

东海原甲藻 (*Prorocentrum donghaiensis*) 对原生动物群落结构影响的现场船基实验

张利永^{1,2} 颜 天^{1,*} 韩 刚^{1,2} 周名江¹

(1. 中国科学院海洋研究所海洋生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要 2005 年在长江口赤潮频发海域调查期间, 分别于 4 月 27 日、5 月 4 日和 5 月 8 日, 在 zzf1、zc18a 和 ra5 站位利用现场船基培养的方法, 研究了添加到赤潮密度 10^6 cells L^{-1} 的东海原甲藻 (*Prorocentrum donghaiense*) 对原生动物群落结构的影响。结果发现, 赤潮密度的东海原甲藻抑制了小型无壳纤毛虫的种群数量, 而没有抑制中大型砂壳纤毛虫和夜光虫 (*Noctiluca scintillans*) 的种群数量, 从而使得原生动物群落向中大型种类演替, 这种影响的程度与原生动物本身的群落组成和浮游植物的组成密切相关。添加东海原甲藻 72 h 后, 在以小型无壳纤毛虫管游虫 (*Cyrtostrombidium* sp.) 为优势种的 zzf1 站位, 演替为以大型原生动物夜光虫为优势种的群落; 在以中大型原生动物百乐拟铃虫 (*Tintinnopsis beroidea*) 和夜光虫为优势种的 zc18a 站位, 仍然是以此为优势种, 且大型原生动物夜光虫在群落中的比例上升; 在以小型无壳纤毛虫急游虫 2 (*Strombidium* sp. 2) 为优势种的 ra5 站位, 演替为以中大型原生动物百乐拟铃虫和亚速岛网纹虫 (*Favella azorica*) 为优势种的群落。zzf1 和 ra5 站位实验组中原生动物的总丰度都呈下降趋势, 而 zc18a 站位变化不明显, 这是由于前两个站位的最优势种管游虫 (zzf1 站位) 和急游虫 2 (ra5 站位) 的丰度迅速下降, 而 zc18a 站位的优势种百乐拟铃虫和夜光虫的丰度比较稳定造成的。在 zzf1 和 zc18a 站位, 对照组和实验组中原生动物的总生物量在实验前后都没有大的变化, 而在 ra5 站位却均呈下降的趋势。这可能与浮游植物的组成有关, zzf1 和 zc18a 站位是以无毒的锥状斯氏藻 (*Scrippsiella trochoidea*) 和螺旋环沟藻 (*Gyrodinium spirale*) 为主, 而 ra5 站位是有毒的亚历山大藻 (*Alexandrium* sp.) 为主。综上所述, 可预测当东海大规模赤潮爆发时, 会使原生动物群落向中大型种类演替, 进而可能影响海洋生态系统的结构和功能。

关键词 东海原甲藻 赤潮 原生动物群落结构 现场培养实验

文章编号: 1000-0933 (2007) 05-1926-11 中图分类号: Q178 X55 文献标识码: A

A shipboard study of the effects of HAB species *Prorocentrum donghaiense* on protozoan communities at three sites in the East China Sea, involving 72h inoculation experiments to simulate HAB bloom events

ZHANG Li-Yong^{1,2}, YAN Tian^{1,*}, HAN Gang^{1,2}, ZHOU Ming-Jiang¹

1 Key Laboratory of Marine Ecology and Environmental Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 China Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (5) 1926 ~ 1936.

Abstract : To study the effects of simulated HAB (Harmful algal blooms) on protozoan community structure, shipboard

基金项目 国家重点基础研究发展规划资助项目 (2001CB409709) ; 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (KZCX2-YW-208)

收稿日期 2006-09-12 ; 修订日期 2007-03-30

作者简介 张利永 (1976 ~) 男, 山东莱芜人, 博士生, 主要从事海洋生态毒理学研究. E-mail : liyongz@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : tianyan@ms.qdio.ac.cn

致谢 承蒙徐奎栋研究员在原生动物物种鉴定方面的指导, 及类彦立副研究员的讨论, 谨致谢忱。

Foundation item The project was financially supported by State Key Basic and Development Plan (No. 2001CB409709) ; Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-208)

Received date 2006-09-12 ; **Accepted date** 2007-03-30

Biography ZHANG Li-Yong, Ph. D. candidate, mainly engaged in marine ecology and toxicology. E-mail : liyongz@163.com

Prorocentrum donghaiense inoculation experiments (at about 10^6 cells L^{-1} , equivalent to bloom density) were carried out at stations zzf1, zc18a and ra5 in the East China Sea, a frequent HAB occurrence area, on 27th April, 4th May and 8th May 2005, respectively. The results showed that *P. donghaiense* at a density of 10^6 cells L^{-1} could inhibit the abundance of small-sized aloricate ciliates, but had no significant effect on medium- and large-sized protozoa, which thereby led to a community succession toward medium- or large-sized individuals. Such effects and the degree of impact were closely related to both protozoan and phytoplankton community compositions. At station zzf1, the protozoan community initially dominated by the small-sized aloricate ciliate *Cyrtostrombidium* sp. changed remarkably and was dominated by the large-sized protozoan *Noctiluca scintillans* after adding *P. donghaiense* for 72 h. At station zc18a, the protozoan community initially dominated by medium-sized tintinnid *Tintinnopsis beroidea* and *N. scintillans* was still dominated by the two protozoa, and the dominant degree of *N. scintillans* increased noticeably after adding *P. donghaiense* for 72 h. At station ra5, the protozoan community initially dominated by the small-sized aloricate ciliate *Strombidium* sp. 2 changed dramatically and was dominated by *T. beroidea* and the large-sized tintinnid *Favella azorica* at the end of the experiment. The total abundance of protozoa decreased dramatically at stations zzf1 and ra5 due to the reduction of their dominant species *Cyrtostrombidium* sp. and *Strombidium* sp. 2, whereas no significant variation was found at station zc18a due to the steady abundance of its dominant species *T. beroidea* and *N. scintillans* after adding *P. donghaiense* for 72 h. The total biomass of protozoa at stations zzf1 and zc18a changed slightly in both control groups and the experimental ones. In contrast, total biomass decreased drastically at station ra5 at the end of the experiments, which might be due to the different phytoplankton composition at the three stations: station zzf1 and zc18a were dominated by non-toxic *Scrippsiella trochoidea* and *Gyrodinium spirale*, however station ra5 was dominated by toxic *Alexandrium* sp.. These results indicate that large scale *P. donghaiense* HAB could affect protozoan communities and might further exert a profound influence on the structure and function of marine ecosystems.

Key Words : *Prorocentrum donghaiense* ; HAB ; Protozoan community structure ; inoculation experiment

近年来,在我国东海长江口及其邻近海区每年都有大规模的东海原甲藻 (*Prorocentrum donghaiense*) 赤潮发生,其对海洋生态系统的影响引起了人们的广泛关注^[1]。近年来的研究表明,东海原甲藻对中华哲水蚤 (*Calanus sinicus*)、褶皱臂尾轮虫 (*Brachionus plicatilis*) 和蒙古裸腹溞 (*Moina mogolica*) 的存活以及繁殖等生命活动有一定的不利影响^[2,11,12]。

原动物是海洋生态系统中的重要组分,属于个体较小的生物,大部分小于 200 μm ^[3],是构成微型浮游动物的最主要成分^[4],是初级生产力的主要消费者,在海洋生态系统的物质循环和能量流动中起重要作用^[5~10]。赤潮的消长过程对原动物的群落结构影响较大,能使其发生明显的变化^[1~13]。为了了解大规模东海原甲藻赤潮对该海域原动物群落结构的影响,本文用现场培养的方法,研究了添加到赤潮密度的东海原甲藻对原动物群落结构的影响,进而为研究东海原甲藻赤潮对海洋生态系统的影响以及对环境资源可能带来的危害提供资料。

1 材料和方法

1.1 实验站位

在 2005 年 4 月 27 日~5 月 17 日,赤潮 973MC2005-03 航次在东海长江口及其邻近海区进行了近一个月的综合调查,期间分别于 4 月 27 日、5 月 4 日和 5 月 8 日,在 zzf1、zc18a 和 ra5 三个站位 (图 1) 进行了实验。

① 陈洋. 有害赤潮对海洋浮游生态系统结构和功能影响的初步研究. 硕士论文. 2005
② 韩刚. 东海大规模赤潮对中华哲水蚤和黑褐新糠虾的生态毒理学研究. 硕士论文. 2006

1.2 实验方法

1.2.1 东海原甲藻的培养

实验所用的东海原甲藻分离自东海 2002 年春季东海原甲藻赤潮发生海区,实验室内用 f/2 培养液培养,温度 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$,光照 $40\mu\text{E}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$,光暗比 12 L:12D。在本航次前,以同样的方法和条件接种培养东海原甲藻,培养容器为 5 L 的透明聚乙烯瓶,培养体积 4 L,共培养 5 瓶。航次开始后,将培养瓶置于通有流动现场海水的水槽内,使培养温度与现场海水的温度接近。每隔 2 d 取样计数其密度,实验开始前东海原甲藻的密度约 10^8 cells L^{-1} 。

1.2.2 操作方法

取表层海水,用孔径 $1000\mu\text{m}$ 的筛绢过滤,除去中大型浮游动物,然后将其分为对照组和实验组。用孔径 $10\mu\text{m}$ 的筛绢将东海原甲藻培养液浓缩,镜检计数后,加入到实验组海水中,使其最终密度在 10^6 cells L^{-1} 左右,对照组加入等体积的过滤海水。培养容器为透明聚乙烯瓶,培养体积为 4 L。实验处理完毕后,将培养容器置于固定在甲板上的水槽内进行培养。水槽内通有流动现场海水,使培养温度与现场海水水温相近。

1.3 取样方法

操作完毕,分别于 0.5 h 和 4 h 后进行第 1、2 次取样,此后每隔 4 h 取样 1 次,1 d 后改为每 12 h 取样 1 次,两天后结束实验。取样时先轻轻摇动培养瓶,使培养液混合均匀,取样体积为 200 ml,取样后立即用体积分数 2% 的甲醛固定。所有样品于阴凉处存放。

1.4 分析方法

样品用 Utermöhl 法分析^[4]。200 ml 样品经过 10 d 静止沉降后,去除上清液,将样品全部收集于 25 ml Utermöhl 计数杯中,再静止沉降 24 h 以上,最后在倒置显微镜(型号 XD-101,江南光电股份有限公司) $\times 200$ 放大倍率下进行原生动物的全片计数。

原生动物的物种鉴定参照 Kofoid 等方法^[3, 15-19],浮游植物的物种鉴定参照金德祥等方法^[20-22]。

1.5 原生动物生物量的计算

测量每种原生动物的最大长度和宽度,优势种测量 20 个细胞,稀有种测量全部观察到的细胞,求平均值。再根据近似的几何体形状,计算其细胞体积,按照以下公式计算不同类群原生动物的生物量:

无壳纤毛虫 ^[23]	无壳纤毛虫生物量 (pg C) = 细胞体积 (μm^3) $\times 0.14$
砂壳纤毛虫 ^[24]	砂壳纤毛虫 (pg C) = 细胞体积 (μm^3) $\times 0.053 + 444.5$
夜光虫 ^[25]	夜光虫生物量 (pg C) = 细胞体积 (μm^3) $\times 0.13$

2 实验结果

2.1 实验站位的水文环境条件

表 1 给出了实验站位表层海水的环境条件。3 个站位的表层海水水温差异较大,而叶绿素的值自南向北依次减小,而盐度都在 30 左右。

2.2 研究站位的原生动物和浮游植物

2.2.1 原生动物

表 2 列出了研究站位出现的原生动物优势种的种名、丰度和最大长宽。3 个站位出现的原生动物有一定差别。zzf1 站位的优势种是小型无壳纤毛虫管游虫,大型原生动物夜光虫是群落中的次优势种。zc18a 站

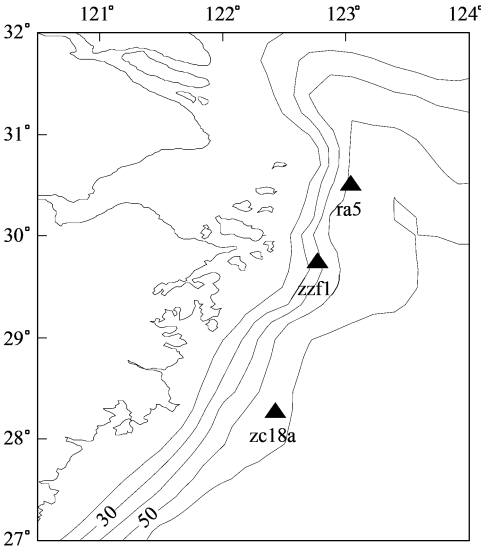


图 1 实验站位
Fig. 1 Study stations

的优势种是中型砂壳纤毛虫百乐拟铃虫,夜光虫也是群落中的次优势种。而 ra5 站位的优势种是小型无壳纤毛虫急游虫 2,其优势度非常突出,远远高于其它种类。

表 1 实验开始前研究站位的水温、盐度和叶绿素 a 值

Table 1 The initial temperature, salinity and chl a of the study stations

站位 Stations	时间 Time	水温 Temperature (℃)	盐度 Salinity	叶绿素 Chl a μg L ⁻¹
zzf1	4 月 27 日	16.1	30.5	2.0
zc18a	5 月 4 日	19.6	30.1	3.1
ra5	5 月 8 日	17.2	30.5	1.9

数据由王云峰提供 The data is from Wang Yun-Feng

表 2 研究站位出现的原动物及其大小和丰度

Table 2 Protozoa species, their linear parameters and abundance in the study stations

原动物 Protozoa	长度 Length (μm)	宽度 Width (μm)	丰度 Abundance (Ind L ⁻¹)	研究站位 Stations
管游虫 <i>Cyrtostrombidium</i> sp.	40	25	560	zzf1
夜光虫 <i>Noctiluca scintillans</i>	540	540	311	zzf1
急游虫 2 <i>Strombidium</i> sp. 2	9	7	258	zzf1
<i>Strombidinopsis acuminata</i>	80	23	124	zzf1
急游虫 1 <i>Strombidium</i> sp. 1	18	15	40	zzf1
<i>Strombidium conicum</i>	45	35	27	zzf1
<i>Tintinnopsis nana</i>	25	18	27	zzf1
侠盗虫 <i>Strobilidium</i> sp.	120	85	22	zzf1
急游虫 4 <i>Strombidium</i> sp. 4	40	34	13	zzf1
根状拟铃虫 <i>T. radix</i>	380	56	4	zzf1
百乐拟铃虫 <i>Tintinnopsis beroidea</i>	83	25	881	zc18a
夜光虫 <i>Noctiluca scintillans</i>	430	430	229	zc18a
<i>Strombidium conicum</i>	45	35	200	zc18a
急游虫 3 <i>Strombidium</i> sp. 3	19	14	157	zc18a
侠盗虫 <i>Strobilidium</i> sp.	115	83	105	zc18a
<i>T. nana</i>	26	18	14	zc18a
小领细壳虫 <i>Stenosemella parvicollis</i>	43	37	10	zc18a
根状拟铃虫 <i>T. radix</i>	380	56	10	zc18a
直颈拟铃虫 <i>T. directa</i>	80	40	5	zc18a
急游虫 2 <i>Strombidium</i> sp. 2	9	8	45370	ra5
<i>Strombidium conicum</i>	46	36	6187	ra5
百乐拟铃虫 <i>Tintinnopsis beroidea</i>	85	25	3520	ra5
<i>T. lohmanni</i>	100	75	404	ra5
急游虫 4 <i>Strombidium</i> sp. 4	40	33	98	ra5
亚速岛网纹虫 <i>Favella azorica</i>	160	65	53	ra5
<i>Tintinnidium mucicola</i>	112	36	49	ra5
甲冈栉毛虫 <i>Didinium gargantua</i>	100	36	18	ra5
勃拉西里拟铃虫 <i>T. brasiliensis</i>	80	54	9	ra5

2.2.2 浮游植物的优势种及其丰度

图 2 给出 3 个站位浮游植物主要优势种的丰度在实验过程中的变化。zzf1 和 zc18a 站位都是以锥状斯氏藻 (*Scrippsiella trochoidea*)和螺旋环沟藻 (*Gyrodinium spirale*)为优势种的浮游植物群落,而 ra5 站位的最优势种是亚历山大藻 (*Alexandrium* sp.) ,其丰度高达 1.2 × 10⁴ cells L⁻¹,比次优势种的锥状斯氏藻大 2 个数量级。据报道,该海域出现亚历山大藻的细胞毒性与中等毒性的其它亚历山大藻相当,约为 8.6 pg STX eq^[26]。实验

过程中 3 个站位对照组中主要优势种的丰度都比较稳定 ,实验组添加东海原甲藻后 ,其丰度在实验过程中维持在 10^6 cells L^{-1} 左右 ,而柔弱拟菱形藻 (*Pseudo-nitzschia delicatissima*) 的丰度都呈上升趋势 ,其它优势种的丰度比较稳定。

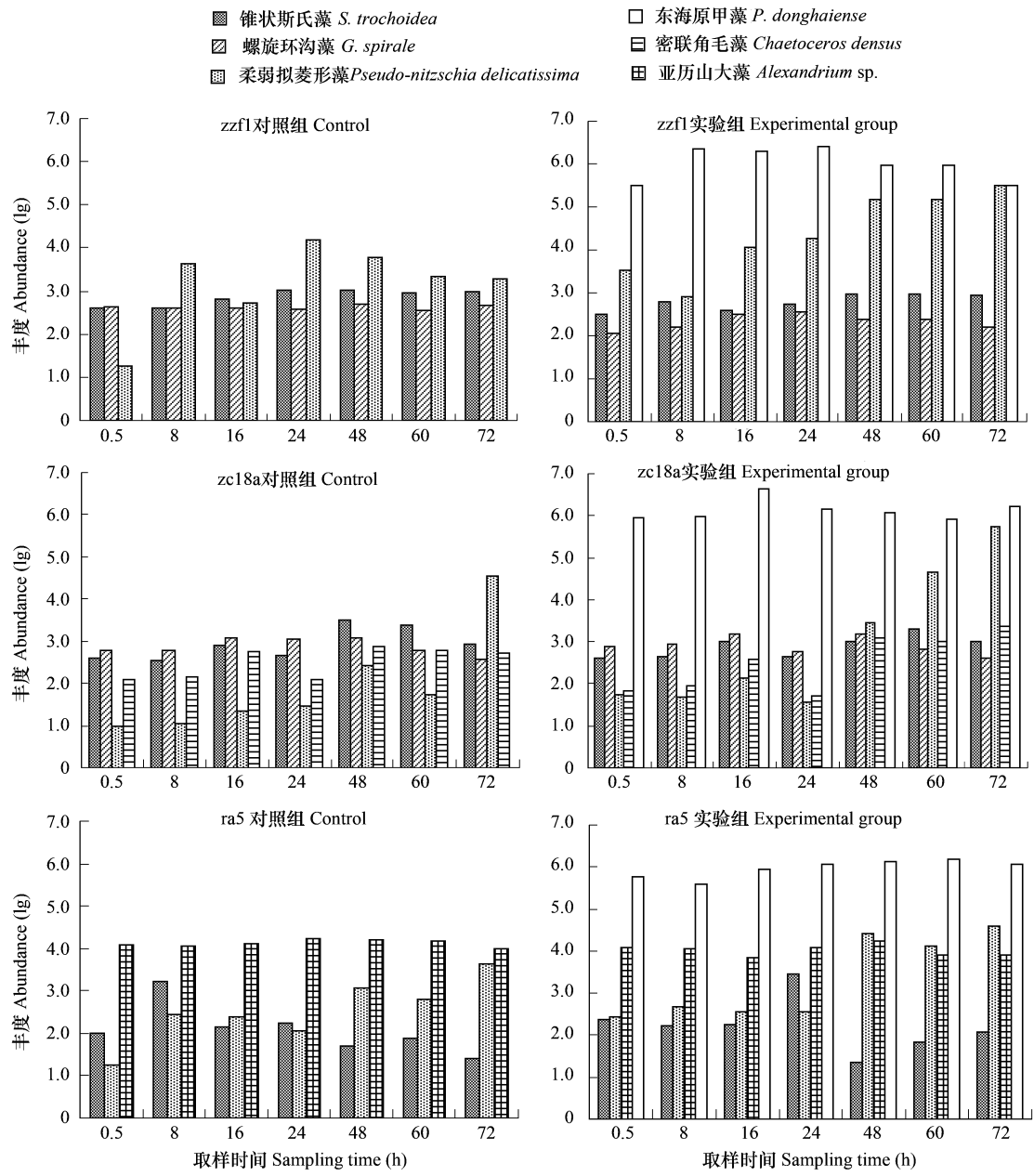


图2 实验过程中对照组和添加东海原甲藻的实验组中浮游植物优势种的丰度

Fig. 2 Abundance of dominant phytoplankton species in the control and experimental groups during the experiments

2.3 原生动物的群落结构变化

在以小型无壳纤毛虫管游虫为最优势种的 zzf1 站位 ,原生动物的群落结构变化如图 3 所示。添加东海原甲藻后 ,实验组中原生动物的群落结构短时间内就发生了明显变化 :大型原生动物夜光虫取接管游虫成为群落中的优势种 ,实验结束时仍是以夜光虫为优势种的群落 ,而对照组演替成以另一种小型无壳纤毛虫急游虫 4 为优势种的群落。可见 ,高密度的东海原甲藻能改变以小型无壳纤毛虫为主的原生动物的群落结构 ,使之向大型种类演替。

在以中大型原生动物百乐拟铃虫和夜光虫为优势种的 zc18a 站位 ,原生动物的群落结构变化如图 4 所

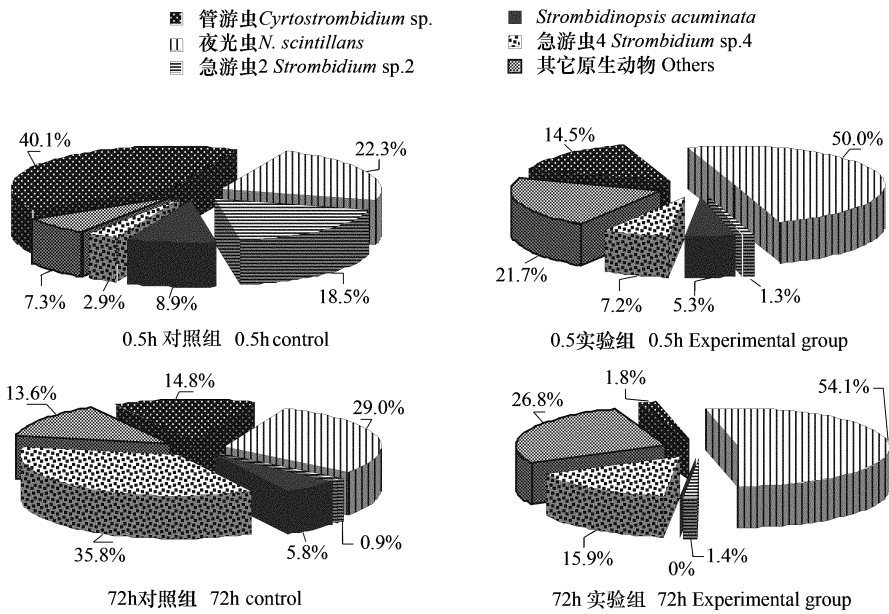


图3 实验前后 zzf1 站位对照组和添加东海原甲藻的实验组中原生动物的群落结构

Fig. 3 The protozoa community structure in the control and experimental groups in the beginning and at the end of the experiment of station zzf1

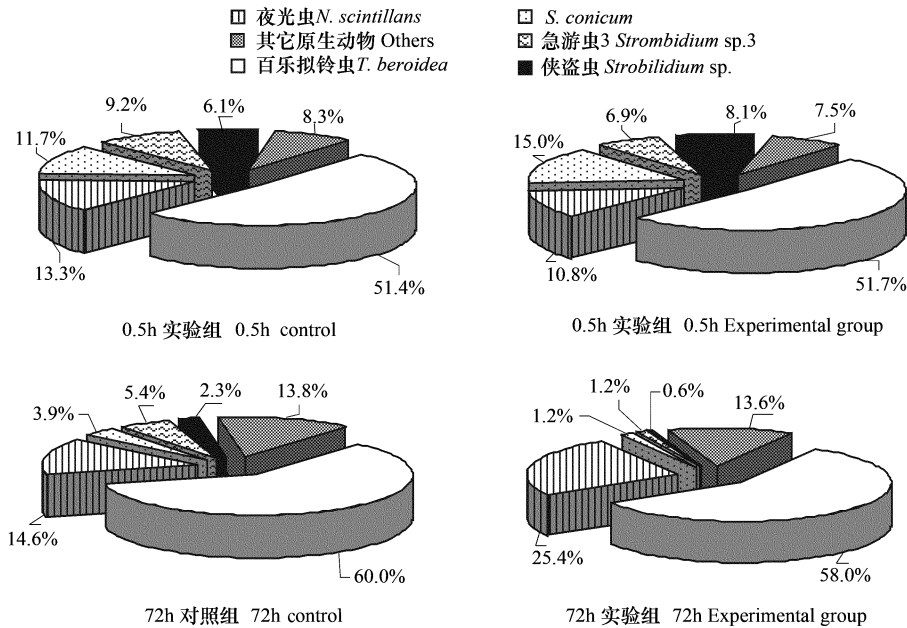


图4 实验前后 zc18a 站位对照组和添加东海原甲藻的实验组中原生动物的群落结构

Fig. 4 The protozoa community structure in the control and experimental groups in the beginning and at the end of the experiment of station zc18a

示。实验前后原生动物的群落结构在对照组和实验组都是以百乐拟铃虫和夜光虫为优势种的群落。但添加东海原甲藻 72 h 后 ,与对照组相比 ,夜光虫在实验组中的百分比明显升高。可见 ,高密度的东海原甲藻能促进以中大型原生动物为主的原生动物群落向大型种类演替。

在以小型无壳纤毛虫急游虫 2 为优势种的 ra5 站位 ,原生动物的群落结构变化如图 5 所示。与前两个站位相比 ,本站位原生动物群落结构的变化更加剧烈 :对照组向以中大型砂壳纤毛虫百乐拟铃虫和亚速岛网纹虫为主的群落快速演替 ,这可能是由于该站位含有较高密度的亚历山大藻。实验组也有相似的演替趋势 ,但

在东海原甲藻和亚历山大藻的共同作用下 ,实验结束时 ,群落中中大型原生动物的优势度更加明显。可见 ,高密度的东海原甲藻和亚历山大藻能改变以小型无壳纤毛虫为主的原生动物的群落结构 ,使之向中大型砂壳纤毛虫演替 ;由于较高密度的亚历山大藻的存在 ,这种演替比 zzf1 站位更明显。

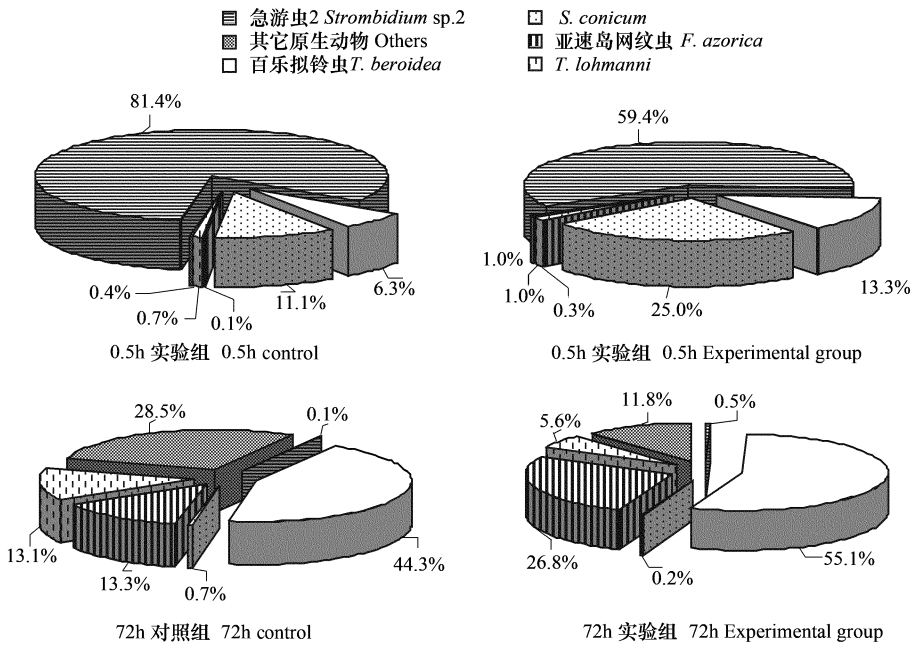


图5 实验前后 ra5 站位对照组和添加东海原甲藻的实验组中原生动物的群落结构

Fig. 5 The protozoa community structure in the control and experimental groups in the beginning and at the end of the experiment of station ra5

2.4 原生动物总丰度及其优势种丰度的变化

图6显示了3个站位原生动物总丰度在实验过程中的变化 ,从图中可知 ,原生动物总丰度的变化趋势与其优势种密切相关。添加东海原甲藻后 ,在以小型无壳纤毛虫为主的 zzf1 和 ra5 站位 ,实验组中原生动物的总丰度都呈下降趋势 ,而在以中大型原生动物百乐拟铃虫和夜光虫为主的 zc18a 站位 ,原生动物总丰度的变化不明显。这是因为添加东海原甲藻后 ,zzf1 和 ra5 站位实验组中原生动物的优势种管游虫和急游虫 2 的丰度快速下降 ,而 zc18a 站位的优势种百乐拟铃虫和夜光虫的丰度没有明显变化造成的 (图7)。

2.5 原生动物总生物量的变化

3个站位原生动物总生物量的变化如图8所示。可以看出 ,现场海水中原生动物的总生物量在3个站位相差悬殊 ,zzf1 站位最大 ,zc18a 站位较小 ,ra5 站位最小 ,主要是由于个体较大的夜光虫在3个站位分布不均造成的 (表1)。在 zzf1 和 zc18a 站位 ,实验结束时 ,添加东海原甲藻的实验组中原生动物的总生物量都高于对照组中原生动物的总生物量。而在 ra5 站位 ,对照组和实验组中原生动物的总生物量都呈下降趋势。

3 讨论

3.1 东海原甲藻抑制小型无壳类的种群数量

在鉴定计数过程中发现高密度的东海原甲藻有一定的黏附性 ,大量附着在小型无壳纤毛虫的体表。王丽平和韩刚的研究都认为 ,高密度的东海原甲藻有一定的黏附性 ,其黏附作用是造成褶皱臂尾轮虫和中华哲水蚤存活率下降的原因 [21]。小型无壳纤毛虫本身很脆弱 ,对环境压力的变化比较敏感 ,抗干扰的能力比较低 ,对海水搅动等处理 ,就能对其造成一定的损伤 [27]。无壳纤毛虫一旦被黏附 ,其生命活动将受到较大抑制 ,容易造成大量死亡。因此 ,在 zzf1 和 ra5 站位的实验组 ,添加赤潮密度的东海原甲藻后 ,小型无壳纤毛虫的丰度

① 韩刚. 东海大规模赤潮对中华哲水蚤和黑褐新糠虾的生态毒理学研究. 硕士论文. 2006

都迅速下降。

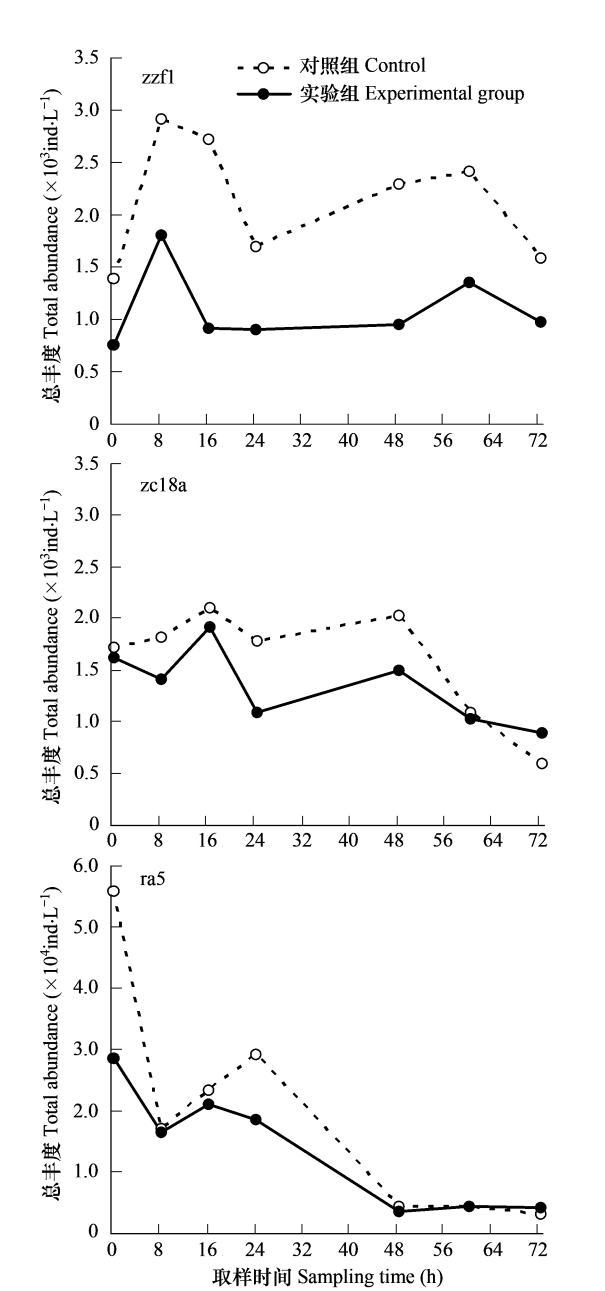


图6 实验过程中对照组和添加东海原甲藻的实验组中原生动物的总丰度

Fig. 6 Total abundance of protozoa in the control and experimental groups during the experiments

3.2 东海原甲藻能维持大型原生动物的种群数量

据报道,当东海原甲藻的密度 $< 10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 时,可以维持褶皱臂尾轮虫良好的生长和种群繁殖^[2]。从个体大小上看,亚速岛网纹虫和褶皱臂尾轮虫非常接近,东海原甲藻的大小可能在亚速岛网纹虫的摄食粒径范围之内,从而促进其种群数量的增加。另据报道,在约 $10^8 \text{ cells L}^{-1}$ 的密度下,微小原甲藻 (*P. minimum*) 能维持爱氏网纹虫 (*F. ehrenbergii*) 良好的生长^[28],无论个体大小、形态结构还是亲缘关系,东海原甲藻和微小原甲藻以及亚速岛网纹虫和爱氏网纹虫都非常相近。东海原甲藻可能是适合亚速岛网纹虫摄食的藻类。因

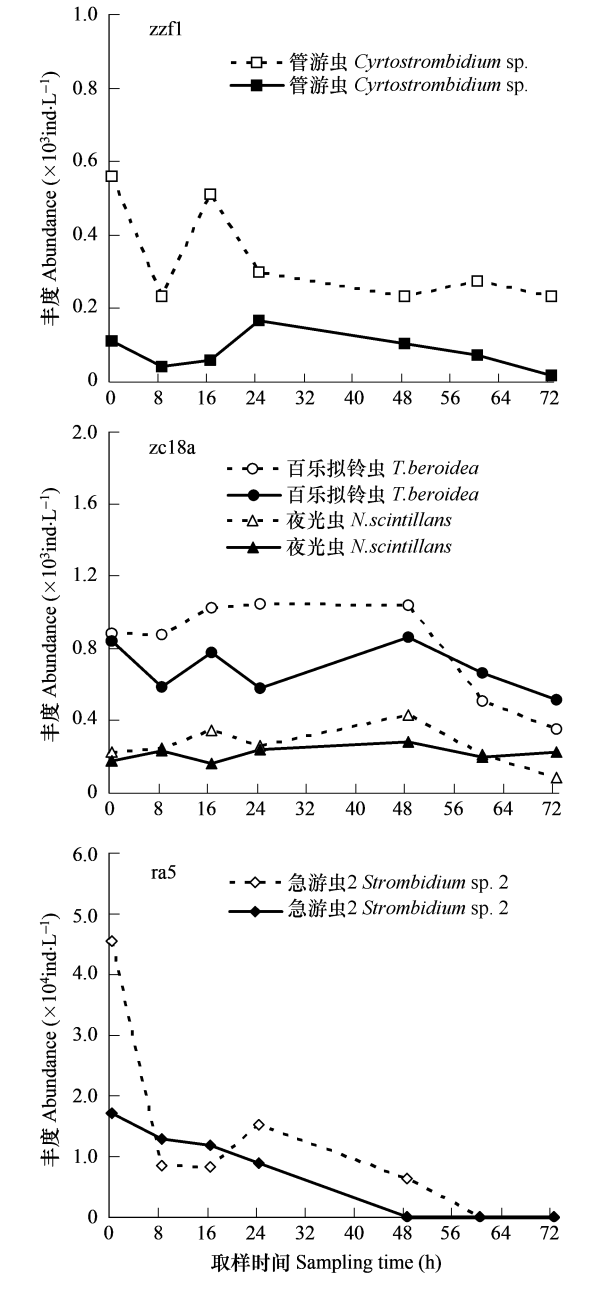


图7 实验过程中对照组(虚线)和添加东海原甲藻的实验组中(实线)原生动物优势种的丰度

Fig. 7 The abundance of protozoa dominant species in the control (broken lines) and experimental groups (solid lines) during the experiments

此,添加东海原甲藻后,ra5 站位实验组中亚速岛网纹虫的丰度及其在原生动物群落中的百分比都呈上升趋势。

夜光虫的食谱较广^[29,30],能摄食甲藻和各种鞭毛藻^[31~33],尤其是 < 30 μm 的微型浮游植物,更是夜光虫喜欢摄食的类群^[34]。东海原甲藻属于典型的微型浮游植物,实验组中高密度的东海原甲藻可能是夜光虫的主要食物来源,从而促进夜光虫的生长繁殖。现场调查时发现,在东海原甲藻赤潮期间,某些站位夜光虫的丰度较高,说明两者营养关系可能比较密切。因此,在zzf1 和 zc18a 站位的实验组,添加赤潮密度的东海原甲藻后,夜光虫在群落中的百分比明显上升。

3.3 产毒亚历山大藻严重影响原生动物的生命活动

据报道,产麻痹性贝毒的亚历山大藻对某些原生动物有明显的不良影响^[35~39],如塔玛亚历山大藻 (*A. tamarense*)在 3.0×10^6 cells L⁻¹时,很快就能使爱氏网纹虫的游泳出现异常,3~10 min 内丧失向前游泳的能力,几个小时后虫体全部裂解死亡^[35];当乌氏亚历山大藻 (*A. ostenfeldii*)的密度 > 3.0×10^6 cells L⁻¹时,爱氏网纹虫的游泳出现异常,至 5.0×10^6 cells L⁻¹时,几乎所有的爱氏网纹虫都出现游泳异常,接着裂解死亡^[36]。据报道,该海域出现的亚历山大藻的细胞毒性与中等毒性的其它亚历山大藻相当,约为 8.6 pg STX eq^[26]。小型无壳纤毛虫可能对产毒亚历山大藻更敏感,从而使得 ra5 站位原生动物的总丰度和总生物量在对照组和实验组都呈下降趋势。

与本研究结果不同的是,1991 年日本广岛湾发生的赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo*)赤潮,使得原生动物群落由类铃虫 (*Codonellopsis nipponica*)向与其大小相近的真丁丁虫 (*Eutintinnus tubulosus*)和长形旋口虫 (*Helicostomella longa*)演替^[2],而 1998 年该海区发生的圆鳞异囊藻 (*Heterocapsa circularisquama*)赤潮使得原生动物群落由较大型的拟铃虫 (*Tintinnopsis cylindrica*)向小型无壳纤毛虫曳尾虫 (*Tontonia* sp.)演替^[3]。由于不同赤潮藻在毒性、作用方式以及影响机制等方面可能存在较大差异,从而使得不同赤潮藻形成的赤潮对原生动物的影响也不尽相同。

海洋生态系统中各组分间的关系非常复杂,据报道某些混合营养的甲藻能摄食纤毛虫^[40~44],如无纹环沟藻 (*Gyrodinium instriatum*)能摄食亚速岛网纹虫和某种真丁丁虫 (*E. tubulosus*),红色裸甲藻 (*Gymnodinium sanguineum*)对微型纤毛虫的摄食率也比较高^[44]。近来的研究认为东海原甲藻能摄食小于 12 μm 的鞭毛藻^[45]。可见,原生动物与浮游植物的关系错综复杂,东海大规模赤潮到底以何种机制影响原生动物的群落结构,进而影响微食物环的物质循环和能量流动,最终影响海洋生态系统的结构和功能,有待进一步的实验室和现场研究。

References :

[1] Zhou M J, Zhu M Y, Zhang J. Status of harmful algal blooms and related research activities in China. *Life Sci.*, 2001, 13 (2) : 54 - 59.

[2] Wang L P, Yan T, Tan Z J, et al. Effects of *Alexandrium tamarense* and *Prorocentrum donghaiense* of rotifer *Brachionus plicatilis* population. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (7) : 1151 - 1155.

[3] Sun W B. Progress in Protozoology. Qingdao : Qingdao Ocean University Press, 1999. 1, 155 - 176.

[4] Tillmann U. Interactions between planktonic microalgae and protozoan grazers. *J Eukaryot Microbiol*, 2004, 51 (2) : 156 - 168.

[5] Banse K. Grazing, zooplankton production as key controls of phytoplankton production in the open ocean. *Oceanogr.*, 1994, 7 : 13 - 20.

[6] Verity P G. Abundance, community composition size distribution and production rates of tintinnids in Narragansett Bay, Rhode Island. *Estuar Cstl*

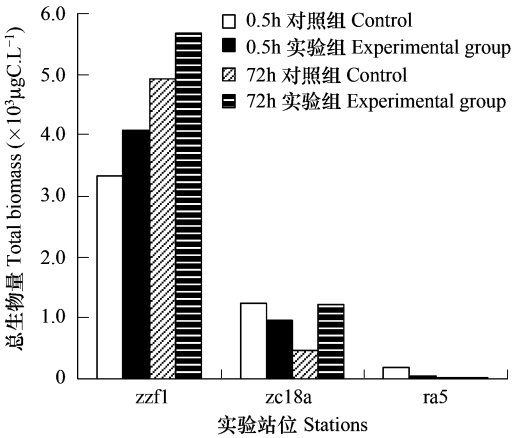


图8 实验前后对照组和添加东海原甲藻的实验组中原生动物的总生物量

Fig. 8 Total biomass of protozoa in the control and experimental groups in the beginning and at the end of the experiments

Shelf Sci ,1987 ,24 :671 — 690.

- [7] Zhang L Y ,Sun J ,*et al.* Studies on growth rate and grazing mortality rate by microzooplankton of size-fractionated phytoplankton in spring and summer]. *Acta Oceanologica Sinica* ,2005 ,24 (2) :85 — 101.
- [8] Sun J ,Liu D Y ,Wang Z L ,*et al.* Microzooplankton herbivory during red tide frequent occurrence period in spring in the East China Sea. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2003 ,14 (7) :1073 — 1080.
- [9] Sun J ,Song X X ,Yin K D ,*et al.* Preliminary study of microzooplankton herbivory in Hong Kong in summer. *Acta Ecologica Sinica* ,2003 ,23 (4) :712 — 724.
- [10] Hong H S ,Ke L ,Huang B Q ,*et al.* Spatial-temporal distribution characteristics of the composition and abundance of ciliate in Taiwan Strait. *Acta Oceanologica Sinica* ,2000 ,22 (supp) :250 — 260.
- [11] Buskey E J ,Hyatt C J. Effects of the Texas (USA) brown tide alga on planktonic grazers. *Mar Ecol Prog Ser* ,1995 ,126 :285 — 292.
- [12] Kamiyama T. Change in the microzooplankton community during decay of a *Heterosigma akashiwo* bloom. *J Oceanogr* ,1995 ,51 :279 — 287.
- [13] Kamiyama T. Temporal changes in the ciliate assemblage and consecutive estimates of their grazing effect during the course of a *Heterocapsa circularisquama* bloom. *J Plankton Res* ,2005 ,27 (4) :303 — 311.
- [14] Utermöhl H. Zur vervollkommenung der quantitativen phytoplanktonmethodik. *Mitteilungen der Internationalen Vereinigung für Limnologie* ,1958 ,9 :1 — 38.
- [15] Kofoid C A ,Campbell A S. The ciliata :the tintinnina. *Bull. Mus. Comp. Zool* ,1939 ,84 — 473.
- [16] Yin G D. Preliminary study of tintinnids in the Jiaozhou Bay. *Journal of Shandong University* ,1952 ,2 :36 — 56.
- [17] Lei Y L ,Xu K D ,Song W B. Studies on *Strombidium sulcatum* , a harmful ciliate during algae cultivation. *Journal of Fishery Sciences of China* ,1996 ,3 (4) :39 — 47.
- [18] Song W B ,Xu K D. Morphological studies on tintinnine ciliates (Ciliophora tintinnina) from the Weddell Sea Antarctica. *Chinese Journal of Polar Research* ,1999 ,11 (1) :34 — 38.
- [19] Xu K D ,Hong H S ,Song W B ,*et al.* Studies on tintinnine ciliates in the Taiwan Strait (Ciliophora tintinnina). *Acta Zootaxonomica Sinica* ,2001 ,26 (4) :454 — 466.
- [20] Yamaji I. Illustrations of the marine plankton of Japan. Hoikusha Publishing Co. Ltd ,1984. 1 — 154.
- [21] Jin D X ,Chen J H ,Huang K G. Marine pelagic diatom in China. Shanghai :Shanghai Science and Technology Press ,1965. 20 — 214.
- [22] Tomas C R. Identifying Marine Phytoplankton. San Diego :Academic Press ,1997.
- [23] Putt M ,Stoecker D K. An experimentally determined carbon : volume ratio for marine oligotrichous ciliates from estuarine and coastal waters. *Limnol Oceanogr* ,1989 ,34 :1097 — 1103.
- [24] Verity P G ,Langdon C. Relationships between lorica volume , carbon , nitrogen and ATP content of tintinnids in Narragansett Bay. *J Plankton Res* ,1984 ,6 :859 — 868.
- [25] Edler L. Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea. Phytoplankton and chlorophyll. *Baltic Marine Biol* ,1979 ,5 :1 — 38.
- [26] Zhou M J ,Yan T ,Zou J Z. Preliminary analysis of the characteristics of red tide areas in Changjiang River estuary and its adjacent sea. *Chinese Journal of Applied Ecology* ,2003 ,14 (7) :1031 — 1038.
- [27] Gifford D J. Laboratory culture of marine planktonic oligotrichs (ciliophora , oligotrichida). *Mar Ecol Prog Ser* ,1995 ,23 :257 — 267.
- [28] Rosetta C H ,McManus G B. Feeding by ciliates on two harmful algal bloom species ,*Prymnesium parvum* and *Prorocentrum minimum*. *Harmful Algae* ,2003 ,2 :109 — 126.
- [29] Huang C J ,Qi S ,Qi Y Z ,*et al.* The position and function of *Noctiluca scintillans* in its ecological community in Dapeng Bay the South China Sea , *Oceanologia ET Limnologia Sinica* ,1997 ,28 (4) :348 — 355.
- [30] Uhlig G ,Sabliag G. Long-term studies on *Noctiluca scintillans* in the German Bight population and red tide phenomena 1968 — 1988. *Netherlands J Sea Res* ,1997 ,25 (1/2) :101 — 112.
- [31] Elbrächter M ,Qi Y Z. Aspects of *Noctiluca* (Dinophyceae) population dynamics. *Physiological Ecology of Harmful Algae Blooms*. New York : Springer ,1998 ,315 — 335.
- [32] Kiorboe T ,Titelman J. Feeding , prey selection and prey encounter mechanisms in the heterotrophic dinoflagellate *Noctiluca scintillans*. *J Plankton Res* ,1998 ,20 :1615 — 1636.
- [33] Strom S L ,Morello T A. Comparative growth rates and yields of ciliates and heterotrophic dinoflagellates. *J Plankton Res* ,1998 ,20 :571 — 584.
- [34] Umani S F ,Beran A ,Parlato S ,*et al.* *Noctiluca scintillans* MACARTNEY in the Northern Adriatic Sea : long-term dynamics , relationships with temperature and eutrophication , and role in the food web. *J Plankton Res* ,2004 ,26 (5) :545 — 561.
- [35] Hansen P J. The red tide dinoflagellate *Alexandrium tamarense* : effects on behaviour and growth of a tintinnid ciliate. *Mar Ecol Prog Ser* ,1989 ,

53 :105 — 116.

[36] Hansen P J ,Cembella A D , Moestrup Ø. The marine dinoflagellate *Alexandrium ostenfeldii* : paralytic shellfish toxin concentration , composition , and toxicity to a tintinnid ciliate. *Journal of Phycology* ,1992 , 28 :597 — 603.

[37] Tilmann U , John U. Toxic effects of *Alexandrium* spp. On heterotrophic dinoflagellates : an allelochemical defence mechanism independent of PSP-toxin content. *Mar Ecol Prog Ser* ,2002 , 230 :47 — 58.

[38] Jennifer C , Strom S. Effects of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae) on protist grazers : laboratory experiments with ciliates and heterotrophic dinoflagellates. *Aquat Microbl Ecol* ,2005 , 39 :121 — 134.

[39] Kamiyama T , Arima S. Lethal effect of the dinoflagellate *Heterocapsa circularisquama* upon the tintinnid ciliate *Favella taraiakensis*. *Mar Ecol Prog Ser* ,1997 , 150 :27 — 33.

[40] Bockstahler K R , Coats D W. Grazing of the mixotrophic dinoflagellate *Gymnodinium sanguineum* on ciliate populations of Chesapeake Bay. *Marine Biology* ,1993 , 116 :477 — 487.

[41] Hansen P J. *Dinophysis* — a planktonic dinoflagellate genus which can act both as prey and a predator of a ciliate. *Mar Ecol Prog Ser* ,1991 , 73 :253 — 261.

[42] Smalley G W , Coats D W. Ecology of the red-tide dinoflagellate *Ceratium furca* : distribution , mixtrophy and grazing impact on ciliate population of Chesapeak Bay. *J Eukaryot Microbial* ,2002 , 49 :63 — 73.

[43] Smalley G W , Coats D W , Adams E J. A new method using fluorescent microspheres to determine grazing on ciliates by the mixotrophic dinoflagellate *Ceratium furca*. *Aquat Microb Ecol* ,1999 , 17 :167 — 179.

[44] Uchida T , Kamiyama T , Matsuyama Y. Predation by a photosynthetic dinoflagellate *Gyrodinium instriatum* on loricated ciliates. *J Plankton Rres* , 1997 , 19 (5) :603 — 608.

[45] Jeong H J , Du Yoo Y Park J Y , *et al.* Feeding by phototrophic red-tide dinoflagellates : five species newly revealed and six species previously known to be mixotrophic. *Aquat Microb Ecol* ,2005 , 40 (2) :133 — 150.

参考文献：

[1] 周名江 , 朱明远 , 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展. *生命科学* ,2001 , 13 (2) :54 ~ 59.

[2] 王丽平 , 颜天 , 谭志军 , 等. 塔玛亚历山大藻和东海原甲藻对褶皱臂尾轮虫种群数量的影响. *应用生态学报* ,2003 , 14 (7) :1151 ~ 1155.

[3] 宋微波. 原生动植物学专论. 青岛 : 青岛海洋大学出版社 ,1999. 1 , 155 ~ 176.

[8] 孙军 , 刘东艳 , 王宗灵 , 等. 春季赤潮频发期东海微型浮游动物摄食研究. *应用生态学报* ,2003 , 14 (7) :1073 ~ 1080.

[9] 孙军 , 宋秀贤 , 殷克东 , 等. 香港水域夏季微型浮游动物摄食研究. *生态学报* ,2003 , 23 (4) :712 ~ 724.

[10] 洪华生 , 柯林 , 黄邦钦 , 等. 台湾海峡纤毛虫的种类组成及其丰度时空分布特征. *海洋学报* ,2000 , 22 (增刊) :250 ~ 260.

[16] 尹光德. 胶州湾砂壳纤毛虫之初步调查. *山东大学学报* ,1952 , 2 :36 ~ 56.

[17] 类彦立 , 徐奎栋 , 宋微波. 单细胞培养中一敌害纤毛虫——具沟急游虫的生态习性及其形态学初探. *中国水产科学* ,1996 , 3 (4) :39 ~ 47.

[18] 宋微波 , 徐奎栋. 南极威德尔海冰层下的砂壳纤毛虫. *极地研究* ,1999 , 11 (1) :34 ~ 38.

[19] 徐奎栋 , 洪华生 , 宋微波 , 等. 台湾海峡的砂壳纤毛虫研究 (纤毛动物门 砂壳亚目). *动物分类学报* ,2001 , 26 (4) :454 ~ 466.

[21] 金德祥 , 陈金环 , 黄凯歌. 中国海洋浮游硅藻类. 上海 : 上海科学技术出版社 ,1965. 20 ~ 214.

[26] 周名江 , 颜天 , 邹景忠. 长江口临近海域赤潮发生区基本特征初探. *应用生态学报* ,2003 , 14 (7) :1031 ~ 1038

[29] 黄长江 , 杞桑 , 齐雨藻 , 等. 南海大鹏湾夜光虫种群在其生态群落中的地位和功能. *海洋与湖沼* ,1997 , 28 (4) :348 ~ 355.