

# 微绿球藻、隐藻和颤藻竞争氮磷营养的通路分析

曹煜成 王少沛 李卓佳\* 文国樑 陈素文

(广东省渔业生态环境重点实验室, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广州 510300)

**摘 要** 分别将微绿球藻、啮噬隐藻和绿色颤藻进行单培养和混合培养, 分析其对氮、磷营养盐的吸收及竞争作用。结果表明, 3 种微藻对氮磷的吸收速率为颤藻 > 微绿球藻 > 隐藻, 培养至第 10 天时, 无机氮的吸收量分别为 13.496、7.533 和 6.739 mg/L, 无机磷的吸收量分别为 2.165、0.581 和 0.510 mg/L。以通路分析法研究 3 种微藻两两混合培养时对氮、磷的作用程度, 发现微绿球藻和颤藻共培养, 二者对氮磷的吸收量均有所降低; 微绿球藻和隐藻共培养, 微绿球藻对氮磷的吸收起主要作用; 隐藻和颤藻共培养, 隐藻被颤藻抑制, 颤藻对氮磷的吸收远大于隐藻。

**关键词** 微藻 无机氮 无机磷 竞争 通路分析

中图分类号 X172

文献标识码 A

文章编号 1000-7075(2012)04-0099-08

## Path analysis on competition of nitrogen and phosphorus among *Nannochloropsis oculata*, *Cryptomonas erosa* and *Oscillatoria chlorine*

CAO Yu-cheng WANG Shao-pei LI Zhuo-jia\*

WEN Guo-liang CHEN Su-wen

(Key Laboratory of Fishery Ecology and Environment, Guangdong Province, Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300)

**ABSTRACT** *Nannochloropsis oculata*, *Cryptomonas erosa* and *Oscillatoria chlorine* were separately or co-cultured in inorganic culture solutions, and the consumption of nitrogen and phosphorus during the culturing was analyzed. The results showed that the absorption ability of *O. chlorine* on nitrogen and phosphorus was the highest, and that of *C. erosa* was the lowest. The nitrogen consumption by *O. chlorine*, *N. oculata*, and *C. erosa* were 13.496, 7.533, and 6.739 mg/L respectively at the tenth day, and that of phosphorus were 2.165, 0.581, and 0.510 mg/L, respectively. The effect of the microalgae co-culturing was investigated by the path analysis method. The results showed that the absorption of nitrogen and phosphorus by them both increased, indicating that the interaction of *N. oculata* and *O. chlorine* was positive. When *N. oculata* and *C. erosa* were co-cultured, *N. oculata* played a dominant role in utiliza-

公益性农业行业专项(201103034)、现代农业(虾)产业技术体系建设专项(CARS-47)、国家十二五支撑计划(2011BAD13B10)、南海水产研究所中央级科研院所基本科研专项(2007ZD01; 2012YD02)、广东省科技计划(2012B020308003)和广东省鱼病防治专项(2130108)共同资助

\* 通讯作者。E-mail: zhuojiali609@163.com, Tel: (020)84453048

收稿日期: 2011-09-13; 接受日期: 2011-11-30

作者简介: 曹煜成(1979-), 男, 助理研究员, 主要从事池塘环境调控研究。E-mail: cyc\_169@163.com, Tel: (020)84451349

tion of nitrogen and phosphorus. However, the nitrogen and phosphorus utilization ability of *C. erosa* was significantly ( $P < 0.05$ ) inhibited by *O. chlorine*.

**KEY WORDS** Microalgae Nitrogen Phosphorus Competition Path analysis

养殖水体富营养化已日渐成为制约水产业健康发展的重要问题之一。由于养殖代谢产物和残饵的累积、大量含氮磷肥料的使用等因素,导致水体中氮磷营养的积累效应尤为显著(Hu *et al.* 2010; 蔡立胜等 2004)。水环境中的浮游微藻能有效促进氮磷的吸收与转化(王朝晖等 1999),利用藻类净化水质能取得较好的效果(况琪军等 2001)。目前该领域的研究主要集中在对湖泊、海湾等开放性水体中氮磷营养的迁移和转化(陈永川等 2005; 蔡立胜等 2004),而从微藻生态净化角度研究养殖池塘水体中氮磷的吸收和转化的报道不多。在对虾养殖池塘中通常少数占据生态优势的浮游微藻对整个池塘水环境藻相的结构变化起到主导作用(刘孝竹等 2011)。因此,本研究选用对虾养殖池塘中的常见优势微藻——微绿球藻 *Nannochloropsis oculata*、嗜噬隐藻 *Cryptomonas erosa* 和绿色颤藻 *Oscillatoria chlorine*,分析其对氮磷营养盐的吸收和转化特性,以及它们作为群落共存时不同微藻对营养盐利用的贡献程度,以期建立养殖池塘优良微藻藻相调控及水环境原位修复技术提供基础参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

本研究开展时间为2010年10月~2011年1月。微绿球藻、嗜噬隐藻和绿色颤藻均分离自广东湛江东海岛的对虾养殖池塘。藻种保种于中国水产科学研究院南海水产研究所健康养殖中心。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 培养条件与培养液

培养容器为500 ml锥形瓶,使用前经120 ℃灭菌。培养温度26~28 ℃,光照强度4 000 lx,光暗比12:12,盐度15,每3 h摇动藻液1次,实验周期为10d。

根据海水对虾集约化养殖池塘的氮磷营养特点(李奕雯等 2010; 李卓佳等 2010),培藻营养液依照配方配制(李卓佳等 2009)。其中,对  $\text{NaNO}_3$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$  和柠檬酸铁的浓度进行了调整,使 N、P 和 Fe 的浓度分别达到 14、2、0.14 mg/L。

#### 1.2.2 实验分组

实验共分为6个组。其中,微绿球藻、隐藻、颤藻每种微藻的单培养各为1个实验组,上述微藻两两混合培养分别设置3个实验组,即:微绿球藻+颤藻、隐藻+颤藻、微绿球藻+隐藻。各组均设3个平行。

#### 1.2.3 接种、取样及测定

将藻液以6 000 r/min离心5 min,弃上清液;重复洗涤、离心1次,弃原培养液;以新鲜培养液悬浮,混匀后接入500 ml的锥形瓶中。各种微藻的实验初始密度均设为  $7 \times 10^4$  cells/ml。每两天取1次藻样,以甲醛固定,用血球计数板在显微镜下计数(颤藻经过超声波破碎后计数),取得细胞数( $N_{2d}$ )(彭聪聪等 2010)。氮、磷浓度按GB-海洋监测规范(国家质量技术监督局 2007)进行测定。其中无机氮(Total inorganic nitrogen, TIN)为硝酸盐氮、亚硝酸盐氮、氨氮三者之和,无机磷(Inorganic phosphorus, IP)为活性磷酸盐。

### 1.3 数据分析

对单培养微藻的细胞密度与硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-$ -N)、亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2^-$ -N)、氨氮( $\text{NH}_4^+$ -N)、IP的吸收量作简单相关性分析。其中,营养盐的吸收速率计算公式为:

$$V_{\text{吸收速率}} = (\text{原培养液内的营养盐含量} - \text{取样测定的营养盐含量}) / (\text{培养液体积} \times \text{时间})$$

对混合培养系统中不同藻种的细胞密度和 TIN、IP 浓度变化作通路分析,确定各种微藻在单培养和混合培养条件下对氮磷的吸收效果及竞争作用。通路分析(Path Analysis)是研究变量间相互关系、自变量对因变量作用方式和程度的多元统计分析技术。其中,通路分析的相关计算公式如下:

$$r_{x_i, x_j} = \frac{\sum x_i x_j - \sum x_i \sum x_j}{\sqrt{\left[ \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \right] \left[ \sum x_j^2 - \frac{(\sum x_j)^2}{n} \right]}} \quad r_{xy} = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sqrt{\left[ \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \left[ \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]}}$$

$$R^2 = \sum_{k \neq i} b_k^2 r_{ky} = b_1^* r_{x_1, y} + b_2^* r_{x_2, y} + b_3^* r_{x_3, y} + \dots \quad b_e^* = \sqrt{1 - R^2}$$

以单因素方差分析法检验相关数据间的差异显著性。其中,简单相关性分析、通路分析和单因素方差分析均采用 SPSS 12.0 软件进行计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 单培养的微藻细胞密度与硝酸盐氮的关系

随着藻细胞数量的增长,培养液中硝酸盐氮的浓度均呈现不断降低的趋势。颤藻对硝酸盐氮的总吸收量和吸收速率均显著高于微绿球藻和隐藻( $P < 0.05$ ),其中颤藻的总吸收量为 13.489 mg/L,而三者的吸收速率分别为 1.349、0.754、0.690 mg/L·d。微绿球藻、隐藻和颤藻的细胞密度与硝酸盐氮浓度均显著负相关(图 1~图 3),相关系数  $r$  分别为 -0.819、-0.91 和 -0.889( $P < 0.05$ )。

### 2.2 单培养的微藻细胞密度与亚硝酸盐氮的关系

前 4 d 微绿球藻组、颤藻组和隐藻组 3 组藻液的亚硝酸盐氮浓度均有不同程度的升高,之后随着各组微藻细胞数量的不断升高,各组亚硝酸盐氮浓度的浓度有所下降(图 4~图 6),第 10 天时,其浓度亚硝酸盐氮分别为 0.010、0.002、0.079 mg/L。微绿球藻、隐藻和颤藻的细胞密度与亚硝酸盐氮浓度的相关性不显著( $P > 0.05$ ),相关系数  $r$  分别为 -0.561、0.679、-0.641。

### 2.3 单培养的微藻细胞密度与氨氮的关系

在初始培养的前 6 d,3 组藻液的氨氮浓度都有所增加(图 7~图 9),到第 6 天后,微绿球藻组的氨氮浓度开始降低,最终浓度为 0.023 1 mg/L;隐藻组的氨氮在第 6~8 天时也开始降低,随后又升高至 0.105 8 mg/L;颤藻组的氨氮自第 4 天降低,直到最终的 0.014 2 mg/L。微绿球藻、隐藻和颤藻的细胞密度与氨氮浓度相关性不显著( $P > 0.05$ ),相关系数  $r$  分别为 0.065、0.625、-0.396。

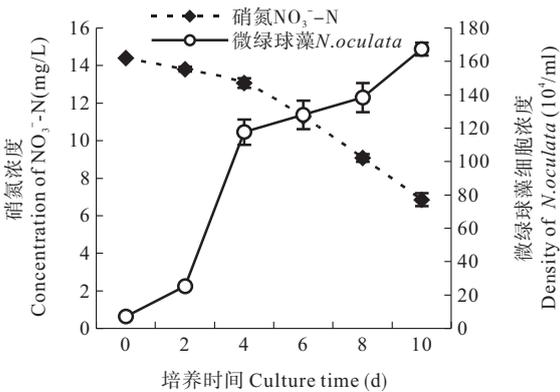


图 1 微绿球藻和硝酸盐氮的变化

Fig. 1 The variation of *N. oculata* and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N

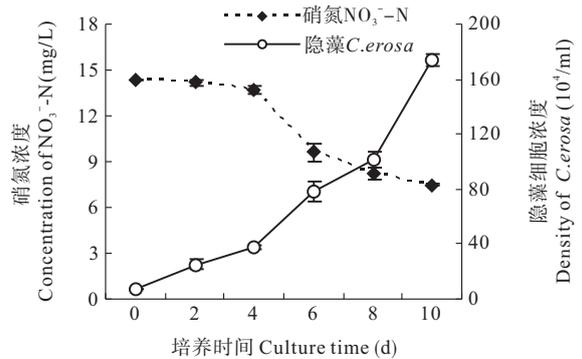


图 2 隐藻和硝酸盐氮的变化

Fig. 2 The variation of *C. erosa* and NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N

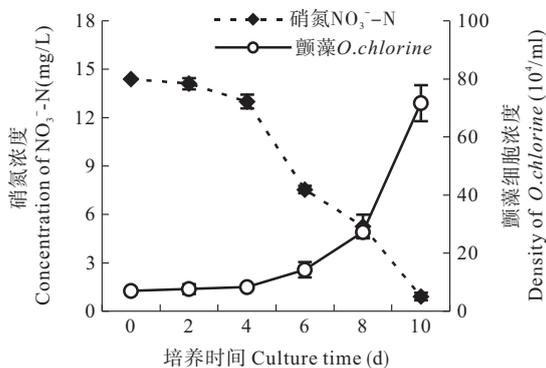


图3 颤藻和硝酸盐氮的变化

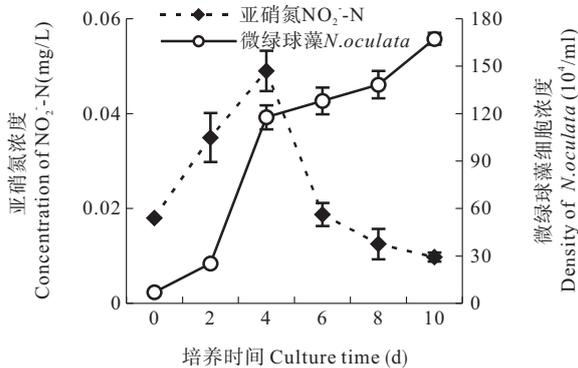
Fig. 3 The variation of *O. chlorinae* and  $\text{NO}_3^-$ -N

图4 微绿球藻和亚硝酸盐氮的变化

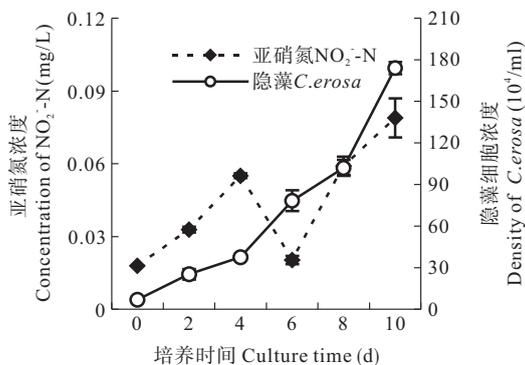
Fig. 4 The variation of *N. oculata* and  $\text{NO}_2^-$ -N

图5 隐藻和亚硝酸盐氮的变化

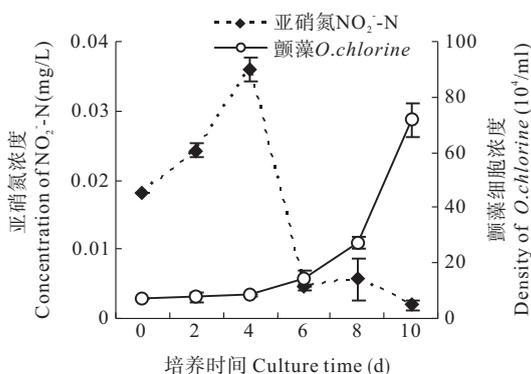
Fig. 5 The variation of *C. erosa* and  $\text{NO}_2^-$ -N

图6 颤藻和亚硝酸盐氮的变化

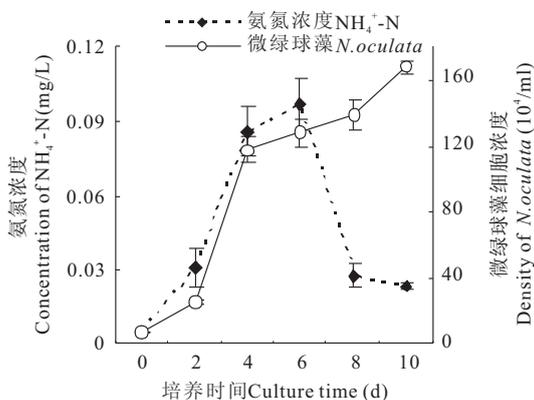
Fig. 6 The variation of *O. chlorinae* and  $\text{NO}_2^-$ -N

图7 微绿球藻和氨氮的变化

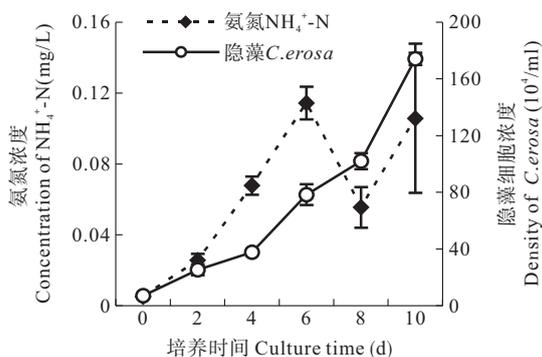
Fig. 7 The variation of *N. oculata* and  $\text{NH}_4^+$ -N

图8 隐藻和氨氮的变化

Fig. 8 The variation of *C. erosa* and  $\text{NH}_4^+$ -N

## 2.4 单培养的微藻细胞密度与 TIN、IP 的关系

随着藻细胞数量的增长,培养液中 TIN 的浓度均有所降低,到第 10 天时,微绿球藻、隐藻和颤藻的吸收量分别为 7.533、6.739、13.496 mg/L (图 10~图 12)。3 种微藻的细胞密度与 TIN 浓度均呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ),微绿球藻、隐藻和颤藻的相关系数  $r$  分别为  $-0.852$ 、 $-0.929$  和  $-0.893$ 。

颤藻对 IP 的吸收速率明显高于微绿球藻和隐藻 ( $P < 0.05$ ), 其数值分别为 0.216 5、0.058 1、0.051 0 mg/L · d (图 13~图 15)。3 种微藻的细胞密度与 IP 的浓度显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数  $r$  分别为 -0.817、-0.885、-0.965。

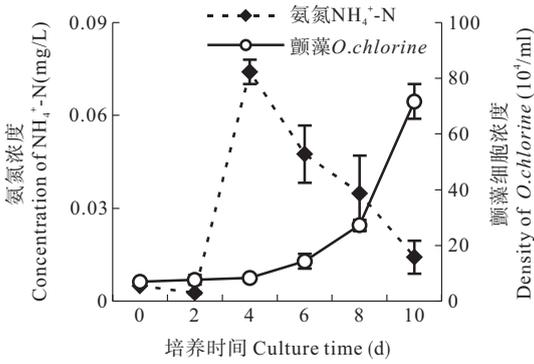


图 9 颤藻和氨氮的变化

Fig. 9 The variation of *O. chlorinae* and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$

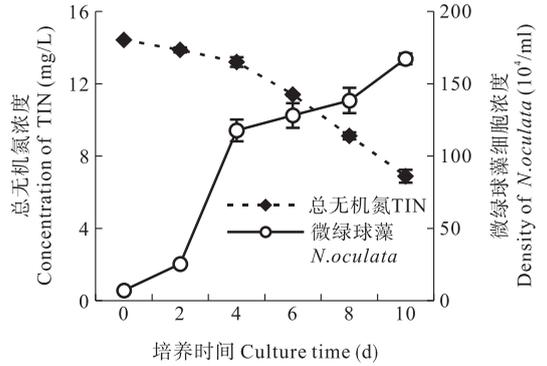


图 10 微绿球藻和总无机氮的变化

Fig. 10 The variation of *N. oculata* and TIN

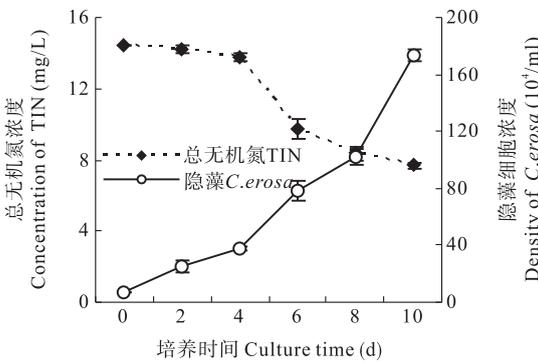


图 11 隐藻和总无机氮的变化

Fig. 11 The variation of *C. erosa* and TIN

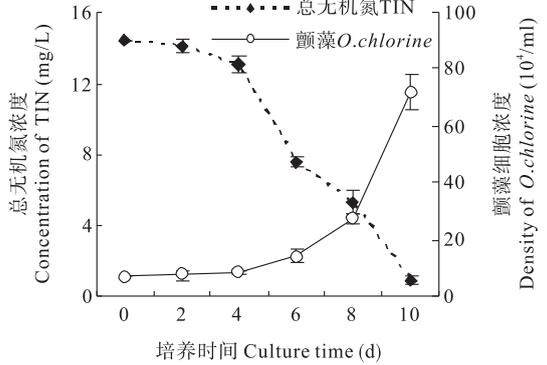


图 12 颤藻和总无机氮的变化

Fig. 12 The variation of *O. chlorinae* and TIN

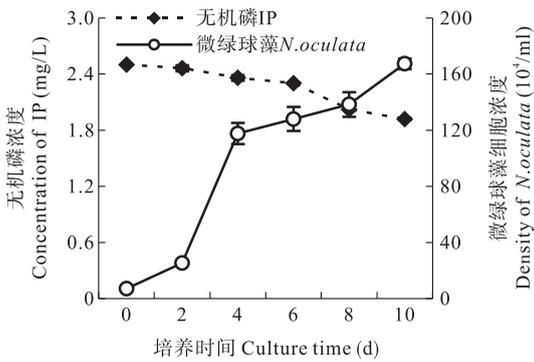


图 13 微绿球藻和无机磷的变化

Fig. 13 The variation of *N. oculata* and IP

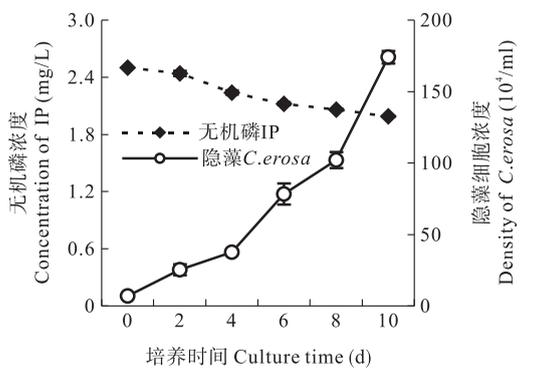


图 14 隐藻和无机磷的变化

Fig. 14 The variation of *C. erosa* and IP

## 2.5 混合培养微藻对 TIN、IP 的通路分析

### 2.5.1 微绿球藻和颤藻对 TIN、IP 的影响

颤藻与微绿球藻间具有竞争作用, 这在一定程度上限制了它们对磷的吸收。X<sub>n</sub>对 Y<sub>N</sub>的总负作用从 -0.026 增加到 -0.951, 同样 X<sub>0</sub>对 Y<sub>N</sub>的负作用也增加到 -0.978, 从决定系数 R<sup>2</sup>(i) 看, X<sub>0</sub> > X<sub>n</sub>, 说明 X<sub>0</sub> 为主

要决定因素,颤藻对 TIN 的影响具主导作用。X<sub>n</sub>和 X<sub>o</sub>对 Y<sub>p</sub>的总作用均为负值,从决定系数看,X<sub>n</sub>为主要决定因素,X<sub>o</sub>为主要的限制因素,颤藻对 IP 的影响具主导作用(表 11,表 2)。

2.5.2 隐藻和颤藻对 TIN、IP 的影响

隐藻受到颤藻的强烈抑制作用,藻细胞密度一直较低,其作用力很低,对氮、磷的影响主要决定于颤藻。X<sub>c</sub>和 X<sub>o</sub>对 Y<sub>N</sub>的负作用有所削弱。由表 1 和表 2 中的决定系数 R<sup>2</sup>(i)显示 X<sub>o</sub>远大于 X<sub>c</sub>,说明 X<sub>o</sub>为主要决定因素。

2.5.3 微绿球藻和隐藻对 TIN、IP 的影响

对 TIN 的吸收微绿球藻要稍大于隐藻,其总作用分别增加到-0.973 和-0.734,决定系数 X<sub>n</sub>远大于 X<sub>c</sub>,这可能因为微绿球藻增殖较快,合成细胞所需的营养较多。对 IP 的作用与 TIN 的相似,X<sub>n</sub>和 X<sub>c</sub>对 Y<sub>p</sub>的总作用分别增加为-0.907 和-0.871,对 Y<sub>p</sub>的决定系数相差不大,表明二者对 IP 的作用接近(表 1,表 2)。

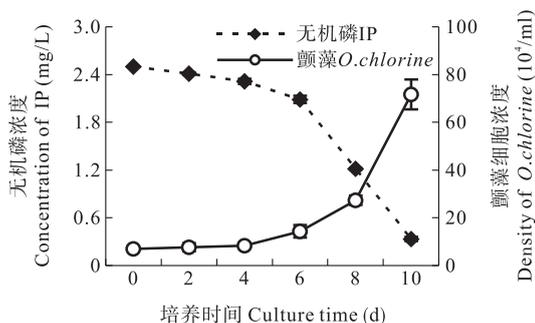


图 15 颤藻和无机磷的变化

Fig. 15 The variation of *O. chlorinae* and IP

表 1 微绿球藻、隐藻和颤藻对 TIN 的影响

Table 1 Effect of *N. oculata*, *C. erosa* and *O. chlorinae* on TIN

组别 Group	途径 Path	直接作用 Direct effect $b_i^*$	X <sub>i</sub> 通过 X <sub>k</sub> 对 Y <sub>N</sub> 的间接作用 Indirect effect of X <sub>i</sub> on Y <sub>N</sub>	$r_{xik}b_k^*$	X <sub>i</sub> 对 Y <sub>N</sub> 的总作用 Total effect of X <sub>i</sub> on Y <sub>N</sub> $r_{xiy}$	R <sup>2</sup> (i)
微绿球藻-颤藻 <i>N. oculata</i> - <i>O. chlorinae</i>	X <sub>n</sub> -Y <sub>N</sub>	-0.026	X <sub>n</sub> ↔ X <sub>o</sub> → Y <sub>N</sub>	-0.924 4	-0.951	0.048 7
	X <sub>o</sub> -Y <sub>N</sub>	-0.953	X <sub>o</sub> ↔ X <sub>n</sub> → Y <sub>N</sub>	-0.025 2	-0.978	0.956 3
	e-Y <sub>N</sub>	0.207 4			0.207 4	0.043 02
隐藻-颤藻 <i>C. erosa</i> - <i>O. chlorinae</i>	X <sub>c</sub> -Y <sub>N</sub>	-0.039	X <sub>c</sub> ↔ X <sub>o</sub> → Y <sub>N</sub>	0.139 5	0.101	0.009 36
	X <sub>o</sub> -Y <sub>N</sub>	-0.969	X <sub>o</sub> ↔ X <sub>c</sub> → Y <sub>N</sub>	0.005 6	-0.964	0.928 1
	e-Y <sub>N</sub>	0.264 6			0.264 6	0.070 0
微绿球藻-隐藻 <i>N. oculata</i> - <i>C. erosa</i>	X <sub>n</sub> -Y <sub>N</sub>	-0.922	X <sub>n</sub> ↔ X <sub>c</sub> → Y <sub>N</sub>	-0.051	-0.973	0.943
	X <sub>c</sub> -Y <sub>N</sub>	-0.070	X <sub>c</sub> ↔ X <sub>n</sub> → Y <sub>N</sub>	-0.664	-0.734	0.098
	e-Y <sub>N</sub>	0.228			0.228	0.052

注: X<sub>n</sub>为微绿球藻的生物量,X<sub>o</sub>为颤藻的生物量,X<sub>c</sub>为隐藻的生物量,Y<sub>N</sub>为无机氮 TIN 的浓度,r 为相关系数,b<sub>i</sub>为途径系数,R<sup>2</sup>(i)为决定系数,e 为剩余因素,下同。R<sub>1</sub><sup>2</sup>=b<sub>1</sub><sup>2</sup>=(−0.026)<sup>2</sup>=0.000 676,同理,R<sub>2</sub><sup>2</sup>=0.908 2,R<sub>12</sub><sup>2</sup>=2b<sub>1</sub>\*r<sub>x1x2</sub>b<sub>2</sub><sup>2</sup>=2×(−0.026)×0.970×(−0.953)=0.048 07;R<sup>2</sup>(1)=R<sub>1</sub><sup>2</sup>+R<sub>2</sub><sup>2</sup>=0.000 676+0.048 07=0.048 7

Note: X<sub>n</sub>, X<sub>o</sub>, X<sub>c</sub>are biomass of *N. oculata*, *C. erosa* and *O. chlorinae*, respectively. Y<sub>N</sub> is concentration of TIN, r is coefficient of relationship,b<sub>i</sub>is path coefficient,R<sup>2</sup>(i) is coefficient of determination,e is residual factor. R<sub>1</sub><sup>2</sup>=b<sub>1</sub><sup>2</sup>=(−0.026)<sup>2</sup>=0.000 676,R<sub>2</sub><sup>2</sup>=0.908 2, R<sub>12</sub><sup>2</sup>=2b<sub>1</sub>\*r<sub>x1x2</sub>b<sub>2</sub><sup>2</sup>=2×(−0.026)×0.970×(−0.953)=0.048 07;R<sup>2</sup>(1)=R<sub>1</sub><sup>2</sup>+R<sub>2</sub><sup>2</sup>=0.000 676+0.048 07=0.048 7

表 2 微绿球藻、隐藻和颤藻对 IP 的影响

Table 2 Effect of *N. oculata*, *C. erosa* and *O. chlorinae* on IP

组别 Group	途径 Path	直接作用 Direct effect $b_i^*$	X <sub>i</sub> 通过 X <sub>k</sub> 对 Y <sub>p</sub> 的间接作用 Indirect effect of X <sub>i</sub> on Y <sub>N</sub>	$r_{xik}b_k^*$	X <sub>i</sub> 对 Y <sub>p</sub> 的总作用 Total effect of X <sub>i</sub> on Y <sub>p</sub> $r_{xiy}$	R <sup>2</sup> (i)
微绿球藻-颤藻 <i>N. oculata</i> - <i>O. chlorinae</i>	X <sub>n</sub> -Y <sub>p</sub>	-1.158	X <sub>n</sub> ↔ X <sub>o</sub> → Y <sub>p</sub>	0.187 2	-0.971	0.907 4
	X <sub>o</sub> -Y <sub>p</sub>	0.193	X <sub>o</sub> ↔ X <sub>n</sub> → Y <sub>p</sub>	-1.123	-0.930	-0.396 3
	e-Y <sub>p</sub>	0.236 6			0.236 6	0.055 98
隐藻-颤藻 <i>C. erosa</i> - <i>O. chlorinae</i>	X <sub>c</sub> -Y <sub>p</sub>	0.023	X <sub>c</sub> ↔ X <sub>o</sub> → Y <sub>p</sub>	0.143 0	0.166	0.007 1
	X <sub>o</sub> -Y <sub>p</sub>	-0.993	X <sub>o</sub> ↔ X <sub>c</sub> → Y <sub>p</sub>	-0.003 3	-0.997	0.986 0
	e-Y <sub>p</sub>	0.077 5			0.077 5	0.006 0
微绿球藻-隐藻 <i>N. oculata</i> - <i>C. erosa</i>	X <sub>n</sub> -Y <sub>p</sub>	-0.582	X <sub>n</sub> ↔ X <sub>c</sub> → Y <sub>p</sub>	-0.325	-0.907	0.717
	X <sub>c</sub> -Y <sub>p</sub>	-0.451	X <sub>c</sub> ↔ X <sub>n</sub> → Y <sub>p</sub>	-0.419	-0.871	0.581
	e-Y <sub>p</sub>	0.281			0.281	0.079

注: Y<sub>p</sub> 为 IP 的浓度

Note: Y<sub>p</sub> is concentration of IP

### 3 讨论

水体富营养化日渐成为制约水产业健康发展的重要环境问题。随着经济的快速发展,工农业生产及生活排污使水体环境中的氮、磷、有机碳等污染源大量积累,水体生态受到破坏(李卓佳等 2010; 胡晓娟等 2010)。浮游微藻对水环境中的物质循环和能量流动具有举足轻重的作用,它对于维持水体生态系统的正常功能,促进水环境氮、磷营养的吸收与转化(王朝晖等 1999),稳定水环境是不可或缺的,况琪军等(2001)利用藻类净化水质取得了良好的效果。在水产养殖环境调控中,优良和稳定的浮游微藻藻相可促进环境营养的转化,减少并消除氨氮、亚硝酸氮、有机污染物等,还可通过光合作用提高水体溶氧,促进有机质分解。

水体中各理化因子对浮游藻类生长的影响大小依次为:磷酸盐、氨氮、铁离子、亚硝酸氮、酸碱度、硝酸氮、温度、锰离子、溶解氧(米振琴等 1999),可见营养因子对微藻有重要的影响。氮在细胞代谢中是形成氨基酸、氨基糖和胺化物等的基本元素;磷是藻类生长的另一种主要营养,是合成 ATP、核酸、磷脂等的基本元素。研究发现,微藻在生长过程中所吸收的氮磷与初始氮磷的形式与浓度有显著的相关性( $P < 0.01$ ),通常营养盐吸收快的微藻,其生物量增长也较快(陈明耀等 1995; 蒋霞敏等 2002)。

王丽卿等(2002)研究提出,在微绿球藻培养的初期,培养液中的亚硝酸氮和氨氮都同步下降,这与本研究存在差别。一般处于某种营养盐限制下的微藻被移入营养盐丰富的环境中,其吸收速率有明显的提升,限制的程度越大,其吸收速率提升得越明显。作者认为在不同的营养和环境条件下,氮磷的吸收速率可能存在一定的差别,而且无机氮的3种形态是处于动态变化的,本研究的微藻培养液中只加入了硝酸氮,而接种的藻密度相对较低,因此吸收速率小于转化速率,这可能导致了亚硝酸氮和氨氮略有升高。

种间竞争是存在于不同微藻间的一种普遍现象,在营养盐、光照及其他生态位因子上微藻种群间均存在一定的竞争作用,这也是促使微藻藻相变化的关键因素之一(Piazzi *et al.* 2002; Litchman *et al.* 2003)。据报道,*Caulerpa taxifolia* 和 *Caulerpa racemosa* 虽然属于同一属,但也存在较强的种间竞争,初期二者间的正相作用明显,随着藻细胞数量的不断增高,彼此间的抑制作用有所加强,后者明显抑制前者的生长(Piazzi *et al.* 2002)。陈德辉等(1999)提出铜绿微囊藻 *Microcystis aeruginosa* 和斜生栅藻 *Scenedesmus obliquus* (Turp.) 的实验室竞争抑制参数。Kuwata 等(2000)研究认为,氨氮和微藻的细胞数量是影响微囊藻 *Microcystis novacekii* 和四尾栅藻 *Scenedesmus quadricauda* 间竞争作用的重要因子,但它只能影响两种微藻的竞争过程,无法改变竞争结果。在水产集约化养殖中,池塘中蓝藻一旦形成优势,硅藻、隐藻和绿藻就不易成为优势种,因为蓝藻在富营养的水环境中更具有竞争优势,可对其他微藻种类产生抑制(查广才等 2004)。在以往的研究中,多以微藻的细胞数量或生物量作为主要评价指标,分析不同微藻间的竞争关系,这在一定程度上忽略了在营养这个关键因子层面的竞争效应分析。因此,本研究选用对虾养殖池塘中的常见优势微藻——微绿球藻、嗜噬隐藻和绿色颤藻,用通径分析的方法研究其对氮磷营养盐的吸收和转化特性,微藻细胞生长与氮磷营养的相关性,以及它们作为群落共存时不同微藻对营养盐利用的贡献程度。

本研究结果表明,微绿球藻和颤藻混合培养时,它们对氮磷的吸收速率最高,但其中颤藻仍是氮磷浓度降低的主要因素,微绿球藻是次要因素;在隐藻和颤藻的混合组中,隐藻一直被颤藻抑制,细胞密度较低,在对氮磷营养盐的总作用上,颤藻远大于隐藻,隐藻的作用较弱;在微绿球藻和隐藻的混合组中,微绿球藻的生长速度快于隐藻,对氮磷吸收的作用大于隐藻,尤其是对无机氮的吸收,微绿球藻成为主要决定因素。综上所述,颤藻对无机氮和无机磷的吸收效率最高,微绿球藻次之,隐藻最低,所以仅从环境营养转化与利用的角度而言,颤藻是有益的,但颤藻增殖过快容易形成水华,对水环境也是一种破坏。通常认为在水产养殖水体中形成以蓝藻为优势的微藻群落,养殖生物生长缓慢且容易发生病害(曹煜成等 2007; 彭聪聪等 2010; 刘孝竹等 2011)。

因此,在养殖水环境调控与优化时,一方面要考虑如何有效吸收环境中的富余营养盐,保持水体的清洁,另一方面还需考虑如何控制有害藻类的大量繁殖,诱发次生的水环境恶化效应。对此,作者认为可以从建立“水环境优良微藻藻相构建与维护技术”作为切入点。首先,选取若干具有生态优势的优良土著微藻种类,对其进行定向培养,促进并形成稳定藻相,使之形成生态优势压制有害微藻的生长;同时维持藻相中不同微藻间的优势平衡,以免个别微藻形成过度优势。由此,既可利用其大幅消减或消除水体环境中的富余营养盐,又可抑制

有害藻类的生长,避免次生水环境恶化的发生。

## 参 考 文 献

- 王丽卿,黄旭雄. 2002. 不同营养盐浓度下微绿球藻的生长及水体中氮磷的变化. 上海水产大学学报, 11(3):215~218
- 王朝晖,林秋奇,杞 桑,齐雨藻,骆育敏. 1999. 水网藻在不同环境条件下对氮磷的吸收能力. 中国环境科学, 19(3):257~261
- 米振琴,谢 骏,潘德博,张 跃,严旭东,庄世鹏. 1999. 精养虾池浮游植物、理化因子与虾病的关系. 上海水产大学学报, 8(4):304~308
- 刘孝竹,曹煜成,李卓佳,文国樑,李奕雯. 2011. 高位虾池养殖后期浮游微藻群落结构特征. 渔业科学进展, 32(3):84~91
- 陈永川,汤 利. 2005. 沉积物—水体界面氮磷的迁移转化规律研究进展. 云南农业大学学报, 20(4):527~532
- 陈明耀. 1995. 生物饵料培养. 北京: 中国农业出版社, 25~78
- 陈德辉,刘永定,袁峻峰,章宗涉,宋立荣,陈 坚. 1999. 微囊藻和栅藻共培养实验及其竞争参数的计算. 生态学报, 19(6):908~913
- 况琪军,谭渝云. 2001. 活性藻系统对氮、磷及有机物的去除研究. 中国环境科学, 21(3):212~216
- 李卓佳,王少沛,曹煜成,陈素文,文国樑. 2009. 地衣芽孢杆菌与3种微藻生长的相互影响. 农业环境科学学报, 28(4): 839~844
- 李卓佳,李奕雯,曹煜成,文国樑,刘孝竹. 2010. 凡纳滨对虾海水高位池养殖水体理化因子变化与营养状况分析. 农业环境科学学报, 29(10): 2 025~2 032
- 李奕雯,李卓佳,曹煜成,文国樑,刘孝竹. 2010. 对虾高密度养殖后期水质因子的昼夜变化规律. 南方水产, 6(6):26~31
- 查广才,周昌清,黄建容,何建国,麦雄伟. 2004. 凡纳对虾淡化养殖虾池微型浮游生物群落及多样性. 生态学报, 24(8):1 752~1 759
- 胡晓娟,李卓佳,曹煜成,杨宇峰. 2010. 养殖池塘生态系统中磷的收支及解磷微生物的研究进展. 安全与环境学报, 10(1): 7~11
- 海洋监测规范 GB17378. 4—2007,第4部分:海水分析
- 曹煜成,李卓佳,杨莺莺,文国樑. 2007. 浮游微藻生态调控技术在对虾养殖应用中的研究进展. 南方水产, 3(4):70~73
- 蒋霞敏. 2002. 温度、光照、氮含量对微绿球藻生长及脂肪酸组成的影响. 海洋科学, 8:9~13
- 彭聪聪,李卓佳,曹煜成,刘孝竹,胡晓娟. 2010. 虾池浮游微藻与养殖水环境调控的研究概况. 南方水产, 6(5): 74~80
- 蔡立胜,方建光,董双林. 2004. 桑沟湾养殖海区沉积物——海水界面氮、磷营养盐的通量. 海洋水产研究, 25(4):57~64
- Hu, X. J., Li, Z. J., Cao, Y. C., Zhang, J., Gong, Y. X., and Yang, Y. F. 2010. Isolation and identification of a phosphate-solubilizing bacterium *Pantoeastewartii* subsp. *stewartii* g6, and effects of temperature, salinity, and pH on its growth under indoor culture conditions. *Aquaculture International*, 18(6):1 079~1 091
- Kuwata, A., and Miyazaki, T. 2000. Effects of ammonium supply rates on competition between *Microcystis novacekii* (Cyanobacteria) and *Scenedesmus quadricauda* (Chlorophyta): simulation study. *Ecological Modelling*, 135(1): 81~87
- Litchman, E. 2003. Competition and coexistence of phytoplankton under fluctuating light: experiments with two cyanobacteria. *Aquatic Microbial ecology*, 31(3):241~248
- Piazzini, L., and Ceccherelli, G. 2002. Effects of competition between two introduced *Caulerpa*. *Marine Ecology Progress Series*, 225(11):189~195