于高富营养化的封闭型养殖系统水体生态修复具有更好的实际指导意义。

在有限体积内,藻体密度与  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除效率成正比,而与吸收速率一般呈反比例关系。因此对于特定水体,密度选择尤为重要。一般说,藻体密度越高,  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除效率越高、时间越短。但是对于大水体种植高密度海藻,意味成本和劳力使用较高。此外,由于藻体密度过高,藻体间相对拥挤,所接受到的光照强度被遮挡而减弱,会导

致单位藻体重量吸收能力较低<sup>[24]</sup>,这非常不利于大水体,藻体利用效率低,且增加成本。但如果起始培养藻体密度过低,吸收速率反而低,如本实验中  $2 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $4 \text{g} \cdot \text{L}^{-1}$  低密度组在第 1 小时的吸收速率特别低,说明藻体起始密度要达到一定密度时,藻体才能更好生长和吸收营养。

有关研究认为藻体密度为  $2000 \sim 3000 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  时生长绝对量最高,吴超元等<sup>[24]</sup>则提出细基江蓠繁枝变种的栽培密度保持在  $500 \sim 1000 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$  范围内较为合适,而我们在象山港网箱养殖区的真江蓠栽培密度可以达到  $1400 \sim 1800 \text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

海区研究显示,1ha 海区每年可生产 258 t 江蓠(*G. chilensis* 或 *G. tenuistipitata*),通过江蓠收获可去除 1020 kg 氮和 374 kg 磷<sup>[12,25]</sup>。目前我国南方人工栽培细基江蓠(*G. tenuistipitata*)干重产量已达到了  $5000 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[26]</sup>,细基江蓠 TN 和 TP 月平均含量分别 4.837% 和 0.285%,通过细基江蓠养殖和收获, N 和 P 去除量约分别为  $242.14 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2006 年,本课题组对象山港海区栽培的真江蓠进行了氮磷含量分析,其氮和磷含量分别为 4.645% 和 0.548%,表明每吨干重真江蓠,可以从海区中除去 46.5 kg 氮和 5.5 kg 磷,可见真江蓠具有更高去除氮磷能力,且海区生态修复效果非常显著。2006 年 8-12 月,我们应用真江蓠养殖技术对上海市金山区城市沙滩富营养化海域进行了治理,共投放了 6.5 t 真江蓠。根据表 2 预测放养真江蓠可使水体中  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度降低  $0.36 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,而实际  $\text{NH}_4\text{-N}$  减少量为  $0.294 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,水体  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度由  $0.30 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$  降到几乎检测不出(活性磷也未能检测出来),完全达到 I-II 类海水水质标准,海区透明度已达到 4.5~6.0 m。可见真江蓠养殖对封闭性海区的富营养化生态修复效果十分明显。

#### 参考文献:

- [1] Hanisak M D. The use of *Gracilaria tikvahiae* (Gracilariales, Rhodophyta) as a model system to understand the nitrogen nutrition of cultured seaweeds [J]. Hydrobiologia, 1990, 204/205: 79-87.
- [2] Troell M, Rönnbäck P, Halling C, et al. Ecological engineering in aquaculture; use of

- seaweeds for removing nutrients from intensive mariculture[J]. *Appl Phycol*, 1999, 11: 89–97.
- [3] Fei X G. Solving the coastal eutrophication problem by large scale seaweed cultivation [J]. *Hydrobiologia*, 2004, 512: 145–151.
- [4] 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.
- [5] 徐姗楠,何培民.我国赤潮频发现象分析与海藻栽培生物修复作用[J]. *水产学报*, 2006, 30(4): 554–561.
- [6] Yang Y F, Fei X G, Song J M, *et al.* Growth of *Gracilaria lemaneiformis* under different cultivation conditions and its effects on nutrient removal in Chinese coastal waters[J]. *Aquaculture*, 2006, 254: 248–255.
- [7] Hernández I, Martínez-Aragón J F, Tovar A, *et al.* Biofiltering efficiency in removal of dissolved nutrients by three species of estuarine macroalgae cultivated with sea bass (*Dicentrarchus labrax*) waste waters 2. Ammonium [J]. *Appl Phycol*, 2002, 14: 375–384.
- [8] Hernández I, Pérez-Pastor A, Vergara J J, *et al.* Studies on the biofiltration capacity of *Gracilariopsis longissima*: From microscale to macroscale[J]. *Aquaculture*, 2006, 252: 43–53.
- [9] 何培民,徐姗楠,郭婷婷.大型海藻生态修复重要作用与发展策略[C]//国家“863”计划资源环境技术领域第三届海洋生物高技术论坛论文集(上册).厦门:厦门大学出版社,2005:612–614.
- [10] Chopin T, Buschmann A H, Halling C, *et al.* Integrating seaweeds into aquaculture systems: a key towards sustainability[J]. *Phycol*, 2001, 37: 975–986.
- [11] Troell M, Halling C, Neori A, *et al.* Integrated mariculture: asking the right questions [J]. *Aquaculture*, 2003, 226: 69–90.
- [12] Troell M, Halling C, Nilsson A, *et al.* Integrated marine cultivation of *Gracilaria chilensis* (Gracilariales, Rhodophyta) and salmon cages for reduced environmental impact and increased economic output[J]. *Aquaculture*, 1997, 156: 45–61.
- [13] Anderson R J, Smit A J, Levitt G J. Upwelling and fish-factory waste as nitrogen sources for suspended cultivation of *Gracilaria gracilis* in Saldanha Bay, South Africa[J]. *Hydrobiologia*, 1999, 398/399: 455–462.
- [14] 国家技术监督局.中华人民共和国国家标准—海洋监测规范 GB 171378.4—1998[S].
- [15] 华海霞,梁永超,娄运生,等.水稻硅吸收动力学参数固定方法的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 358–362.
- [16] 罗勇胜,李卓佳,文国樑.细基江蓠繁枝变种净化养殖废水投放密度研究[J]. *南方水产*, 2006, 2(5): 7–11.
- [17] 毛玉泽,杨红生,周毅,等.龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)的生长、光合作用及其对扇贝排泄氮磷的吸收[J]. *生态学报*, 2006, 26(10): 3225–3231.
- [18] 刘静雯,董双林.氮饥饿细基江蓠繁枝变型和孔石莼氨氮的吸收动力学特征[J]. *海洋学报*, 2004, 26(2): 95–103.
- [19] 李大鹏,林贞贤.龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)在营养限制胁迫后对  $\text{NH}_4\text{-N}$  的超补偿吸收研究[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(4): 307–312.
- [20] Tyler A C, McGlathery K J. Uptake and release of nitrogen by the macroalgae *Gracilaria vermiculophylla* [J]. *Journal of Phycology*, 2006, 42(3): 515–525.
- [21] 许忠能,林继辉.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.
- [22] 钱鲁闽,徐永健,王永胜.营养盐因子对龙须菜和菊花江蓠氮磷吸收速率的影响[J]. *台湾海峡*, 2005, 24(4): 546–552.
- [23] 徐永健,钱鲁闽.水动力条件对龙须菜 N 吸收的影响[J]. *海洋环境科学*, 2004, 23(2): 32–35.
- [24] 吴超元,李纫芷,林光恒,等.细基江蓠繁枝变型生长适宜环境条件的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1994, 25(1): 60–66.
- [25] Haglund K, Pedersen M. Outdoor pond cultivation of the subtropical marine red alga *Gracilaria tenuistipitata* in brackish water in Sweden. Growth, nutrient uptake, co-cultivation with rainbow trout and epiphyte control [J]. *J Appl Phycol*, 1993, 5: 271–284.
- [26] 杨宇峰,费修纛.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*, 2003, 33(1): 53–57.



## Study on $\text{NH}_4\text{-N}$ removing efficiency and kinetics in *Gracilaria asiatica*

WEN Shan-shan<sup>1</sup>, ZHANG Han-ye<sup>2</sup>, HE Wen-hui<sup>1</sup>, ZHANG Yin-jiang<sup>1</sup>,  
XU Shan-nan<sup>1</sup>, HE Pei-min<sup>1</sup>

(1. College of Fisheries and Life, Shanghai Ocean University, Shanghai 200090, China;

2. East China Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** Eutrophication caused by mariculture has become a serious environmental problem. Seaweeds would play an important role for decreasing marine eutrophication due to the cost saving, low sensitivity to environmental and impurity factors, the possible contaminant recovery from the biomaterial and its elevated adsorption capacity. Seaweeds are able to absorb large quantities of nitrogen, phosphorus and carbon dioxide, produce large quantities of oxygen, and have excellent effect on decreasing eutrophication. In this paper, ammonium nitrogen removing efficiency and absorption rate by *Gracilaria asiatica* with different culture densities were determined, and dynamics character of ammonium nitrogen uptaking at N-limited and the N-replete situation and the effect of different initial concentration of ammonium nitrogen on absorption rate were studied. *Gracilaria asiatica* was collected at Xiangshan harbor, Zhejiang province, southern China, and cultivated in the laboratory. Samples of the alga were maintained in a flask with 250 mL seawater of 21 salinity. The alga were cultured in culture boxes at  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ , under  $60 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  illumination, and on 12 h:12 h light/dark cycle. The result showed that the ability of ammonium nitrogen removing was enhanced by seaweed culture density (in  $2 - 24 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) and experiment time (in 5 hours) increasing. The highest efficiency of ammonium nitrogen removing with highest density ( $24 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) of *G. asiatica* was up to 99.77% after 5 hours. Ammonium nitrogen concentration declined from  $300 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  to zero. The ammonium nitrogen removing efficiency with lowest density ( $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ) was only 20%. Higher ammonium nitrogen absorption rate ( $30 - 41 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) was kept in different density groups during initial culture period, especially in  $16 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  density group, then decreased with density increase. The maximum uptake rates reached as high as  $28.33 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  and  $18.85 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  at 3 h and 5 h, respectively, in  $2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  minimum density group. The lowest ammonium nitrogen uptake rate of  $11.70 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  and  $1.90 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  were obtained at 3 h and 5 h with the highest density group ( $24 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ). In initial concentration experiment, maximum uptake rates ( $V_{\text{max}}$ ) and half-saturation constant(Km) of *G. asiatica* at N-limited and the N-replete situation reached the highest value, 116.47, 159.40  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  and 439.70, 913.61  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  in the first hour, then they declined from 24.29, 23.22  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  and 166.87, 255.30  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  with culture prolonging from 1 h to 5 h. In initial concentration experiment, ammonium nitrogen removing efficiency were increased with initial concentration reduced in the range of  $100 - 300 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ , especially with lowest ammonium nitrogen concentration ( $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ). Ammonium nitrogen removing efficiency kept in 56.7% - 67.4% with  $300 - 500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  of ammonium nitrogen concentration. There was no difference for ammonium nitrogen absorption of *G. asiatica* at between N-limited and the N-replete situation. Within  $300 - 500 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  of ammonium nitrogen concentration, a fast absorption rate of *G. asiatica* at N-half hungry situation presented in the first stage( $40.7 - 102.1 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ), and almost had a positive relation with concentration, which was not fit the Micheal dynamics saturation

equations. But, within  $100 - 200 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  of ammonium nitrogen concentration, the uptake rates of *G. asiatica* were as low as  $17.8 - 40.8 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ . When the concentration decreased in some limited range, the absorption rate reached the maximum and fit the Micheal dynamics saturation equations. It would provide important theory data for cleaning water and bioremediation by cultivating *G. asiatica*, and large-scale cultivation of *G. asiatica* could be a good solution to the problem of eutrophication due to their capability of removing nutrients.

**Key words:** *Gracilaria asiatica*;  $\text{NH}_4\text{-N}$ ; uptake kinetics; bioremediation

.....

## 欢迎订阅 2009 年度《中国水产科学》

《中国水产科学》为中国水产科学研究院主办的学术性期刊,目前已成为中国水产界的重要学术期刊。本刊在促进中国的水产科学、加强国际间学术交流、展示中国水产界最新科研成果与研究进展等方面发挥了重要作用。刊物影响因子逐年递增,2007 年中国科技期刊引证报告统计的影响因子值为 0.829,并获得第三届“中国百种杰出学术期刊”奖。

本刊主要报道水产生物学基础研究、水生生物病害及其防治、水产生物营养及饲料、渔业生态保护及渔业水域环境保护、水产品保鲜与加工综合利用、水产资源、海淡水捕捞、水产养殖与增殖以及渔船等方面的最新进展、最新成果、最新技术和方法。

本刊为双月刊,A4 开本,每期 176 页,单月出版,国内外公开发行。

国内定价 30 元/期,全年 180 元(含邮费)。邮发代号:18-250。

国内统一刊号:CN 11-3446/S,国际标准刊号:ISSN 1005-8737,国外代号 4639Q。

直接向编辑部订阅可享受 8 折优惠,也可在当地邮电局(所)办理订阅手续(可破季订阅)。漏订或补订当年和过期期刊,请直接向编辑部订阅。

编辑部地址:北京市丰台区青塔村 150 号(中国水产科学研究院内),邮政编码:100141

联系电话:010-68673921

传真:010-68673931

E-mail:zgsckx@cafs.ac.cn; jfishok@pulica.bj.cninfo.net