

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

## Acta Ecologica Sinica



第32卷 第4期 Vol.32 No.4 2012

中国生态学学会  
中国科学院生态环境研究中心  
科学出版社

主办  
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

# 生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 4 期      2012 年 2 月 (半月刊)

## 目 次

固垦对南汇东滩湿地大型底栖动物的影响.....	马长安,徐霖林,田伟,等	(1007)
基于 ArcView-WOE 的下辽河平原地下水生态系统健康评价 .....	孙才志,杨磊	(1016)
京郊典型集约化“农田-畜牧”生产系统氮素流动特征 .....	侯勇,高志岭,马文奇,等	(1028)
不同辐射条件下苹果叶片净光合速率模拟.....	高照全,冯社章,张显川,等	(1037)
藏北高原典型植被样区物候变化及其对气候变化的响应.....	宋春桥,游松财,柯灵红,等	(1045)
祁连山中段林草交错带土壤水热特征及其对气象要素的响应 .....	唐振兴,何志斌,刘鹄	(1056)
祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素.....	田风霞,赵传燕,冯兆东,等	(1066)
呼伦贝尔沙地樟子松年轮生长对气候变化的响应.....	尚建勋,时忠杰,高吉喜,等	(1077)
结合激光雷达分析上海地区一次连续浮尘天气过程.....	马井会,顾松强,陈敏,等	(1085)
福建中部近海浮游动物数量分布与水团变化的关系 .....	田丰歌,徐兆礼	(1097)
香港巨牡蛎和长牡蛎幼虫及稚贝的表型性状.....	张跃环,王昭萍,闫喜武,等	(1105)
东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征.....	李慧,王江涛	(1115)
起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响.....	魏杰,赵文,杨为东,等	(1124)
不同磷条件下塔玛亚历山大藻氮的生态幅.....	文世勇,宋琍琍,龙华,等	(1133)
秦岭天然次生油松林冠层降雨再分配特征及延滞效应.....	陈书军,陈存根,邹伯才,等	(1142)
伊犁河谷北坡垂直分布格局及其与环境的关系——一种特殊的双峰分布格局.....	田中平,庄丽,李建贵	(1151)
濒危种四合木与其近缘种霸王水分关系参数和光合特性的比较.....	石松利,王迎春,周红兵,等	(1163)
干旱胁迫下黄土高原 4 种乡土禾草抗氧化特性 .....	单长卷,韩蕊莲,梁宗锁	(1174)
施加角担子菌 B6 对连作西瓜土壤微环境和西瓜生长的影响 .....	肖逸,王兴祥,王宏伟,等	(1185)
内蒙古典型草原区芨芨草群落适生境.....	张翼飞,王炜,梁存柱,等	(1193)
盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系.....	管孝艳,王少丽,高占义,等	(1202)
黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性.....	刘春利,胡伟,贾宏福,等	(1211)
松嫩平原玉米带农田土壤氮密度时空格局.....	张春华,王宗明,居为民,等	(1220)
小麦冬性强弱评价体系的建立.....	王鹏,张春庆,陈化榜,等	(1230)
唐家河自然保护区高山姬鼠和中华姬鼠夏季生境选择的比较.....	黎运喜,张泽钧,孙宜然,等	(1241)
西花蓟马在 6 种蔬菜寄主上的实验种群生命表 .....	曹宇,鄧军锐,孔译贤	(1249)
同位素富集-稀释法研究食性转变对鱼类不同组织 N 同位素转化率的影响 .....	曾庆飞,谷孝鸿,毛志刚,等	(1257)
基于生态网络分析的南京主城区重要生态斑块识别.....	许文雯,孙翔,朱晓东,等	(1264)
珠三角城市绿地 CO <sub>2</sub> 通量的季节特征.....	孙春健,王春林,申双和,等	(1273)
污染场地地下水渗流场模拟与评价——以柘城县为例.....	吴以中,朱沁园,刘宁,等	(1283)
<b>专论与综述</b>		
湿地退化研究进展.....	韩大勇,杨永兴,杨杨,等	(1293)
绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评 .....	杨荣,苏永中,王雪峰	(1308)
<b>问题讨论</b>		
抗辐射菌 <i>Deinococcus radiodurans</i> 的多样性 .....	屠振力,方俐晶,王家刚	(1318)
平茬措施对柠条生理特征及土壤水分的影响 .....	杨永胜,卜崇峰,高国雄	(1327)
<b>研究简报</b>		
祁连山典型灌丛降雨截留特征.....	刘章文,陈仁升,宋耀选,等	(1337)
野生鸭儿芹种子休眠特性及破除方法.....	喻梅,周守标,吴晓艳,等	(1347)



**封面图说:** 遗鸥群飞来——遗鸥意即“遗落之鸥”(几乎是最后才被发现的新的鸥种,因此得名)。1931年,瑞典动物学家隆伯格撰文记述在中国额济纳采到了标本。1987年,中国的鸟类学家在鄂尔多斯的桃力庙获得了一对遗鸥的标本。1990年春夏之交,发现了湖心各岛上大量的遗鸥种群。近年来的每年夏季,大约全球 90% 以上的遗鸥都会到陕西省神木县境内的沙漠淡水湖-红碱淖上聚集。遗鸥——国家一级重点保护、CITES 附录一物种。

**彩图提供:** 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201101030004

李慧, 王江涛. 东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征. 生态学报, 2012, 32(4): 1115-1123.

Li H, Wang J T. Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum*. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1115-1123.

## 东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争特征

李 慧, 王江涛\*

(中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

**摘要:**对东海原甲藻和中肋骨条藻按照起始 Chl-a 比 1:5、1:1 和 5:1 进行了 f/2 条件下的共培养实验, 以探讨这两种藻的种间竞争特征。实验结果表明在共培养体系中, 中肋骨条藻完全占优势, 而东海原甲藻的生长受到明显的抑制。应用 Lotka-Volterra 种间竞争模型对共培养实验进行模拟的结果表明, 东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争结果与初始密度配比无关, 中肋骨条藻总会竞争胜过东海原甲藻。为了探讨他感作用对东海原甲藻和中肋骨条藻种间竞争的影响, 采用了中肋骨条藻的无藻细胞滤液来进行培养实验。实验结果显示, 中肋骨条藻滤液对东海原甲藻及其本身的生长均无明显影响, 这表明他感作用并非中肋骨条藻获得优势的主要竞争方式。

**关键词:**种间竞争; 他感作用; 东海原甲藻; 中肋骨条藻

### Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum*

LI Hui, WANG Jiangtao\*

Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

**Abstract:** *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* are two most typical red tide species in the East China Sea. They can coexist in natural phytoplankton community, but during algal blooms, *P. donghaiense* blooms are frequently observed following *S. costatum* blooms. Many studies have been conducted to clarify the relationship between these two species, but until recently, the mechanism controlling the bloom succession between *S. costatum* and *P. donghaiense* is still not resolved. In order to examine the competition between these two species and the effect of allelopathy, this study conducted series bi-algal culture experiments and filtrate experiments.

The bi-algal experiments of *P. donghaiense* and *S. costatum* were conducted in f/2 medium. The initial ratios of Chl-a of the two algae were 1:5, 1:1 and 5:1, respectively. Experimental results showed that *S. costatum* suppressed *P. donghaiense* and become completely dominant in the bi-algal culture. The growth tendency and the maximum growth rate  $\mu$  of in the bi-algal culture were similar. On the contrary, the growth of *P. donghaiense* was significantly suppressed by *S. costatum* from the 5th day and its average maximum cell density in the bi-algal culture was much lower than that in its monoculture. The results showed *S. costatum* might have a superior survival strategy to *P. donghaiense*.

To investigate the interaction between *P. donghaiense* and *S. costatum* in the bi-algal culture, Lotka-Volterra model was applied to simulate our results. The simulated results showed that the carrying capacity (K) and growth rate (r) of *S. costatum* were much higher than that of *P. donghaiense*, and *S. costatum* apparently inhibited growth of *P. donghaiense* in the bi-algal culture. The model indicated that *S. costatum* would always outcompete *P. donghaiense* in the bi-algal culture, and initial cell densities induce little effect on the competitive outcome, which matched the experimental results.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41076065); “973”项目(2010CB428701)

收稿日期: 2011-01-03; 修订日期: 2011-10-31

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jtwang@ouc.edu.cn

In order to study whether allelopathy could affect the competition between these two species, the filtrates of *S. costatum* cultivated under f/2 medium were used to incubate *P. donghaiense* and *S. costatum*. The results indicated that under f/2 level, N/P=40 level and N/P=120 level, both *P. donghaiense* and *S. costatum* in filtrate cultures exhibited the same growth trends as their controls. Therefore, *S. costatum* filtrates induced little allelopathic effect on the growth of *P. donghaiense* and itself, and the result might suggest allelopathy was not the critical mechanism for *S. costatum* to achieve dominance.

In this study, concentration of nutrients in bi-algal and mono-algal cultures was analyzed. The results showed that in bi-algal cultures, nutrient uptake curves, especially the  $\text{PO}_4\text{-P}$  uptake curve, were similar to those of *S. costatum* in mono-algal cultures. This similarity might imply that, the advantaged physiological characteristics of *S. costatum*, such as higher growth rate, and superior adaptability to absorb nutrients, could contribute for it to outcompete *P. donghaiense*. In addition, as a sticky algae, *S. costatum* might inter-specifically coagulate and then remove *P. donghaiense* from the culture medium.

**Key Words:** inter-specific competition; allelopathy; *Prorocentrum donghaiense*; *Skeletonema costatum*

东海原甲藻(*Prorocentrum donghaiense*)与中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)是我国近海主要的两种赤潮藻种,几乎每年都会爆发大规模的赤潮。在自然条件下东海原甲藻与中肋骨条藻可以共存,并且在某些海域的赤潮形成过程中常会产生交互演替现象<sup>[1-2]</sup>,但是目前对这两种藻赤潮的发生及演替原因、控制机制等方面的了解还远远不够。浮游植物的种间竞争在赤潮的发生和演替中起着重要的作用。不同的浮游植物可能采用不同的竞争方式,其中,他感作用是一种常见而有效的种间作用方式,并且被认为是影响浮游植物群落发展及演变的一个重要因素<sup>[3-6]</sup>。本文首先通过东海原甲藻与中肋骨条藻的共培养实验,观察两种藻的种间竞争结果;其次通过滤液培养实验讨论他感作用在这两种藻竞争中的作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

实验所采用的东海原甲藻和中肋骨条藻取自中国海洋大学海洋污染生态化学实验室微藻培养室。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 实验设计

首先进行了预实验,以统计在营养盐充足条件下东海原甲藻和中肋骨条藻单个藻细胞 Chl-a 的量。结果显示生长良好的条件下单个藻细胞的 Chl-a 含量,东海原甲藻与中肋骨条藻之比约为 3:2,本文以此来设计两种藻培养实验的初始密度和共培养的 Chl-a 比例。

#### (1) 单培养实验

取指数生长期的东海原甲藻按照  $(0.3, 1.0, 1.5) \times 10^4$  个/mL 的起始藻密度,接种于 400mL 灭菌的 f/2 培养基中进行单培养,中肋骨条藻单培养的初始密度则为  $(0.45, 1.5, 2.25) \times 10^4$  个/mL。此单培养组作为整个实验的对照组,每组设 3 个平行,实验进行 7d。

#### (2) 共培养实验

东海原甲藻与中肋骨条藻的共培养共设置 3 个实验组,采用灭菌的 f/2 培养基,培养体积 400mL,每组设 3 个平行样,实验进行 7d。具体的初始 Chl-a 比例及密度组合如表 1 所示。

#### (3) 共培养的模拟

对东海原甲藻与中肋骨条藻的共培养结果采用 Lotka-Volterra 种间竞争模型进行模拟,模拟方程可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$\frac{dx}{dt} = r_x x \left[ \frac{(K_x - x)}{K_x} \right] - Axy = r_x x \left[ \frac{(K_x - x - ay)}{K_x} \right] \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = r_y y \left[ \frac{(K_y - y)}{K_y} \right] - Bxy = r_y y \left[ \frac{(K_y - y - bx)}{K_y} \right] \quad (2)$$

$x$  与  $y$  分别表示东海原甲藻和中肋骨条藻的细胞密度; $r_x$  与  $K_x$  表示东海原甲藻的增长率和最大生物量; $r_y$  与  $K_y$  为中肋骨条藻的增长率和最大生物量; $A$  表示中肋骨条藻对东海原甲藻的影响程度, $B$  则表示东海原甲藻对中肋骨条藻的影响程度; $A=ar_x/K_x$ ,  $B=br_y/K_y$ ,  $a$  与  $b$  分别表示与种内作用相比另一种藻对自身的影响程度。在单培养体系中  $a=b=0$ , 由方程(1)和(2)可以求得 Logistic 参数  $r_x$ 、 $K_x$ 、 $r_y$  及  $K_y$ , 再通过共培养的数据由方程(1)和(2)可以得到  $a$  与  $b$ , 当藻密度的实验结果与理论结果差异最小时,  $a$  与  $b$  有最佳值。

表 1 东海原甲藻与中肋骨条藻共培养的 Chl-a 比例及初始藻密度

Table 1 The initial Chl-a ratios and cell densities of *P. donghaiense* and *S. costatum* in bi-algal cultures

实验组 Experimental groups	东海原甲藻与中肋骨条藻初始 Chl-a 比例 The initial Chl-a ratios of <i>P. donghaiense</i> and <i>S. costatum</i>	东海原甲藻初始密度 The initial cell density of <i>P. donghaiense</i> /( $\times 10^4$ 个/mL)	中肋骨条藻初始密度 The initial cell density of <i>S. costatum</i> /( $\times 10^4$ 个/mL)
1	1:5	0.3	2.25
2	1:1	1.0	1.5
3	5:1	1.5	0.45

#### (4) 滤液培养实验

在 f/2 培养基中培养中肋骨条藻至 12d(衰亡期), 取适量藻液通过  $0.45\mu\text{m}$  的滤膜过滤得到中肋骨条藻的无藻细胞滤液。用 HCl 调滤液 pH 为 7.9—8.2, 并按照以下 3 种方式进行营养盐加富: ① f/2 水平,  $880\mu\text{mol/L NO}_3\text{-N}$  和  $32\mu\text{mol/L PO}_4\text{-P}$ ; ② N/P=40 水平,  $530\mu\text{M NO}_3\text{-N}$  和  $13\mu\text{mol/L PO}_4\text{-P}$ ; ③ N/P=120 水平,  $450\mu\text{mol/L NO}_3\text{-N}$  和  $3.7\mu\text{mol/L PO}_4\text{-P}$ 。取指数期的中肋骨条藻按照初始密度  $1.5\times 10^4$  个/mL 接种至上述滤液中进行单培养, 东海原甲藻的接种密度则为  $1.0\times 10^4$  个/mL, 并分别以具有相同营养盐浓度和初始藻密度的海水培养基作为对照组。滤液培养组与海水对照组的培养体积均为 400ml, 每组设 3 个平行, 实验进行 7d。

#### 1.2.2 培养条件

所有的培养实验均在光照培养箱中进行, 温度设置为  $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ , 光照采用白色冷光源, 光照度 4000lx, 光暗比为 12h:12h, 每天定时摇瓶, 以防止藻细胞黏附及缺氧。

#### 1.2.3 测试方法

每天定时取 5mL 藻液用 Lugol's 碘液固定后用于显微镜计数(Leica DM4000B, Germany)。计数采用血球计数板, 每个样品计数 6 次取平均值, 并换算成个/mL。另外, 对于单培养及共培养实验组, 每天过滤取 10ml 无藻细胞滤液, 在  $-20^\circ\text{C}$  下保存, 用作测定营养盐含量(Quatro Bran+Luebbe, Germany)。

#### 1.2.4 计算方法

通过每组实验的平行样计算平均值及标准偏差( $n=3$ )。实验组与对照组的显著性差异用 one-way ANOVA 进行分析, Tukey tests( $\alpha=0.05$ )用于平均值的检验<sup>[8]</sup>。 $P<0.05$  作为显著性差异的标准。

## 2 实验结果

### 2.1 共培养实验及模拟

#### (1) 共培养实验结果

图 1 表示了共培养体系中, 东海原甲藻与中肋骨条藻的藻密度随时间的变化。在 1:5、1:1 和 5:1 三种初始 Chl-a 比例下的共培养结果显示, 中肋骨条藻的生长趋势与对照组基本一致, 而东海原甲藻的生长会受到一定程度的抑制。在 Chl-a 1:5 的共培养体系中, 中肋骨条藻与对照组的藻密度无明显差别( $P=0.92>0.05$ ), 并且具有相近的生长率  $\mu$ <sup>[9]</sup>( $\mu_{\text{max}}$  分别为  $1.19/\text{d}$  和  $1.13/\text{d}$ ); 东海原甲藻在前 5d 没有受到明显影响, 但从第 6 天开始藻密度迅速衰减, 与对照组相比表现出明显的生长受抑制现象( $P=0.03<0.05$ ), 最大抑制率(IR, Inhibition Ratio)<sup>[10]</sup>为 96%, 最大藻密度仅为对照组的 36.8%。对于 Chl-a 1:1 及 Chl-a 5:1 共培组, 藻的竞争情况与 Chl-a 1:5 组基本类似, 即, 中肋骨条藻生长无明显影响( $P$  分别为 0.94 和 0.84, 均大于 0.05), 而东海原甲藻 5d 后受到明显的抑制( $P$  均为  $0.04<0.05$ ), 最大抑制率分别为 89% 和 75%。

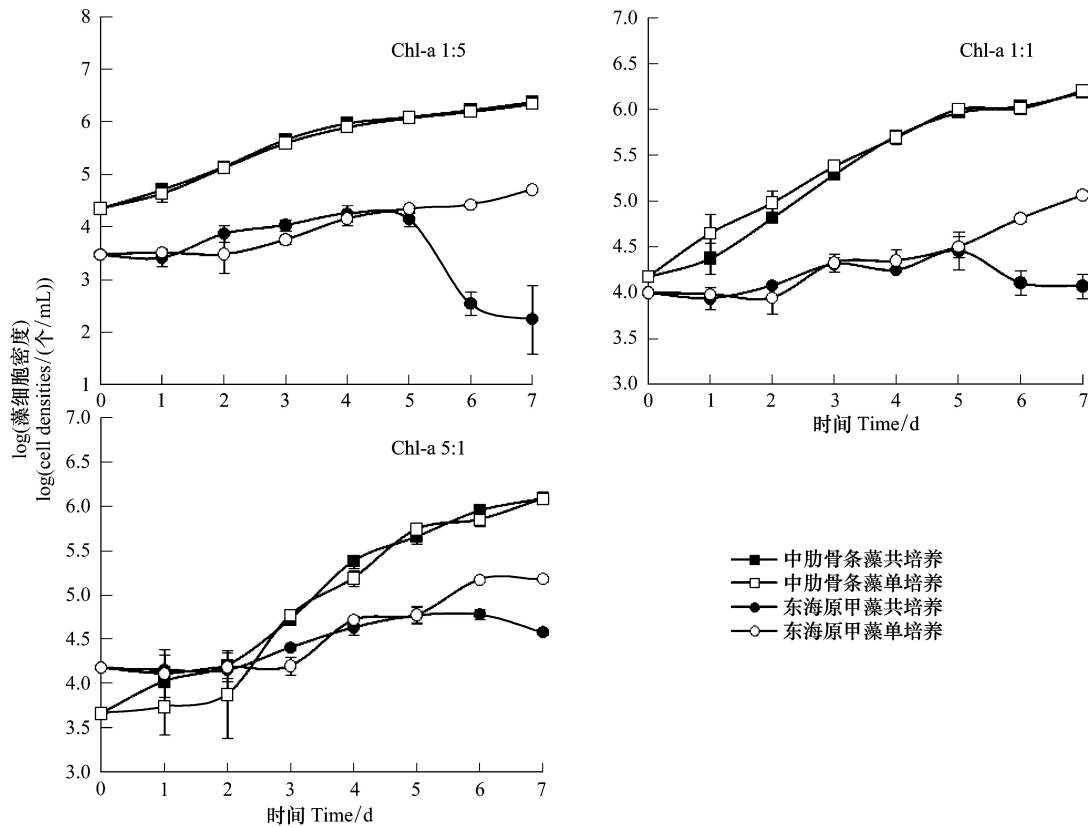


图 1 不同初始 Chl-a 比例的共培养实验中藻密度随时间的变化

Fig. 1 Cell densities of algae in bi-algal cultures with different initial Chl-a ratios

(2) 共培养的模拟

对东海原甲藻与中肋骨条藻共培养的实验结果采用 Lotka-Volterra 种间竞争模型进行模拟,模拟结果如下表 2。

表 2 东海原甲藻与中肋骨条藻的模拟参数

Table 2 The Estimated parameters of *P. donghaiense* and *S. costatum*

藻种 Algae species	最大生物量 $K$ Maximum biomass /(个/mL)	生长率 $r$ Growth rate /d	$a$ 或 $b$	$A$ 或 $B$ ( $\text{mL} \cdot \text{个}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ )
东海原甲藻 <i>P. donghaiense</i>	$1.14 \times 10^6$	0.42	1.53	$5.70 \times 10^{-7}$
中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	$2.69 \times 10^6$	0.98	0.89	$3.23 \times 10^{-7}$

可以发现,单培养体系中,中肋骨条藻的最大生物量及生长率均大于东海原甲藻,而且  $a(A)$  大于  $b(B)$ ,即在共培养体系中,中肋骨条藻对东海原甲藻的抑制程度较大。由于  $bK_x < K_y$  且  $aK_y > K_x$ ,因此模拟结果表明,两种藻类不论以何种初始密度组合进行共培养,中肋骨条藻会竞争胜过东海原甲藻,与实验结果一致。

2.2 滤液培养实验

本文获取中肋骨条藻的滤液来进行培养实验,以检验其对受试藻是否具有他感作用。f/2 水平、N/P=40 水平及 N/P=120 水平 3 种营养盐条件下的滤液培养结果(图 2)。对于 f/2 培养体系,中肋骨条藻的滤液组与对照组有相近的生长趋势,  $P=0.96 > 0.05$ ,最大生长率也基本一致,分别为 1.31/d 和 1.19/d;东海原甲藻有相同的实验结果,实验组与对照组的生长状况无明显差别,  $P=0.99 > 0.05$ 。在营养盐限制(P 限制)的滤液体系中,N/P=40 和 N/P=120 滤液体系中的实验结果与 f/2 体系类似,即,中肋骨条藻滤液对骨条藻本身无影响( $P$  分别为 0.94 和 0.95  $> 0.05$ ),对东海原甲藻的生长亦无明显影响( $P$  分别为 0.85 和 0.79  $> 0.05$ )。

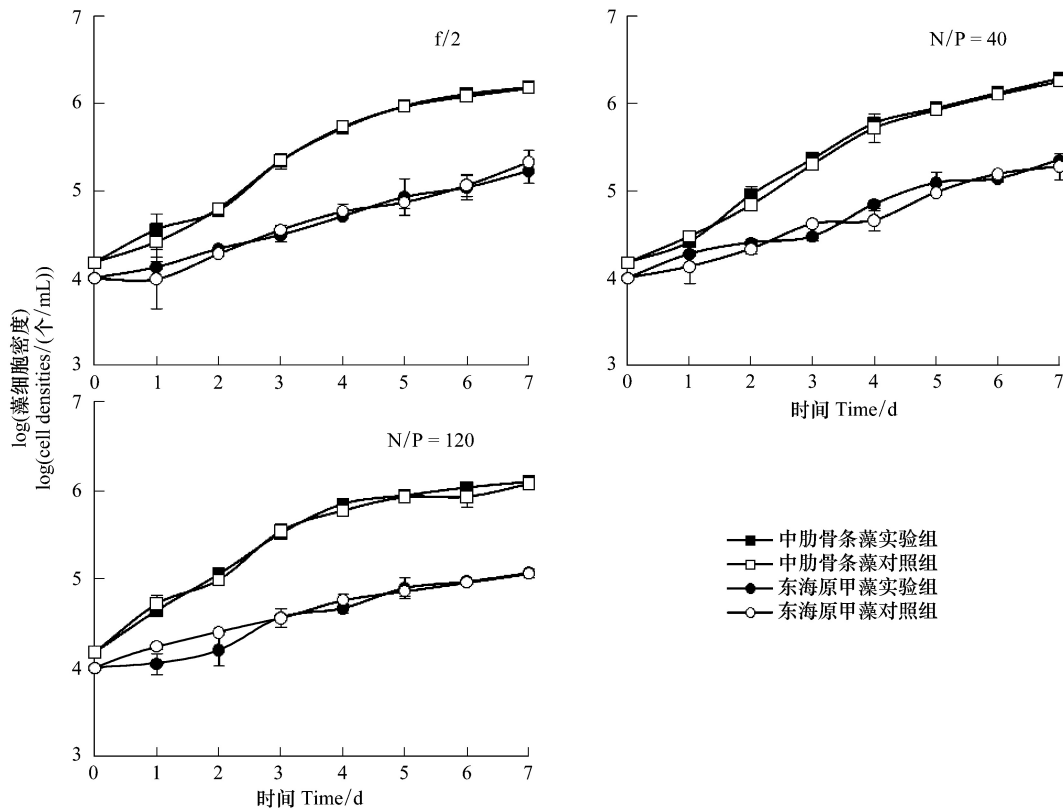


图2 藻类在不同营养盐条件的中肋骨条藻滤液中的生长

Fig. 2 The growth of algae in filtrates of *S. costatum* with different nutrient conditions

### 2.3 共培养条件下的营养盐吸收情况

图3—图5 分别表示了东海原甲藻与中肋骨条藻共培养组(图5)及相应单培养组(图3,图4)对  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{PO}_4\text{-P}$  的吸收情况,不同的图标表示不同的接种密度或初始 Chl-a 比例。

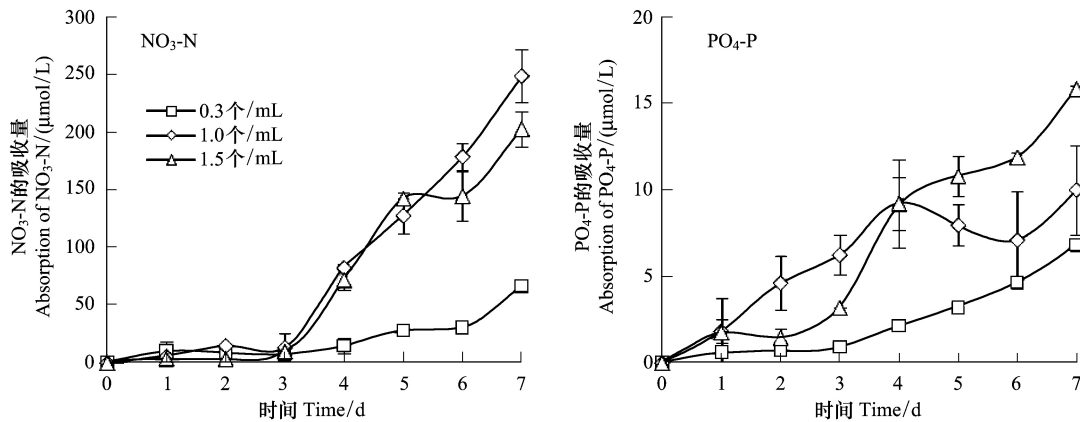


图3 对照组东海原甲藻的营养盐吸收曲线

Fig. 3 The nutrient uptake curve of *P. donghaiense* in mono-algal cultures

从图3可以看出,东海原甲藻从第4天才开始对  $\text{NO}_3\text{-N}$  有明显的吸收,且初始密度越低则  $\text{NO}_3\text{-N}$  的吸收速率越小; $\text{PO}_4\text{-P}$  的吸收情况也与起始密度相关,初密度越大则吸收速率越高,培养7d的最大吸收量为  $15.39\mu\text{mol/L}$ 。对比图3和图4可以发现,中肋骨条藻对  $\text{NO}_3\text{-N}$  和  $\text{PO}_4\text{-P}$  的吸收情况与东海原甲藻明显不同,其在实验进行第2天甚至第1天就对营养盐有较大吸收, $\text{PO}_4\text{-P}$  的吸收尤其明显,体系中的  $\text{PO}_4\text{-P}$  在第4

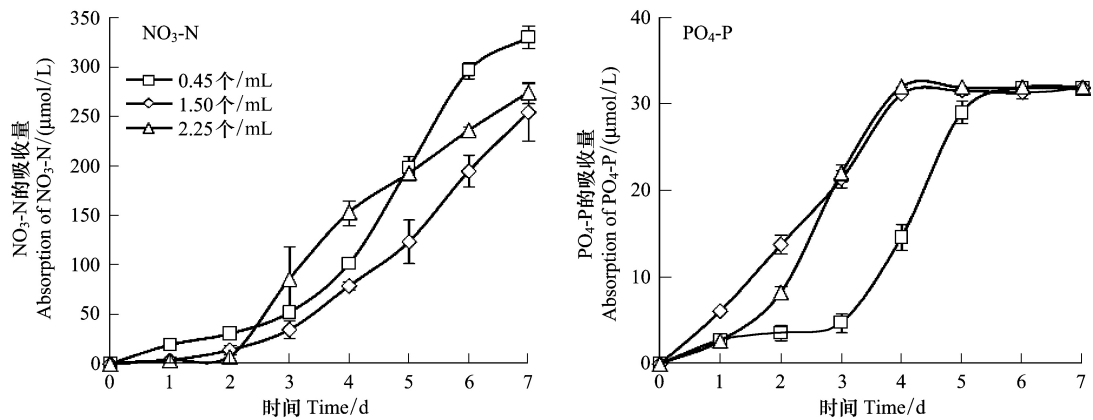


图4 对照组中肋骨条藻的营养盐吸收曲线

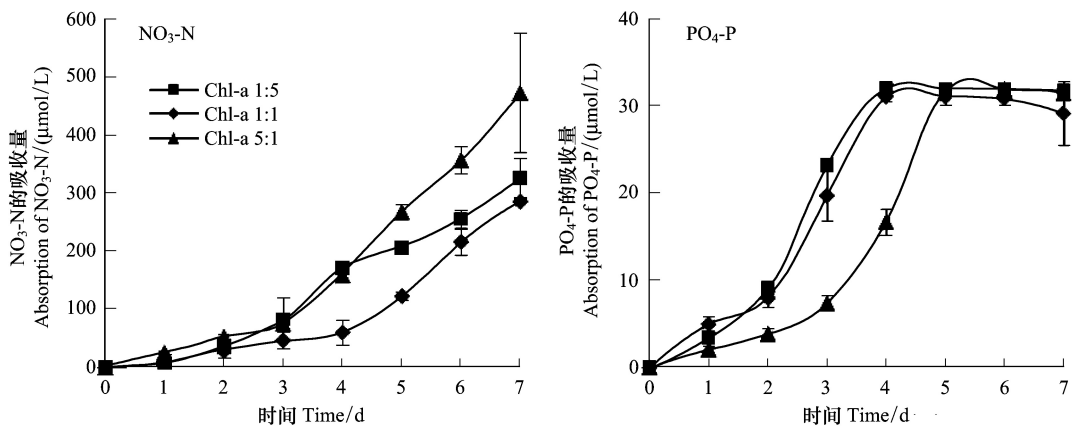
Fig. 4 The nutrient uptake curve of *S. costatum* in mono-algal cultures

图5 东海原甲藻与中肋骨条藻共培养条件下的营养盐吸收曲线

Fig. 5 The nutrient uptake curve in bi-algal cultures of *P. donghaiense* and *S. costatum*

天(初密度  $1.5$  和  $2.25 \times 10^4$  个/mL)或第 5 天(初密度  $0.45 \times 10^4$  个/mL)就基本耗尽。图 5 显示了共培养体系中的营养盐吸收情况。可以发现共培养体系对营养盐的吸收特征与单培养中肋骨条藻的营养盐吸收情况更为接近,  $\text{NO}_3\text{-N}$  的吸收由中肋骨条藻与东海原甲藻共同贡献,中肋骨条藻的吸收量更多;  $\text{PO}_4\text{-P}$  则主要被中肋骨条藻吸收,吸收曲线与中肋骨条藻对照组的吸收曲线很相近,共培体系中的  $\text{PO}_4\text{-P}$  最终会被耗尽。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 共培养实验

为了研究东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争关系,本文首先采用了共培养的实验方法,并设计了两种藻不同的初始 Chl-a 比例。很多研究表明,浮游植物间的竞争结果与起始密度组合有关,例如, Uchida 等<sup>[7]</sup>对 *Heterocapsa circularisquama* 与 *Gymnodinium mikimotoi* 进行共培养实验和模型模拟的结果发现, *H. circularisquama* 与 *G. mikimotoi* 的种间竞争结果受初始密度组合的影响。Wang 等<sup>[11]</sup>对 *Alexandrium tamarense* 和 *P. donghaiense* 按照不同的初始密度组合进行共培养,结果发现,两种藻的相互作用程度依赖于初始密度,模型的模拟结果显示 *A. tamarense* 较 *P. donghaiense* 有更大的竞争优势。王朝晖等<sup>[12]</sup>对海洋卡盾藻与中肋骨条藻的种间竞争进行研究,也发现竞争结果明显受到初始接种比例的影响,海洋卡盾藻在竞争中基本处于劣势,但当其细胞密度远高于中肋骨条藻时会取得竞争优势。

本文对东海原甲藻与中肋骨条藻进行共培养的实验结果与上述研究有所不同,实验发现东海原甲藻与中肋骨条藻的竞争结果并不依赖于初始密度配比。在不同初始 Chl-a 比的共培养实验中,中肋骨条藻都会完全



占竞争优势,而东海原甲藻受到完全的抑制。本文应用 Lotka-Volterra 种间竞争模型对两种藻的共培养结果进行模拟,结果发现, $a=1.53$ , $b=0.89$ ,即中肋骨条藻对东海原甲藻的抑制程度比东海原甲藻对中肋骨条藻的抑制程度高将近两倍,且 $bK_x < K_y$ , $aK_y > K_x$ 。通过实验和模拟结果可以认为,在营养盐充足的条件下,初始 Chl-a 的比例(初始密度配比)对中肋骨条藻与东海原甲藻竞争结果的影响不大,中肋骨条藻会是完全的优势种。

很多研究认为浮游植物的种间竞争结果与他感作用有关<sup>[13-15]</sup>,例如,Wang 等<sup>[16]</sup>认为,在 *Scripsiella trochoidea* 和 *P. donghaiensis* 的共培养体系中,*S. trochoidea* 可以依靠他感作用获取竞争优势。赵晓玮等<sup>[17]</sup>在研究赤潮异湾藻和米氏凯伦藻间相互作用时发现,不同起始生物量比对共培养体系中两种微藻的生长和竞争影响显著,并且认为他感作用是导致实验结果的可能原因。Tameishi 等<sup>[18]</sup>认为 *Prorocentrum minimum* 可以产生高分子量的多糖组分来抑制 *S. costatum* 的生长。Liu 等<sup>[19]</sup>研究发现在共培养及滤液培养实验中,*Phaeocystis globosa* 对 *Chattonella marina* 和 *Chattonella ovata* 会产生明显的抑制作用,作者认为他感作用是 *P. globosa* 获取竞争优势的主要原因。为了探讨他感作用在东海原甲藻与中肋骨条藻种间竞争中的作用,本文获取中肋骨条藻的无藻细胞滤液来进行培养实验。

### 3.2 滤液培养

浮游植物通过他感作用来进行种间竞争他感作用是浮游植物群落发展及演变的一个基本原因,研究证明通过藻类胞外活性物质的相互影响,可以直接实现藻类不同种群之间及藻类与其它生物类群之间的相互作用<sup>[5-6]</sup>。很多实验发现某些藻类的培养滤液会对其他藻的生长产生影响,例如,Suikkanen 等<sup>[20]</sup>通过实验来检验 *Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon flos-aquae* 和 *Anabaena lemmermannii* 对 *Thalassiosira weissflogii*, *Rhodomonas* sp. 和 *P. parvum* 的他感作用,结果表明 3 种蓝绿藻对共存的藻类会有抑制作用,他感效应可能对藻的种间竞争及蓝绿藻赤潮的爆发和维持具有重要作用;Ribalet 等<sup>[21]</sup>发现, *Skeletonema marinoi* 可以产生短链不饱和醛作为化学防御物质,并对其他生物产生毒害作用;赵卫红等<sup>[22]</sup>在柔弱几内亚藻赤潮期间分离赤潮水体中的胶体物质,并将赤潮异湾藻和中肋骨条藻在具有不同胶体物质含量的截留液中进行培养,结果发现赤潮水体中的胶体物质对赤潮异湾藻的生长起促进作用,而对中肋骨条藻的生长起抑制作用。柔弱几内亚藻在增殖过程中所产生的胶体物质对其他藻类具有他感作用,并可能影响柔弱几内亚藻赤潮的形成。

本文在  $f/2$  培养基中培养中肋骨条藻,并获取其衰亡期的无藻细胞滤液,分别将营养盐添加至  $f/2$  水平、 $N/P=40$  水平和  $N/P=120$  水平,进行东海原甲藻与中肋骨条藻的培养。实验结果发现在中肋骨条藻滤液中培养的藻类没有受到明显影响,与对照组具有相近的生长趋势。这说明在较高的营养盐条件下,不论营养盐充足或 P 限制,他感作用并非东海原甲藻与中肋骨条藻种间竞争的主要方式,或者说他感作用的程度十分微弱,不足以表现出明显的影响,这与赵卫红等<sup>[23]</sup>的研究结果有所不同。

本文对共培养实验的营养盐吸收特征进行了分析,发现共培养体系中的营养盐吸收情况与中肋骨条藻单培养的吸收情况更为接近, $NO_3-N$  的吸收可能由两种藻共同贡献,并以中肋骨条藻的吸收为主, $PO_4-P$  则主要由中肋骨条藻吸收。在高营养盐条件下,相对于东海原甲藻来讲,共培养体系中的中肋骨条藻具有更高的生长速率和较高的营养盐利用能力,这是中肋骨条藻能够快速增殖并竞争胜过东海原甲藻的主要原因。因此本文的研究结果认为在较高的营养盐条件下,中肋骨条藻与东海原甲藻的种间竞争主要通过营养竞争方式,中肋骨条藻依靠其有利的生理特性而最终获得优势,他感作用的贡献并不明显。

另外,中肋骨条藻与东海原甲藻的种间竞争也可能通过黏性作用来进行。浮游植物的细胞通常都具有一定的黏性,在水体中不同黏性的藻细胞间可能发生混合沉降,通过这种物种间的共沉降过程,一些藻种可能从水体中清除,有研究表明微藻间的粘结沉降在赤潮的演替中起着重要的作用<sup>[24-26]</sup>。一般来讲黏性大的藻类更容易被从水体中清除,但是如果高黏性的藻具有较小的个体和较高的生长率,则低黏性的藻可能会被清除。中肋骨条藻是一种黏性较强的藻类,并且具有较小的个体和较高的生长率,使得其常作为一种“粘合剂”而调控着水体中整个硅藻群落的生长动力学过程<sup>[27]</sup>。因此在共培养时,东海原甲藻的生长受抑制及从培养

体系中的清除,可能与中肋骨条藻对其的黏性共沉降有关。

#### 4 结论

在东海原甲藻与中肋骨条藻的共培养体系中,中肋骨条藻会获得竞争优势,而东海原甲藻的生长会受到明显的抑制。应用种间竞争模型进行模拟的结果也认为,东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争结果不受初始 Chl-a 比例或密度配比的影响,中肋骨条藻会是竞争优胜藻。滤液培养实验的结果发现,中肋骨条藻滤液对东海原甲藻及其本身的生长没有明显影响,他感作用并非中肋骨条藻获取竞争优势的主要方式。通过分析共培养体系中藻类对营养盐的吸收情况,认为东海原甲藻与中肋骨条藻的种间竞争主要通过营养竞争的方式进行。

#### References:

- [ 1 ] Huang C J, Dong Q X. Taxonomic and biological studies on organisms causing a large scale red tide in Zhujiang River estuary in spring, 1998 III. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(1):1-6.
- [ 2 ] Zhou M J, Zhu M Y. Progress of the Project "Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms in China". *Advances in Earth Science*, 2006, 21(7):673-579.
- [ 3 ] Rice E L. 2nd ed. London: Academic Press, 1984: 422.
- [ 4 ] Honjo T. The biology and prediction of representative red tide associated with fish kills in Japan. *Reviews in Fisheries Science*, 1994, 2:225-253.
- [ 5 ] Vardi A, Schatz D, Beeri K, Motro U, Sukenik A, Levine A, Kaplan A. Dinoflagellate - cyanobacterium communication may determine the composition of phytoplankton assemblage in a mesotrophic lake. *Current Biology*, 2002, 12:1767-1772.
- [ 6 ] Roy S, Alam S, Chattopadhyay J. Competing effects of toxin-producing phytoplankton on overall plankton populations in the Bay of Bengal. *Bull. Journal of Mathematical Biology*, 2006, 68:2303-2320.
- [ 7 ] Uchida T, Toda S, Matsuyama Y, Yamaguchi M, Kotani Y, Honjo T. Interactions between the red tide dinoflagellates *Heterocapsa circularisquama* and *Gymnodinium mikimotoi* in laboratory culture. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1999, 241:285-299.
- [ 8 ] Mulderij G, Mooij W M, Smolders A J P, Van Donk E. Allelopathic inhibition of phytoplankton by exudates from *Stratiotes aloides*. *Aquatic Botany*, 2005, 82:284-296.
- [ 9 ] Frangópoulos M, Guisande C, deBlas E, Maneiro I. Toxin production and competitive abilities under phosphorus limitation of *Alexandrium* species. *Harmful Algae*, 2004, 3:131-139.
- [ 10 ] Lu H M, Liao X J, Yang Y F, Xu S H. Effects of Extracts from *Gracilaria lemaneiform* on Microalgae. *Ecology Science*, 2008, 27(5):424-426.
- [ 11 ] Wang Y, Yu Z M, Song X X, Zhang S D. Interactions between the bloom-forming dinoflagellates *Prorocentrum donghaiense* and *Alexandrium tamarense* in laboratory cultures. *Journal of Sea Research*, 2006, 56:17-26.
- [ 12 ] Wang Z H, Yuan M L, Luo Y M, Zhao J G. Studies on interspecies competition of *Chattonella Marina* with *Skeletonema costatum* and *Scrippsiella Trochoidea* in laboratory cultures. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2010, 34(2):336-343.
- [ 13 ] Fistarol G O, Legrand C, Selander E, Hummert C, Stolte W, Granéli E. Allelopathy in *Alexandrium* spp. : effect on a natural plankton community and on algal monocultures. *Aquatic Microbial Ecology*, 2004, 35:45-56.
- [ 14 ] Suikkanen S, Fistarol G O, Legrand C. Effects of cyanobacterial allelochemicals on a natural plankton community. *Marine Ecology-Progress Series*, 2005, 287:1-9.
- [ 15 ] Granéli E, Weberg M, Salomon P S. Harmful algal blooms of allelopathic microalgal species; The role of entrophication. *Harmful Algae*, 2008, 8:94-102.
- [ 16 ] Wang Y, Tang X X. Interactions between *Prorocentrum donghaiense* Lu and *Scrippsiella trochoidea* (Stein) Loeblich III under laboratory culture. *Harmful Algae*, 2008, 7:65-75.
- [ 17 ] Zhao X W, Tang X X, Wang Y. Interactions between two species of marine bloom microalgae under controlled laboratory conditions; *Heterosigma akashiwo* and *Karenia Mikimotoi*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(5):958-965.
- [ 18 ] Tameishi M, Yamasaki Y, Nagasoe S, Shimasaki Y, Oshima Y, Honjo T. Allelopathic effects of the dinophyte *Prorocentrum minimum* on the growth of the bacillariophyte *Skeletonema costatum*. *Harmful Algae*, 2009, 8:421-429.
- [ 19 ] Liu J S, Vanrijsse M, Yang W D. Negative effects of *Phaeocystis globosa* on microalgae. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(4):911-916.
- [ 20 ] Suikkanen S, Fistarol G O, Granéli E. Allelopathic effects of the Baltic cyanobacteria *Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon flos-aquae* and *Anabaena lemmermannii* on algal monocultures. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2004, 308:85-101.

- [21] Ribalet F, Wichard T, Pohbert G, Ianoea A, Miralto A, Casotti R. Age and nutrient limitation enhance polyunsaturated aldehyde in marine diatoms. *Phytochemistry*, 2007, 68: 2059-2067.
- [22] Zhao W H, Cui X, Wang J T. Effect of colloidal substances in red-tide seawater on the growth of *Heterosigma akashiwo* and *Skeletonema costatum*. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(2): 573-580.
- [23] Zhao W H, Chen M M. Effect of nutrient limitation on allelopathy produced of *Skeletonema costatum*. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(4): 225-228.
- [24] Riebesell U. Particle aggregation during and sinking velocities of diatoms. *Marine Biology*, 1991, 108: 449-455.
- [25] Kiørboe T, Hansen J L S. Phytoplankton aggregate formation: observation of patterns and mechanisms of cell sticking and the significance of exopolymeric material. *Journal of Plankton Research*, 1993, 15: 993-1018.
- [26] Kiørboe T, Lundsgaard C, Olesen M, Hansen J L S. Aggregation and sedimentation processes during a spring phytoplankton bloom: a field experiment to test coagulation theory. *Journal of Marine Research*, 1994, 52: 297-323.
- [27] Hansen J L S, Timm U, Kiørboe T. Adaptive significance of phytoplankton stickiness with emphasis on the diatom *Skeletonema costatum*. *Marine Biology*, 1995, 123: 667-676.

#### 参考文献:

- [1] 黄长江,董巧香. 1998年春季珠江口海域大规模赤潮原因生物的形态分类和生物学特征Ⅲ. *海洋与湖沼*, 2001, 32(1): 1-6.
- [2] 周名江,朱明远. “我国近海有害赤潮发生的生态学、海洋学机制及预测防治”研究进展. *地球科学进展*, 2006, 21(7): 673-679.
- [12] 王朝晖,袁美玲,骆育敏,赵建刚. 海洋卡盾藻与中肋骨条藻和锥状斯氏藻种间竞争研究. *水生生物学报*, 2010, 34(2): 336-343.
- [17] 赵晓玮,唐学玺,王悠. 两种海洋赤潮微藻赤潮异湾藻和米氏凯伦藻之间的相互作用. *植物生态学报*, 2009, 33(5): 958-965.
- [22] 赵卫红,崔欣,王江涛,等. 赤潮水体中胶体物质对赤潮异湾藻(*Heterosigma akashiwo*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)生长的影响. *生态学报*, 2009, 29(2): 573-580.
- [23] 赵卫红,陈玫玫. 营养盐限制对中肋骨条藻产生化感作用的影响. *海洋环境科学*, 2010, 29(4): 225-228.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 4 February, 2012 (Semimonthly)  
CONTENTS

The influence of a reclamation project on the macrobenthos of an East Nanhui tidal flat ..... MA Changan, XU Linlin, TIAN Wei, et al (1007)

Ecological health assessment of groundwater in the lower Liaohe River Plain using an ArcView-WOE technique ..... SUN Caizhi, YANG Lei (1016)

Nitrogen flows in intensive “crop-livestock” production systems typically for the peri-urban area of Beijing ..... HOU Yong, GAO Zhiling, MA Wenqi, et al (1028)

The simulation of leaf net photosynthetic rates in different radiation in apple canopy ..... GAO Zhaoquan, FENG Shezhang, ZHANG Xianchuan, et al (1037)

Phenological variation of typical vegetation types in northern Tibet and its response to climate changes ..... SONG Chunqiao, YOU Songcai, KE Linghong, et al (1045)

Soil moisture and temperature characteristics of forest-grassland ecotone in middle Qilian Mountains and the responses to meteorological factors ..... TANG Zhenxing, HE Zhibin, LIU Hu (1056)

Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains ..... TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong, et al (1066)

Response of tree-ring width of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to climate change in Hulunbuir sand land, China ..... SHANG Jianxun, SHI Zhongjie, GAO Jixi, et al (1077)

Analysis of a dust case using lidar in Shanghai ..... MA Jinghui, GU Songqiang, CHEN Min, et al (1085)

Relating the distribution of zooplankton abundance in the coastal waters of central Fujian Province to the seasonal variation of water masses ..... TIAN Fengge, XU Zhaoli (1097)

Phenotypic traits of both larvae and juvenile *Crasstrea hongkongensis* and *C. gigas* ..... ZHANG Yuehuan, WANG Zhaoping, YAN Xiwu, et al (1105)

Inter-specific competition between *Prorocentrum donghaiense* and *Skeletonema costatum* ..... LI Hui, WANG Jiangtao (1115)

Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species ..... WEI Jie, ZHAO Wen, YANG Weidong, et al (1124)

On the ecological amplitude of nitrate of *Alexandrium tamarense* at different initial phosphate concentrations in laboratory cultures ..... WEN Shiyong, SONG Lili, LONG Hua, et al (1133)

Time lag effects and rainfall redistribution traits of the canopy of natural secondary *Pinus tabulaeformis* on precipitation in the Qinling Mountains, China ..... CHEN Shujun, CHEN Cungen, ZOU Bocai, et al (1142)

The vertical distribution of vegetation patterns and its relationship with environment factors at the northern slope of Ili River Valley: a bimodal distribution pattern ..... TIAN Zhongping, ZHUANG Li, LI Jianguo (1151)

Comparative analysis of water related parameters and photosynthetic characteristics in the endangered plant *Tetraena mongolica* Maxim. and the closely related *Zygophyllum xanthoxylon* (Bunge) Maxim. .... SHI Songli, WANG Yingchun, ZHOU Hongbing, et al (1163)

Antioxidant properties of four native grasses in Loess Plateau under drought stress ..... SHAN Changjuan, HAN Ruilian, LIANG Zongsuo (1174)

The effects of the addition of *Ceratobasidium stevensii* B6 and its growth on the soil microflora at a continuously cropped water-melon (*Citrullus lanatus*) site in China ..... XIAO Yi, WANG Xingxiang, WANG Hongwei, et al (1185)

Suitable habitat for the *Achnatherum splendens* community in typical steppe region of Inner Mongolia ..... ZHANG Yifei, WANG Wei, LIANG Cunzhu, et al (1193)

Spatio-temporal variability of soil salinity and its relationship with the depth to groundwater in salinization irrigation district ..... GUAN Xiaoyan, WANG Shaoli, GAO Zhanyi, et al (1202)

Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity on a slope of the wind-water erosion crisscross region on the Loess Plateau ..... LIU Chunli, HU Wei, JIA Hongfu, et al (1211)

Spatial and temporal variations of total nitrogen density in agricultural soils of the Songnen Plain Maize Belt ..... ZHANG Chunhua, WANG Zongming, JU Weimin, et al (1220)

The evaluation system of strength of winteriness in wheat ..... WANG Peng, ZHANG Chunqing, CHEN Huabang, et al (1230)

A comparison of summer habitats selected by sympatric *Apodemus chevrieri* and *Apodemus draco* in Tiangjiahe Nature Reserve, China ..... LI Yunxi, ZHANG Zejun, SUN Yiran, et al (1241)

Life tables for experimental populations of *Frankliniella occidentalis* on 6 vegetable host plants ..... CAO Yu, ZHI Junrui, KONG Yixian (1249)

Effect of diet switch on turnover rates of tissue nitrogen stable isotopes in fish based on the enrichment-dilution approach ..... ZENG Qingfei, GU Xiaohong, MAO Zhigang, et al (1257)

Recognition of important ecological nodes based on ecological networks analysis: A case study of urban district of Nanjing ..... XU Wenwen, SUN Xiang, ZHU Xiaodong, et al (1264)

Seasonal characteristics of CO<sub>2</sub> fluxes above urban green space in the Pearl River Delta, China ..... SUN Chunjian, WANG Chunlin, SHEN Shuanghe, et al (1273)

Simulation and evaluation of groundwater seepage in contaminated sites: case study of TuoCheng County ..... WU Yizhong, ZHU Qinyuan, LIU Ning, LU Genfa, DAI Mingzhoet al (1283)

**Review and Monograph**

Recent advances in wetland degradation research ..... HAN Dayong, YANG Yongxing, YANG Yang, LI Ke (1293)

A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis ..... YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng (1308)

**Discussion**

The diversity of the radio-resistant bacteria *Deinococcus radiodurans* ..... TU Zhenli, FANG Lijing, WANG Jiagang (1318)

Effect of pruning measure on physiology character and soil waters of *Caragana korshinskii* ..... YANG Yongsheng, BU Chongfeng, GAO Guoxiong (1327)

**Scientific Note**

Characteristics of rainfall interception for four typical shrubs in Qilian Mountain ..... LIU Zhangwen, CHEN Rensheng, SONG Yaoxuan, et al (1337)

Dormancy break approaches and property of dormant seeds of wild *Cryptotaenia japonica* ..... YU Mei, ZHOU Shoubiao, WU Xiaoyan, et al (1347)

# 《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 4 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 4 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元