

赤潮水体中胶体物质对赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo*) 和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 生长的影响

赵卫红^{1,*}, 崔 鑫², 王江涛², 季乃云¹, 苗 辉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: 2004 年 2 月 9 ~ 10 日在胶州湾发生的柔弱几内亚藻 (*Guinardia delicatula*) 赤潮期间分别在 3 个典型赤潮站位采集表层水样, 利用过滤 (0.7 μm) 和切向超滤 (1000 Daltons) 分离赤潮暴发水体中的胶体物质, 分析了不同滤液及截留液的有机碳含量, 并将赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo*) 和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 在 < 1000 Daltons 的超滤液及具有不同含量胶体物质 (1000 Daltons ~ 0.7 μm) 的截留液中进行培养。结果发现在发生柔弱几内亚藻赤潮期间水体中的溶解有机碳浓度会增加, 特别是胶体有机碳浓度会成倍增长; 在不同胶体含量海水中培养的赤潮异弯藻的最大生长率 μ_{max} 和最大生物量 B_f 与对照组相比会随着胶体含量的增加而显著增大, 而中肋骨条藻的最大生长率 μ_{max} 和最大生物量 B_f 与对照组相比会随着胶体含量增加而显著降低, 表明柔弱几内亚藻赤潮水体中的胶体物质对赤潮异弯藻的生长起促进作用, 而对中肋骨条藻的生长起抑制作用。这说明柔弱几内亚藻在增殖过程中所产生的胶体物质具有他感作用, 会影响其它微藻的生长, 从而可能对柔弱几内亚藻赤潮的形成起重要作用。

关键词: 柔弱几内亚藻; 赤潮; 胶体; 赤潮异弯藻; 中肋骨条藻

文章编号: 1000-0933 (2009) 02-0573-08 中图分类号: Q142, Q178, X171 文献标识码: A

Effect of colloidal substances in red-tide seawater on the growth of *Heterosigma akashiwo* and *Skeletonema costatum*

ZHAO Wei-Hong^{1,*}, CUI Xin², WANG Jiang-Tao², JI Nai-Yun¹, MIAO Hui¹

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

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

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 0573 ~ 0580.

Abstract: Surface water was sampled at the three red tide stations during the *Guinardia delicatula* bloom in Jiaozhou Bay on February 9th–10th, 2004 and the colloidal substances were separated by filtration (0.7 μm) and cross-flow ultrafiltration (1000 Daltons). The organic carbon in the filtrates and retentates were analyzed respectively. *Heterosigma akashiwo* and *Skeletonema costatum* were cultured in the < 1000 Daltons ultrafiltrate and the retentates with different amount of colloidal substances (1000 Daltons – 0.7 μm). The results show that the dissolved organic carbon concentration is enhanced in the water, especially the colloidal organic carbon is increased severalfold during the *Guinardia delicatula* bloom. Compared with the controls, the maximum growth rate μ_{max} and maximum biomass B_f of the *Heterosigma akashiwo* cultured in the retentates increase markedly with the colloid amount increase, but those of the *Skeletonema costatum* decrease remarkably with the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40106013); 中国科学院知识创新重要方向资助项目 (KZCX2-YW-208-01); 国家“863”资助项目 (2006AA09Z180)

收稿日期: 2007-08-30; 修订日期: 2007-12-06

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

colloid amount increase. It indicates that the colloidal substances in *Guinardia delicatula* bloom water can enhance the growth of *Heterosigma akashiwo* but suppress the growth of *Skeletonema costatum*. This phenomenon implies that *Guinardia delicatula* is able to produce colloid size allelopathic substances during the algal proliferation. These substances could influence other algal growth, which maybe play an important role in the *Guinardia delicatula* bloom formation.

Key Words: *Guinardia delicatula*; bloom; colloid; *Heterosigma akashiwo*; *Skeletonema costatum*

海洋中胶体物质的含量是极其丰富的,主要由无机和有机物质组成,其粒径小,比表面积大,又富含有机官能团,是有机碳、营养盐、痕量金属、痕量有机物和色素的重要载体,并影响着其生物地球化学循环^[1-9]。一些研究表明胶体物质对浮游植物生长具有一定的影响,赵新淮等曾利用大亚湾海水对湛江等鞭藻进行培养实验,结果发现胶体物质对湛江等鞭藻的生长有促进作用^[10]。郑爱榕,陈敏等利用错流超滤技术提取海洋胶体,研究了海洋胶体对小球藻、亚心形扁藻和球等鞭金藻生长的影响,结果表明海洋胶体对微藻的生长有显著的刺激作用^[11]。胶体物质的一个重要来源是生物源,在赤潮暴发期间胶体有机物可以达到初始值的数倍^[12]。2004年2月胶州湾发生柔弱几内亚藻(*Guinardia delicatula*)(原柔弱根管藻 *Rhizosolenia delicatula*)赤潮,该藻属温带近岸种,中国渤海、黄海、东海和南海海域均有记录,该种细胞圆柱形,由数个细胞相连组成链状,无毒,以前未见报道我国北方冬季发生该藻赤潮。本研究在胶州湾柔弱几内亚藻赤潮暴发海区采集了海水,利用过滤和切向超滤技术分离胶体物质,通过室内对胶州湾常见的赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo*)和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)培养实验,研究赤潮暴发海区海水中的胶体物质对不同藻类的生长效应,以此来推测海洋胶体在有害赤潮形成过程中的作用。

1 材料与方法

1.1 水样采集

2004年2月9日和10日,胶州湾发生柔弱几内亚藻赤潮,9日分别在东北部赤潮严重区 A5 站和未发生赤潮的湾中心 C3 站(图1)采集了表层水样,分装于10L 聚乙烯桶中带回实验室做进一步处理。10日赤潮区域有所扩大,除东北部的 A5 和 Y1 站赤潮仍较严重外,湾中心的 C3 站生物量也开始升高,分别采集了这3个站位的表层水,分装于5L 聚乙烯桶中,带回实验室做进一步的处理。

1.2 水样过滤及切向超滤处理

水样采集当天在实验室内用 $\phi 47\text{mm}$ GF/F(Whatman) 滤膜进行过滤,滤膜冷冻保存用于测定叶绿素 a,将100 ml 滤液装入聚乙烯瓶中,放入冰箱 -20°C 冷冻保存用于测定营养盐,约50 ml 装于 450°C 预灼烧过的60ml 玻璃瓶中,加入 $200\mu\text{l}$ 饱和 HgCl_2 溶液,置于 4°C 保存,用于测定预滤液的有机碳。然后将剩余滤液用 Pall Filtron

Corporation 的 UltraslabTM 切向超滤系统进行超滤,UltrasetteTM 超滤膜的标准截留分子量为1000 Daltons。2月9日采集的2个水样,超滤浓缩因子为10,2月10日采集的3个水样超滤浓缩因子为5。样品超滤前超滤系统分别用3次蒸馏水、0.1 mol/L NaOH 溶液和0.1 mol/L HCl 溶液洗涤,在各清洗液之间用3次蒸馏水进行清洗。用约500 ml 预滤液样品对系统进行处理,然后进行样品超滤分离。样品超滤结束后,再用大量3次蒸馏水和 NaOH 溶液清洗超滤系统^[13]。分别取50 ml 超滤液和截留液于 450°C 预灼烧过的60 ml 玻璃瓶中,加入 $200\mu\text{l}$ 饱和 HgCl_2 溶液,置于 4°C 保存,用于测定超滤液和截留液中的有机碳。样品有机碳回收率在70% ~

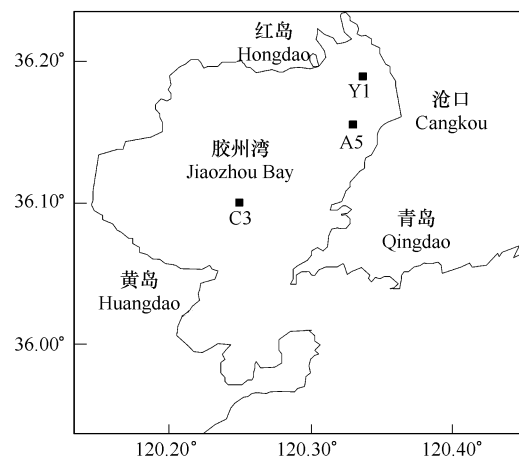


图1 采样站点

Fig.1 Sampling stations

105%,其中2月10日的A5站和Y1站的回收率较低,分别为70%和79%,其它的均在86%以上。

1.3 样品分析方法

营养盐是用Skalar San&plus微量自动分析仪(荷兰)分析, NH_4^+ -N采用次氯酸钠法; NO_3^- -N采用Cd-Cu还原后重氮偶氮法, NO_2^- -N采用重氮偶氮法; PO_4^{3-} -P采用抗坏血酸-磷钼蓝法测定, SiO_3^{2-} 采用硅钼蓝法测定。溶解无机氮(DIN)为 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N之和。溶解有机碳采用高温燃烧氧化法^[14],用TOC-V型总有机碳分析仪(日本岛津)测定。叶绿素a(Chl-a)采用分光光度法测定^[15]。

1.4 赤潮异弯藻和中肋骨条藻的培养实验

水样经过滤和超滤分离后,首先对每个站位的截留液和超滤液按截留液体积比分别为0%,50%,100%比例配制各200ml,分别得到3个含1000 Daltons~0.7 μm 胶体物质梯度的水样。对于每一组培养液按事先测定的营养盐本底值添加N、P、Si营养盐、痕量金属及维生素,其中痕量金属和维生素按f/2配方添加,其它营养盐添加量如表1所示。由于水样体积有限,2月9日采集的2个站点的水样只培养了赤潮异弯藻,2月10日采集的3个站点的水样培养了中肋骨条藻,平行做双样,以超滤液的培养做对照组。赤潮异弯藻和中肋骨条藻种均来自中国科学院海洋研究所海洋生态与环境重点实验室藻种库。

表1 各站位培养液中无机营养盐添加量

Table 1 The added nutrients amount in each culture

| 采样时间 Sample time | 站位 Station | P($\mu\text{mol/L}$) | N($\mu\text{mol/L}$) | Si($\mu\text{mol/L}$) | 痕量金属 Trace metal | 维生素 Vitamin |
|---------------------|---------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------|----------------|
| 2004-02-09 | C3 | +3 | +10 | +30 | f/2 | f/2 |
| 2004-02-09 | A5 | +2 | +0 | +30 | f/2 | f/2 |
| 2004-02-10 | C3 | +3 | +40 | +25 | f/2 | f/2 |
| 2004-02-10 | A5 | +3 | +20 | +30 | f/2 | f/2 |
| 2004-02-10 | Y1 | +3 | +20 | +30 | f/2 | f/2 |

分别将培养至指数生长期的赤潮异弯藻和中肋骨条藻等份加入配制好的上述培养液中,二者体积比为1:100,使赤潮异弯藻和中肋骨条藻的初始细胞密度分别为 $4.5 \times 10^6/\text{L}$ 和 $8.6 \times 10^6/\text{L}$,于23 $^{\circ}\text{C}$ 下培养架上进行光照培养,光暗比为12h/12h。每天摇瓶两次,并于固定时间取样用721分光光度计在400nm波长下测定各赤潮异弯藻培养液的吸光值,在430nm波长下测定各中肋骨条藻培养液的吸光值,细胞浓度(N)与吸光值(A)之间的关系按线性方程 $N = (33.97A - 0.11) \times 10^7/\text{L}$ (赤潮异弯藻)和 $N = (29.43A - 0.25) \times 10^8/\text{L}$ (中肋骨条藻)换算。

2 结果与讨论

2.1 胶州湾柔弱几内亚藻赤潮暴发海区生物理化环境

生物理化调查结果表明,柔弱几内亚藻赤潮暴发区盐度范围在28.886~30.959。2004年2月9日,在李村河口附近A5站浮游植物生物量很高,叶绿素a达到26 $\mu\text{g/L}$,而湾中心C3站相对要低得多,只有3.15 $\mu\text{g/L}$ 。到了10日,赤潮区域进一步扩大,冒岛、沧口水道附近海域Y1站叶绿素a达到44 $\mu\text{g/L}$,李村河口附近叶绿素a略有降低至23 $\mu\text{g/L}$,并且赤潮有向湾中心扩大趋势,湾中心叶绿素a增加到4.73 $\mu\text{g/L}$ 。两天中,湾中心的无机氮均保持在约34 $\mu\text{mol/L}$,而湾东北部在82.03~101.20 $\mu\text{mol/L}$,A5站10日的无机氮比9日的有所降低。磷酸盐在2月9日时,湾东北部达到1.28 $\mu\text{mol/L}$,湾中心只有0.45 $\mu\text{mol/L}$,而到了10日各采样站位磷酸盐均降到小于0.23 $\mu\text{mol/L}$ 。硅酸盐在东北部有与磷酸盐相似的变化趋势。从营养盐数据来看,这次赤潮的形成富营养化起了很重要作用,但磷酸盐的耗尽限制了柔弱几内亚藻的进一步快速增殖。

溶解有机碳(DOC)浓度在256~584 $\mu\text{mol/L}$,其中真溶解态有机碳(UOC, <1 Daltons)占到64%~98%。赤潮发生区的DOC比未发生区的要高,且随着赤潮进一步发展,DOC也增高,A5站DOC 2月9日为265 $\mu\text{mol/L}$,第2天增高到496 $\mu\text{mol/L}$,是第1天的近2倍。而湾中心第1天还未发现有柔弱几内亚藻赤潮,

第 2 天才观测到,这时 DOC 由 2 月 9 日的 $256\mu\text{mol/L}$,增加到 2 月 10 日的 $305\mu\text{mol/L}$,是第 1 天的 1.2 倍,而胶体有机碳(COC, $1000\text{ Daltons} \sim 0.7\mu\text{m}$)由 $4.4\mu\text{mol/L}$,增加到 $25.6\mu\text{mol/L}$,第 2 天是第 1 天的近 6 倍。Niven 等^[12]曾观测了发生在加拿大 Nova Scotia 的 Bedford 海盆的一次赤潮前后的有机碳变化,发现在赤潮发生的过程中各形态有机碳的浓度都逐渐升高,DOC 在此期间的最高值约为其初始值的 1 倍左右,UOC 约为初始值的 1.7 倍,而 COC 在此期间的高值约为初始值的 9 倍。在长江口邻近海区也曾发现,在发生中肋骨条藻赤潮站位,溶解有机碳是未发生赤潮站位的 2 倍,而胶体有机碳是 3 到 5 倍^①。这些均表明赤潮浮游植物在开始大量繁殖时,会产生大量胶体有机物质。

2.2 柔弱几内亚藻赤潮暴发海区胶体物质对赤潮异弯藻生长的影响

在图 2 中,湾中心 C3 站和赤潮暴发区 A5 站的生长曲线显示随着截留液与超滤液体积比的增加,赤潮异弯藻生物量增加,表明水体中的胶体物质对赤潮异弯藻的生长具有一定的促进作用。Logistic 生长模型适用于描述早期缓慢生长期的生长过程^[16],因此本文选择该生长模型描述海洋赤潮藻前期的生长状况, Logistic 方程如下:

$$B_t = \frac{B_f}{1 + \frac{B_f - B_0}{B_0} e^{-\frac{4\mu_{\max} \cdot t}{B_f}}}$$

式中, B_t 为 t 时刻生物量 ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$), B_0 为起始生物量 ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$), B_f 为终止生物量 ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$), μ_{\max} 为最大生长速率 ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)。这样,根据 Logistic 生长模型,对赤潮异弯藻的生长曲线进行非线性拟合,结果如图 2 所示,拟合结果相关系数 R^2 在 $0.95 \sim 0.99$,根据拟合结果可以得到生长参数 B_f 和 μ_{\max} ,结果列于表 2。

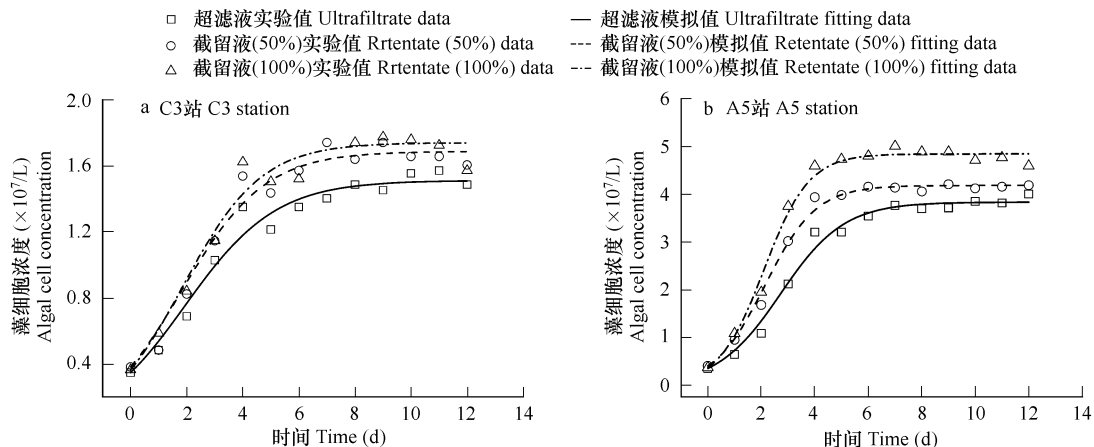


图 2 不同胶体含量下的赤潮异弯藻生长曲线及 Logistic 生长模型拟合曲线

Fig. 2 Growth curves and the Logistic growth model fitting curves of *Heterosigma akashiwo* in the different colloid amount solution

C3 站超滤液, 50% 截留液和 100% 截留液培养赤潮异弯藻的最大生长速率分别为 $0.23, 0.29, 0.31 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 表明在含有胶体的截留液中赤潮异弯藻生长的较快; 其终止生物量分别为 $1.51, 1.69, 1.74 (\times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1})$, 也是随着培养介质中胶体含量的增加而增大。A5 站的胶体物质对赤潮异弯藻的促进作用更加明显, 在 3 种培养介质中的最大生长速率分别为 $0.81, 1.10, 1.45 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 终止生物量分别为 $3.83, 4.18, 4.84 (\times 10^7 \text{ cell} \cdot \text{L}^{-1})$ 。Logistic 生长模型的结果进一步说明了柔弱几内亚藻赤潮暴发海区胶体物质对赤潮异弯藻的生长具有促进作用。

胶体物质对浮游植物生长有一定的促进作用, 在以前的研究中已有报道^[10,11]。胶体物质的一个重要来源是生物源, 在赤潮暴发期间胶体有机物可以达到初始值的数倍, 本次柔弱几内亚藻赤潮暴发期间, 亦产生了

① 杨登峰. 富营养化水体中胶体营养物质研究. 中国海洋大学硕士论文, 2004

大量的胶体物质。胶体中含有微藻生长必需的 N, P 和 Fe 等营养物质^[7], 可以作为藻类吸收营养物质的中介, 另一方面, 胶体物质本身也含有大量的有机物, 其中的一些营养成分也可被浮游植物所利用, 这可能是柔弱几内亚藻赤潮暴发期间产生的胶体对赤潮异弯藻的生长具有促进作用的主要原因。在以前的研究中, 胶州湾夏季曾经观察到柔弱几内亚藻和赤潮异弯藻共生的现象, 推测, 柔弱几内亚藻和赤潮异弯藻两种微藻分泌物之间可能存在着某种相互促进的作用。

表 2 不同胶体含量溶液中赤潮异弯藻的最大生长速率 μ_{\max} ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 和终止生物量 B_f ($\times 10^7 \text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 2 The maximum growth rate μ_{\max} ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) and final biomass B_f ($\times 10^7 \text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$) of *Heterosigma akashiwo* in the different colloid amount solution

| 项目 Item | 站位 Station | | | | | |
|------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|
| | C3 | | | A5 | | |
| | 超滤液 Ultrafiltrate | 截留液 Retentate(50%) | 截留液 Retentate(100%) | 超滤液 Ultrafiltrate | 截留液 Retentate(50%) | 截留液 Retentate(100%) |
| μ_{\max} | 0.23 | 0.29 | 0.31 | 0.81 | 1.10 | 1.45 |
| $\pm \mu_{\max}$ | 0.02 | 0.02 | 0.03 | 0.03 | 0.03 | 0.05 |
| B_f | 1.51 | 1.69 | 1.74 | 3.83 | 4.18 | 4.84 |
| $\pm B_f$ | 0.04 | 0.04 | 0.05 | 0.07 | 0.05 | 0.06 |
| R^2 | 0.97 | 0.97 | 0.95 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |

2.3 柔弱几内亚藻赤潮暴发海区胶体物质对中肋骨条藻生长的影响

图 3 的中肋骨条藻生长曲线显示, 在暴发柔弱几内亚藻赤潮的海水中, 中肋骨条藻在 4 ~ 5d 时生物量达到最大, 随后开始下降。胶体对中肋骨条藻的生长有抑制作用, 随着胶体含量的增加抑制作用增强。赤潮发生的初期, 如湾中心的 C3 站, 其抑制作用较强烈, 在浓缩液的比例为 100% 时, 完全抑制了中肋骨条藻的生长; 在胶体浓缩液比例为 50% 的介质中, 中肋骨条藻有一定的生长, 但其生长速率要比在无胶体存在的超滤液中慢。Y1 站赤潮发展到较高时期, 胶体的抑制作用比 C3 站有所减弱, A5 站的抑制作用进一步减弱。

由于中肋骨条藻的生长曲线有些没有出现平稳期, 利用 Logistic 生长模型, 对指数生长期的生长曲线进行了拟合, 如图 4 所示。拟合结果列于表 3, 相关系数 R^2 都大于 0.99。3 个站位中肋骨条藻的最大生长速率和终止生物量均随着胶体含量的增大而减小, C3 站在截留液 100% 时, 中肋骨条藻已完全受到抑制, 最大生长率已测定不出。

表 3 不同胶体含量溶液中中肋骨条藻的最大生长速率 μ_{\max} ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) 和终止生物量 B_f ($\times 10^8 \text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$)

Table 3 The maximum growth rate μ_{\max} ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) and final biomass B_f ($\text{cell} \cdot \text{L}^{-1}$) of *Skeletonema costatum* in different colloid amount solution

| 项目 Item | 站位 Station | | | | | | | | |
|------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------------|
| | C3 | | | A5 | | | Y1 | | |
| | 超滤液 Ultrafiltrate | 截留液 Retentate (50%) | 截留液 Retentate (100%) | 超滤液 Ultrafiltrate | 截留液 Retentate (50%) | 截留液 Retentate (100%) | 超滤液 Ultrafiltrate | 截留液 Retentate (50%) | 截留液 Retentate (100%) |
| μ_{\max} | 2.61 | 2.00 | - | 2.55 | 1.91 | 1.79 | 2.78 | 2.07 | 1.38 |
| $\pm \mu_{\max}$ | 0.06 | 0.06 | - | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.03 | 0.05 | 0.20 |
| B_f | 5.50 | 5.50 | - | 6.85 | 4.81 | 4.12 | 7.46 | 5.29 | 3.33 |
| $\pm B_f$ | 0.07 | 0.11 | - | 0.20 | 0.06 | 0.14 | 0.12 | 0.04 | 0.11 |
| R^2 | 0.99 | 0.99 | - | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 | 0.99 |

中肋骨条藻是一种广温广盐种, 以沿岸最多, 该种是胶州湾冬季和夏季的优势藻种, 通常密集在湾的北部, 并有向湾中部和湾口逐渐递降的分布趋势。1998 年 7 月和 1999 年 6 月在胶州湾曾发现中肋骨条藻赤潮^[17,18]。柔弱几内亚藻也是冬季胶州湾常见的优势种之一, 但在冬季柔弱几内亚藻占优势种时, 中肋骨条藻很少出现^[18]。在上面的实验中, 已经显示, 从柔弱几内亚藻赤潮暴发区的海水中提取出的胶体物质, 对中肋

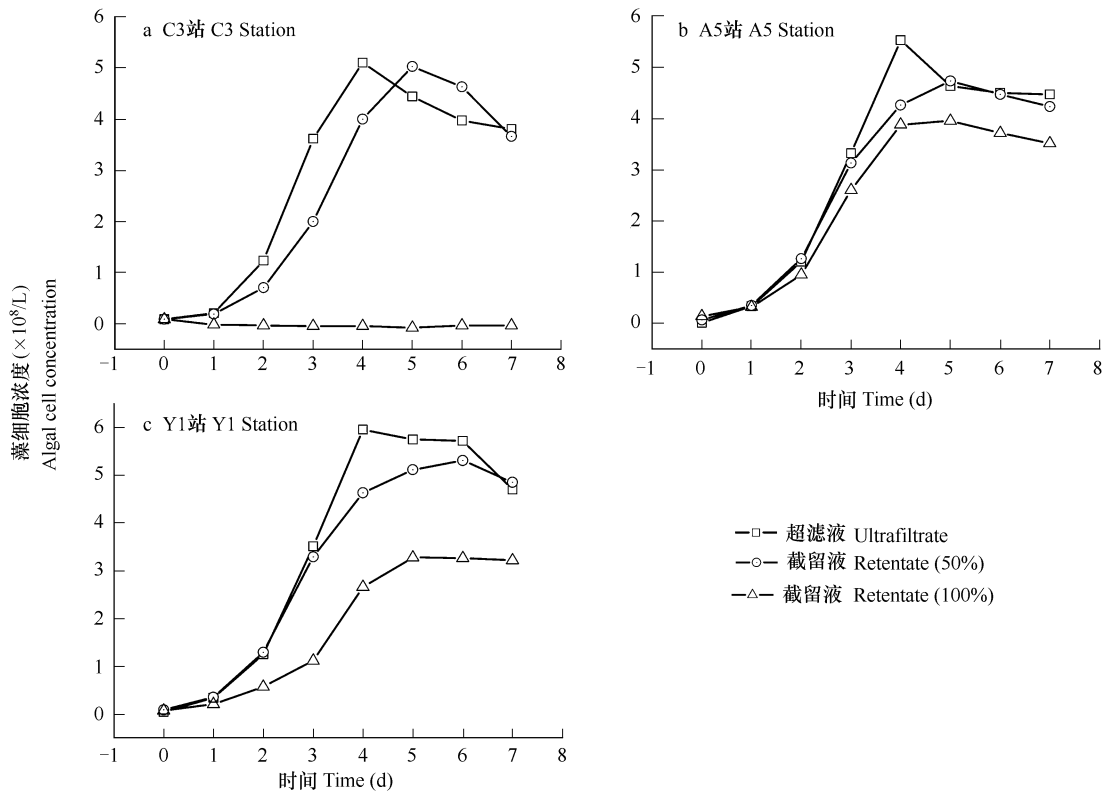


图3 不同胶体含量下中肋骨条藻的生长曲线

Fig.3 Growth curves of *Skeletonema costatum* in different colloid amount solution

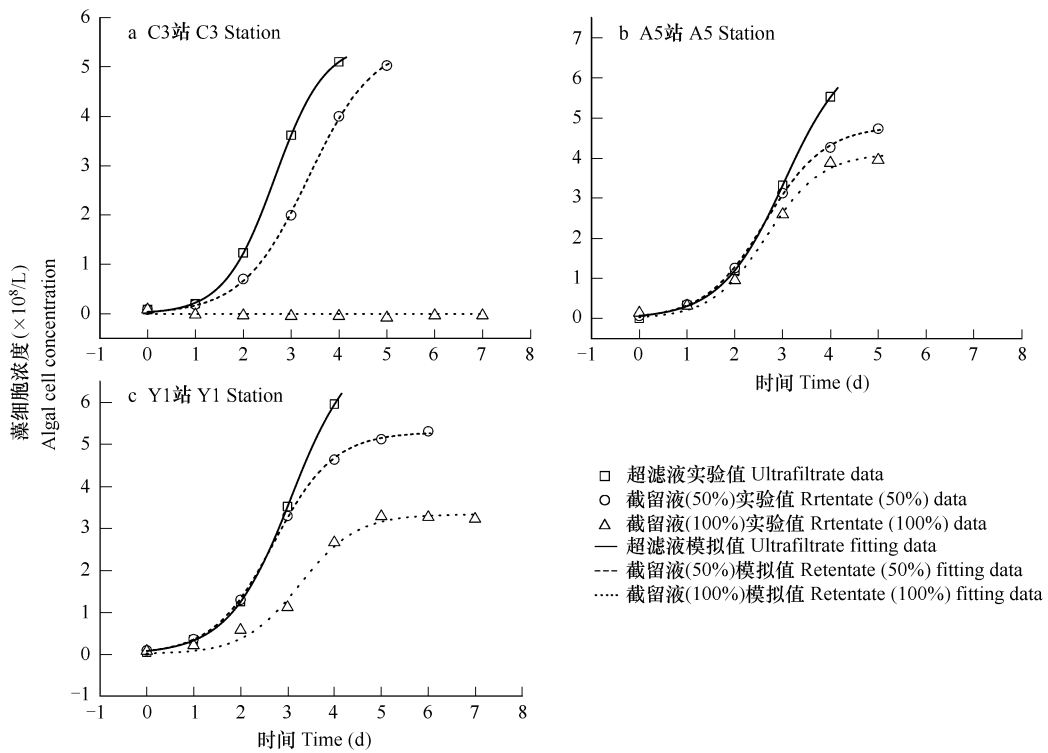


图4 不同胶体含量下中肋骨条藻的 Logistic 生长模型拟合曲线

Fig.4 Logistic growth model fitting curves of *Skeletonema costatum* growing in different colloid amount solution

骨条藻的生长具有强烈的抑制作用,胶体含量越高抑制作用越强,甚至使中肋骨条藻完全死亡。这表明柔弱几内亚藻能形成赤潮,除了受到富营养化作用外,与其产生他感物质抑制其它藻类的增殖有关。

已有一些研究表明,某些浮游植物分泌的代谢产物对其它浮游植物的生长繁殖具有抑制或促进作用,这些种间生化关系在群落的种类交替或数量变化中起着一定的作用。小球藻(*Chlorella vulgaris*)能够分泌一种叫小球藻素(Chlorellin)的抗生素来抑制菱形藻(*Nitzschia frustulum*)的生长;四尾栅藻(*Scenrdexmus quadricauda*)的培养液经过滤后,用来培养板星藻(*Pediastrum boryanum*),后者不能生长,可是如果把滤液煮沸,就会失去抑制作用;多甲藻(*Peridinium polonicum*)能够分泌一种叫glenodinin的抗生素来抑制栅藻、杜氏藻(*Dunaliella* sp.)的生长。中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)的滤液能够促进黄藻类滑盘藻(*Olisthodiscus lutens*)的生长,而在滑盘藻增殖的滤液中,中肋骨条藻明显受到抑制^[19]。Honjo等^[20]发现赤潮异弯藻能产生他感物质,这种物质能强烈抑制以骨条藻为优势种的硅藻的增殖,而对三角原甲藻(*Prorocentrum triestinum*)和异弯藻本身的生长则有促进作用。他们进一步研究发现赤潮异弯藻细胞表面包裹着一种多糖-蛋白质的复合物,赤潮异弯藻所产生的他感物质是从藻细胞表面脱落下来或由藻细胞直接分泌释放到水体中的多糖-蛋白质复合物,这些多糖-蛋白质复合物主要以大分子形式存在,当其浓度达到1.0 $\mu\text{g}/\text{ml}$ 时,能抑制骨条藻的生长,并促进三角原甲藻和赤潮异弯藻本身的生长。因此他感物质的抑制效应要达到一定的浓度才能显现出来。

在柔弱几内亚藻赤潮暴发过程中,产生大量的有机物质,特别是胶体有机物质成倍增长。柔弱几内亚藻也可能象赤潮异弯藻一样产生他感物质,这种他感物质的组成和数量目前还没有办法确定,但在测定三维荧光光谱时发现,在柔弱几内亚藻赤潮暴发区会产生大量类蛋白质^[21]。因此我们推测,柔弱几内亚藻在增殖过程中产生了影响其他藻类生长的他感物质,这些物质有很大一部分是以胶体的形式存在的,当这种物质达到一定的浓度,便可促进赤潮异弯藻的生长,但抑制中肋骨条藻的生长。

4 小结

柔弱几内亚藻赤潮会使水体中的溶解有机碳浓度增加,特别是胶体有机碳浓度会成倍增长。柔弱几内亚藻赤潮水体中的胶体物质对赤潮异弯藻的生长起促进作用,而对中肋骨条藻的生长起抑制作用,随着胶体含量的增加,这种促进或抑制作用会加强,这说明柔弱几内亚藻大量增殖期间会产生他感物质,这种物质主要在胶体粒径范围内。他感物质的产生对浮游植物种群变动及赤潮的形成可能具有重要作用。

References:

- [1] Honeyman B D, Santschi P H. A "Browning-pumping" model for oceanic trace metal scavenging: evidence from Th isotopes. *J. Mar. Res.*, 1989, 47: 951—992.
- [2] Wen L S, Santschi P, Gill G, *et al.* Estuarine trace metal distributions in Galveston Bay: importance of colloidal forms in the speciation of the dissolved phase. *Mar. Chem.*, 1999, 63: 185—212.
- [3] Wells M L, Smith G J, Bruland K W. The distribution of colloidal and particulate bioactive metals in Narragansett Bay, RI. *Mar. Chem.*, 2000, 71: 143—163.
- [4] Dai M H, Benitez-Nelson C R. Colloidal organic carbon and ²³⁴Th in the Gulf of Maine. *Mar. Chem.*, 2001, 74: 181—196.
- [5] Sigleo A C, Macko S A. Carbon and nitrogen isotopes in suspended particles and colloids, Chesapeake and San Francisco Estuaries, USA. *Estuar. Coast. Shelf. Sci.*, 2002, 54: 701—711.
- [6] Pan J F and Wang W X. Influences of dissolved and colloidal organic carbon on the uptake of Ag, Cd, and Cr by the marine mussel *Perna viridis*. *Environ. Pollut.*, 2004, 129: 467—477.
- [7] Zhao W H. New advances in studies on marine colloid. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(2): 221—229.
- [8] Zhao W H, Wang J T. Colloidal organic carbon, nitrogen and phosphorus in Yantai Silili Bay aquaculture water. *Journal of Jinan University (Sci. & Tech.)*, 2004, 18(2): 132—135.
- [9] Zhao W H, Wang J T. Preliminary study of colloidal organic carbon, nitrogen and phosphorus in Jiaozhou Bay. *Journal of Jinan University (Sci. & Tech.)*, 2005, 19(1): 25—28.
- [10] Zhao X H, Zhang Z B, Han X J. Interaction of colloids with phosphate and cupric ion in seawater and their influence on growth of microalga.

- Journal of Harbin Institute of Technology, 2002, 34(6):776-779.
- [11] Zheng A R, Chen M, Lü E, *et al.* Effects of Nitrogen, phosphor and iron in marine colloids on the growth of microalgae. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(3): 339-343.
- [12] Niven S E H, Kepkay P E, Boraie A. Colloidal organic carbon and colloidal ^{234}Th dynamics during a coastal phytoplankton bloom. *Deep-Sea Res.*, 1995, 42: 257-273.
- [13] Zhao W H, Cui X, Wang J T. The evaluation of cross-flow ultrafiltration techniques for isolating marine organic carbon. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(11): 77-82.
- [14] Wang J T, Zhao W H, Tan L J. Comparison of HTC method and UV/persulphate method to determine colloidal organic carbon in seawater. *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 2000, 18(1): 53-59.
- [15] Ocean Monitoring Regulation Committee. *Ocean Monitoring Regulation*. Beijing: Ocean Press, 1991. 690-691.
- [16] Wang X L, Deng N N, Zhu C J, *et al.* Effect of nutrients (phosphate and nitrate) composition on the growth of HAB alga. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(3): 453-460.
- [17] Huo W Y, Yu Z M, Zou J Z, *et al.* Outbreak of *Skeletonum Costatum* red tide and its relations to the environmental factors in Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2001, 32(3): 311-318.
- [18] Wu Y L, Zhou C X. The ecological study on red tide in the main chinese estuaries and bays, Section Four, the Jiaozhou Bay. In: Qi Y Z, *et al* eds. *The red tide in chinese coastal area*. Beijing: Science Press, 2003. 136-146.
- [19] Shen G Y, Shi B Z. *Marine ecology*. Beijing: Science Press, 2002. 147-148.
- [20] Honjo T. Overview on bloom dynamics and physiological ecology of *Heterosigma akashiwo*. In: Smayda T J, Shimizu Y. eds. *Toxic phytoplankton bloom in the sea*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993. 33-41.
- [21] Ji N Y, Zhao W H, Wang J T, *et al.* Fluorescence characteristics of dissolved organic matter during algal bloom in Jiaozhou Bay. *Environmental Science*, 2006, 27(2): 257-262.

参考文献:

- [7] 赵卫红. 海洋中胶体研究的新进展. *海洋与湖沼*, 2000, 31(2):221~229.
- [8] 赵卫红,王江涛. 烟台四十里湾养殖区的胶体有机碳、氮和磷. *济南大学学报(自然科学版)*, 2004, 18(2):132~135.
- [9] 赵卫红,王江涛. 胶州湾胶体有机碳、氮和磷的初步研究. *济南大学学报(自然科学版)*, 2005, 19(1):25~28.
- [10] 赵新淮,张正斌,韩喜江. 海水胶体与 PO_4^{3-} 、 Cu^{2+} 的作用及对微藻生长的影响. *哈尔滨工业大学学报*, 2002, 34(6):776~779.
- [11] 郑爱蓉,陈敏,吕娥,等. 海洋胶体中氮、磷和铁对微藻生长的效应. *自然科学进展*, 2004, 14(3):339~343.
- [13] 赵卫红,崔鑫,王江涛. 切向超滤技术分离海洋胶体有机碳性能的研究. *自然科学进展*, 2004, 14(11):77~82.
- [15] 《海洋监测规范》编辑委员会. *海洋监测规范*. 北京:海洋出版社, 1991. 690~691.
- [16] 王修林,邓宁宁,祝陈坚,等. 磷酸盐、硝酸盐组成对海洋赤潮藻生长的影响. *中国海洋大学学报*, 2004, 34(3):453~460.
- [17] 霍文毅,俞志明,邹景忠,等. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系. *海洋与湖沼*, 2001, 32(3):311~318.
- [18] 吴玉霖,周成旭. 中国主要河口海湾赤潮生态研究,第4节,胶州湾. 见:齐雨藻等著, *中国沿海赤潮*. 北京:科学出版社, 2003. 136~146.
- [19] 沈国英,施并章. *海洋生态学*. 北京:科学出版社, 2002. 147~148.
- [21] 季乃云,赵卫红,王江涛,等. 胶州湾赤潮暴发水体中溶解有机物质荧光特征. *环境科学*, 2006, 27(2): 257~262.