

ISSN 1000-0933  
CN 11-2031/Q

# 生态学报

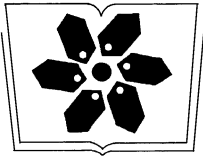
## Acta Ecologica Sinica



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/stxb201101060020

魏杰, 赵文, 杨为东, 葛玉. 起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响. 生态学报, 2012, 32(4): 1124-1132.

Wei J, Zhao W, Yang W D, Ge Y. Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 1124-1132.

## 起始生物量比对 3 种海洋微藻种间竞争的影响

魏 杰<sup>1</sup>, 赵 文<sup>1,\*</sup>, 杨为东<sup>2</sup>, 葛 玉<sup>1</sup>

(1. 大连海洋大学, 辽宁省水生生物学重点实验室, 大连 116023; 2. 大连老虎滩海洋公园, 大连 116000)

**摘要:**为深入了解饵料微藻与赤潮微藻间的种间竞争关系,通过微藻共培养的方法,研究了起始生物量比(1:4、1:1 和 4:1)对 3 种海洋微藻(塔玛亚历山大藻、蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻)两两之间种间竞争的影响,并对其作用机制进行了探讨。结果表明:①3 种海洋微藻表现出种间竞争的相互抑制效应;②在与塔玛亚历山大藻(简称 A)的种间竞争中,蛋白核小球藻(简称 C)和湛江等鞭金藻(简称 I)均在竞争中占优势,蛋白核小球藻随自身起始生物量比的提高,其竞争优势越加明显,湛江等鞭金藻在 A:I=1:1 时竞争优势最为明显;在蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻的种间竞争中,当 C:I=1:4 时,湛江等鞭金藻在竞争中占优势,C:I=1:1 时,初期湛江等鞭金藻占竞争优势,随蛋白核小球藻的迅速生长,后期蛋白核小球藻占竞争优势,C:I=4:1 时,蛋白核小球藻占绝对竞争优势;③由种间竞争抑制参数比较得出,3 种微藻的种间竞争强弱依次为蛋白核小球藻>湛江等鞭金藻>塔玛亚历山大藻。蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻在起始比例 C:I=1:1 时,可共培养利用,在海产经济动物育苗中可对其进行适时采收投喂;两种饵料藻对塔玛亚历山大藻具有明显的抑制作用,可为开发利用饵料藻进行赤潮生物防控提供一定的科学依据。

**关键词:**种间竞争;起始生物量;塔玛亚历山大藻;蛋白核小球藻;湛江等鞭金藻

## Effects of initial biomass ratio on the interspecific competition outcome between three marine microalgae species

WEI Jie<sup>1</sup>, ZHAO Wen<sup>1,\*</sup>, YANG Weidong<sup>2</sup>, GE Yu<sup>1</sup>

1 Key Laboratory of Hydrobiology in Liaoning Province, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China

2 Dalian Tiger Beach Amusement Park, Dalian 116000, China

**Abstract:** The investigation of interspecific competition is useful to reveal the mechanism in regulating growth and reproduction of organisms, optimal control of harmful organisms and co-culture of beneficial organisms. The interspecific competition is influenced by either population density or body size, therefore it is important to investigate the effects of biomass on the interspecific competition.

A method of co-culturing microalgae was used to examine the effects of initial biomass ratio (1:4, 1:1 and 4:1) on interspecific competition between three marine microalgae species, *Alexandrium tamarense*, *Isochrysis zhanjiangensis* and *Chlorella pyrenoidosa* in the present experiment. The mixed algae in the exponential growth phase were cultured to increase cell density in 250 mL erlenmeyer flasks containing 150 mL of f/2 culture medium. The temperature was maintained at (20±1) °C, and flasks were illuminated in a photoperiod of 12L—12D with a light intensity of approximately 1000 lx. The salinity was (31±0.5) and pH was 8.34. After 20 days culture, the densities of algal cell (algal cells/ml) were measured with OlympusCX21 microscope. Moreover, logistic growth curve was fitted to calculate the competitive inhibition parameters based on the cell densities.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40776065)

收稿日期:2011-01-06; 修订日期:2011-08-01

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhaowen@dlou.edu.cn

The results mainly suggested the following points: 1) the inhibition effect of interspecific competition between three microalgae was significantly related to the environmental carrying capacities ( $K$ ); 2) during the process of competition with *A. tamarensis* (A), both *C. pyrenoidosa* (C) and *I. zhanjiangensis* (I) were dominant algae. With the increase of initial biomass, *C. pyrenoidosa* showed the increasing competition advantage. When the biomass ratio of A to I was held at 1:1, *I. zhanjiangensis* was obviously super-dominant. When the ratio of C to I was 1:4, *I. zhanjiangensis* was the dominant algae. When the ratio of C to I was 1:1, *I. zhanjiangensis* was competitively dominant in the earlier stage, but *C. pyrenoidosa* grew faster, superseding *I. zhanjiangensis* in the later stage. When the ratio of C to I was 4:1, *C. pyrenoidosa* was predominant; 3) based on the competitive inhibition parameters, the interspecies competitive ability of three species of microalgae were as follow: *C. pyrenoidosa* > *I. zhanjiangensis* > *A. tamarensis*. Furthermore, their competitive ability significantly depended on the algal cell size.

The above results suggested that equal ratio of *C. pyrenoidosa* to *I. zhanjiangensis* was suitable to co-culture and then utilize in the marine economic animals aquaculture. Moreover, they could also inhibit the growth of *A. tamarensis*. This might be used to control the harmful algae bloom. It was speculated that the inhibiting effect of *C. pyrenoidosa* and *I. zhanjiangensis* on the growth of *A. tamarensis* was mainly due to the competition of nutritional sources, while the inhibiting effect of *A. tamarensis* on the growth of *C. pyrenoidosa* and *I. zhanjiangensis* was caused by both the direct contact of cells and secondary secretion of toxic substances.

**Key Words:** interspecific competition; initial biomass; *Alexandrium tamarensis*; *Chlorella pyrenoidosa*; *Isochrysis zhanjiangensis*

种间竞争是两种或两种以上生物共同利用同一资源而产生的相互作用,是生物群落中普遍存在的物种间相互产生负效应的一种作用方式。对其机理的研究有助于进一步了解竞争生物的生长及抑制规律,可以用来调控生物的生长和繁殖,进行有害生物的防治以及有益生物的共培养利用。种间竞争不仅与种群密度有关,而且与生物个体大小密切相关,因此研究生物量对生物种间竞争的影响具有重要意义。

有关海洋微藻间的相互作用包括赤潮微藻之间<sup>[1-4]</sup>,大型海藻与赤潮微藻间<sup>[5-7]</sup>等的研究已经广泛展开。但目前关于饵料微藻与赤潮微藻间相互作用及其作用机理的研究仅见少数报道<sup>[8]</sup>,而且研究的种类较为单一。为深入了解饵料微藻与赤潮微藻间的种间竞争关系,以及进一步验证微藻间的相互作用是否存在明显的个体大小依赖性,本文采用 1 种赤潮藻塔玛亚历山大藻(*Alexandrium tamarensis*)和 2 种饵料藻:湛江等鞭金藻(*Isochrysis zhanjiangensis*)和蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)进行两种微藻的共培养实验。塔玛亚历山大藻是一种能够产生麻痹性贝毒(PSP)的有害赤潮藻,在较暖海域里发生赤潮的频率较高,为世界性分布种<sup>[9]</sup>。湛江等鞭金藻和蛋白核小球藻在国内外被广泛培养用作水产经济动物育苗的开口饵料。3 种海洋微藻均生长快,适应性广。本文在实验生态条件下,研究了不同起始生物量比对 3 种海洋微藻两两之间种间竞争的影响,旨在为探讨海洋微藻间相互作用的规律和竞争机制提供有价值的参考资料,为运用种间竞争进行赤潮生物防控以及有益微藻的共培养利用提供一些理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 藻种来源

本实验所用的塔玛亚历山大藻、湛江等鞭金藻和蛋白核小球藻均取自辽宁省水生生物学重点实验室。

### 1.2 培养条件

培养海水取自大连黑石礁近海,经沉淀、砂滤、300 目筛绢网(孔径 37.5  $\mu\text{m}$ )过滤,煮沸消毒后待用。用于微藻培养的 250 mL 三角锥瓶预先用次氯酸刷洗,并置于 180  $^{\circ}\text{C}$  干燥箱中灭菌 2 h 后待用。培养液采用 f/2 营养盐配方,取处于指数生长期的藻种接种。培养温度为(20 $\pm$ 1)  $^{\circ}\text{C}$ ,盐度为 31 $\pm$ 0.5,光照强度 1000 lx,光照周期 L:D=12:12,pH 值 8.34。每隔 4—6 h 摇瓶 1 次,防止藻附壁或下沉。

### 1.3 实验方法

每种微藻随机选取 50 个藻细胞进行测量,每个细胞体积单独计算,分别得出 3 种微藻细胞的平均体积,由于微藻细胞的相对密度接近 1,因此其体积值可视为其鲜重值(即平均湿重)。得出塔玛亚历山大藻细胞的平均湿重为  $8.45 \times 10^{-7}$  mg/个,蛋白核小球藻为  $8.42 \times 10^{-9}$  mg/个,湛江等鞭金藻为  $5.46 \times 10^{-8}$  mg/个。在共培养实验中根据微藻细胞起始密度和平均湿重来设定起始生物量比。

#### (1) 塔玛亚历山大藻和蛋白核小球藻

I. 塔玛亚历山大藻(简称 A)起始密度为  $1.0 \times 10^4$  个/mL,蛋白核小球藻(简称 C)起始密度为  $4.0 \times 10^6$  个/mL,起始生物量比为 A:C=1:4; II. 塔玛亚历山大藻起始密度为  $1.0 \times 10^4$  个/mL,蛋白核小球藻起始密度为  $1.0 \times 10^6$  个/mL,起始生物量比为 A:C=1:1; III. 塔玛亚历山大藻起始密度为  $4.0 \times 10^4$  个/mL,蛋白核小球藻起始密度为  $1.0 \times 10^6$  个/mL,起始生物量比为 A:C=4:1。

#### (2) 塔玛亚历山大藻和湛江等鞭金藻

I. 塔玛亚历山大藻起始密度为  $1.0 \times 10^4$  个/mL,湛江等鞭金藻(简称 I)起始密度为  $6.0 \times 10^5$  个/mL,起始生物量比为 A:I=1:4; II. 塔玛亚历山大藻起始密度为  $1.0 \times 10^4$  个/mL,湛江等鞭金藻起始密度为  $1.5 \times 10^5$  个/mL,起始生物量比为 A:I=1:1; III. 塔玛亚历山大藻起始密度为  $4.0 \times 10^4$  个/mL,湛江等鞭金藻起始密度为  $1.5 \times 10^5$  个/mL,起始生物量比为 A:I=4:1。

#### (3) 蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻

I. 蛋白核小球藻起始密度为  $1.0 \times 10^6$  个/mL,湛江等鞭金藻起始密度为  $6.0 \times 10^5$  个/mL,起始生物量比为 C:I=1:4; II. 蛋白核小球藻起始密度为  $1.0 \times 10^6$  个/mL,湛江等鞭金藻起始密度为  $1.5 \times 10^5$  个/mL,起始生物量比为 C:I=1:1; III. 蛋白核小球藻起始密度为  $4.0 \times 10^6$  个/mL,湛江等鞭金藻起始密度为  $1.5 \times 10^5$  个/mL,起始生物量比为 C:I=4:1。

将处于指数生长期的 3 种微藻按以上起始密度分别混合接种在 150mL f/2 培养液中,连续培养 20d。实验以相同条件下单种培养的微藻作为对照组,起始密度分别为:塔玛亚历山大藻  $(1.0, 4.0) \times 10^4$  个/mL,蛋白核小球藻  $(1.0, 4.0) \times 10^6$  个/mL,湛江等鞭金藻  $(1.5, 6.0) \times 10^5$  个/mL。每个试验设 3 个重复。每隔 1d 取 1mL 藻液,取样时需摇匀,用鲁哥氏液固定。采用细胞计数法,在 OlympusCX21 型双筒显微镜下进行细胞计数,观察微藻细胞密度的变化。每个样品计数 3 次,取其平均值。

### 1.4 数据分析

#### 1.4.1 生长曲线的拟合

取藻类密度达到最大值之前的数据,用统计软件 SPSS 12.0 中非线性回归分析进行逻辑斯蒂生长曲线的拟合,利用逻辑斯蒂方程的积分式:  $N_t = K / (1 + e^{-(a-rt)})$  [10] 做模型公式,获得  $K$ (最大环境容纳量)和  $r$ (瞬时增长率)的估计值。

#### 1.4.2 竞争抑制参数的计算

利用 Lotka-Volterra 双种竞争模型的差分形式 [11-12]:

$$(N_{an} - N_{an-1}) / (t_n - t_{n-1}) = r_a N_{an-1} (K_a - N_{an-1} - \alpha N_{bn-1}) / K_a \quad (1)$$

$$(N_{bn} - N_{bn-1}) / (t_n - t_{n-1}) = r_b N_{bn-1} (K_b - N_{bn-1} - \beta N_{an-1}) / K_b \quad (2)$$

式中,  $N_{an}$ 、 $N_{bn}$  分别为共培养中藻  $a$  和藻  $b$  在时间  $t_n$  时的数量 ( $\times 10^4$  个/mL);  $N_{an-1}$ 、 $N_{bn-1}$  分别为共培养中藻  $a$  和藻  $b$  在时间  $t_{n-1}$  时的数量 ( $\times 10^4$  个/mL);  $r_a$ 、 $r_b$  分别为藻  $a$  和藻  $b$  的增长率(由单种培养经回归计算获得);  $K_a$ 、 $K_b$  分别为藻  $a$  和藻  $b$  的最大环境容纳量(由单种培养获得);  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为共培养中藻  $b$  对藻  $a$ 、藻  $a$  对藻  $b$  竞争抑制参数。因本实验背景条件为不同生物量比各藻的种间关系,所以本文将上述公式中数量分别乘以各藻平均湿重转换成生物量(mg/mL)计算  $\alpha$ 、 $\beta$ 。

应用上述公式计算共培养藻类增长曲线在拐点以后的每一单位时间的所有的竞争抑制参数,取其平均值作为该种的竞争抑制参数的估计值 [13]。抑制起始点为藻类增长曲线的拐点  $T_p$ , 这时  $N = K/2$ ,  $T_p = a/r$ 。

### 1.4.3 数据统计

曲线拟合、统计分析等数据处理均在 SPSS 12.0 统计软件上进行, *T*-test 检验实验组与对照组之间的差异显著性,  $P < 0.05$  作为差异显著水平;绘图在 EXCEL 中进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 塔玛亚历山大藻和蛋白核小球藻的种间竞争关系

在 A:C=1:4、1:1 和 4:1 的处理中(图 1),蛋白核小球藻迅速进入指数生长期,均在第 15 天生物量达最大值,约为对照组(单养)的 89.60%、87.59% 和 64.48%;与蛋白核小球藻相比,塔玛亚历山大藻的生长受到了极明显的抑制,其最大生物量出现在第 15—17 天,仅约为对照组的 5.27%、9.75% 和 37.16%。可见,蛋白核小球藻随着自身起始生物量比的提高,其种群竞争生长的优势越加明显,同时对塔玛亚历山大藻的生长抑制作用也愈加明显。

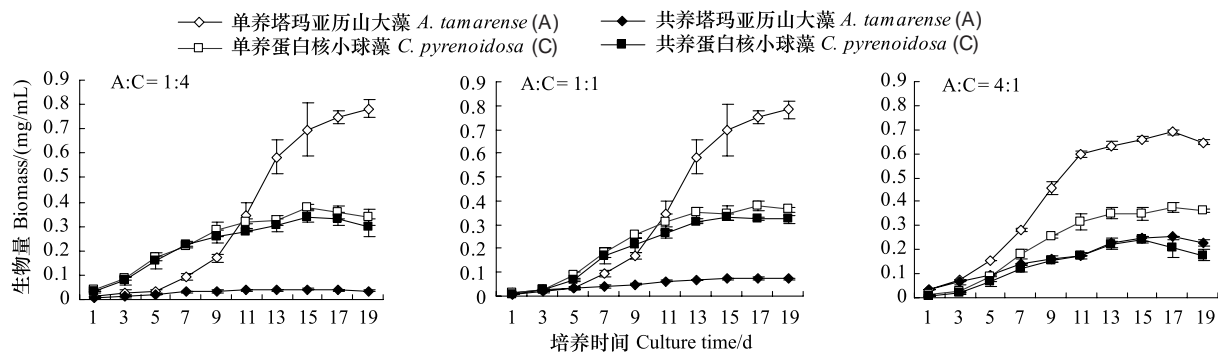


图 1 起始生物量比对塔玛亚历山大藻和蛋白核小球藻生长的影响

Fig. 1 The effect of initial biomass ratio on the growth of *A. tamarensis* and *C. pyrenoidosa*

不同起始生物量比下塔玛亚历山大藻和蛋白核小球藻的逻辑斯蒂模型分析见表 1。两种微藻表现出种间竞争的相互抑制效应,除 A:C=1:4 组中蛋白核小球藻的最大环境容纳量( $K$ )与对照组差异不显著( $P > 0.05$ )外,其余各组两种共养微藻的最大环境容纳量与对照组相比均显著降低( $P < 0.05$ ),其中塔玛亚历山大藻受到的抑制作用最为明显。

表 1 不同起始生物量比下塔玛亚历山大藻和蛋白核小球藻的逻辑斯蒂模型分析

Table 1 The Logistic model of *A. tamarensis* and *C. pyrenoidosa* at different initial biomass ratio

生物量比 Biomass ratio	藻种 Microalgae	$K / (10^4 \text{个/mL})$	$a$	$r$	$R^2$	$T_p / \text{d}$
A:C=1:4	<i>A. tamarensis</i> (P)	109.00±3.82	4.799±0.254	0.376±0.040	0.970±0.016	12.8±0.7
	<i>C. pyrenoidosa</i> (P)	4220.48±523.55	2.386±0.181	0.436±0.122	0.980±0.008	5.7±1.2
	<i>A. tamarensis</i> (M)	5.03±0.17*	1.661±0.092	0.324±0.041	0.973±0.011	5.2±0.5
	<i>C. pyrenoidosa</i> (M)	4020.02±322.61	2.478±0.180	0.416±0.086	0.947±0.037	6.1±1.1
A:C=1:1	<i>A. tamarensis</i> (P)	109.00±3.82	4.799±0.254	0.376±0.040	0.970±0.016	12.8±0.7
	<i>C. pyrenoidosa</i> (P)	4520.66±252.01	3.919±0.200	0.504±0.057	0.979±0.023	7.8±0.6
	<i>A. tamarensis</i> (M)	9.60±1.16*	2.140±0.134	0.314±0.049	0.983±0.012	7.0±1.5
	<i>C. pyrenoidosa</i> (M)	3873.84±166.88*	4.038±0.147	0.537±0.052	0.973±0.029	7.5±0.5
A:C=4:1	<i>A. tamarensis</i> (P)	82.75±1.06	3.439±0.095	0.445±0.019	0.997±0.002	7.7±0.1
	<i>C. pyrenoidosa</i> (P)	4520.66±252.01	3.919±0.200	0.504±0.057	0.979±0.023	7.8±0.6
	<i>A. tamarensis</i> (M)	32.78±1.47*	2.101±0.104	0.275±0.021	0.972±0.009	7.6±0.4
	<i>C. pyrenoidosa</i> (M)	2791.74±260.74*	3.866±0.105	0.508±0.040	0.960±0.011	7.6±0.4

$R^2$  为回归判定系数, \* 表示与对照组差异显著 ( $P < 0.05$ ); P: 单养(对照组); M: 共养

不同起始生物量比下塔玛亚历山大藻和蛋白核小球藻的竞争抑制参数见表 2。在不同处理组中,蛋白核小球藻对塔玛亚历山大藻的竞争抑制参数( $\alpha$ )皆大于塔玛亚历山大藻对蛋白核小球藻的竞争抑制参数( $\beta$ ),

而两种微藻的种间相对竞争力( $\alpha/\beta$  或  $\beta/\alpha$ )有随自身起始生物量比的减小而增强的趋势。

2.2 塔玛亚历山大藻和湛江等鞭金藻的种间竞争关系

在 A:I = 1:4、1:1 和 4:1 的处理中(图 2),湛江等鞭金藻迅速进入指数生长期,均在第 9 天生物量达最大值,约为对照组(单养)的 71.12%、84.53% 和 60.57%;与湛江等鞭金藻相比,塔玛亚历山大藻的生长受到了极明显的抑制,其最大生物量出现在第 13—17 天,仅约为对照组的 6.33%、6.02% 和 21.05%。可见,湛江等鞭金藻在 A:I= 1:1 组,其种群竞争生长的优势最明显,同时对塔玛亚历山大藻的生长抑制作用也最明显。

表 2 不同起始生物量比下塔玛亚历山大藻和蛋白核小球藻的竞争抑制参数

Table 2 The competitive parameters of *A. tamarensis* and *C. pyrenoidosa* at different initial biomass ratio

竞争抑制参数 Competitive parameters	A : C = 1 : 4 (5d)	A : C = 1 : 1 (7 d)	A : C = 4 : 1 (7 d)
$\alpha$	2.91 ± 0.23	2.77 ± 0.41	2.42 ± 0.82
$\beta$	1.30 ± 0.84	1.23 ± 0.81	0.84 ± 0.25
$\alpha / \beta$	2.24	2.25	2.87
$\beta / \alpha$	0.45	0.44	0.35

( )内天数是竞争拐点(即抑制起始点)

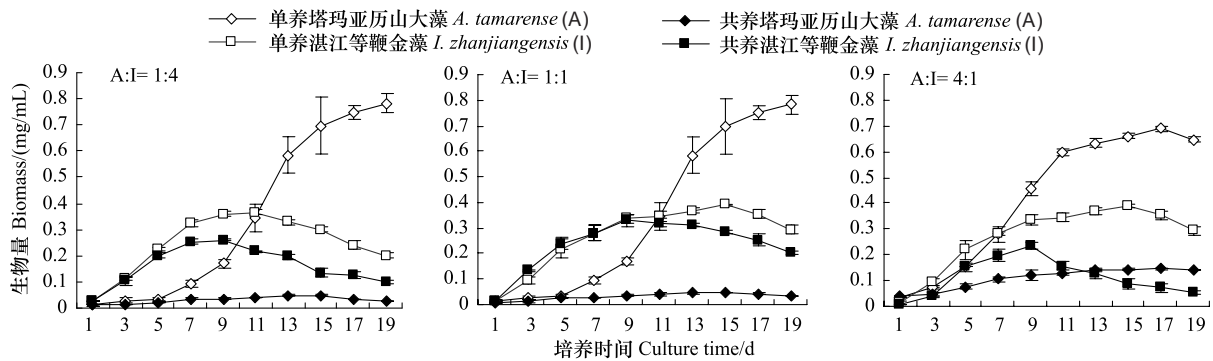


图 2 起始生物量比对塔玛亚历山大藻和湛江等鞭金藻生长的影响

Fig. 2 The effect of initial biomass ratio on the growth of *A. tamarensis* and *I. zhanjiangensis*

不同起始生物量比下塔玛亚历山大藻和湛江等鞭金藻的逻辑斯蒂模型分析见表 3。两种微藻也表现出种间竞争的相互抑制效应,除 A:I=1:1 组中湛江等鞭金藻的最大环境容纳量(K)与对照组差异不显著( $P > 0.05$ )外,其余各组两种共养微藻的最大环境容纳量均显著低于对照组( $P < 0.05$ ),其中塔玛亚历山大藻受到的抑制作用最为明显。

表 3 不同起始生物量比下塔玛亚历山大藻和湛江等鞭金藻的逻辑斯蒂模型分析

Table 3 The Logistic model of *A. tamarensis* and *I. zhanjiangensis* at different initial biomass ratio

生物量比 Biomass ratio	藻种 Microalgae	K / ( $10^4$ 个/mL)	a	r	R <sup>2</sup>	Tp / d
A : I = 1 : 4	<i>A. tamarensis</i> (P)	109.00 ± 3.82	4.799 ± 0.254	0.376 ± 0.040	0.970 ± 0.016	12.8 ± 0.7
	<i>I. zhanjiangensis</i> (P)	676.00 ± 23.12	3.177 ± 0.169	0.742 ± 0.065	0.995 ± 0.002	4.3 ± 0.2
	<i>A. tamarensis</i> (M)	6.52 ± 0.70 *	1.915 ± 0.163	0.312 ± 0.069	0.963 ± 0.005	6.3 ± 1.1
	<i>I. zhanjiangensis</i> (M)	481.43 ± 6.98 *	3.038 ± 0.006	0.868 ± 0.024	0.993 ± 0.003	3.5 ± 0.1
A : I = 1 : 1	<i>A. tamarensis</i> (P)	109.00 ± 3.82	4.799 ± 0.254	0.376 ± 0.040	0.970 ± 0.016	12.8 ± 0.7
	<i>I. zhanjiangensis</i> (P)	677.05 ± 23.68	3.352 ± 0.336	0.641 ± 0.025	0.962 ± 0.013	5.2 ± 0.4
	<i>A. tamarensis</i> (M)	5.49 ± 0.15 *	2.207 ± 0.375	0.400 ± 0.044	0.939 ± 0.026	5.5 ± 0.4
	<i>I. zhanjiangensis</i> (M)	615.70 ± 43.89	3.649 ± 0.318	0.868 ± 0.119	0.936 ± 0.041	4.2 ± 0.4
A : I = 4 : 1	<i>A. tamarensis</i> (P)	82.75 ± 1.06	3.439 ± 0.095	0.445 ± 0.019	0.997 ± 0.002	7.7 ± 0.1
	<i>I. zhanjiangensis</i> (P)	677.05 ± 23.68	3.352 ± 0.336	0.641 ± 0.025	0.962 ± 0.013	5.2 ± 0.4
	<i>A. tamarensis</i> (M)	17.89 ± 0.88 *	1.567 ± 0.349	0.335 ± 0.124	0.981 ± 0.006	4.9 ± 1.0
	<i>I. zhanjiangensis</i> (M)	437.10 ± 25.89 *	4.615 ± 0.064	0.991 ± 0.049	0.982 ± 0.015	4.7 ± 0.2

P: 单养; M: 共养

不同起始生物量比下塔玛亚历山大藻和湛江等鞭金藻的竞争抑制参数见表 4, 在不同处理组中, 湛江等鞭金藻对塔玛亚历山大藻的竞争抑制参数( $\alpha$ )皆大于塔玛亚历山大藻对湛江等鞭金藻的竞争抑制参数( $\beta$ ), 而两种微藻的种间相对竞争力( $\alpha/\beta$  或  $\beta/\alpha$ )有随自身起始生物量比的减小而增强的趋势。

表 4 不同起始生物量比下塔玛亚历山大藻和湛江等鞭金藻的竞争抑制参数

Table 4 The competitive parameters of *A. tamarensis* and *I. zhanjiangensis* at different initial biomass ratio

竞争抑制参数 Competitive parameters	A:I=1:4(5 d)	A:I=1:1(5 d)	A:I=4:1(5 d)
$\alpha$	4.79±3.33	2.91±0.90	4.10±2.27
$\beta$	4.68±1.62	2.01±1.04	2.02±0.50
$\alpha/\beta$	1.02	1.45	2.03
$\beta/\alpha$	0.98	0.69	0.49

### 2.3 蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻的种间竞争关系

在 C:I = 1:4、1:1 和 4:1 的处理中(图 3), 湛江等鞭金藻最大生物量约为对照组(单养)的 75.72%、52.60% 和 7.36%; 蛋白核小球藻最大生物量约为对照组的 30.33%、51.48% 和 91.69%。在起始比例为 C:I=1:4 时, 湛江等鞭金藻虽在竞争中取胜, 但其生长优势随着蛋白核小球藻种群密度的增加而降低; 起始比例为 C:I=1:1 时, 在共养第 9 天时 C:I=1:2, 在共养第 13 天 C:I=1:1, 在共养第 17 天 C:I=2:1, 湛江等鞭金藻的优势地位在短时间内被蛋白核小球藻所取代; 起始比例为 C:I=4:1 时, 蛋白核小球藻占据绝对竞争优势, 湛江等鞭金藻种群密度仅在小范围内上下波动, 至种群逐渐消失。

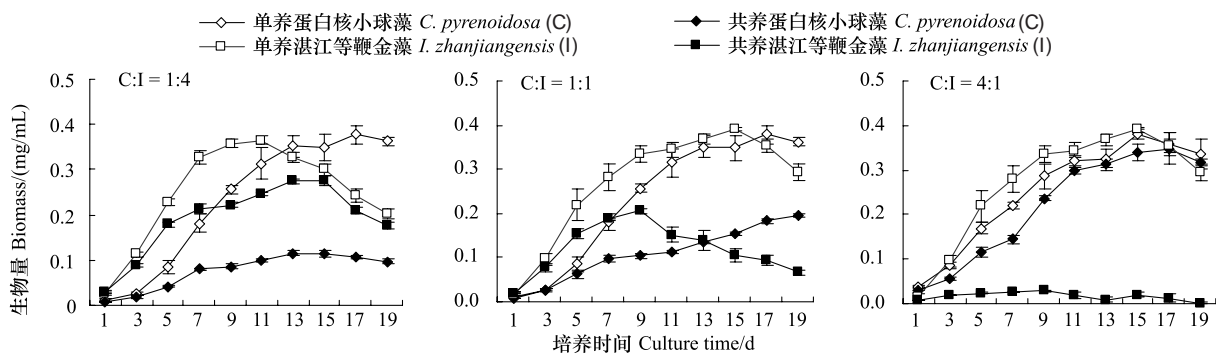


图 3 起始生物量比对蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻生长的影响

Fig. 3 The effect of initial biomass ratio on the growth of *C. pyrenoidosa* and *I. zhanjiangensis*

不同起始生物量比下蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻的逻辑斯蒂模型分析见表 5。两种微藻也表现出种间竞争的相互抑制效应, 除 C:I=4:1 组中蛋白核小球藻的最大环境容纳量( $K$ )较对照组略有提高外, 其余各组两种共养微藻的最大环境容纳量与对照组相比均显著降低( $P<0.05$ )。

不同起始生物量比下蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻的竞争抑制参数见表 6, 在不同处理组中, 蛋白核小球藻对湛江等鞭金藻的竞争抑制参数( $\beta$ )大于湛江等鞭金藻对蛋白核小球藻的竞争抑制参数( $\alpha$ ); 在 C:I=1:4 和 1:1 时, 两种微藻的种间相对竞争力( $\alpha/\beta$  或  $\beta/\alpha$ )在自身起始生物量比低时较强, 而在 C:I=4:1 时, 蛋白核小球藻种间相对竞争力( $\beta/\alpha$ )最强。

## 3 讨论

### 3.1 3 种海洋微藻种间竞争力的比较

种群密度是种群增长的重要参数, 也是影响种间竞争的重要因素之一。研究表明<sup>[4]</sup>, 当塔玛亚历山大藻(A)和赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*, H)接种比例为 A:H=1:4 时, 赤潮异弯藻在竞争中占优势, 而当 A:H=1:1 及 4:1 时, 塔玛亚历山大藻在竞争中占优势; 蔡恒江等<sup>[3]</sup>认为, 赤潮异弯藻对中肋骨条藻(*Skeletonema*



*costatum*, S) 的抑制作用随其初始接种密度的提高而愈加明显,塔玛亚历山大藻和中肋骨条藻与塔玛亚历山大藻和赤潮异弯藻之间的种间竞争结果相类似,即起始密度比为 A:S(H)=1:4 时,中肋骨条藻和赤潮异弯藻分别在竞争中占优势,当 A:S(H)=1:1 和 4:1 时,塔玛亚历山大藻在竞争中占优势。

表 5 不同起始生物量比下蛋白核小球藻(C)和湛江等鞭金藻(I)的逻辑斯蒂模型分析

Table 5 The Logistic model of *C. pyrenoidosa* (C) and *I. zhanjiangensis* (I) at different initial biomass ratio

生物量比 Biomass ratio	藻种 Microalgae	K /(10 <sup>4</sup> 个/mL)	a	r	R <sup>2</sup>	T <sub>p</sub> /d
C:I=1:4	<i>C. pyrenoidosa</i> (P)	4520.66±252.01	3.919±0.200	0.504±0.057	0.979±0.023	7.8±0.6
	<i>I. zhanjiangensis</i> (P)	676.00±23.12	3.177±0.169	0.742±0.065	0.995±0.002	4.3±0.2
	<i>C. pyrenoidosa</i> (M)	1377.56±69.41*	3.362±0.153	0.545±0.041	0.974±0.005	6.2±0.2
	<i>I. zhanjiangensis</i> (M)	507.45±11.11*	2.354±0.103	0.477±0.018	0.948±0.018	4.9±0.1
C:I=1:1	<i>C. pyrenoidosa</i> (P)	4520.66±252.01	3.919±0.200	0.504±0.057	0.979±0.023	7.8±0.6
	<i>I. zhanjiangensis</i> (P)	677.05±23.68	3.352±0.336	0.641±0.025	0.962±0.013	5.2±0.4
	<i>C. pyrenoidosa</i> (M)	2241.44±51.00*	2.888±0.101	0.335±0.013	0.918±0.011	8.6±0.2
	<i>I. zhanjiangensis</i> (M)	381.50±10.07*	2.988±0.123	0.790±0.027	0.992±0.005	3.8±0.2
C:I=4:1	<i>C. pyrenoidosa</i> (P)	4220.48±523.55	2.386±0.181	0.436±0.122	0.980±0.008	5.7±1.2
	<i>I. zhanjiangensis</i> (P)	677.05±23.68	3.352±0.336	0.641±0.025	0.962±0.013	5.2±0.4
	<i>C. pyrenoidosa</i> (M)	4323.16±500.85	2.738±0.052	0.336±0.022	0.985±0.008	8.2±0.5
	<i>I. zhanjiangensis</i> (M)	53.76±3.36*	1.527±0.147	0.605±0.109	0.982±0.013	2.6±0.4

表 6 不同起始生物量比下蛋白核小球藻(C)和湛江等鞭金藻(I)的竞争抑制参数

Table 6 The competitive parameters of *C. pyrenoidosa* (C) and *I. zhanjiangensis* (I) at different initial biomass ratio

竞争抑制参数 Competitive parameters	C:I=1:4(5 d)	C:I=1:1(7 d)	C:I=4:1(5 d)
$\alpha$	0.96±0.47	1.32±0.38	0.49±0.26
$\beta$	1.65±0.86	2.08±0.30	1.96±0.95
$\alpha/\beta$	0.59	0.64	0.25
$\beta/\alpha$	1.72	1.58	4.0

种间竞争不仅与种群密度有关,而且与生物个体大小密切相关。郝雯瑾等<sup>[8]</sup>认为,在青岛大扁藻(*Platymonas helgolandica* var. *tsingtaoensis*)和强壮前沟藻(*Amphidinium carterae*)起始生物量比为 P:A=1:3、1:1 和 3:1 时,青岛大扁藻的种间竞争能力皆大于强壮前沟藻。本实验结果表明,3 种海洋微藻表现出种间竞争的相互抑制效应,在起始生物量比为 A:C(I)=1:4、1:1 和 4:1 时,蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻对塔玛亚历山大藻均有明显的抑制作用,塔玛亚历山大藻所达到的最大环境容纳量仅为对照组的 4.6%—39.6%,且蛋白核小球藻(湛江等鞭金藻)对塔玛亚历山大藻的竞争抑制参数皆大于塔玛亚历山大藻对蛋白核小球藻(湛江等鞭金藻)的竞争抑制参数;在起始生物量比为 C:I=1:4、1:1 和 4:1 时,蛋白核小球藻对湛江等鞭金藻的竞争抑制参数皆大于湛江等鞭金藻对蛋白核小球藻的竞争抑制参数,二者均在自身起始生物量比高时表现出较强的竞争优势。由此可见,3 种微藻的种间竞争强弱依次为蛋白核小球藻>湛江等鞭金藻>塔玛亚历山大藻。

### 3.2 3 种海洋微藻种间竞争机制的探讨

生物种间竞争可分为资源利用性竞争和相互干扰性竞争。资源利用性竞争主要特征表现为参与竞争的个体对营养盐、光照等有限环境资源的竞争。浮游生物的大小在海洋浮游生物群落结构组成中起重要作用,藻类的大小、形态和表面积/体积比例的不同会影响其对营养盐的吸收能力<sup>[13]</sup>,Egge 认为营养盐的吸收与细胞表面积显著相关<sup>[14]</sup>,Armstrong 认为微藻间的相互作用存在明显的大小依赖性,个体较小的微藻具有较大的比表面积,能更多的吸收营养和接受光照,获取生长所需条件,因而在竞争中占优势<sup>[15]</sup>。塔玛亚历山大藻、

湛江等鞭金藻和蛋白核小球藻的个体大小依次递减,而表面积/体积比依次递增,实验结果表明,种间竞争强弱依次为蛋白核小球藻>湛江等鞭金藻>塔玛亚历山大藻,与上述结论一致。由此推测,资源竞争作用可能是两种饵料微藻抑制塔玛亚历山大藻的重要原因。

相互干扰性竞争为一个个体以行为上直接对抗影响另一个个体,竞争的手段可能通过他感作用(即分泌次生物质)和直接接触来实现。很多有毒赤潮藻类在吸收营养盐方面并没有什么优势,但是他们可以通过分泌毒素等方式在海洋浮游生物群落中占优势<sup>[16-18]</sup>。对塔玛亚历山大藻的研究表明<sup>[3,19]</sup>,其藻细胞和去藻过滤液都有一定的毒性作用。由此可以推测,塔玛亚历山大藻对两种饵料藻生长的抑制作用很可能是通过细胞的直接接触和分泌有毒的次生物质两种方式完成的。

蛋白核小球藻与湛江等鞭金藻的种间竞争中,在 C:I=1:1 时,两种微藻的竞争抑制参数均最大,分析其原因可能是由于两藻对资源利用速率较其他处理组均有所提高,但似乎通过资源竞争已不能保持其竞争优势,所以推测,在蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻的竞争过程中很可能同时存在克生物质(胞外活性物质)的相互作用。当二者生物量比越大(4:1)或越小(1:4)时,主要是通过对资源的竞争来抑制对方,而当二者生物量比越接近(1:1)时,很可能同时存在某种克生物质来抑制对方,本结论尚需进一步验证。从实验结果可以看出,生态位接近的两个种群,竞争程度越强烈,终将有一个较弱的种群被排斥,蛋白核小球藻与湛江等鞭金藻间的种间竞争符合高斯原理<sup>[20]</sup>。

同时还发现在两种微藻可实现共存的实验中(C:I=4:1 除外),3 种海洋微藻的种间相对竞争力( $\alpha/\beta$  或  $\beta/\alpha$ )均有随各自起始生物量比减小而增强的趋势。可能在各自起始生物量处于劣势时,为实现两个物种的共存,需要不断地增强自身的相对竞争力,这与各藻的竞争效应和竞争反应密切相关。可见,种间竞争是一个极其复杂的动态过程,随着物种和环境的多元化,其竞争越趋向复杂化。

### 3.3 3 种海洋微藻种间竞争的应用展望

在海产经济动物育苗生产中,通常将饵料藻按照一定比例进行混合投喂,本实验结果得出,蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻在起始生物量比为 C:I=1:1 时,在共养第 9 天时 C:I=1:2,在共养第 13 天 C:I=1:1,在共养第 17 天 C:I=2:1,两种饵料藻可实现共培养利用,因此,在育苗中可根据需要对其进行适时采收投喂。

目前利用大型海藻与浮游微藻间的竞争作用,进行水体富营养化治理及赤潮防治方面的研究已广泛展开。王悠等<sup>[5]</sup>研究发现在大型海藻-微藻的共培养体系中,塔玛亚历山大藻密度为  $0.31 \times 10^4$  个/mL 时,与 3.4 g/L 石莼(*Ulva pertusa*)共养,144 h 塔玛亚历山大藻被完全杀死。若结合本实验结果,相同密度下的塔玛亚历山大藻分别与 10.48 mg/L 蛋白核小球藻(A:C=1:4)和 2.62 mg/L 湛江等鞭金藻(A:I=1:1)共养,所能达到的最大环境容纳量仅为对照组的 4.61% 和 5.04%,由此可见,两种饵料藻的生物量仅为石莼的 0.08%—0.43% 即可有效地抑制塔玛亚历山大藻的种群增长。

郝雯瑾<sup>[8]</sup>等在研究强壮前沟藻与青岛大扁藻之间的相互作用中,发现青岛大扁藻的种间竞争能力明显高于强壮前沟藻,本研究也发现蛋白核小球藻和湛江等鞭金藻对塔玛亚历山大藻具有明显的抑制作用,同时饵料藻具有生长速度快,适应性广,容易培养等特点,这可为开发利用饵料藻进行赤潮生物防控提供一定的科学依据。在流动性小、较封闭的中小型生态系统中,可以利用饵料藻来控制赤潮的发生,然而,在河口、海湾以及养殖海区等开放的大型生态系统中,同时受到营养盐、温度、光照、水流、潮汐和捕食生物等诸多因素的影响,是否可以利用饵料藻或大型海藻与饵料藻的共同作用来更有效地防治赤潮,有待深入研究。

### References:

- [1] 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(2):285-299.
- [2] 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.
- [3] Cai H J, Tang X X, Zhang P Y, Yang Z. The effect of initial cell density on the interspecific competition between three species of red tide

- microalgae. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(6): 1331-1336.
- [ 4 ] Dong Y W, Dong S L, Liu X Y. The effect of initial cell density on the population competition between *Alexandrium tamarens* Balech and *Heterosigma akashiwo* Hada. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(6): 964-968.
- [ 5 ] Wang Y, Yu Z M, Song X X, Zhang S D. Effects of macroalgae on growth of 2 species of bloom microalgae and interactions between these microalgae in laboratory culture. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 274-280.
- [ 6 ] Huo Y Z, Zhang J H, Xu S N, Tian Q T, Zhang Y J, He P M. Effects of seaweed *Gracilaria verrucosa* on the growth of microalgae: a case study in the laboratory and in an enclosed sea of Hangzhou Bay, China. *Harmful Algae*, 2011, 10(4): 411-418.
- [ 7 ] Zhang S D, Song X X, Cao X H, Yu Z M. Inhibitory effect of *Gracilaria lemaneiformis* (Bory) weber bosse on the co-cultured *Scrippsiella trochoidea* (Stein) loeblich III under controlled laboratory conditions. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2008, 29(8): 2291-2295.
- [ 8 ] Han W J, Wang Y, Tang X X. Interactions between two marine microalgae: *Amphidinium carterae* hulburt and *Platymonas helgolandica var. tsingtaoensis* in under controlled laboratory co-culture. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2008, 47(S1): 98-105.
- [ 9 ] Guo H. Illustrations of Planktons Responsible for the Blooms in Chinese Coastal Waters. Beijing: Ocean Press, 2004: 78-79.
- [ 10 ] Liu J K. Senior Aquatic Biology. Beijing: Science Press, 1999: 63-72.
- [ 11 ] Shang Y C, Cai X M. General Ecology. Beijing: Peking University Press, 1992: 108-117.
- [ 12 ] Sun R Y, Li B. General Ecology. Beijing: Higher Education Press, 1993: 106-108.
- [ 13 ] Karp-Boss L, Boss E, Jumars P A. Nutrient fluxes to planktonic osmotrophs in the presence of fluid motion. *Oceanography and Marine Biology: An Annual Review*, 1996, 34: 71-107.
- [ 14 ] Egge J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations?. *Journal of Marine Systems*, 1998, 16(3/4): 191-198.
- [ 15 ] Armstrong R A. A hybrid spectral representation of phytoplankton growth and zooplankton response: the "control rod" model of plankton interaction. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003, 50(22/26): 2895-2916.
- [ 16 ] Chen B Z, Zhu M Y, Wang Z L, Li R X. Adaptive and competitive strategies of red tide algae. *Marine Environmental Science*, 2005, 24(1): 70-75.
- [ 17 ] Jonsson P R, Pavia H, Toth G. Formation of harmful algal blooms cannot be explained by allelopathic interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(27): 11177-11182.
- [ 18 ] Weissbach A, Tillmann U, Legrand C. Allelopathic potential of the dinoflagellate *Alexandrium tamarens* on marine microbial communities. *Harmful Algae*, 2010, 10(1): 9-18.
- [ 19 ] Tan Z J, Yan T, Zhou M J, Li J, Yu R C, Wang Y F. The effects of *Alexandrium tamarens* on survival, growth and reproduction of *Neomysis awatschensis*. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1635-1639.
- [ 20 ] Dong S L, Zhao W. Aquatic Ecology for Aquaculture. Beijing: China Agriculture Press, 2004: 76-77.

#### 参考文献:

- [ 2 ] 赵晓玮, 唐学玺, 王悠. 两种海洋赤潮微藻赤潮异弯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.
- [ 3 ] 蔡恒江, 唐学玺, 张培玉, 杨震. 不同起始密度对 3 种赤潮微藻种间竞争的影响. *生态学报*, 2005, 25(6): 1331-1336.
- [ 4 ] 董云伟, 董双林, 刘相义. 不同起始浓度对塔玛亚历山大藻和赤潮异弯藻种群竞争的影响. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(6): 964-968.
- [ 5 ] 王悠, 俞志明, 宋秀贤, 张善东. 大型海藻与赤潮微藻以及赤潮微藻之间的相互作用研究. *环境科学*, 2006, 27(2): 274-280.
- [ 7 ] 张善东, 宋秀贤, 曹西华, 俞志明. 龙须菜对锥状斯氏藻抑制作用的机制. *环境科学*, 2008, 29(8): 2291-2295.
- [ 8 ] 郝雯瑾, 王悠, 唐学玺. 两种海洋微藻——强壮前沟藻与青岛大扁藻之间的相互作用研究. *中山大学学报: 自然科学版*, 2008, 47(S1): 98-105.
- [ 9 ] 郭皓. 中国近海赤潮生物图谱. 北京: 海洋出版社, 2004: 78-79.
- [ 10 ] 刘建康. 高级水生生物学. 北京: 科学出版社, 1999: 63-72.
- [ 11 ] 尚玉昌, 蔡晓明. 普通生态学. 北京: 北京大学出版社, 1992: 108-117.
- [ 12 ] 孙儒泳, 李博. 普通生态学. 北京: 高等教育出版社, 1993: 106-108.
- [ 16 ] 陈炳章, 朱明远, 王宗灵, 李瑞香. 赤潮藻类的适应与竞争策略. *海洋环境科学*, 2005, 24(1): 70-75.
- [ 19 ] 谭志军, 颜天, 周名江, 李钧, 于仁诚, 王云峰. 塔玛亚历山大藻对黑褐新糠虾存活、生长以及种群繁殖的影响. *生态学报*, 2002, 22(10): 1635-1639.
- [ 20 ] 董双林, 赵文. 养殖水域生态学. 北京: 中国农业出版社, 2004: 76-77.

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