

东海原甲藻 (*Prorocentrum donghaiense*) 和 链状亚历山大藻 (*Alexandrium catenella*) 对模拟食物链物质传递的影响

陈 洋^{1,2} 颜 天^{1,*} 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 100039)

摘要 研究了东海原甲藻的基本营养组成, 并就赤潮密度下的东海原甲藻 (*Prorocentrum donghaiense*) 和链状亚历山大藻 (*Alexandrium catenella*) 在单一和混合情况下对赤潮藻→卤虫模拟食物链物质传递的影响进行了探讨。结果表明: 与其它饵料微藻相比, 东海原甲藻必需氨基酸中的苯丙氨酸、赖氨酸和组氨酸含量明显偏低。东海原甲藻单独投喂时, 卤虫对其的总物质转化效率随着藻密度的增加呈现先逐渐增加再逐渐降低的趋势。而当不同密度的东海原甲藻分别与一种硅藻小新月菱形藻 (*Nitzschia closterium*) 混合投喂时, 随东海原甲藻密度的增加, 卤虫选择性地增加对东海原甲藻的摄食, 而降低对小新月菱形藻的摄食, 并且其总物质转化效率逐渐降低。暴露于链状亚历山大藻藻液, 卤虫体重减轻, 且在其体内未检测到叶绿素 a, 表明卤虫未摄食该藻。当链状亚历山大藻藻细胞重悬液和去藻过滤液分别与小新月菱形藻或东海原甲藻混合时, 卤虫对后两株藻的摄食量和总物质转化效率均有所降低。因此, 在大规模赤潮发生时, 东海原甲藻和链状亚历山大藻可能分别对浮游动物的营养和存活带来不利影响, 并影响物质沿食物链的传递。

关键词 有害赤潮 (Harmful Algal Blooms HABs); 东海原甲藻; 链状亚历山大藻; 卤虫; 总物质转化效率; 营养组成

文章编号: 1000-0933 (2007) 10-3964-09 中图分类号: Q148 Q178.53 X55 文献标识码: A

The effects of *Prorocentrum donghaiense* and *Alexandrium catenella* on the material transfer in a simulated marine food chain

CHEN Yang^{1,2}, YAN Tian^{1,*}, ZHOU Ming-Jiang¹

¹ Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (10) 3964 ~ 3972.

Abstract : The biochemical composition (C, N elements, fat, carbohydrate, ash and amino acids) of *Prorocentrum donghaiense* was analyzed and the effects of *P. donghaiense* and *Alexandrium catenella* on the transport of materials through a simulated marine food chain (algae → *Artemia salina*) were investigated. The results showed that the content of phenylalanine, histidine and lysine in *P. donghaiense* was obviously lower than in other dietary microalgae. Fed with *P. donghaiense* solely, the gross conversion efficiencies (GCEs) of *A. salina* increased gradually when the algal densities were lower than 4×10^4 cells/mL, and decreased gradually at higher densities. When fed with the mixture of *P. donghaiense* and

基金项目: 中国科学院知识创新资助项目 (KZCX2-YW-208); 国家重点基础研究规划资助项目 (2001CB409709)

收稿日期: 2006-08-30; 修订日期: 2007-03-28

作者简介: 陈洋 (1979 ~), 女, 吉林松原人, 博士生, 主要从事海洋生态毒理学研究. E-mail: chenyang@ms.qdio.ac.cn

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

Foundation item : This work was financially supported by Innovation Project of Chinese Academy of Sciences (No. KZCX2-YW-208); National Basic Research Priorities Programme (No. 2001CB409709)

Received date 2006-08-30; **Accepted date** 2007-03-28

Biography : CHEN Yang, Ph. D. candidate, mainly engaged in marine ecotoxicology. E-mail: chenyang@ms.qdio.ac.cn

the diatom *Nitzschia closterium* , *A. salina* preferred grazing on *P. donghaiense* to *N. closterium* , and the GCEs of *A. salina* decreased with the increasing density of *P. donghaiense*. When exposed to *A. catenella* at the densities of $10 - 10^3$ cells/mL , *A. salina* lost weight with no *Chlorophyll a* detected in their guts , which indicated that *A. salina* didn't ingest the algal cells. When the re-suspended cells and cell-free medium of *A. catenella* were mixed with *N. closterium* or *P. donghaiense* respectively , the grazing and GCEs of *A. salina* were all diminished. Consequently , based on the results from this simple food chain model , we propose that the large-scale blooms of *P. donghaiense* and *A. catenella* in the East China Sea could adversely affect zooplankton due to insufficient food or nutrition , and therefore impact the materials transfer efficiency through the food chain.

Key Words : Harmful Algal Blooms (HABs) ; *Prorocentrum donghaiense* ; *Alexandrium catenella* ; *Artemia salina* ; gross conversion efficiency ; biochemical composition

有害赤潮 (harmful algal blooms HABs) 的频繁爆发对自然海洋生态系统产生了显著的不利影响^[1~3]。东海是我国重要的渔业和海产品资源地 , 同时也是赤潮的高发区^[4] , 特别是近几年来 , 在东海长江口、舟山附近海域连续在春夏之交爆发面积达到几千平方公里的原甲藻 (*Prorocentrum donghaiense*) 赤潮 , 持续长达一个月。2002 年 5 月海上调查中在某些海域还发现了与原甲藻 (最高密度 10^7 cells/L) 同时形成赤潮的链状亚历山大藻 (*Alexandrium catenella*) , 最高密度可达 10^5 cells/L^[5]。已有研究表明东海有害赤潮藻对浮游动物的存活和繁殖、贝类受精卵的孵化及其浮游幼体的活力等有明显的不利影响^[6,10] , 但这种长时间、大规模的赤潮对海洋生态系统结构和功能的影响还不清楚。海洋生态系统最重要的功能是物质循环和能量传递 , 而浮游植物→浮游动物这一环节是物质和能量沿食物链传递的初始环节 , 也是最重要环节^[7] , 所以了解有害赤潮对海洋浮游食物链物质传递效率的影响对于阐明整个海洋生态系统的功能可能受到的影响具有重要帮助。

微藻是许多海洋生物及其幼体的优良饵料 , 依赖藻类的海洋生物能否成功地生长发育很大程度上取决于微藻细胞内各生化组分的比例和可利用性^[8]。特别是一些特殊组分 , 如氨基酸和脂肪酸等的质和量会直接影响到海洋生物幼体的生长、发育和存活^[9]。

因此 , 本文以东海原甲藻 (*P. donghaiense*) 和链状亚历山大藻 (*A. catenella*) 为研究对象 , 对东海原甲藻的基本营养组成进行了初步分析 , 同时 , 在实验室内初步研究了赤潮密度下的东海原甲藻和链状亚历山大藻在单独、混合及分别与小新月菱形藻 (*Nitzschia closterium*) 混合的情况下 , 对“藻-浮游动物-卤虫”食物链物质传递的影响。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

链状亚历山大藻 (*A. catenella*) 和东海原甲藻 (*P. donghaiense*) 分离自中国东海长江口海域 (由赤潮 973 项目子课题承担单位暨南大学提供) , 以 f/2-Si 培养液单种培养。硅藻小新月菱形藻 (*N. closterium*) 系实验室常年连续培养种 , 以 f/2 培养液单种培养 , 以上 3 株藻的培养温度为 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, 光照 $54\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 光暗比 14L:10D , 均选取指数生长中期的藻液 (密度分别约为 1×10^4 cells/ml、 1×10^5 cells/ml 和 $3 \sim 4 \times 10^6$ cells/ml) 用于实验 ; 实验用卤虫 (*Artemia salina*) 为低温保藏的卤虫卵经海水孵化 3 ~ 4d 的无节幼体 , 卤虫卵产自青海尕斯库勒湖。海水取自青岛胶州湾外太平角无污染海水 , 使用前经沉淀砂滤 $0.45\mu\text{m}$ 混合纤维滤膜抽滤后高温消毒 , 用 ATAGO (S/Mill-E 型) 手提式盐度计测定盐度。

1.2 实验方法

1.2.1 藻细胞数量与干重关系的测定

配制一系列不同细胞密度的链状亚历山大藻和东海原甲藻藻液 , 准确计数后 , 将藻液分别抽滤到已烘为

① 王丽平. 有害赤潮藻对海湾扇贝 (*Argopecten irradians*) 早期发育和褶皱臂尾轮虫 (*Branchionus plicatilis*) 种群数量的影响. 中国科学院海洋研究所博士学位论文 , 2004.

恒重的 GF/C 滤膜上 80℃烘至恒重后称重 ,经回归分析得藻数量与干重的关系 ,在小新月菱形藻干重测定中 ,采用 GF/F 滤膜过滤 ,其它操作同上。

1.2.2 东海原甲藻的基本营养成分分析

取指数生长中期的东海原甲藻 (密度约为 1.2×10^5 cells/ml)藻液 ,经 3000r/min 离心 20min 收集藻细胞 ,并于 60℃烘箱中烘至恒重后分析。基本营养成分 (包括 C、N 元素、蛋白质、脂肪、糖、灰分和氨基酸)的测定参照文献 [10]的方法进行。

1.2.3 卤虫摄食和转化效率实验

实验在黑暗、充气条件下进行约 15h ,实验温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,实验容器为 1000ml 烧杯 ,内装实验液 800ml ,每个烧杯中加入孵化 3 ~ 4d 的卤虫无节幼体 4000 ~ 6000 尾 ,每个实验组 3 个平行 ,链状亚历山大藻经 10μm 筛绢过滤得藻细胞和去藻过滤液 ,藻细胞用消毒海水重新悬浮得藻细胞重悬液用于实验。除了东海原甲藻和链状亚历山大藻混合实验中以投喂东海原甲藻 (4×10^4 cell/ml)的实验组作为对照外 ,其它所有实验均以投喂小新月菱形藻 (100×10^4 cell/ml)的实验组作为对照。

(1) 卤虫摄食实验

在实验前后分别取 100 尾卤虫 ,用蒸馏水冲洗干净后过滤于玻璃纤维滤膜 GF/C 上 ,样品中叶绿素 a 的测定和计算参照《海洋监测规范》[11]。

(2) 转化效率实验

实验开始时取一定数量的卤虫幼体 (4000 ~ 6000 尾) ,用筛绢收集于 7ml 离心管中 ,60℃烘箱中烘至恒重后称取干重 ,得实验起始时每尾卤虫的平均重量 ,另取等量卤虫幼体放入各烧杯中 ,实验结束时计各烧杯中卤虫个体数 ,并用筛绢收集称取干重 ,得实验结束时每尾卤虫的平均重量。实验前后取样 ,准确计数藻密度 ,得实验前后藻密度值 ,其差值作为卤虫摄食的藻量。根据公式 (1) 计算各实验组卤虫的总物质转化效率 :

总物质转化效率 = 卤虫干重的增加量/卤虫摄食的藻的干重

(1)

2 实验结果

2.1 藻细胞数量与干重的关系

链状亚历山大藻、东海原甲藻和小新月菱形藻藻细胞数量与干重的相关关系及单细胞干重如表 1 所示 3 株藻的藻细胞干重均与藻细胞数量呈线性相关 ,由回归方程计算得出 3 株藻藻细胞干重分别为 2000、600、30 pg/cell。

表 1 藻细胞数量与干重的关系

Table 1 The relationships between algal number and its dry weight			
藻 Algae	藻细胞数量与干重关系 Regression equation		藻干重 Dry weight (pg/cell)
链状亚历山大藻 <i>A. catenella</i>	$Y = 0.002x + 0.0317$	$R^2 = 0.9808$	2000
东海原甲藻 <i>P. donghaiense</i>	$Y = 0.0006x - 0.0626$	$R^2 = 0.9685$	600
小新月菱形藻 <i>N. closterium</i>	$Y = 0.00003 + 0.3606$	$R^2 = 0.8719$	30

2.2 东海原甲藻的基本营养成分

东海原甲藻的基本营养成分如表 2 所示 :东海原甲藻的 C、N 元素含量分别为藻干重的 34.42% 和 6.23% ,其它各生化组分的含量由高到低为蛋白质 (38.95%)、糖 (33.78%)、灰分 (19.38%)和粗脂肪 (7.89%) ,与其它饵料微藻相比 ,各组分的含量均处于正常水平。

东海原甲藻的氨基酸组成和含量如表 3 所示 ,结果显示 :东海原甲藻氨基酸总量占藻干重的 31.65% ,其中必需氨基酸为 15.75% ,非必需氨基酸为 15.9% 。与其它微藻 (如小球藻、三角褐指藻、亚心形扁藻等)相比 ,东海原甲藻的氨基酸总量处于正常水平 ,但必需氨基酸中的苯丙氨酸、赖氨酸和组氨酸含量偏低 ,分别仅为藻干重的 1.5%、1.74% 和 0.34% ,这 3 种氨基酸构成了东海原甲藻的限制性营养成分。

表 2 东海原甲藻与其它饵料微藻基本营养组成的比较

Table 2 Principal biochemical composition of <i>P. donghaiense</i> (%) and comparison with other microalgae		
生化组成 Biochemical composition	东海原甲藻 (干重%) <i>P. donghaiense</i> (Dry weight %)	其它饵料微藻 (干重%) ^[12, 13] Other microalgae (Dry weight %)
碳 Carbon	34.42	17 ~ 69
氮 Nitrogen	6.23	3.5 ~ 11
蛋白质 Protein	38.95	22 ~ 70
粗脂肪 Crude fat	7.89	2.1 ~ 10
总糖 Total carbohydrate	33.78	16 ~ 44
灰分 Ash	19.38	7.5 ~ 49

表 3 东海原甲藻的氨基酸组成及含量

Table 3 Amino acid composition and content of <i>P. donghaiense</i> (%)		
氨基酸组成 Amino acid composition	东海原甲藻 (干重%) <i>P. donghaiense</i> (Dry weight %)	其它饵料微藻 (干重%) ^[12, 13] Other microalgae (Dry weight %)
必需氨基酸 essential amino acid		
亮氨酸 Leu	2.89	1.86 ~ 5.46
精氨酸 Arg	2.79	1.23 ~ 3.23
缬氨酸 Val	1.94	2.10 ~ 5.11
赖氨酸 Lys	1.74	1.62 ~ 4.17
苯丙氨酸 Phe	1.5	1.87 ~ 3.49
苏氨酸 Thr	1.43	1.26 ~ 2.94
异亮氨酸 Ile	1.34	1.44 ~ 3.89
蛋氨酸 Met	1.03	0.09 ~ 0.77
组氨酸 His	0.34	0.38 ~ 0.86
非必需氨基酸 non-essential amino acid		
谷氨酸 Glu	4.10	3.51 ~ 9.74
天门冬氨酸 Asp	3.16	2.46 ~ 6.09
丙氨酸 Ala	2.67	1.60 ~ 4.94
甘氨酸 Gly	2.13	1.80 ~ 3.34
丝氨酸 Ser	1.46	1.16 ~ 2.83
脯氨酸 Pro	1.31	0 ~ 4.86
酪氨酸 Tyr	1.07	0.24 ~ 3.06
胱氨酸 Cys	0.71	0 ~ 0.33
总量	31.65	27.0 ~ 59.90

2.3 卤虫对东海原甲藻的总物质转化效率

2.3.1 卤虫对东海原甲藻单种的总物质转化效率

卤虫对东海原甲藻和小新月菱形藻的总物质转化效率如图 1 所示 :当东海原甲藻和小新月菱形藻密度分别低于 4×10^4 cells/ml 和 1.75×10^6 cells/ml 时 ,卤虫的总物质转化效率随藻密度的增加逐渐增加 ,藻密度继续增加 ,卤虫的总物质转化效率有逐渐下降的趋势。

2.3.2 东海原甲藻与小新月菱形藻混合时卤虫的摄食和总物质转化效率

不同密度的东海原甲藻与小新月菱形藻混合时卤虫的摄食结果如图 2A 所示 :随着各混合实验组中东海原甲藻密度的增加 ,卤虫对东海原甲藻的摄食量逐渐增加 ,对小新月菱形藻的摄食量逐渐降低 ,这表明 :卤虫会选择性地增加对东海原甲藻的摄食。

不同密度的东海原甲藻与小新月菱形藻混合时卤虫的总物质转化效率如图 2B 所示 :各混合实验组 ,随着东海原甲藻密度的增加 ,卤虫的总物质转化效率逐渐降低 ,且当东海原甲藻密度达到 6×10^4 cells/ml 时

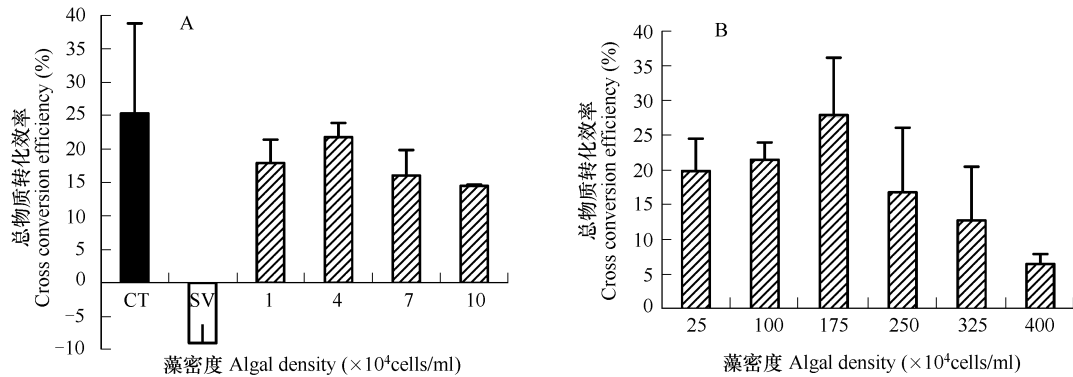


图1 卤虫对东海原甲藻 (A) 和小新月菱形藻 (B) 的总物质转化效率

Fig. 1 Gross conversion efficiency in dry weight from *P. donghaiense* (A) or *N. closterium* (B) to *A. salina*
CT 对照 Control ;SV 饥饿 Starvation

(Mix3), 卤虫的总物质转化效率明显低于只投喂小新月菱形藻的对照组 ($P < 0.05$), 当东海原甲藻密度达到 9×10^4 cells/ml (Mix4) 时, 卤虫的总物质转化效率与只投喂小新月菱形藻或东海原甲藻的对照组均有显著差异 ($P < 0.05$) 这说明: 虽然赤潮发生时浮游植物的生物量增加, 但传递到下一营养级生物的物质质量并不一定增加, 反而有可能降低。

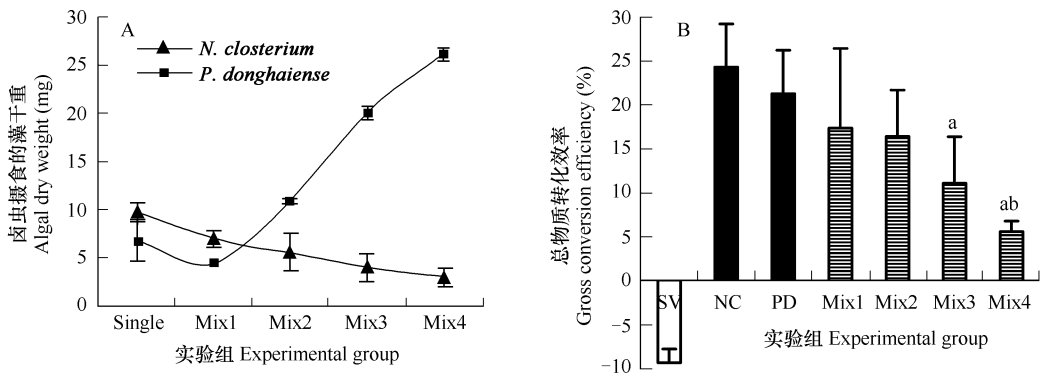


图2 各实验组卤虫的摄食量 (干重) 和总物质转化效率

Fig. 2 The dry weight grazed by *A. salina* (A) and its gross conversion efficiency in the mixture of *P. donghaiense* and *N. closterium* (B) in each experimental group

a : 与小新月菱形藻 (NC) 单种实验组有显著差异 $P < 0.05$; b : 与东海原甲藻 (PD) 单种实验组有显著差异 $P < 0.05$; a : significantly different from NC control ; b : significantly different from PD control ;

单种 Single : *N. closterium* (NC, 100×10^4 cells/ml) ; *P. donghaiense* (PD, 4×10^4 cells/ml) ;
Mix1, Mix2, Mix3, Mix4 小新月菱形藻 (100×10^4 cells/ml) 分别与 1×10^4 , 3×10^4 , 6×10^4 , 9×10^4 cells/ml 的东海原甲藻混合 *N. closterium* at the density of 100×10^4 cells/ml mixed with *P. donghaiense* at the density of 1×10^4 , 3×10^4 , 6×10^4 and 9×10^4 cells/ml respectively

2.4 链状亚历山大藻对卤虫总物质转化效率的影响

2.4.1 链状亚历山大藻对卤虫摄食和总物质转化效率的影响

如图 3A 所示: 15h 摄食实验后, 对照组卤虫体内叶绿素 a 含量约为 0.15mg/mg (干重), 而饥饿组和链状亚历山大藻各密度组卤虫体内均未检测到叶绿素 a, 与对照组有显著差异 ($P < 0.05$), 这表明卤虫未摄食链状亚历山大藻。

以各实验组实验前后卤虫体重的变化率对链状亚历山大藻藻密度作图, 结果如图 3B 所示: 链状亚历山大藻各密度组卤虫体重均降低, 与饥饿组类似 ($P > 0.05$), 与对照组有显著差异 ($P < 0.05$), 这也进一步说明

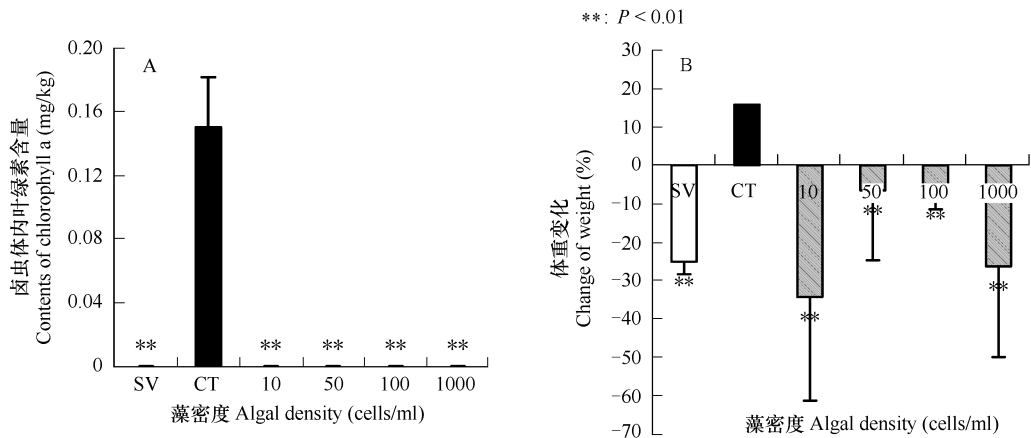


图 3 卤虫对链状亚历山大藻的摄食和总物质转化效率
Fig. 3 Grazing and gross conversion efficiency of *A. salina* on *A. catenella*
CT 对照 Control ; SV 饥饿 Starvation

卤虫未摄食链状亚历山大藻。实验虽然只进行 15h ,但仍发现各实验组卤虫有部分死亡 ,表明链状亚历山大藻在短期内就对卤虫有致死作用。因此 ,链状亚历山大藻一方面直接导致生物死亡 ,另一方面影响生物的摄食 ,这均导致物质无法沿食物链传递。

2. 4. 2 链状亚历山大藻对于卤虫对小新月菱形藻和东海原甲藻总物质转化效率的影响

当链状亚历山大藻藻细胞重悬液和去藻过滤液分别与 小新月菱形藻混合时 ,各实验组卤虫摄食后体内叶绿素 a 含量如图 4A 所示 :小新月菱形藻与链状亚历山大藻藻细胞重悬液混合各实验组 (RC) ,随链状亚历山大藻藻细胞密度的增加 ,卤虫体内叶绿素 a 含量逐渐降低 ,当藻细胞密度为 100cells/ml 时 ,卤虫体内叶绿素 a 含量已明显低于对照组 ($P < 0.05$) ;小新月菱形藻与链状亚历山大藻去藻过滤液混合的各实验组 (M)中 ,卤虫体内叶绿素 a 含量均明显低于对照组 ($P < 0.05$) ,这表明 :链状亚历山大藻重悬藻细胞和去藻过滤液均影响了卤虫对小新月菱形藻的摄食。各实验组中卤虫对小新月菱形藻的总物质转化效率结果如图 4B 所示 :当

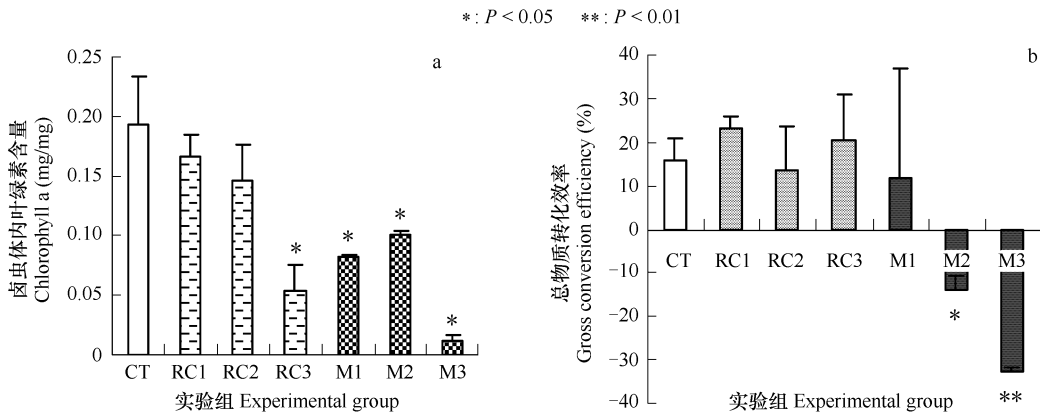


图 4 链状亚历山大藻重悬藻细胞和去藻过滤液对于卤虫对小新月菱形藻摄食和总物质转化效率的影响

Fig. 4 Effects of re-suspended cells and cell-free medium of *A. catenella* on feeding and gross conversion efficiency of *A. salina* on *N. closterium*
对照 Control (CT) :小新月菱形藻 *N. closterium* (100×10^4 cells/ml) ; RC1 , RC2 , RC3 :小新月菱形藻 (100×10^4 cells/ml) 分别与 1cells/ml , 10cells/ml 和 100cells/ml 的链状亚历山大藻藻细胞重悬液混合 *N. closterium* at the density of 100×10^4 cells/ml mixed with re-suspended cells of *A. catenella* at the density of 1 , 10 and 100 cells/ml respectively ; M1 , M2 , M3 :小新月菱形藻 (100×10^4 cells/ml) 分别与 1ml , 10ml , 100ml (0.12% , 1.2% , 12.5%) 链状亚历山大藻去藻过滤液混合 *N. closterium* at the density of 100×10^4 cells/ml mixed with 1 , 10 and 100 milliliter cell-free medium of *A. catenella* respectively

链状亚历山大藻藻细胞重悬液与小新月菱形藻混合时, 卤虫的总物质转化效率与对照组无显著差异 ($P > 0.05$); 而当去藻过滤液与小新月菱形藻混合时, 10ml (1.2%) 去藻过滤液就导致卤虫的总物质转化效率明显降低, 与对照组差异显著 ($P < 0.05$), 去藻过滤液体积继续增加, 这种影响更加显著。

链状亚历山大藻藻细胞重悬液和去藻过滤液分别对于卤虫对东海原甲藻摄食的影响结果如图 5A 所示: 15h 摄食实验后, 各实验组卤虫体内叶绿素 a 含量均与对照组无显著差异 ($P > 0.05$), 这表明链状亚历山大藻的重悬藻细胞和去藻过滤液在实验密度和体积下均未影响卤虫对东海原甲藻的摄食。各混合实验组中卤虫对东海原甲藻的总物质转化效率结果如图 5B 所示, 随着重悬藻细胞密度的增加或去藻过滤液体积的增加, 各混合实验组中卤虫的总物质转化效率均有逐渐降低的趋势, 虽然与对照组无显著差异 ($P > 0.05$)。

以上结果表明, 链状亚历山大藻赤潮的发生, 将会影响到下一营养级生物的存活及对藻的利用效率。

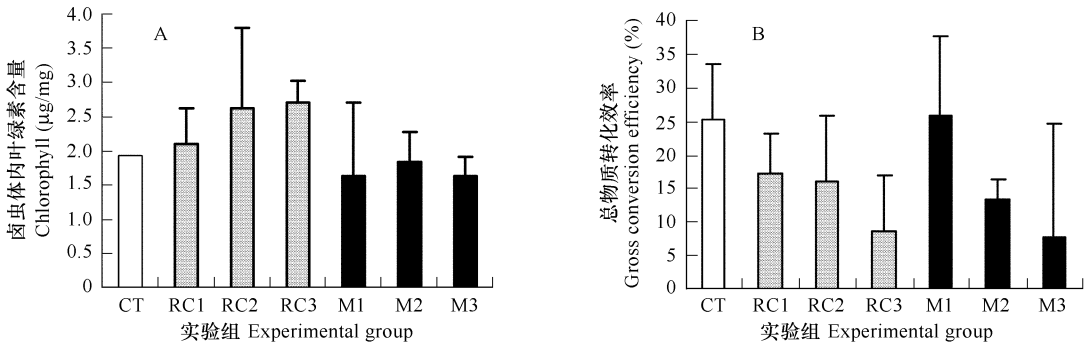


图 5 链状亚历山大藻藻细胞重悬液和去藻过滤液对于卤虫对东海原甲藻摄食和总物质转化效率的影响

Fig. 5 The effects of re-suspended cells and cell-free medium of *A. catenella* on feeding and gross conversion efficiency of *A. salina* on *P. donghaiense*

对照 Control (CT): *P. donghaiense* (4×10^4 cells/ml); RC1, RC2, RC3: 东海原甲藻 (4×10^4 cells/ml) 分别与 1cells/ml, 10cells/ml 和 100cells/ml 的链状亚历山大藻藻细胞重悬液 (re-suspended cells, RC) 混合 *P. donghaiense* at the density of 4×10^4 cells/ml mixed with re-suspended cells of *A. catenella* at the density of 1cells/ml, 10cells/ml and 100cells/ml respectively; M1, M2, M3: 东海原甲藻 (4×10^4 cells/ml) 分别与 1ml, 10ml, 100ml (0.12%, 1.2%, 12.5%) 链状亚历山大藻去藻过滤液 (cell-free medium M) 混合 (*P. donghaiense* at the density of 4×10^4 cells/ml mixed with 1, 10 and 100 milliliter cell-free medium of *A. catenella* respectively)

3 讨论

3.1 东海原甲藻的营养缺失对浮游生态系统的影响

已有研究证明, 饵料中必需氨基酸要按某特定生物中的比例存在, 饵料中不足的成分将形成营养的限制因素, 造成生物体内蛋白质合成减少, 出现蛋白质缺乏症, 影响生物成体的生命活动和幼体的生长发育^[13]。如: 三角褐指藻 (*Phaeodactylum tricornutum*) 由于缺乏足够比例的蛋氨酸、赖氨酸和精氨酸, 不能单独维持对虾幼体的生长和变态发育^[14]; 盐藻 (*Dunaliella salina*) 由于缺乏蛋氨酸, 单独投喂不能维持对虾幼体的存活^[14]; 淡水种钝顶螺旋藻 (*Spirulina platensis*) 的赖氨酸、苯丙氨酸和组氨酸含量较低, 单独作为饵料时, 不能满足牡蛎幼体对蛋白质的需求, 影响其生长发育^[15]。由于东海原甲藻必需氨基酸中的苯丙氨酸、赖氨酸和组氨酸含量偏低, 因此, 当长时间、大规模的东海原甲藻赤潮发生时, 东海原甲藻成为绝对优势种, 这些氨基酸的缺乏有可能对下一营养级生物的生命活动造成影响, 本研究中发现的东海原甲藻密度较高时, 卤虫物质转化效率的降低可能与此有关。另外有研究证明, 饵料微藻中脂肪酸, 尤其是多不饱和脂肪酸的量和组成会直接影响到生物幼体的生长、发育、变态和存活^[9], 例如: 由于金藻 (*Isochrysis galbana*) 的必需脂肪酸中的二十碳五烯酸 (20:5n-3) 和二十二碳六烯酸 (22:6n-3) 含量偏低, 以它为饵料的牡蛎幼体生长缓慢^[16]; 硅藻 (*Nitzschia laevis*) 由于二十碳五烯酸 (20:5n-3) 含量偏低, 长期单独作为饵料不能维持鲍鱼 (*Haliotis discus hannai*) 的存活^[17]。因此, 对于东海原甲藻的脂肪酸组成和含量分析及其对下一营养级生物可能造成的影响有待于进一步研究。

3.2 东海大规模赤潮对模拟浮游食物链物质传递效率的影响途径

本研究中发现的东海原甲藻密度较高时 ($>4 \times 10^4$ cells/ml), 卤虫的总物质转化效率下降可能有两方面原因:一方面,藻密度超过一定值以后, 卤虫对藻的摄食或同化效率可能降低^[18], 以往有关浮游动物摄食的研究发现, 浮游动物对单胞藻的摄食率随藻密度的增加逐渐增加, 在一定藻密度下达到饱和, 藻密度继续增加, 浮游动物的摄食率趋于稳定或逐渐降低^[19], 还有研究发现:当藻密度过高时, 虽然卤虫仍可能摄食大量的藻细胞, 但并不能充分的消化利用, 很大一部分藻细胞未被消化而以假粪的形式被排出体外, 即卤虫的同化效率可能降低^[20];另一方面, 高密度的藻液还可能影响卤虫物质和能量消耗的各个环节, 如运动、呼吸、排泄和繁殖等^[20~22], 这些影响可能使得生物物质和能量的消耗增加, 从而导致卤虫的总物质转化效率降低。本实验中卤虫物质转化效率降低的具体途径有待于进一步研究。

本实验还发现, 链状亚历山大藻本身不能被卤虫摄食利用, 同时, 链状亚历山大藻重悬藻细胞和去藻过滤液对于卤虫对其它藻的摄食和总物质转化效率均有不利影响, 这表明:卤虫所受的影响除了与藻细胞内的麻痹性贝毒毒素 PSP (Paralytic Shellfish Poisoning) 有关外, 还可能与藻细胞分泌到水体中的一些其它有害物质有关, 这有待于进一步的实验研究。已有文献报道:亚历山大藻产生的一些胞外分泌物对海洋生物有明显的不良影响^[23~24], 如 Lush 发现一株微小亚历山大藻 (*A. minutum*) 能分泌一种有毒物质对卤虫有十分明显的毒害作用^[23], Ogata 发现一株亚历山大藻 (*A. spp.*) 分泌的毒害物质对鱼类构成巨大威胁^[24], 因此, 对于东海的链状亚历山大藻产生的除 PSP 毒素外的未知毒性物质的影响也应予以高度重视。通过以上多种方式, 东海大规模原甲藻和亚历山大藻赤潮的发生对海洋浮游生态系统的重要功能——物质传递产生影响, 通过食物链的传递作用有可能使整个海洋生态系统的功能受到影响。

3.3 研究展望

本文主要研究了东海原甲藻和链状亚历山大藻对卤虫总物质转化效率的影响, 但对于各种不同物质如碳、氮等及能量沿这一模拟浮游食物链的传递可能受到的影响有待于进一步的实验研究。同时, 本实验以卤虫为实验生物, 因为卤虫可以直接滤食和接触有害藻, 且卤虫卵可以方便地在实验室内进行孵化而得到大量的均匀个体, 它是一种良好的有害赤潮藻毒性研究生物, 该方法已成功地应用于亚历山大藻和原甲藻等毒性的研究中^[25, 26], 而且这种方法简便易行, 具有经济、快速等优点。但是, 由于不同生物之间形态结构、生理机制、代谢途径和敏感性等的差异, 东海原甲藻和链状亚历山大藻对其它海洋生物的影响可能与对卤虫的影响存在差异, 所以在今后的研究中还可以选取自然海洋生态系统中的生物进行比较研究, 以使研究结果更具有现实意义和指导意义。另外, 本实验中发现, 转化效率实验结果误差较大, 且有一定的波动, 这可能与藻的生长、藻密度的计数误差以及实验生物的发育不完全同步等有关, 相关研究也存在类似的现象^[27], 这些不足均有待于在今后的研究中进一步改进。

3.4 结论

总之, 东海大规模赤潮发生时, 东海原甲藻能对物质沿食物链的传递效率产生不利影响, 并可能由于作为单一的食物来源, 对浮游动物等下一营养级生物提供的营养不够全面而造成影响, 链状亚历山大藻由于其产生的毒素或其它毒害物质, 会影响浮游动物的存活或摄食, 由此, 东海大规模赤潮对该海域浮游食物链的结构和功能产生不利影响, 进而通过食物链的传递可能影响整个海洋生态系统的结构和功能。

References :

[1] Smayda T. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea : evidence for a global epidemic. *Toxic Marine Phytoplankton*, 1990, 29 — 40.
[2] Burkholder J M. Implications of harmful microalgae and heterotrophic dinoflagellates in management of sustainable marine fisheries. *Ecological Applications*, 1998, 8 : S37 — S62.
[3] Landsberg J H. The effects of harmful algal blooms on aquatic organisms. *Reviews in Fisheries Science*, 2002, 10 (2) : 113 — 390.
[4] Gao Y H, Yu Q B, Qi Y Z. Species composition and ecological distribution of planktonic diatoms in the Changjiang River estuary in spring. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (7) : 1044 — 1048.
[5] 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.

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

[7] Wang R ,Fan C L. Copepods feeding activities and its contribution to downwards vertical flux of carbon in the East China Sea. Oceanologia et Limnologia Sinica ,1997 ,28 (6) :579 — 587.

[8] Brown M R. The amino acids and sugar composition of 16 microalgae used in mariculture. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology ,1991 ,145 :79 — 99.

[9] Zhang X K ,Mai K S ,Guo J ,*et al.* Fatty acid composition of 14 strains of marine microalgae. Journal of Ocean University of Qingdao ,2001 ,31 (2) :205 — 210.

[10] Huang W K ,Tang Y Z ,Huang H C ,*et al.* Test and analysis of food. Bingjing :China Light Industry Press ,1993.

[11] The specification for marine monitoring. Part 7 :Ecological survey of offshore pollution and biological monitoring. In :Standards Collection of China. Beijing :Standards Press of China ,1998. 490 — 492.

[12] Cao J X ,Li D S ,Wang J Q. Studies on biochemical composition of 10 species of common freshwater phytoplankton. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyarseni ,1997 ,36 (2) ,22 — 27.

[13] Cao S L ,Xiang B Q. Comparision of protein contents and amino acid compositions of eight marine algae. Acta Oceanologica Sinica ,1993 ,15 (4) :98 — 103.

[14] Cao S L ,Xiang B Q ,Fang H. Evaluation of some phytoplankton as food for zoea of *Penaeus orientalis*. Marine Science Bulletin ,1990 ,9 (3) :55 — 62.

[15] Wang D Z ,Zhu Y F ,Li S J ,*et al.* Studies on protein content and amino acid composition of seven microalgae. Journal of Oceanography in Taiwan Strait ,1999 ,18 (3) :297 — 302.

[16] Enright C T ,Newkirk G F ,Craigie J S ,*et al.* Evaluation of phytoplankton as diets for juvenile *Ostrea edulis* L. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology ,1986 ,96 (1) :1 — 13.

[17] Gordon N ,Neori A ,Shpigel M ,*et al.* Effect of diatom diets on growth and survival of the abalone *Haliotis discus hannai* postlarvae. Aquaculture ,2006 ,252 :225 — 233.

[18] Lars-ove L ,Rutger R. Production and energy budget in marine suspension feeding populations :*Mytilus edulis* ,*Cerastoderma edule* ,*Mya arenaria* and *Amphiura filiformis*. Journal of Sea Research ,1996 ,35 (1-3) :199 — 207.

[19] Paffenhofer G A. Food ingestion by the marine planktonic copepod *Paracalanus* in relation to abundance and size distribution of food. Marine Biology ,1984 ,80 :323 — 333.

[20] Kiørboe T ,M hlenberg F ,Hamburger K. Bioenergetics of the planktonic copepod *Acartia tonsa* :relation between feeding ,egg production and respiration ,and composition of specific dynamic action. Marine Ecology Progress Series ,1985 ,26 :85 — 97.

[21] Koski M ,Rosenberg M ,Viitasalo M ,*et al.* Is *Prymnesium patelliferum* toxic for copepods ?Grazing ,egg production ,and egestion of the calanoid copepod *Eurytemora affinis* in mixtures of "good " and "bad " food. Journal of Marine Sciences ,1999 ,56 :131 — 139.

[22] Nejstgaard J C ,Solberg P T. Repression of copepod feeding and fecundity by the toxic haptophyte *Prymnesium patelliferum*. Sarsia ,1996 ,81 :339 — 344.

[23] Lush G J ,Hallegraeff G M. High toxicity of the red tide dinoflagellate *Alexandrium minutum* to the brine shrimp *Artemia Salina*. In :Yasumoto T ,Oshima Y ,Fukuyo Y ,eds. Proceedings of Seventh International Conference on Toxic Phytoplankton. Sendai :UNESCO ,1996. 389 — 392.

[24] Ogata T ,Kodama M. Ichthyotoxicity found in cultured media of *Protogonyaulax* spp. Mar. Bio. ,1996 ,92 :31 — 34.

[25] Simonsen S ,Moller B L ,Larsen J ,*et al.* Haemolytic activity of *Alexandrium tamarense*. In :Lassus P. Ed. Harmful Marine Algal Blooms. New York :Lavoisier ,1995. 513 — 517.

[26] Demaret A ,Sohet K ,Houvenaghel G. Effects of toxic dinoflagellates on the feeding and mortality of *Artemia franciscana* larvae. In :Lassus P ed. Proceedings of Sixth International Conference on Toxic Phytoplankton. Lavoisier :Intercept Ltd ,1995. 427 — 432.

[27] Zhou M J ,Yan T ,Teng W F ,*et al.* Experiments on energy-flux from microalgae to *Artemia salina* L. Acta Ecologica Sinica ,1996 ,16 (2) :221 — 223.

参考文献：

[4] 高亚辉,虞秋波,齐雨藻,等. 长江口附近海域春季浮游硅藻的种类组成和生态分布. 应用生态学报,2003 ,14 (7) :1044 ~ 1048.

[5] 周名江,颜天,邹景忠. 长江口邻近海域赤潮发生基本特征初探. 应用生态学报,2003 ,14 (7) :1031 ~ 1038.

[6] 王丽平,颜天,谭志军,周名江. 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.

[7] 王荣,范春雷. 桡足类摄食研究及其对东海颗粒碳垂直转移的贡献. 海洋与湖沼,1997 ,28 (6) :579 ~ 587.

[9] 张小葵,麦康森,郭健 等. 十四株海洋微藻脂肪酸组成的研究. 青岛海洋大学学报,2001 ,31 (2) :205 ~ 210.

[10] 黄伟坤,唐英章,黄焕昌,等. 食品检验与分析. 北京 :中国轻工业出版社 ,1993.

[11] 海洋监测规范第 7 部分 :近海污染生态调查和生物监测. 见 :中国国家标准. 北京 :中国标准出版社 ,1998. 490 ~ 492.

[12] 曹吉祥,李德尚,王金秋. 10 种淡水常见浮游藻类营养组成的研究. 中山大学学报 (自然科学版) ,1997 ,36 (2) :22 ~ 27.

[13] 曹淑莉,向葆卿. 8 种海洋饵料微藻蛋白质含量及氨基酸组成比例的比较研究. 海洋学报,1993 ,15 (4) :98 ~ 103.

[14] 曹淑莉,向葆卿,房慧. 几种海洋微藻喂养中国对虾 (*Penaeus orientalis*) 蚤状幼体饵料效果的试验研究. 海洋通报,1990 ,9 (3) :55 ~ 62.

[23] 周名江,颜天,滕文法,等. 单胞藻-卤虫能流实验. 生态学报,1996 ,16 (2) :221 ~ 223.