

张莹莹, 杨汝君, 王修林, 等. 2011. Cr(VI) 对海洋浮游植物生长的影响[J]. 环境科学学报, 31(4): 865-872

Zhang Y Y, Yang R J, Wang X L, et al. 2011. Effects of Cr(VI) on the growth of marine algae[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(4): 865-872

Cr(VI) 对海洋浮游植物生长的影响

张莹莹^{1,*}, 杨汝君², 王修林², 战玉杰³

1. 盐城工学院化学与生物工程学院, 盐城 224056

2. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100

3. 中国海洋大学图书馆, 青岛 266100

收稿日期: 2010-07-16

修回日期: 2010-10-29

录用日期: 2010-11-12

摘要: 采用一次培养实验方法, 研究了 Cr(VI) 污染物对海洋浮游植物生长的影响. 结果表明高浓度 Cr(VI) 对 8 种浮游植物的生长普遍有抑制作用, 而较低浓度 Cr(VI) 则易促进旋链角毛藻、青岛大扁藻及中肋骨条藻的生长. 并且在 Logistic 生长模型的基础上结合 Lorentz 方程和 Gauss 方程, 引入 Cr(VI) 污染物浓度项, 建立 Cr(VI) 污染物条件下海洋浮游植物生长动力学模型, 来描述 Cr(VI) 存在条件下海洋浮游植物的生长过程, 其中 Lorentz 方程可描述 Cr(VI) 浓度的变化对浮游植物生长速率参数的影响, 而 Gauss 方程可描述 Cr(VI) 浓度的变化对浮游植物生物量的影响, 实验验证了该模型的合理性, 其拟合可决系数 R^2 为 0.832 ~ 0.986, 平均为 0.909. 本文提出的生长模型可预测不同 Cr(VI) 浓度条件下海洋浮游植物的生长情况, 对研究污染物影响浮游植物的生长具有重要的实际意义.

关键词: Cr(VI); 海洋浮游植物; 生长模型

文章编号: 0253-2468(2011)04-865-08

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

Effects of Cr(VI) on the growth of marine algae

ZHANG Yingying^{1,*}, YANG Rujun², WANG Xiulin², ZHAN Yujie³

1. College of Chemistry and Bioengineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224056

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100

3. Library of Ocean University of China, Qingdao 266100

Received 16 July 2010;

received in revised form 29 October 2010;

accepted 12 November 2010

Abstract: The effects of Cr(VI) on the growth of 8 species of marine algae were investigated using batch culture experiments. The experimental results showed that while high concentrations of Cr(VI) inhibited the growth of 8 species of marine algae, a low concentration ($10 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$) of Cr(VI) promoted the growth of marine algae such as *Chaetoceros curvisetus*, *Platymonas helgolandica*, and *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve. A growth model was further developed to simulate the effect of Cr(VI) on the growth of marine algae by incorporating a logistic growth model with the Lorentz equation and the Gauss equation. In this model, the Lorentz equation was used to describe the effect of Cr(VI) on the growth rate constant while the Gauss equation describes the effect of Cr(VI) on the final biomass of algae. Results of model showed good fits to the experimental data and the correlation coefficients were from 0.832 to 0.986 with an average of about 0.909.

Keywords: Cr(VI); marine algae; growth model

1 引言 (Introduction)

近年来, 我国近海海水污染已达到不容忽视的程度. 据报道, 每年沿海地区排放 $60 \times 10^8 \text{ t}$ 含有大

量重金属污染物的生活废水和工业污水, 导致我国近海海水中的重金属浓度, 相当区域超过国家一类海水水质标准, 部分污染严重的海区超过国家二类海水水质标准近 2 倍(国家环境保护总局, 1997; 国

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (No. 40136020); 深圳科技局深港创新圈项目 (No. SG200810150035A); 盐城工学院博士启动基金; 盐城市科技局科技发展计划项目 (No. YK2009065); 盐城市科技局科技发展计划项目 (No. YK2009065)

Supported by the Key Program from the National Natural Science Foundation of China (No. 40136020), the Innovation Projects in Shenzhen-Hongkong Circle of Shenzhen Science and Technology Bureau (No. SG200810150035A), the Funding Project for Doctor of Yancheng Institute of Technology, the Development Projects in Yancheng Science and Technology Bureau (No. YK2009065) and the Development Projects in Yancheng Science and Technology Bureau (No. YK2009065)

作者简介: 张莹莹 (1976—), 女, 博士, E-mail: yy.zhang@126.com; * 通讯作者 (责任作者)

Biography: ZHANG Yingying (1976—), female, Ph. D., E-mail: yy.zhang@126.com; * Corresponding author

家环境保护总局, 2006; 2007). 通过海洋浮游植物的富集作用, 重金属沿食物链进入到海洋生态系统(周名江等, 1997; Abubakr *et al.*, 2007). 重金属日益严重的污染现状和它对海洋生态系统的严重危害引起人们的高度重视, 关于重金属对浮游植物的毒害作用国内外作了大量的研究.

研究表明少数重金属(如 Cu(II)、Zn(II)等)是单细胞浮游植物所必需的微量营养元素, 对浮游植物群体活力和生产力的动力学控制上有着重要的作用(Hudson *et al.*, 1998; Sunda *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2001; Grantz *et al.*, 2003). 而对于 Cr(VI) 等大部分重金属来说, 在浓度较高时, 则对浮游植物的生长产生明显的毒性作用. 但现有研究大多侧重于重金属对浮游植物毒性大小和毒性机理的研究(Sicko-Goad, 1982; Gonzalez-Davila, 1995; Sunda *et al.*, 1998; Wang *et al.*, 2001; 王丕文, 2002), 有关重金属浓度如何影响浮游植物生长过程的研究却未见报道. Logistic 生长模型仅仅反映出浮游植物生物量与时间的关系(Verhulst, 1838), 不能表达重金属浓度对藻类最终生物量和生长速率的影响, 也不能准确地描述重金属存在条件下藻类的生长过程. 本文在 Logistic 生长模型的基础上, 引入 Cr(VI) 浓度项探讨不同浓度的 Cr(VI) 对 8 种常见海洋浮游植物生长过程的影响, 为进一步估算实际状态下 Cr(VI) 浓度变化对海区各藻类的生长速率、种群密度的影响具有一定价值.

2 材料和方法(Materials and methods)

2.1 材料

实验所选用的赤潮异弯藻(*Heterosigma akashiwo* Hada)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus* Cleve)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum* (Greville) Cleve)、三角褐指藻(*Pheodactylum tricorutum* Bohlin)、海洋原甲藻(*Prorocentrum micans* Ehrenber)、裸甲藻(*Gymnodinium* sp.)、亚心型扁藻(*Platymonas subcordiformis*)、青岛大扁藻(*Platymonas helgolandica*) 分别由中国海洋大学海洋生命学院和黄海水产研究所微藻培养实验室提供. 其中, 中肋骨条藻是渤海冬季和春季的优势藻种, 旋链角毛藻是渤海秋季的优势藻种(康元德, 1991; 孙军等, 2002; 齐雨藻, 2003); 海洋原甲藻、裸甲藻、中肋骨条藻、旋链角毛藻、赤潮异弯藻都曾在渤海历史上多次引发赤潮(孙军等, 2002; 刘东艳, 2003); 而三

角褐指藻、青岛大扁藻、亚心型扁藻是比较常见的饵料藻(刘东艳, 2003).

2.2 培养方法

浮游植物的培养采用 f/2 营养液配方, 培养容器为 500mL 的玻璃三角瓶, 培养条件为温度(20 ± 1) °C, 明暗周期 12h: 12h, 光源为日光灯, 照度为 3000lx, 在整个培养过程中, 各操作步骤均进行灭菌处理(160 °C, 2 h).

2.3 Cr(VI) 对海洋浮游植物生长影响实验

取 20 mL 藻液(长势良好的指数生长期的藻液)加入 300 mL f/2 营养液中, 使浮游植物的起始细胞密度 B_0 均在 $10^4 \text{ cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ 以上, 在其中加入不同浓度的 Cr(VI) (济南试剂总厂, 分析纯的 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 试剂配制)进行实验(具体浓度见图 1 标示), 实验平行样 3 个. 实验条件与浮游植物培养条件相同. 实验周期是 144 ~ 196 h. 每隔 24 h 取 10 mL 藻液, 应用 Coulter 计数仪测定其细胞密度 B_t , 重复测定 3 ~ 6 次, 平行样之间的相对偏差小于 10%. Coulter 计数法的平均测量精密密度为 $99.7\% \pm 0.2\%$.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 Cr(VI) 对海洋浮游植物生长的影响

图 1 表示 Cr(VI) 不同浓度条件下旋链角毛藻、赤潮异弯藻、三角褐指藻、中肋骨条藻、青岛大扁藻、亚心型扁藻、海洋原甲藻、裸甲藻的生长曲线. 结果表明在实验条件下, 不同浓度的 Cr(VI) 对 8 种浮游植物生长的影响有所不同. 较低浓度的 Cr(VI) 对三角褐指藻、海洋原甲藻、裸甲藻等生长有一定的促进作用, 如 $10 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ 以及 $50 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ 的 Cr(VI) 对三角褐指藻的生长促进率分别为 6.78% 和 1.13%, $100 \mu\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ 的 Cr(VI) 对海洋原甲藻和裸甲藻的生长促进率可达 9.16%、5.13%. 这可能是由于低浓度的重金属对藻类的生长具有一定营养作用(Deviprasad *et al.*, 1981; Bi *et al.*, 2007). 而高浓度 Cr(VI) 使 8 种浮游植物的生长受到明显抑制, 随着金属浓度的增加, 藻类生长作用受到的抑制程度加大, 甚至完全停止生长或死亡. 这可能是因为重金属离子造成藻细胞线粒体损伤, 影响光合作用的电子传递系统, 阻碍蛋白质合成, 从而抑制浮游植物生长(杨世勇等, 2004). 根据 Calabrese 和 Baldwin(1999) 的研究, 这种低剂量刺激、高剂量抑制作用被认为是 hormesis 效应, 即生物体受到污染物刺激后, 出现一个先抑制后补偿的过程, 随着

生物体对污染物的适应补偿行为逐渐超过其抑制行为,导致净刺激效应(Calabrese *et al.* , 1999) .

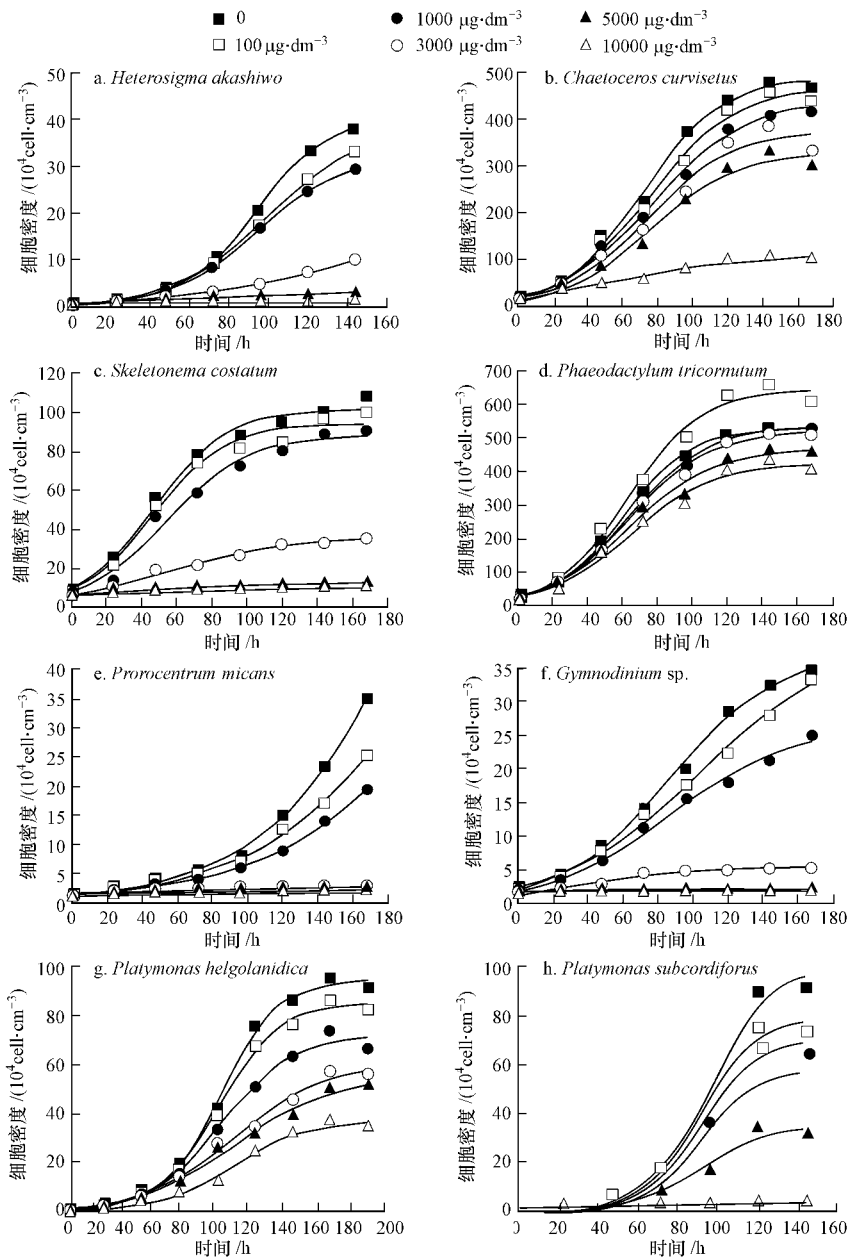


图 1 8 种浮游植物在不同 Cr(VI) 浓度下的 Logistic 方程拟合生长曲线

Fig. 1 Growth curves of eight microalgae in the presence of different concentrations of Cr(VI) fit with the logistic function

3.2 Cr(VI) 存在条件下海洋浮游植物的生长模型

浮游植物生长一般经历延缓期、指数生长期、稳定期 3 个过程,表现出“S”形(邢黎峰等,1998) ,这种 S 形曲线因生物种群生长特性的不同和所处环境条件的变化而呈现出多样性变化,目前主要采用 Mitscherlich、Gompertz、Logistic 等生长模型来描述“S”型生长曲线,但由于它们具有固定的拐点,都只能准确描述一种特定形状的“S”曲线(邢黎峰等,

1998) ,其中 Logistic 生长模型适用于描述早期缓慢生长期长的生长过程(马知恩,1996) ,因此本文选择该生长模型描述海洋浮游植物的生长状况:

$$B_t = \frac{B_f}{1 + \frac{B_f - B_0}{B_0} e^{-\frac{4u_{max}t}{B_f}}} \quad (1)$$

式中, B_t 为 t 时刻生物量($\text{cell} \cdot \text{cm}^{-3}$) , B_0 为初始生物量($\text{cell} \cdot \text{cm}^{-3}$) , B_f 为终止生物量($\text{cell} \cdot \text{cm}^{-3}$) , u_{max} 为最大生长速率常数($\text{cell} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{h}^{-1}$) , t 为时间(h) .

根据方程(1)定义生长速率参数 $GR(h^{-1})$: $GR = 4u_{max}/B_f$ 代入方程(1)可变为:

$$B_i = \frac{B_f}{1 + \frac{B_f - B_0}{B_0} e^{-GR \cdot t}} \quad (2)$$

这样,根据方程(2)应用非线性拟合技术(如 original 7.0)对其进行拟合.即可得到 B_f 和 u_{max} , 拟合的可决系数 R^2 为 0.947~0.991, 平均为 0.969, 可很好地描述赤潮异弯藻、旋链角毛藻、中肋骨条藻、三角褐指藻、海洋原甲藻、裸甲藻、亚心型扁藻、青

岛大扁藻在每个 $Cr(VI)$ 浓度下的生长过程(图1).

如图2所示,方程(2)中的参数生长速率参数 GR 和终止生物量 B_f 都与 $Cr(VI)$ 浓度有关. 为了进一步地描述 $Cr(VI)$ 浓度对浮游植物的最大生长速率以及生物量的影响,需要寻找新的模型来描述二者间的关系. 进一步分析,浮游植物生长速率参数 GR 与 $Cr(VI)$ 浓度 C_{Cr} 的关系符合 Lorentz 曲线,可用方程 Lorentz(3) 来拟合:

$$GR = GR_0 + \frac{2D}{\pi} \frac{\omega_{Cr}}{4(C_{Cr} - C_{Cr-max})^2 + \omega_{Cr}^2} \quad (3)$$

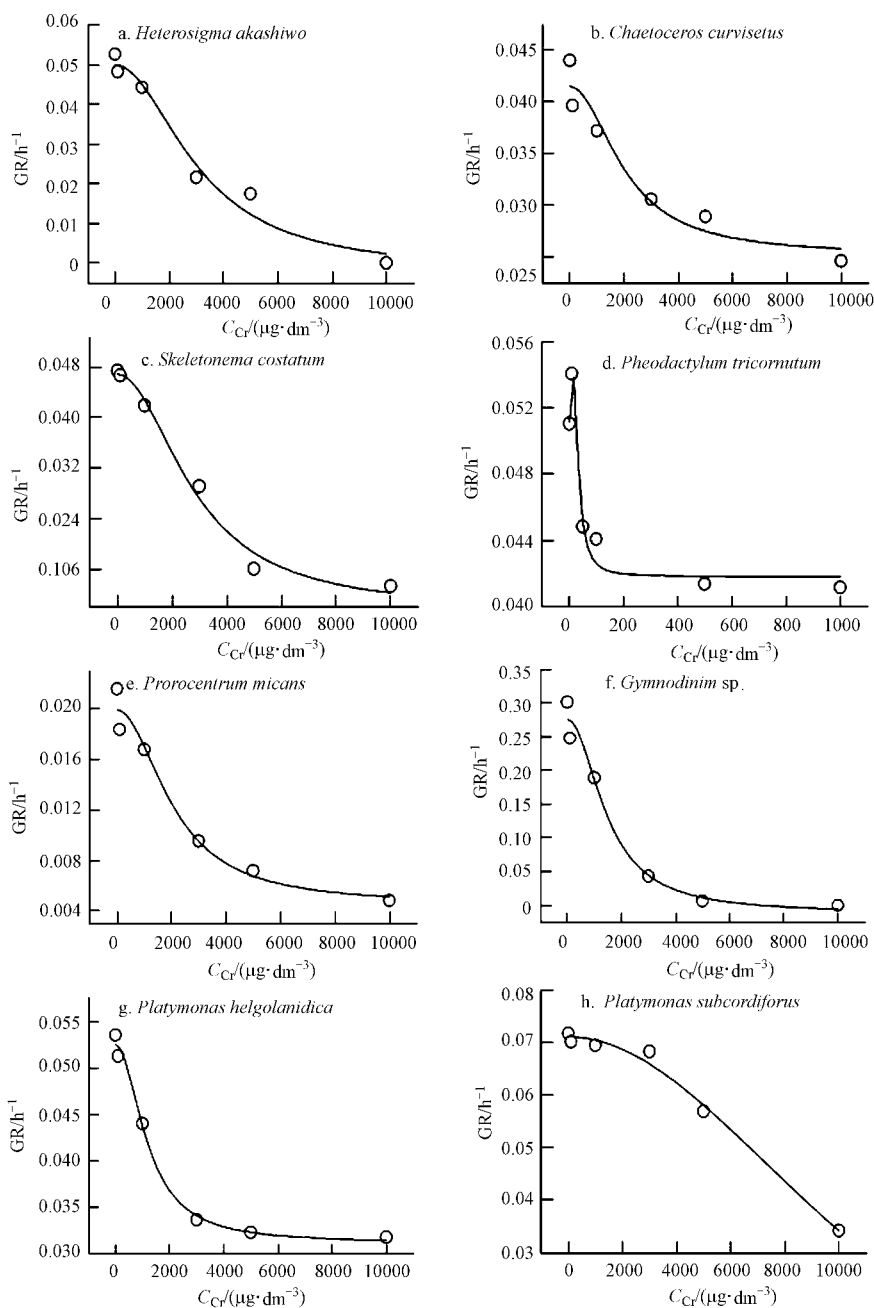


图2 $Cr(VI)$ 存在条件下,浮游植物 GR 与 C_{Cr} 关系曲线

Fig. 2 Relationship between GR and C_{Cr} for the different microalgae

式中, GR_0 为最大生长速率参数 (h^{-1}). 根据方程 (3) 利用非线性拟合得出, 当 Cr(VI) 完全抑制藻类生长时, GR_0 最小极限值为 0, C_{Cr-max} 为生长速率参数最大值时的 Cr(VI) 浓度 ($\mu g \cdot dm^{-3}$), ω_{Cr} 为 Cr(VI) 浓度范围值 ($\mu g \cdot dm^{-3}$), D 为 Cr(VI) 浓度的改变量对生长速率参数的影响总量因子. 应用 Lorentz 方程拟合的可决系数 R^2 为 0.858 ~ 1.000, 平均为 0.929, 可较为准确地描述 8 种浮游植物的生长速率参数与 Cr(VI) 浓度的关系(图 2).

同样, 也需新模型来进一步描述 Cr(VI) 浓度对海洋浮游植物终止生物量 B_f 的影响, 经分析二者之

间可用 GaussAmp 方程 (4) 拟合表示.

$$B_f = B_f^0 + Ae^{-\frac{(C_{Cr}-C_{Cr-max})^2}{2\omega_{Cr}^2}} \quad (4)$$

式中, B_f^0 为浮游植物最小终止生物量 ($cell \cdot cm^{-3}$), 根据方程 (4) 利用非线性拟合得出, 当 Cr(VI) 完全抑制藻类生长时, B_f^0 最小极限值为 B_0 , A 为 Cr(VI) 浓度的改变量对浮游植物生物量的影响总量因子, C_{Cr-max} 为生物量最大值时的 Cr(VI) 浓度 ($\mu g \cdot dm^{-3}$), ω_{Cr} 为 Cr(VI) 浓度范围值 ($\mu g \cdot dm^{-3}$), 拟合的相关系数 R^2 为 0.846 ~ 0.990, 平均为 0.918, 可较好地描述 8 种浮游植物的终止生物量 B_f 与 Cr(VI) 浓度的关系(图 3).

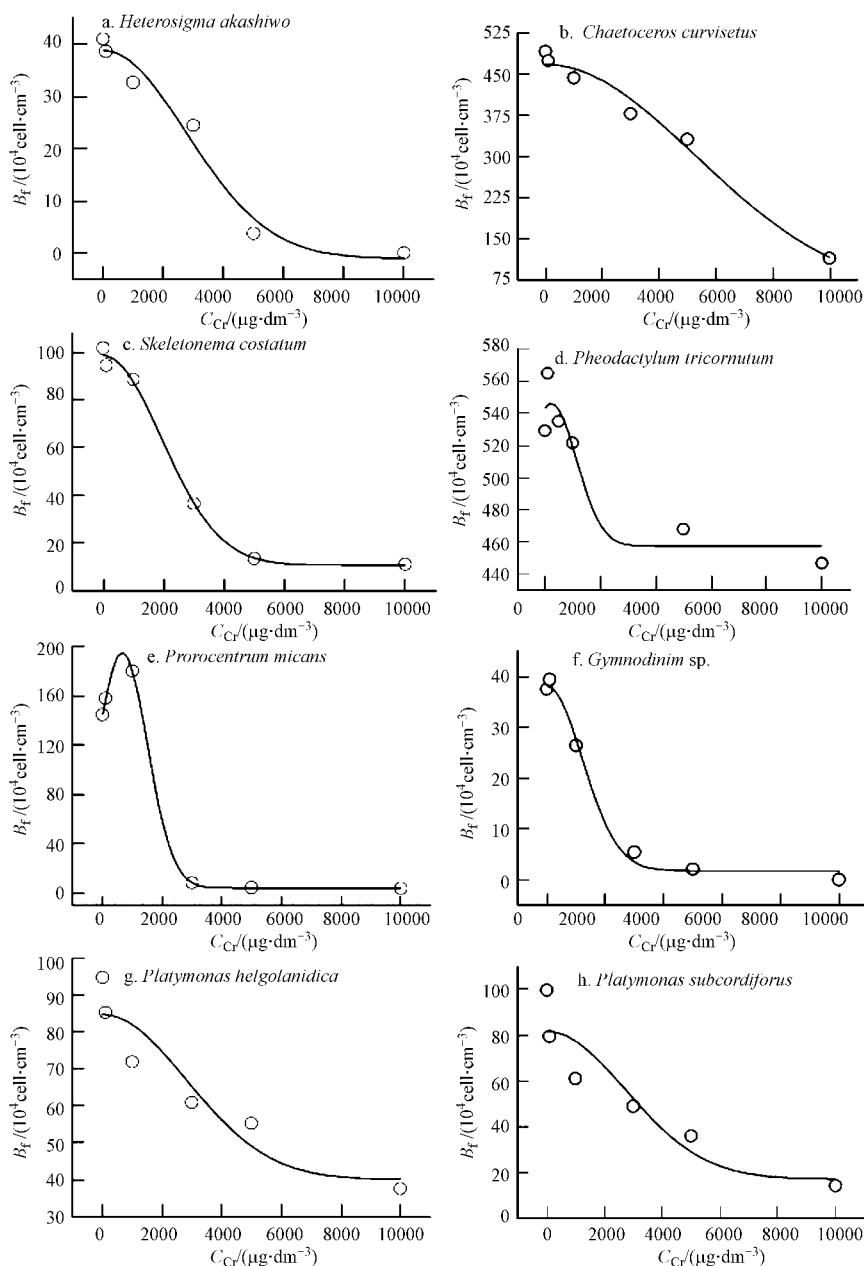


图 3 Cr(VI) 存在条件下, 浮游植物 B_f 与 C_{Cr} 作用曲线

Fig. 3 Relationship between B_f and C_{Cr} for the different microalgae

这样,将方程(2),(3),(4)代入方程(1),得到方程(5):

$$B_t = \frac{B_f^0 + Ae^{-\frac{(C_{Cr}-C_{Cr-max})^2}{2\omega^2}}}{1 + \frac{B_f^0 + Ae^{-\frac{(C_{Cr}-C_{Cr-max})^2}{2\omega^2}} - B_0}{B_0} e^{-(GR_0 + \frac{2D}{\pi^2 4(C_{Cr}-C_{Cr-max})^2 + \omega^2})t}}$$
 (5)

其中,定义

$$\Delta GR_{Cr} = \frac{2D}{\pi^2 4(C_{Cr}-C_{Cr-max})^2 + \omega^2} \omega_{Cr}$$
 (6)

$$\Delta B_f = Ae^{-\frac{(C_{Cr}-C_{Cr-max})^2}{2\omega^2}}$$
 (7)

将方程(6),(7)代入方程(5),则方程(5)可转化为方程(8):

$$B_t = \frac{B_f^0 + \Delta B_f}{1 + \frac{B_f^0 + \Delta B_f - B_0}{B_0} e^{-(GR_0 + \Delta GR_{Cr})t}}$$
 (8)

方程(5)、(8)即为 Cr(VI) 影响条件下描述浮游植物生长过程的新方程(图4).应用方程(5)对

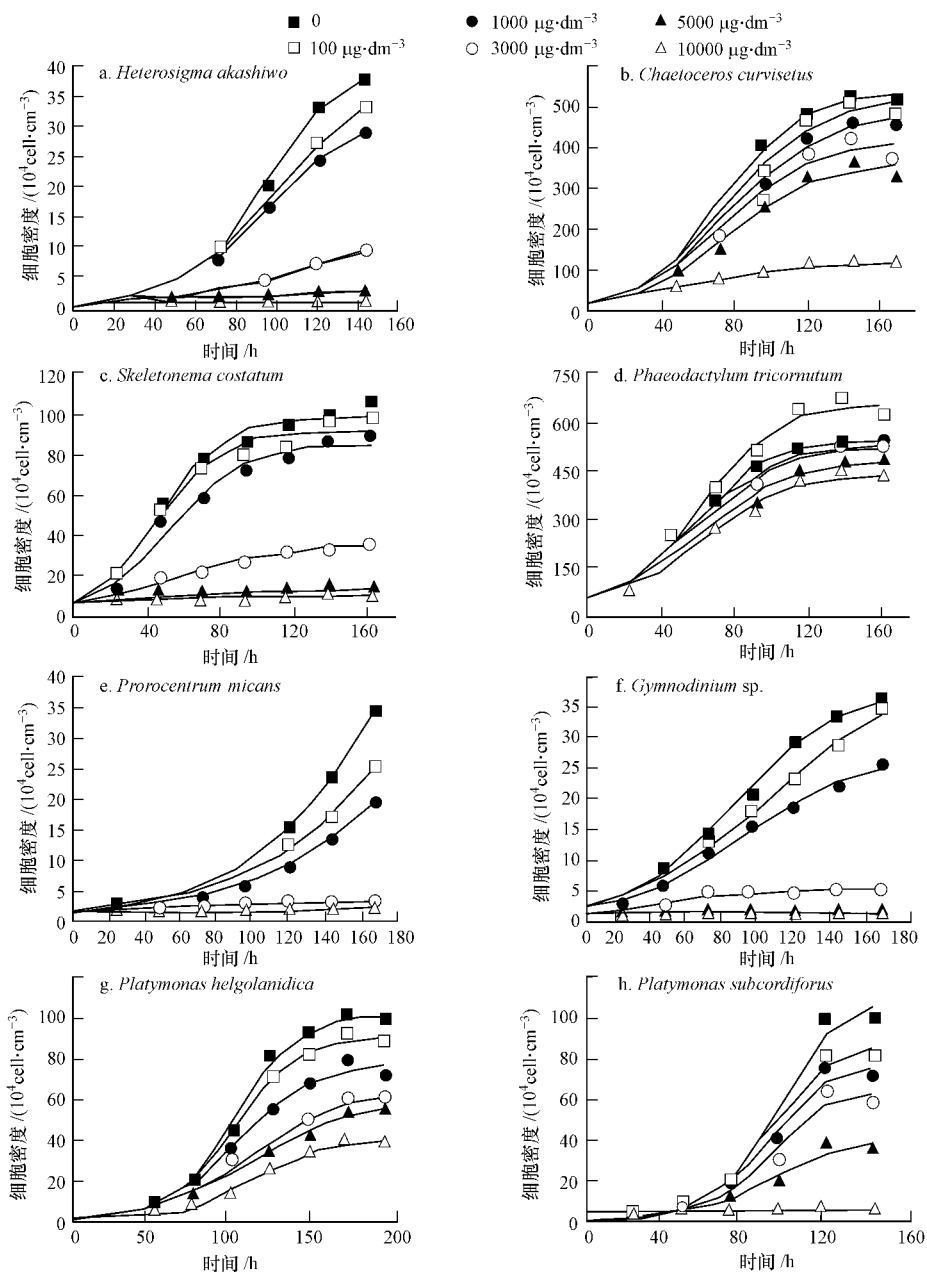


图4 八种浮游植物在不同 Cr(VI) 浓度下的方程拟合生长曲线

Fig. 4 Growth curves of eight microalgae in the presence of different concentrations of Cr(VI) using function (5)

实验数据进行函数作图法拟合(origin7. 0),其拟合可决系数 R^2 为 0. 832 ~ 0. 986, 平均为 0. 909, 表明应用此方程可以很好地描述不同浓度 Cr(VI) 对 8 种浮游植物生长的影响。

综上所述, Cr(VI) 浓度变化对浮游植物生长速率参数的影响, 可用 Lorentz 方程描述, 而对浮游植物生物量的影响, 则可用 GaussAmp 方程描述. 用该方程描述某种浮游植物的生长过程, 当它的拟合参数 C_{Cr-max} 、 C'_{Cr-max} 的数值为 0 时, 说明 Cr(VI) 抑制该浮游植物的生长; 当它的拟合参数 C_{Cr-max} 、 C'_{Cr-max} 的数值大于 0 时, 说明低浓度的 Cr(VI) 对该浮游植物的生长有一定的促进作用, 而 C_{Cr-max} 的数值即为促进生长的最佳浓度. 这样, 应用该方程可以预测不同浓度 Cr(VI) 胁迫下, 相应海区的海洋浮游植物的生长情况. 根据文献报道, 在培养液中添加过量的营养盐可以缓解重金属的毒性, 即营养盐与重金属离子之间可能存在拮抗作用(Olguin *et al.*, 2000). 由于本实验是在 $f/2$ 配方营养盐条件下进行的, 营养盐的浓度远高于实际海区, 所以我们得到的实验结果可能低估了 Cr(VI) 对海洋浮游植物生长的影响。

4 结论(Conclusions)

1) 研究了不同浓度的 Cr(VI) 对八种海洋浮游植物生长的影响. 在应用 Logistic 生长模型的基础上结合 Lorentz 方程和 GaussAmp 方程, 引入 Cr(VI) 污染物浓度项, 建立新的方程来描述 Cr(VI) 存在条件下海洋浮游植物的生长过程. 实验结果表明该方程是合理的, 其中 Lorentz 方程可描述 Cr(VI) 浓度变化对浮游植物生长速率参数的影响, 而 GaussAmp 方程可描述 Cr(VI) 浓度变化对浮游植物生物量的影响, 应用该方程可预测不同浓度 Cr(VI) 条件下, 相应海区海洋浮游植物的生长情况。

2) 该研究对于重金属污染物存在条件下浮游植物生长过程研究具有较重要的理论和实际意义。

责任作者简介: 张莹莹, 理学博士. 研究方向为水环境污染、生态学。

参考文献(References):

Abubakr M I, Eltayeb M A H, Sanja S, *et al.* 2007. Assessment of heavy metals pollution in Sudanese harbours along the Red Sea Coast [J]. *Microchemical Journal*, 87(2): 104-112
Bi D S, Qian C L. 2007. Toxicity effect of Hg^{+2} and Cr(VI) on alga

growth in eutrophic water [J]. *Agricultural Science & Technology*, 8(3): 25-28
Calabrese E J, Baldwin L A. 1999. Evidence that hormesis represents an "overcompensation" response to a disruption in homeostasis [J]. *Ecotoxicology and Environment Safely*, 42: 135-137
Deviprasad P V, Chowdary Y B K. 1981. Effects of metabolic inhibitors on the calcification of a freshwater green alga *gloeotaenium loitlesbergarianum* hansgirg. 2. Effects of some inhibitors of protein synthesis [J]. *Annals of Botany*, 47(4): 461-466
国家环境保护总局. 1997. GB3097—1997 海水水质标准 [S]. 北京: 中国标准出版社
Ministry of Environmental Protection of China. 1997. GB3097—1997. Sea Water Quality Standard. [S]. Beijing: China Standards Press (in Chinese)
国家环境保护总局. 2006. 中国近岸海域环境质量公报(2005) [OL]. 2008-08-03. <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/jagb/2006jah/>
Ministry of Environmental Protection of China. 2006. Bulletin of Marine Environmental Quality of China (2005) [OL]. 2008-08-03. [http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/jagb/2006jah/\(in Chinese\)](http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/jagb/2006jah/(in%20Chinese))
国家环境保护总局. 2007. 中国近岸海域环境质量公报(2006) [OL]. 2008-08-05. <http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/jagb/07hygb/>
Ministry of Environmental Protection of China. 2007. Bulletin of Marine Environmental Quality of China(2006) [OL]. 2008-08-05. [http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/jagb/07hygb\(in Chinese\)](http://jcs.mep.gov.cn/hjzl/jagb/07hygb(in%20Chinese))
Gonzalez-Davila M. 1995. The role of phytoplankton cells on the control of heavy metal concentration in seawater [J]. *Marin Chem*, 48(3/4): 215-236
Grantza D A, Garnerb J H B, Johnson D W. 2003. Ecological effects of particulate matter [J]. *Environment International*, 29: 213-239
Hudson R J M. 1998. Which aqueous species control the rates of trace metal uptake by aquatic biota? Observations and predictions of non-equilibrium effects [J]. *Sci Total Environ*, 219: 95-115
康元德. 1991. 渤海浮游植物的数量分布和季节变化 [J]. *海洋水产研究* 12: 31-44
Kang Y D. 1991. Distribution and seasonal variation of phytoplankton in the Bohai sea [J]. *Marine Fisheries Research*, 12: 31-44 (in Chinese)
马知恩. 1996. 种群生态学的数学建模与研究 [M]. 合肥: 安徽教育出版社. 11-18
Ma Z E. 1996. Population Ecology Mathematical Modeling and Research [M]. Hefei: Anhui Education Press. 11-18 (in Chinese)
Olguin H F, Salibian A, Puig A. 2000. Comparative sensitivity of *Scenedesmus acutus* and *Chlorella pyrenoidosa* as sentinel organisms for aquatic ecotoxicity assessment: Studies on a highly polluted urban river [J]. *Environmental Toxicology*, 15(1): 14-22
齐雨藻, 邹景忠, 梁松. 2003. 中国沿海赤潮 [M]. 北京: 科学出版社. 302-307
Qi Y Z, Zhou J Z, Liang S. The Coastal Red Tide of China [M]. Beijing: Science Press. 302-307 (in Chinese)
Sicko-Goad L. 1982. A morphometric analysis of algal response to low dose, short-term heavy metal exposure [J]. *Protoplasma*, 110(2): 75-86

- 刘东艳,孙军,唐优才,等. 2002. 胶州湾北部水域浮游植物研究—种类组成和数量变化[J]. 青岛海洋大学学报,32(1):67-72
- Liu D Y, Sun J, Tang Y C. 2002. Study on the phytoplankton in the Jiaozhou Bay I: Species composition and abundance [J]. Periodical of Ocean University of China, 32(1): 67-72 (in Chinese)
- 孙军,刘东艳,杨世民,等. 2002. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群落结构的初步研究[J]. 海洋与湖沼,33(5):461-471
- Sun J, Liu D Y, Yang S M, *et al.* 2002. The preliminary study on phytoplankton community structure in the central bohai sea and the bohai strait and its adjacent area [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 33(5): 461-471 (in Chinese)
- Sunda W G, Huntsman S A. 1998. Processes regulating cellular metal accumulation and physiological effect: phytoplankton as model systems [J]. Sci Total Environ, 219: 165-181
- Verhulst P F. 1838. Notice Sur la loi que la population s'uit dons son accroissement [J]. Correspondences Mathematiques Et Physiques, 10: 112-121
- 王丕文. 2002. 海洋生态毒理学研究进展[J]. 国外医学卫生分册, 29(1):15-19
- Wang P W. 2002. Marine ecotoxicology research progress [J]. Foreign Medical Sciences(Section Hygiene), 29(1): 15-19 (in Chinese)
- Wang W X, Robert C H D. 2001. Metal uptake in a coastal diatom influenced by major nutrients (N, P, and Si) [J]. Wat Res, 35(1): 315-321
- Wong M Y, Sauser K R, Chung K T, *et al.* 2001. Response of the ascorbate-peroxidase of selenastrum capricornutum to copper and lead in stormwaters [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 67: 361-378
- 刑黎峰,孙明高,王元军. 1998. 生物生长的 Richards 模型[J]. 生物数学学报,13(3): 348-353
- Xing L F, Sun M G, Wang Y J. 1998. Richards growth model of living-organism [J]. Journal of Biomathematics, 13(3): 348-353 (in Chinese)
- 杨世勇,王方,谢建春. 2004. 重金属对植物的毒害及植物的耐性机制 [J]. 安徽师范大学学报(自然科学版),27(1):71-74
- Yang S Y, Wang F, Xie J C. 2004. Plant toxicity of heavy metals and the tolerant mechanisms of plants [J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 27(1): 71-74 (in Chinese)
- 周名江,颜天. 1997. 中国海洋生态毒理学的研究进展 [J]. 环境科学研究,10(3):1-6
- Zhou M J, Yan T. 1997. Progress in marine eco-toxicology study in China [J]. Research of Environmental Sciences, 10(3): 1-6 (in Chinese)