

文章编号: 1674-5566(2010)02-0252-07

## 浒苔和条浒苔生长及其氨氮 吸收动力学特征研究

田千桃<sup>1</sup>, 霍元子<sup>1</sup>, 张寒野<sup>2</sup>, 李信书<sup>1,3</sup>

冯子慧<sup>1</sup>, 王阳阳<sup>1</sup>, 张饮江<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 201306;

2 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;

3 淮海工学院海洋学院, 江苏 连云港 222005)

**摘要:**研究了浒苔 (*Enteromorpha prolifera*)和条浒苔 (*Enteromorpha clathrata*)在室内条件下的生长及其氨氮吸收动力学特征。结果表明:浒苔和条浒苔藻体体重日生长率分别为 17.30%和 16.82%;浒苔和条浒苔藻体幼苗在温度 25℃和光照 140  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的条件下达到最大体长日生长率,分别为 78.9%和 82.1%。在 1~10 g/L密度范围内,浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的吸收速率随密度和时间的增加而增加,当藻体密度为 10 g/L时,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度分别下降了 86.43%和 84.13%。两种浒苔对  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 吸收速率与介质中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度呈显著的线性关系,在  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度为 400  $\mu\text{mol}/\text{L}$ 时, 30 min后浒苔和条浒苔的吸收速率分别为 421和 409  $\mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ ,说明两种浒苔吸收氨氮的方式以被动扩散为主。在 400  $\mu\text{mol}/\text{L}$ 的起始浓度下,浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的吸收速率随时间变化呈现 3个不同阶段:在 75 min内呈快速吸收阶段, 75~185 min为内部  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 控制的吸收阶段, 250 min后为外界  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度控制的吸收阶段;在 700 min后,浒苔和条浒苔的吸收速率分别为 41.3和 37.7  $\mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ 。该研究结果为理解浒苔绿潮的爆发机制及评价其对海洋生态系统的影响提供了理论依据。

**关键词:**绿潮;浒苔;条浒苔;日生长率;氨氮吸收动力学

**中图分类号:** Q 178.1; S 968.41 **文献标识码:** A

### Preliminary study on growth and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ uptake kinetics of *Enteromorpha prolifera* and *Enteromorpha clathrata*

TIAN Qian-tao<sup>1</sup>, HUO Yuan-zi<sup>1</sup>, ZHANG Han-ye<sup>2</sup>, LIX in-shu<sup>1,3</sup>, FENG Zi-hui<sup>1</sup>,

WANG Yang-yang<sup>1</sup>, ZHANG Yin-jiang<sup>1</sup>, HE Pei-min<sup>1</sup>

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

2. East China Sea Fishery Research Institute Chinese Academy of Fishery Sciences Shanghai 200090, China;

3. School of Marine Science and Technology Huaihai Institute of Technology Lianyungang 222005, China)

**Abstract:** The growth and  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  uptake kinetics of *Enteromorpha prolifera* and *Enteromorpha clathrata* were measured in the laboratory. The results showed that the growth rate of body weight of *E. prolifera* and *E.*

收稿日期: 2009-12-03

基金项目: 国家自然科学基金 (2007AA09Z406); 上海市浦江人才计划项目 (05PJ14086); 上海市优秀学科带头人计划项目 (08XD14037); 上海市水生生物学重点学科资助项目 (S30701)

作者简介: 田千桃 (1983-), 男, 硕士研究生, 专业方向为水域生态修复. E-mail: qttian@mail.shou.edu.cn

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

*clathrata* mature thalli were 17.30% per day and 16.82% per day while the growth rate of body length of seedling which cultured at 25 °C and 140  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  were as high as 85.10% per day and 78.90% per day. The ability of  $\text{NH}_4^+$ -N uptake was enhanced by seaweed culture density (1~10 g/L) and experimental time (in 7 h) increasing. The highest efficiency  $\text{NH}_4^+$ -N uptake with highest density (10 g/L) of *E. prolifera* and *E. clathrata* was up to 86.43% and 84.13%, respectively, after 7 h. The  $\text{NH}_4^+$ -N uptake rate of *E. prolifera* and *E. clathrata* was positively correlated with  $\text{NH}_4^+$ -N concentration, and  $\text{NH}_4^+$ -N uptake rate of *E. prolifera* and *E. clathrata* was 421 and 409  $\mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$  under initial 400  $\mu\text{mol}/\text{L}$  after 30 min, which means that the  $\text{NH}_4^+$ -N uptake mode was passive diffusion for *E. prolifera* and *E. clathrata tenuistipitata*. Three distinct succeeding phases of  $\text{NH}_4^+$ -N uptake were identified for *E. prolifera* and *E. clathrata* cultured at 400  $\mu\text{mol}/\text{L}$ : (1) surge uptake phase in 75 min; (2) internally controlled uptake phase between 75~185 min and (3) externally controlled uptake phase after 250 min; the  $\text{NH}_4^+$ -N uptake rate of *E. prolifera* and *E. clathrata* was 41.3 and 37.7  $\mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ , respectively, after 700 min. The results of this study would provide important theory data for understanding burst mechanism of green tides and evaluating the effects of it on marine ecosystem.

**Key words:** green tides; *Enteromorpha prolifera*; *Enteromorpha clathrata*; growth rate;  $\text{NH}_4^+$ -N uptake kinetics

大型海洋绿藻大量增殖的现象,被称为“绿潮”(Green tide)。自20世纪80年代以来,在世界范围内的近海、海湾和河口内,绿潮已成为一类频发的生态异常现象<sup>[1-4]</sup>。Morand和Briand<sup>[5]</sup>综述了37个国家绿潮现象<sup>[6]</sup>,Schramm和Nienhuis<sup>[7]</sup>列举了欧洲和亚洲受绿潮影响的114个地区。可见,“绿潮”已经成为一个严重的世界性生态问题。

近两年在我国黄海海域也爆发了浒苔绿潮灾害,特别是2008年,浒苔绿潮爆发的范围之大,前所未有,并导致了一系列的环境问题和经济损失。目前我国有关浒苔研究多见于营养价值、繁殖生物学和种质鉴定等方面。为此,本文对浒苔(*Enteromorpha prolifera*)和条浒苔(*Enteromorpha clathrata*)生长及其对 $\text{NH}_4^+$ -N的吸收动力学特征进行了研究,以为浒苔绿潮爆发机制和对近海海洋生态环境影响等方面提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料来源及预培养

浒苔(*Enteromorpha prolifera*)和条浒苔(*Enteromorpha clathrata*)分别于2008年7月和4月采自江苏如东近海和浙江奉化象山港。选择健康藻体,清洗藻体并去除表面附着物,将藻体

培养于加入VES培养液的1~5 L三角烧瓶中,在光照培养箱控制的环境条件下进行2周预培养,每隔3 d添加1次培养液,每6 d换一次消毒海水。

预培养期温度、盐度、光照强度、光周期分别设定为:25  $\pm$  0.5 °C、26、60  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、12 L:12 D,连续充气培养。

### 1.2 氮饥饿藻体培养

将藻体置于氮限制的海水介质中(总无机氮含量 < 3  $\mu\text{mol}/\text{L}$ ),连续饥饿培养20 d,每5 d除氮外,补充其它营养成分,使藻体处于氮饥饿状态。培养条件为:温度 15  $\pm$  0.5 °C,盐度为 26,光照强度 20  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ,光照周期 12L:12D,适当充气培养。

### 1.3 藻体体重相对生长率测定

称取初始湿重约为0.3 g的较大藻体(体长10~15 cm),培养于盛有200 mL VES培养液的250 mL三角烧瓶中,实验各设3个重复。实验条件与预培养相同。连续充气培养5 d,每天定时测定藻体湿重,计算体重相对生长率。

### 1.4 幼苗体长相对生长率测定

选取孢子萌发24 h后的健康幼苗,培养于盛有VES培养液的24孔细胞培养板中,每孔一棵幼苗,测定海藻幼苗在不同温度、光照强度条件

下的相对体长生长率。共设置 20、25、27.5、30 和 32.5 °C 5 个温度梯度, 共设置 20、40、60、100 和 140  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  5 个光照强度梯度, 共计 25 个温度-光照强度组合, 实验进行 4 d。其他条件与预培养相同。应用 Image Pro Plus 软件在 Olympus 解剖镜下进行拍照测量, 计算幼苗体长日相对生长率。

### 1.5 氮饥饿状态下 $\text{NH}_4^+$ -N 吸收动力学测定

两种浒苔  $\text{NH}_4^+$ -N 吸收动力学测定的实验条件设置为: 温度 (25  $\pm$  0.5) °C, 盐度为 26, 光照强度 60  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2/\text{s})$ , 光照周期 12 L:12 D, 充气培养。实验海水基准液 (无机氮浓度小于 3  $\mu\text{mol}/\text{L}$ ) 经过滤、煮沸处理。培养容器为盛有 200 mL 吸收介质的 250 mL 三角烧瓶。

#### 1.5.1 不同密度藻体 $\text{NH}_4^+$ -N 去除效率测定

将藻体按湿重 1 g/L~10 g/L 7 个梯度称重, 每个梯度 3 个重复。培养液中  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度为 200  $\mu\text{mol}/\text{L}$ 。吸收实验开始时 1 h 测一次, 之后每 2 h 测一次。共取样 4 次, 测定  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度。实验结束后, 将藻体置于 60 °C 烘箱中, 烘干至恒重后称其干重。

#### 1.5.2 不同 $\text{NH}_4^+$ -N 浓度下藻体吸收速率测定

培养液  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度设置为 10、25、50、75、100、200、300、400  $\mu\text{mol}/\text{L}$  8 个梯度, 每个梯度 3 个重复组, 每个重复组中放入约 0.3 g 湿重藻体。实验进行 0.5 h 后取样, 测定  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度, 并将藻体置于 60 °C 烘箱中, 烘干至恒重后称其干重。

#### 1.5.3 不同时间藻体对 $\text{NH}_4^+$ -N 吸收速率测定

培养液  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度为 400  $\mu\text{mol}/\text{L}$ , 每瓶均加入 0.3 g 湿重藻体, 于实验开始后 15 min、30 min、50 min、75 min、105 min、135 min、185 min、250 min、350 min、500 min、700 min 取样, 测定  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度。实验结束后, 将藻体置于 60 °C 烘箱中, 烘干至恒重后称其干重。

#### 1.5.4 $\text{NH}_4^+$ -N 测定方法

应用荷兰 SKALAR 流动分析仪进行  $\text{NH}_4^+$ -N 测定。

## 1.6 数据处理

### 1.6.1 藻体生长率测定

藻体体重生长率:

$$R_{GR} = (B_t - B_0) \times 100\% \quad (1)$$

幼苗体长日生长率:

$$R_{GR} = (L_t - L_0) / (t \cdot L_0) \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $R_{GR}$  为相对生长率 (%),  $B_0$  和  $L_0$  为藻体初始湿重 (g) 和体长 ( $\mu\text{m}$ ),  $B_t$  和  $L_t$  为第  $t$  天湿重 (g) 和体长 ( $\mu\text{m}$ ),  $t$  为实验天数。

### 1.6.2 藻体对 $\text{NH}_4^+$ -N 吸收效率

藻体吸收速率即为单位藻体重量吸收  $\text{NH}_4^+$ -N 速率, 计算公式:

$$V = [(C_{t+1} - C_t) \cdot V_{t+1}] / (t \cdot B) \quad (3)$$

式中:  $V$  为吸收速率 [ $\mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ ],  $C_{t+1}$ ,  $C_t$  分别为每次取样时间间隔的起始和结束时介质中  $\text{NH}_4^+$ -N 的浓度 ( $\mu\text{mol}/\text{L}$ ),  $V_{t+1}$  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 (min),  $B$  为藻体干重 (g)。

### 1.6.3 数据分析

应用 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析。藻体生长率和对  $\text{NH}_4^+$ -N 吸收动力学的特征等参数应用 “one way ANOVA” 的方法进行多重比较, 以  $P < 0.05$  作为差异显著性水平, 所得数据均以平均值  $\pm$  标准差表示。

## 2 结果

### 2.1 藻体体重相对生长率测定

图 1 为本实验条件下, 浒苔和条浒苔藻体体重相对生长率测定的实验结果。在实验前 3 d 浒苔生长率略大于条浒苔, 而在实验第 4~6 d 条浒苔生长率略大于浒苔, 两者差异并不显著 ( $P > 0.05$ )。浒苔和条浒苔藻体平均体重日相对生长率为 17.30%  $\pm$  5.0% 和 16.82%  $\pm$  5.2%。

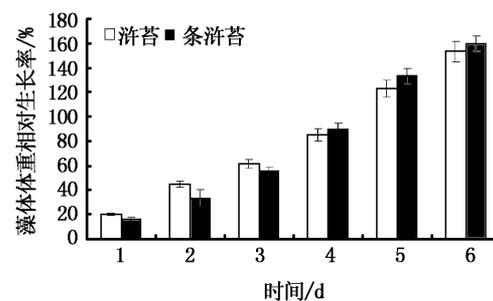


图 1 浒苔和条浒苔藻体体重相对生长率

Fig 1 The relative growth rate of body weight for *E. prolifera* and *E. clathrata thulli*

### 2.2 幼苗体长日相对生长率测定

不同温度和光照强度对浒苔和条浒苔幼苗

体长日相对增长率的影响见图 2。在温度 20 °C 和 25 °C 时,两种浒苔幼苗体长日相对增长率均保持在 40% 以上,显著高于其它温度条件下的增长率 ( $P < 0.05$ )。光照强度为  $140 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,浒苔和条浒苔幼苗在 25 °C 的体长日相对增长率显著高于 20 °C 的体长日相对增长率。除 30 °C 和 32.5 °C 外,两种浒苔幼苗体长日相对增长率随光照强度增加而升高,而在温度 30 °C 以

上,两种浒苔幼苗的生长基本停滞,甚至出现负增长的现象。统计分析表明,在 20~27.5 °C 和 20~140  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  的光照条件下,两种浒苔幼苗体长日相对增长率差异不显著 ( $P > 0.05$ )。由图 2 可知,在 25 °C 和  $140 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  时,浒苔和条浒苔体长日相对增长率分别为  $78.9\% \pm 3.32\%$  和  $82.1\% \pm 2.21\%$ 。图 3 示浒苔幼苗在 25 °C 和  $140 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  条件下生长情况。

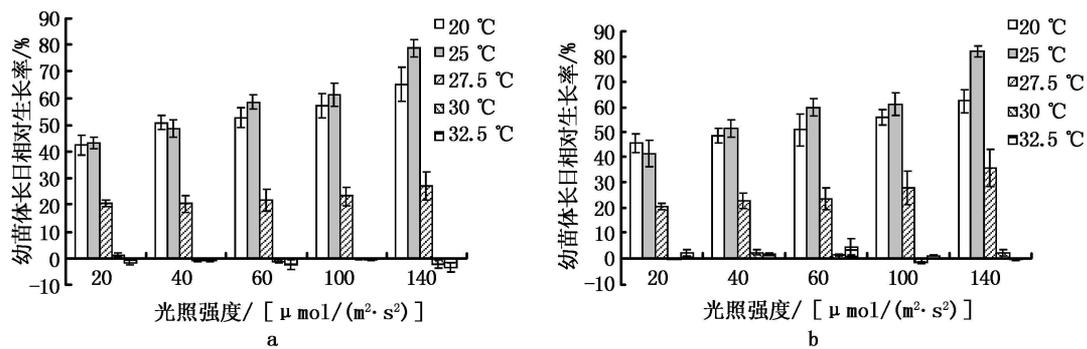


图 2 浒苔 (a) 和条浒苔 (b) 幼苗体长日相对增长率

Fig 2 The relative growth rate of seedling length in *E. prolifera* (a) and *E. clathrata* (b)

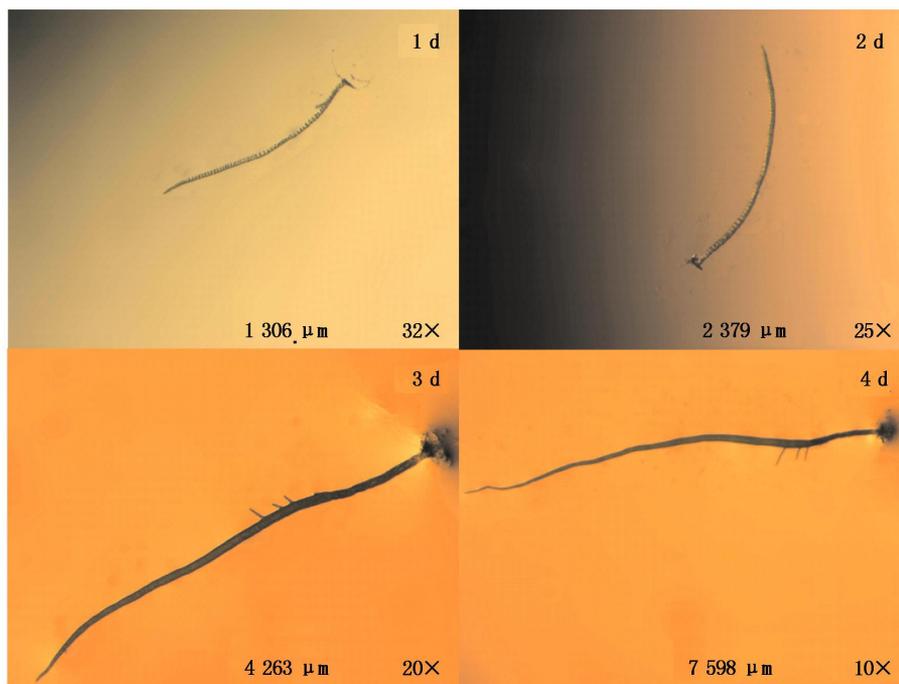


图 3 25 °C、 $140 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  培养条件下浒苔幼苗生长情况

Fig 3 Growth of *E. prolifera* seedlings cultured at 25 °C and  $140 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

### 2.3 藻体密度对 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率的影响

从图 4 可知,在实验范围内,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,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度减低幅度也越大。其中,藻体密度为 10 g/L 时,实验 7 h 后,浒苔和条浒苔培养介质中  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  去除效果最高,其  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$

浓度分别降低了 86.43% 和 84.13%，两者之间差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

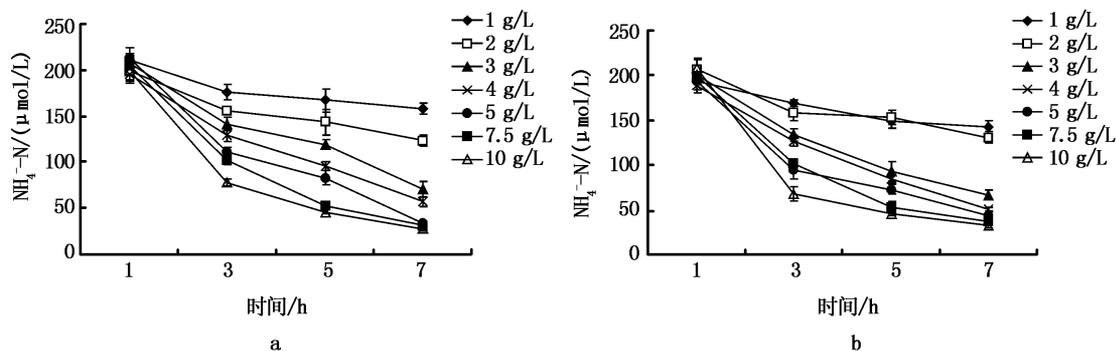


图 4 浒苔 (a) 和条浒苔 (b) 藻体密度对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度降低的影响

Fig 4 Effect of different blade density of *E. prolifera* (a) and *E. clathrata* (b) on the decrease of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration

## 2.4 氮饥饿过程中两种浒苔对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收动力学特征

图 5 显示了在 30 min 内, 不同  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  起始浓度对浒苔和条浒苔吸收速率的影响。从图 5 可知, 在  $10 \sim 400 \mu\text{mol/L}$  的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度范围内, 浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸收效率与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的起始浓度呈极显著的线性关系 ( $P < 0.01$ ), 表明在较短时间内, 浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸收机制为被动扩散。在  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度为  $400 \mu\text{mol/L}$  时, 0.5 h 后, 浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸收速率为  $(421 \pm 13.5) \mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$  和  $(409 \pm 22.3) \mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ , 两者差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

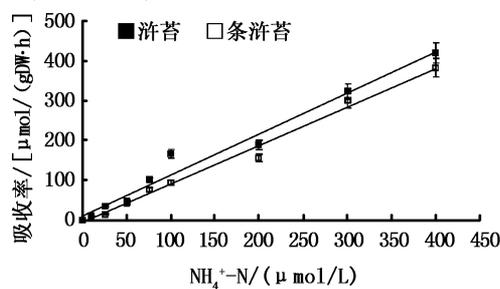


图 5 不同  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  浓度对浒苔和条浒苔吸收速率的影响

Fig 5 Effect of different  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentrations on uptake rate in *E. prolifera* and *E. clathrata*

用吸收速率对吸收时间作图 (图 6) 得到氮饥饿浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  吸收速率随时间变化的曲线。两种浒苔表现出相近的 3 个不同的吸收趋势: 在开始的大约 75 min 内吸收速率比较

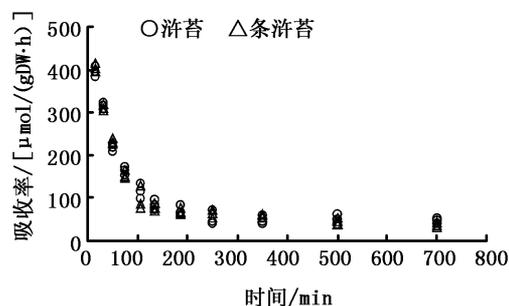


图 6 氮饥饿浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  吸收效率的变化

Fig 6 Changes of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  uptake rates in *E. prolifera* uptake rate in *E. prolifera* and *E. clathrata*

快, 最大的吸收速率达到了  $405 \mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ , 而在随后的 75~185 min 吸收速率相对比较缓慢, 吸收速率为  $69 \sim 164 \mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ , 在 250 min 之后吸收速率基本接近平缓, 此时浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的吸收速率分别为  $(53.0 \pm 3.0) \mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$  和  $(57.3 \pm 6.7) \mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ , 在 700 min 后, 吸收速率分别为  $(41.3 \pm 3.7) \mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$  和  $(37.7 \pm 6.5) \mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ 。经方差分析表明, 在  $400 \mu\text{mol/L}$  的起始浓度下, 浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  吸收速率差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 3 讨论

浒苔属 (*Enteromorpha*) 海藻生存的生态幅较宽。王建伟等<sup>[8]</sup>研究表明, 浒苔 (*E. prolifera*) 的生长对盐度、温度、光照强度和 pH 值的适应范围分别为  $16 \sim 40$ 、 $10 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $> 9 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。

s)、6~10; Dan等<sup>[9]</sup>的结果也显示,浒苔生殖细胞成熟的最适盐度范围为 5.0~52.0,孢子释放的最适盐度为 13.2~45.3,假根形成的盐度范围为 1.6~52.0之间。本实验中,在温度 20~25 °C、光照强度 60~140  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的范围内,两种浒苔幼苗的体长日生长率大于 50%以上,在 20~60  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的范围内也达到了 40%以上。本文所得到浒苔和条浒苔生长的最适温度与王建伟等<sup>[8]</sup>的报道一致,但最适的光照强度与其报道的结果却不甚相同。王建伟等<sup>[8]</sup>研究认为浒苔叶状体的最适生长点在 72  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 左右,而本实验中两种浒苔的体长日生长率随着光照强度的升高而增加,在 140  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时生长率达到最大值,显著高于在其它光照强度条件下的生长率。大型海藻的光合作用速度和藻体生长较大程度地依赖于辐照度的大小,而辐照度与光照强度的关系成正比。从本实验的结果来看,浒苔属海藻具有广辐照适应的特点,这与其广泛地生长于世界大部分地区海洋沿岸的生态习性相一致。本实验中浒苔和条浒苔幼苗的最大体长日生长率分别为 78.9%和 82.1%,略低于张寒野等<sup>[10]</sup>报道的条浒苔日相对生长率为 92.94%的值,而本实验所得的浒苔(17.30%)和条浒苔(16.82%)藻体体重日生长率在乔方利等<sup>[11]</sup>报道的浒苔日生长率 13.5%~31%的范围内,与梁宗英等<sup>[12]</sup>报道的 23%相近。本文的研究结果表明,浒苔属海藻较宽的生态幅和较快的生长率为浒苔绿潮的爆发提供了必要的生物学条件。

大型海藻能够高效去除富营养化水体中氮磷等营养盐。罗勇胜等<sup>[13]</sup>研究表明,当细基江蓠繁枝变种(*Gracilaria tenuistipitata* var *liui*)密度为 30 g/L时,对  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的相对降解率为 69.69%;毛玉泽等<sup>[14]</sup>研究了龙须菜(*Gracilaria lemaneiformis*)对扇贝排泄氮、磷有较强的吸附作用,对  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的去除率为 83.7%;温珊珊等<sup>[15]</sup>的实验表明,当真江蓠(*Gracilaria asiatica*)密度为 10 g/L时,5 h对  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的去除效率为 60%左右;本实验中,浒苔和条浒苔在 7 h内对  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的去除效率可达 86.43%和 84.13%,在 5 h的去除率也接近 80%,说明两种浒苔去除  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的效率要高于细基江蓠繁枝变种、龙须菜和真江蓠。

大型海藻对  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的吸收可区分为 3个时

段<sup>[16]</sup>:起始短期的快吸收( $V_s$ );内部  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 控制的吸收( $V_i$ );外界  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 浓度控制的吸收( $V_e$ )。这 3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化所致。在氮饥饿状态下起始 0~15 min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一种适应。Pedersen<sup>[17]</sup>曾报道,把野外生长的石莼(*Ulva lactuca*)置于室内高浓度  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 介质中,起始 15 min内对  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的吸收超过其对氮需求量的 20倍;氮饥饿细基江蓠繁枝变型在起始的 50 min内也存在着快速吸收阶段<sup>[18]</sup>。本实验也符合这一规律:两种浒苔在实验开始的 75 min内存在一快速吸收阶段,吸收方式为被动扩散。

在一定范围内海藻的最大吸收速率随  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 浓度的升高而增大。刘静雯和董双林<sup>[18]</sup>研究证实,25 °C条件下氮饥饿细基江蓠繁枝变型对  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 最大吸收速率可达 35.0~230.0  $\mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ ;温珊珊等<sup>[15]</sup>对半饥饿真江蓠的研究表明,在 20 °C和  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 浓度 100~500  $\mu\text{mol}/\text{L}$ 条件下,吸收速率可达 23.22~159.40  $\mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ 。本实验中,浒苔和条浒苔对  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的吸收效率与  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 的浓度呈极显著的线性关系,在介质中  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 浓度为 400  $\mu\text{mol}/\text{L}$ 时的吸收速率可分别达到 421和 409  $\mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ ,这与 Rees等<sup>[16]</sup>对一种浒苔(*Enteromorpha* sp.)的研究结果相近[350~400  $\mu\text{mol}/(\text{gDW} \cdot \text{h})$ ]。本实验表明,大规模漂浮聚集浒苔可高效吸收水体中  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ ,对富营养化海域有重要的生态修复作用。

本文对浒苔和条浒苔的生长和  $\text{NH}_4^+ \text{N}$ 吸收动力学特征进行了初步的研究报道,而有关非稳态条件下,两种浒苔的生长和营养吸收动力学特征还有待于进一步研究。

## 参考文献:

- [1] Hiraoka M, Ohno M, Shigeo K S, et al. Crossing test among floating *Ulva* thalli forming 'green tide' in Japan [J]. *Hydrobiologia* 2004, 512: 239-245.
- [2] Lago D B, Sembrano J, Hiraoka M, et al. Taxonomic and ecological profile of 'green tide' species of *Ulva* (*Ulvales*, *Chlorophyta*) in central Philippines [J]. *Hydrobiologia* 2004, 512: 247-253.
- [3] Worm B, Lotze H K. Effects of eutrophication, grazing and

- algal blooms on rocky shores [J]. *Limnology and Oceanography* 2006, 51: 569-579.
- [4] Dion P, Le Bozec S. The French Atlantic coasts[M]//Schramm W, Nienhuis P H. *Marine benthic vegetation: Recent changes and the effects of eutrophication*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996: 251-64.
- [5] Morand P, Briand X. Excessive growth of macroalgae: a symptom of environmental disturbance [J]. *Botanica Marina* 1996, 39: 491-516.
- [6] Morand P, Merceron M. Coastal eutrophication and excessive growth of macroalgae[M]//Pandala S G. *Recent research developments in environmental biology. Research Signpost Trivandrum, Kerala, India* 2004: 395-449.
- [7] Schramm W, Nienhuis P H. Introduction[M]//Schramm W, Nienhuis P H. *Marine benthic vegetation: Recent changes and the effects of eutrophication*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1996: 1-4.
- [8] 王建伟, 阎斌伦, 林阿朋, 等. 浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 生长及孢子释放的生态因子研究 [J]. *海洋通报*, 2007, 26(2): 60-65.
- [9] Dan A, Hiraoka M, Ohno M C. Observations on the effect of salinity and photon fluence rate on the induction of sporulation and rhizoid formation in the green alga *Enteromorpha prolifera* (Müller) J Agardh (Chlorophyta Ulvales) [J]. *Fisheries Science* 2003, 68: 1182-1188.
- [10] 张寒野, 吴望星, 宋丽珍, 等. 条浒苔海区试栽培及外界因子对藻体生长影响 [J]. *中国水产科学*, 2006, 13(5): 781-786.
- [11] 乔方利, 马德毅, 朱明远, 等. 2008年黄海浒苔爆发的基本状况与科学应对措施 [J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(3): 409-410.
- [12] 梁宗英, 林祥志, 马牧, 等. 浒苔漂流聚集绿潮现象的初步分析 [J]. *中国海洋大学学报*, 2008, 38(4): 601-604.
- [13] 罗勇胜, 李卓佳, 文国樑. 细基江蓠繁枝变型净化养殖废水投放密度研究 [J]. *南方水产*, 2006, 2(5): 7-11.
- [14] 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.
- [15] 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(4): 794-803.
- [16] Rees T A V, Grant C M, Hamens H E, et al. Measuring rates of ammonium assimilation in marine algae: use of the protonophore carbonyl cyanide m-Chlorophenylhydrazone to distinguish between uptake and assimilation [J]. *Journal of Phycology* 1998, 34: 264-272.
- [17] Pedersen M F. Transient ammonium uptake in the macroalga *Ulva lactuca* (Chlorophyta): nature, regulation and the consequences for choice of measuring technique [J]. *Journal of Phycology* 1994, 30: 980-986.
- [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.