

铅离子对海洋浮游植物生长影响的研究

张莹莹, 王修林, 杨汝君, 战玉杰, 石晓勇

(中国海洋大学 化学化工学院, 山东 青岛 266003)

摘要: 采用一次培养实验方法, 研究了 Pb^{2+} 对 8 种常见海洋浮游植物生长的影响。在 Logistic 生长模型的基础上, 结合 Lorentz 方程和 GaussAmp 方程, 引入 Pb^{2+} 浓度项, 建立新的方程来描述 Pb^{2+} 存在条件下海洋浮游植物的生长过程, 并且通过对实验数据的非线性拟合, 验证该方程是合理的。实验拟合结果表明, 高浓度 Pb^{2+} ($c(Pb^{2+}) \geq 2500 \mu g/L$) 对浮游植物的生长普遍有抑制作用, 而较低浓度 Pb^{2+} ($c(Pb^{2+}) \leq 100 \mu g/L$) 则易促进赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo* Hada)、旋链角毛藻 (*Chaetoceros curisetus* Cleve)、三角褐指藻 (*Pheodactylum tricorutum* Bohlin)、中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum* (Greville) Cleve)、青岛大扁藻 (*Platymonas helgolandica* Kylin var *tsingtaoensis*)、亚心型扁藻 (*Platymonas subcordiformis*) 的生长, 它们最佳的促进生长浓度分别为: 1 991、2 523、101、1 488、627、509 $\mu g/L$, 但对于海洋原甲藻 (*Prorocentrum micans* Ehrenberg)、裸甲藻 (*Gymnodinium* sp.) 的生长没有明显的影响。应用该方程在一定程度上不仅可以根据浮游植物的生长情况, 推测相应海区的 Pb^{2+} 污染物浓度; 而且也可以预测不同浓度 Pb^{2+} 条件下, 相应海区的海洋浮游植物的生长情况。

关键词: Pb^{2+} ; 浮游植物; 生长模型

中图分类号: Q948.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2005)06-0028-07

近年来, 随着沿海地区经济和工业的迅速发展以及海洋资源的进一步开发和利用, 重金属已成为当今海洋的重要污染物, 目前在中国沿海地区近岸海域海水中均监测到重金属铅^[1]。其中渤海湾、青岛近海、长江口、南海等海域海水的铅污染最为严重, 超标率高达 95%, 部分近海的污染含量已超过三类海水水质标准^[2]。

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早已得到了人们的重视, 关于重金属的研究报道很多, 研究表明少数重金属(例如 Cu、Zn 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^[3-5]; 但是对于 Pb^{2+} 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^[6-9]。但是这些研究都是侧重于重金属对浮游植物毒性机理的研究^[10-12], 有关重金属对浮游植物整个生长过程影响的研究却未见报道, 作者在 Logistic 生长模型的基础上, 引入 Pb^{2+} 浓度项来探讨了不同浓度的 Pb^{2+} 对 8 种常见海洋浮游植物生长过程的影响。

1 材料和方法

1.1 材料

实验所选用的赤潮异弯藻 (*Heterosigma akashiwo* Hada)、旋链角毛藻 (*Chaetoceros curisetus* 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* Ehrenberg)、裸甲藻 (*Gymnodinium* sp.)、亚心型扁藻 (*Platymonas subcordiformis*)、青岛大扁藻 (*Platymonas helgolandica* Kylin var *tsingtaoensis*) 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。其中赤潮异弯藻在大连湾、胶州湾等曾多次形成赤潮; 旋链角毛藻、中肋骨条藻是胶州湾夏季主要的优势藻, 在东海、黄海、渤海分布较

收稿日期: 2003-12-15; 修回日期: 2004-04-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40136020); 教育部重点项目(01110)

作者简介: 张莹莹(1976-), 女, 江苏盐城人, 硕士生, 研究方向为海洋污染生态学, E-mail: yy.zhang@tom.com; 王修林, 通讯联系人, E-mail: wangxl@qingdao.gov.cn

多,曾多次引发赤潮;海洋原甲藻、裸甲藻分布于渤海、东海、南沙群岛等水域,是形成赤潮的主要种类之一;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^[13~16]。

1.2 培养方法

浮游植物的培养采用 f/2 营养液配方,培养条件为温度 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,明暗周期 12 h: 12 h,光源为白色日光灯,照度为约 3 000 lx。在整个培养过程中,各操作步骤均进行灭菌处理(160 $^{\circ}\text{C}$ 烘 2 h)。

1.3 Pb^{2+} 对海洋浮游植物生长影响实验

取 20 mL 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 cell/mL 以上,在其中加入不同浓度的 Pb^{2+} 进行实验,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。

2 结果与讨论

2.1 Pb^{2+} 对海洋浮游植物生长影响

图 1 表示在不同 Pb^{2+} 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,由于浮游植物种类的差异, Pb^{2+} 对不同浮游植物生长的影响有所不同。较低浓度 Pb^{2+} 对黄藻门的赤潮异弯藻,硅藻门的旋链角毛藻、中肋骨条藻、三角褐指藻,绿藻门的亚心型扁藻、青岛大扁藻生长可能有一定的促进作用,而高浓度 Pb^{2+} 对它们的生长表现为抑制作用。这与 Deviprasad^[17] 的实验结果一致。这可能是由于高浓度的 Pb^{2+} 能抑制藻细胞的光合作用并能与藻细胞内的谷氨酸、半胱氨酸络合形成生物螯合物 PbPC_2 ,降低藻细胞的生长速率从而抑制藻类的生长^[18~19]。对甲藻门的海洋原甲藻、裸甲藻来说, Pb^{2+} 对其生长表现为抑制作用,并随着 Pb^{2+} 浓度的增加,抑制作用逐渐增强。这可能是由于甲藻细胞在生理及形态和构造上与其它藻类不同所致^[20]。

2.2 铅离子条件下海洋浮游植物的生长方程

浮游植物生长一般经历延缓期、指数生长期、稳定期三个过程,由此表现出“S”形曲线^[21],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, Brody, Bertalanffy, 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^[21],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^[22],因此作者选择该生长模型描述海洋浮游植物的生长状况^[23]:

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

其中, B_t 为 t 时刻生物量 (cell/mL), B_0 为初始生物量 (cell/mL), B_f 为终止生物量 (cell/mL), u_{\max} 为最大生长速率常数 [cell/(mL·h)], t 为时间 (h)。根据方程 (1) 定义生长速率参数 G_R (h^{-1}): $G_R = 4u_{\max}/B_f$ 代入方程 (1) 可变为:

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

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} , 拟合的相关系数 R^2 为 0.907~0.993, 平均为 0.976, 这可以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、青岛大扁藻在每一个 Pb^{2+} 浓度下的生长过程 (图 1)。

如图 1 所示,方程 (2) 的生长速率参数 G_R 和终止生物量 B_f 都与 Pb^{2+} 浓度有关。对于不同的浮游植物,为了进一步地描述 Pb^{2+} 浓度对浮游植物的最大生长速率以及生物量的影响,由图 2 可知,浮游植物生长速率参数 G_R 与 Pb^{2+} 浓度 $c(\text{Pb}^{2+})$ 的关系可用 Lorentz 方程 (3) 来拟合:

$$G_R = G_{R0} + \frac{2D}{\pi} \frac{W_p b}{4[c(\text{Pb}^{2+}) - c(\text{Pb}_{\max}^{2+})]^2 + \omega_{\text{pb}}^2} \quad (3)$$

其中, G_{R0} 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 Pb^{2+} 完全抑制藻类生长时即 G_{R0} 最小极限值为 0, $c(\text{Pb}_{\max}^{2+})$ 为生长速率参数最大值时的 Pb^{2+} 浓度, ω_{pb} 为 Pb^{2+} 浓度范围值 ($\mu\text{g/L}$), D 为 Pb^{2+} 浓度的改变量对生长速率参数的影响总量因子。应用 Lorentz 方程拟合的相关系数 R^2 为 0.866~0.998, 平均为 0.930, 可以较为准确地描述赤潮异弯藻、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、青岛大扁藻的生长速率参数与 Pb^{2+} 浓度的关系 (图 2)。

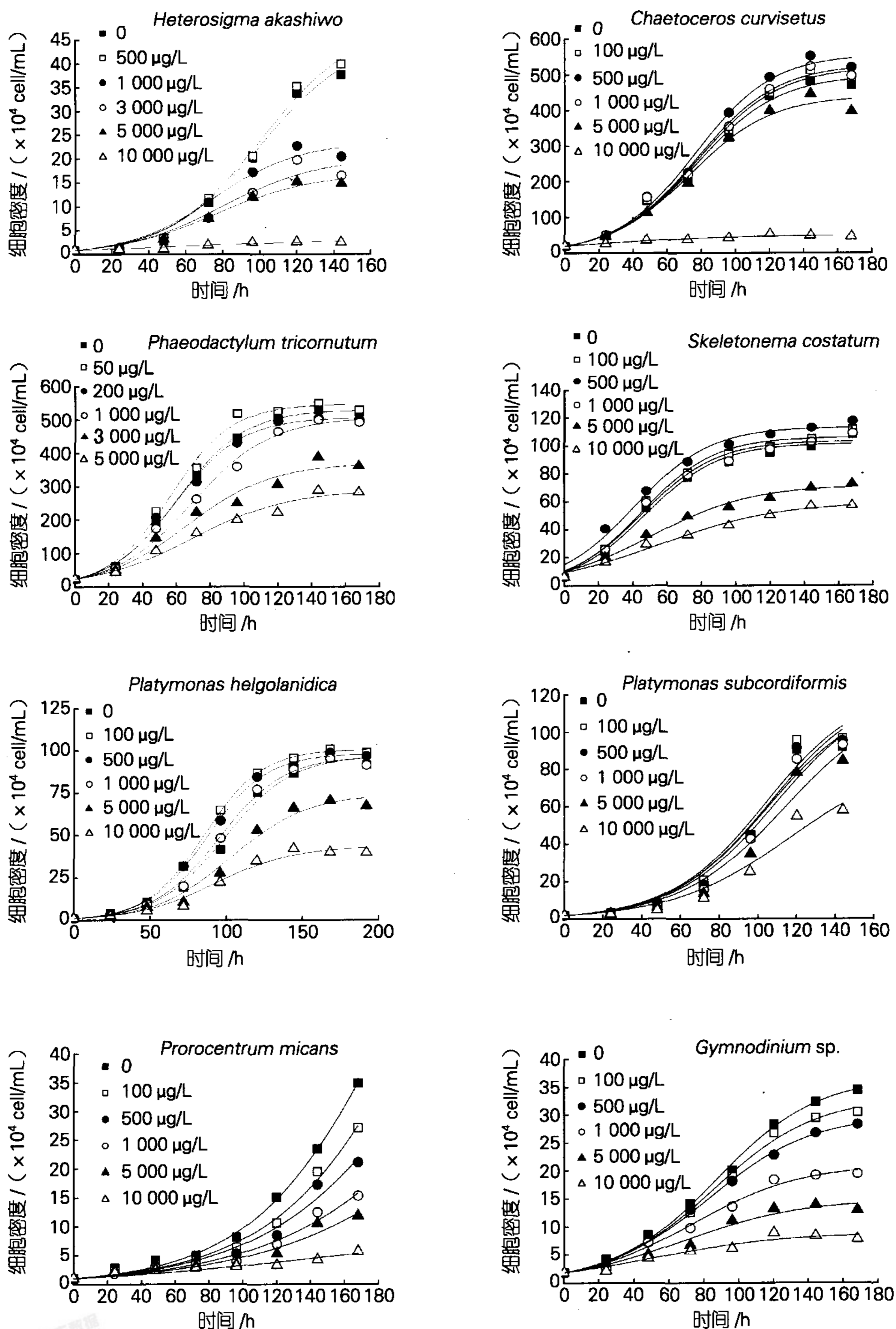


图 1 浮游植物在不同 Pb²⁺ 浓度下用 Logistic 方程拟合的生长曲线
 Fig. 1 The growth curve in lead ion of different concentrations used by Logistic function

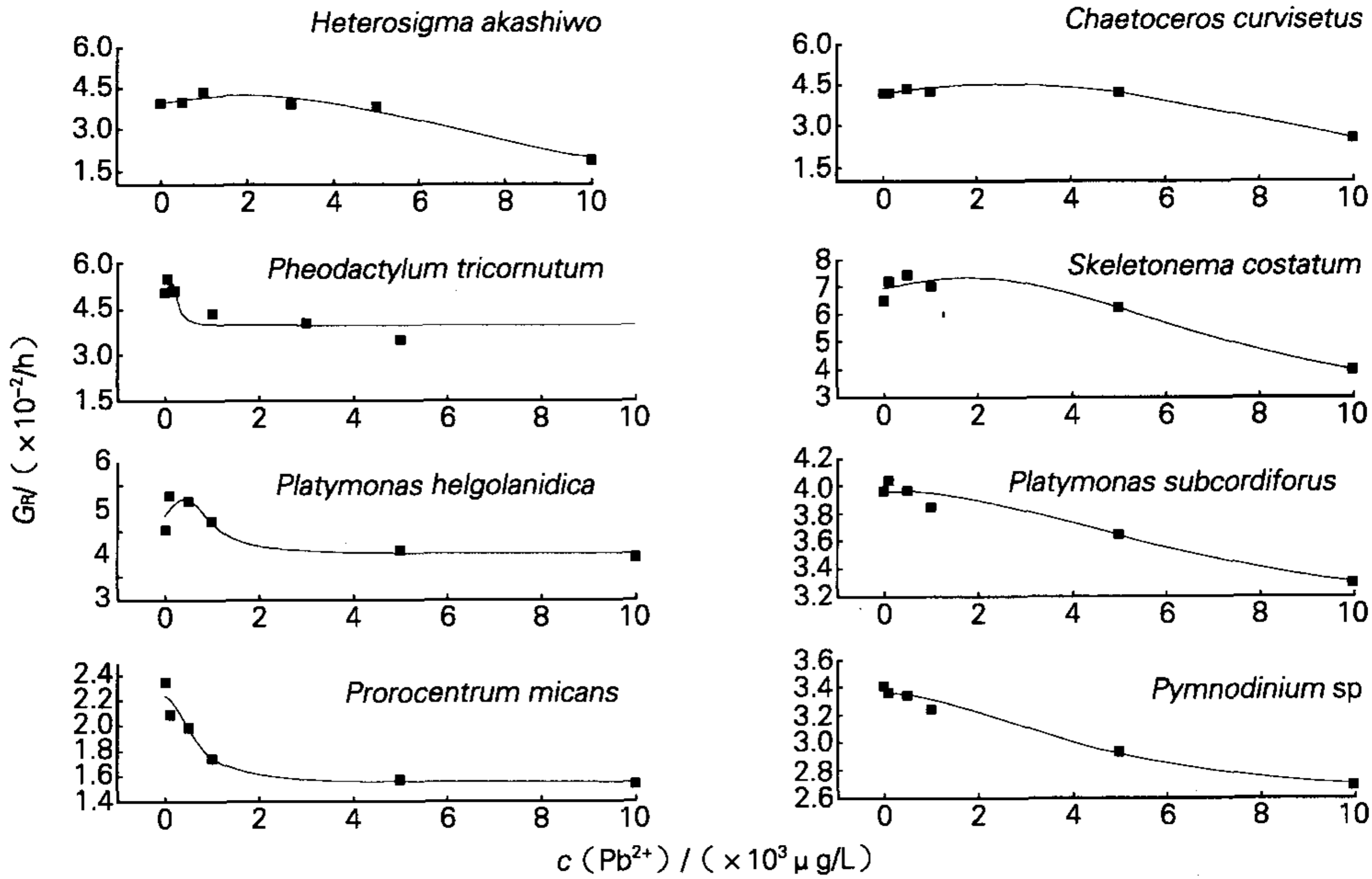


图2 浮游植物 G_R 与 $c(Pb^{2+})$ 作用曲线

Fig. 2 The relationship between G_R and $c(Pb^{2+})$ to the alga

由拟合曲线得到 Pb^{2+} 对 8 种浮游植物的最佳促进生长浓度和最大生长速率见表 1。对于不同的浮游植物, 能促进其生长的最大 Pb^{2+} 浓度不尽相同。以旋链

角毛藻为例, $c(Pb^{2+})$ 在 $2\ 523\ \mu g/L$ 时是促进其生长的最佳浓度, 但在此浓度下, 其他浮游植物的生长已受到抑制。

表 1 浮游植物与对照组最大生长速率比较

Tab.1 The comparison of the maximal growth rate between the control to the alga

藻种	u_c [cell/(mL·h)]	u_m [cell/(mL·h)]	$c(Pb^{2+})$ ($\mu g/L$)
赤潮异弯藻	4 517	4 806	1 991
旋链角毛藻	51 946	60 772	2 523
中肋骨条藻	14 454	18 810	847
三角褐指藻	66 843	75 228	101
青岛大扁藻	10 986	13 285	627
亚心形扁藻	11 816	12 481	509
海洋原甲藻	5 929	5 929	→0
裸甲藻	3 142	3 142	→0

注: u_c 为对照组的生长速率, u_m 为 8 种浮游植物的最大生长速率

同样, 图 3 表明 B_f 与 $c(Pb^{2+})$ 的关系可用 Gaus-sAmp 方程(4)来拟合表示。

$$B_f = B_{f0} + A_e \frac{[c(Pb^{2+}) - c'(Pb^{2+})_{max}]^2}{2\omega_{Pb}^2} \quad (4)$$

其中 B_{f0} 为浮游植物最小终止生物量 (cell/mL), 根据方程(4)利用非线性拟合得出, 当 Pb^{2+} 完全抑制藻类生长时即 B_{f0} 最小极限值为 B_0 , A 为 Pb^{2+} 浓度的改变量对浮游植物生物量的影响总量因

子, $c'(Pb^{2+}_{max})$ 为生物量最大值时的 Pb^{2+} 浓度 ($\mu g/L$), ω'_{Pb} 为 Pb^{2+} 浓度范围值 ($\mu g/L$), 拟合的相关系数 R^2 为 0.793~1, 平均为 0.941, 可以较好地描述赤潮异弯

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、青岛大扁藻的终止生物量 B_t 与 Pb^{2+} 浓度的关系(图 3)。

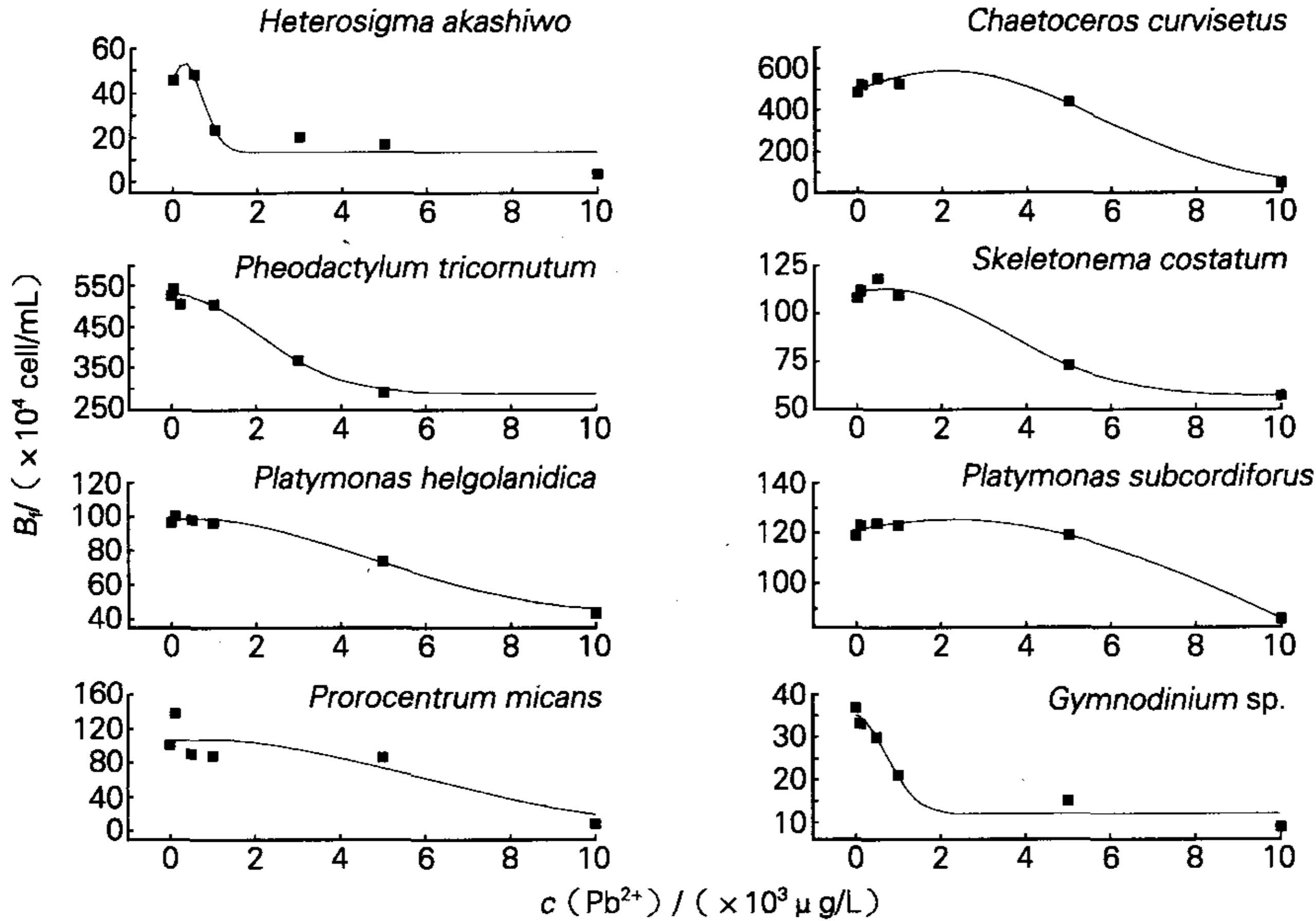


图 3 浮游植物 B_t 与 $c(Pb^{2+})$ 作用曲线

Fig. 3 The relationship between B_t and $c(Pb^{2+})$ to the alga

这样, 将方程(2), (3), (4)代入方程(1), 得到方程:

$$B_t = \frac{B_{f0} + A_e \frac{[c(Pb^{2+}) - c(Pb^{2+}_{max})]^2}{2\omega'^2}}{1 + \frac{B_{f0} + A_e \frac{[c(Pb^{2+}) - c'(Pb^{2+}_{max})]^2}{2\omega'^2}}{B_0} - B_0 e^{-[G_{R0} + \frac{2D}{\pi} \frac{\omega}{4[c(Pb^{2+}) - c(Pb^{2+}_{max})]^2 + \omega'^2}]t}} \quad (5)$$

定义 $\Delta G_{R, Pb} = \frac{2D}{\pi} \frac{\omega_{Pb}}{4[c(Pb^{2+}) - c(Pb^{2+}_{max})]^2 + \omega_{Pb}^2}$ (6)

$$\Delta B_f = A_e \left[\frac{c(Pb^{2+}) - c(Pb^{2+}_{max})}{2\omega_{Pb}^2} \right]^2 \quad (7)$$

将方程(6)、(7)代入方程(5), 则方程(5)可转化为方程(8):

$$B_t = \frac{B_{f0} + \Delta B_f}{1 + \frac{B_{f0} + \Delta B_f - B_0}{B_0} e^{-(G_{R0} + \Delta G_{R, Pb})t}} \quad (8)$$

方程(5), (8)即为铅离子影响条件下用于描述浮游植物生长过程的新方程(如图 4)。应用方程(5)对实验数

据进行函数作图法拟合 (Origin7.0), 其拟和相关系数 R^2 为 0.775~0.998, 平均为 0.921, 表明应用此方程可以很好地描述不同浓度 Pb^{2+} 对赤潮异弯藻、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、青岛大扁藻生长的影响。

Pb^{2+} 浓度的变化对浮游植物生长速率参数的影响, 可用 Lorentz 方程形式来描述, 而对浮游植物生物量的影响, 则可用 GaussAmp 方程形式来描述。当用该方程描述某种浮游植物的生长过程, 它的拟合参数 $c(Pb^{2+}_{max})$ 、 $c'(Pb^{2+}_{max})$ 的数值为 0 时, 说明 Pb^{2+} 抑制该浮游植物的生长; 当它的拟合参数 $c(Pb^{2+}_{max})$ 、 $c'(Pb^{2+}_{max})$ 的数值大于 0 时, 说明低浓度的 Pb^{2+} 对该浮游植物的生长有一定的促进作用, 而 $c(Pb^{2+}_{max})$ 的数值即为促进生长的最佳浓度。这样, 应用该方程不仅可以根

生长情况, 推测相应海区的 Pb^{2+} 浓度; 而且也可以预测不同浓度 Pb^{2+} 条件下, 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也就是说营养盐与重金

属离子之间可能存在拮抗作用^[24]。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, 所以作者得到的实验结果高于实际海区, 与实际海区存在着一定差异。

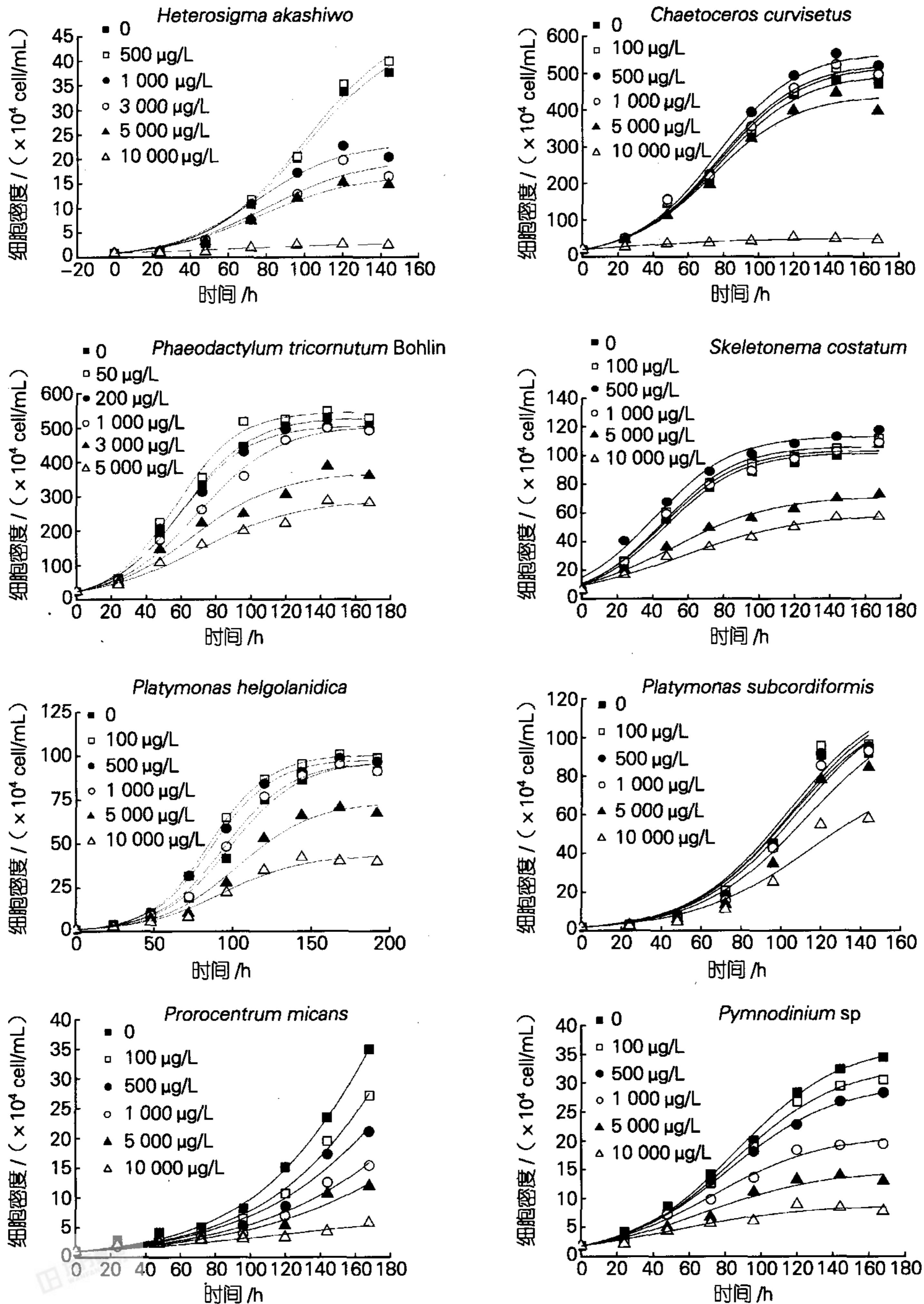


图 4 浮游植物在不同铅离子浓度下用方程(5)拟合的生长曲线
 Fig. 4 The growth curve in lead ion of different concentrations used by function (5)

3 结论

作者研究了不同浓度的 Pb^{2+} 对 8 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 Pb^{2+} 污染物浓度项, 建立新的方程来描述 Pb^{2+} 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 方程可以描述 Pb^{2+} 浓度的变化对浮游植物生长速率参数的影响, 而 GaussAmp 方程可以描述 Pb^{2+} 浓度的变化对浮游植物生物量的影响, 应用该方程不仅可以根据浮游植物的生长情况, 推测相应海区的 Pb^{2+} 污染物浓度, 而且也可以预测不同浓度 Pb^{2+} 条件下, 相应海区的海洋浮游植物的生长情况。它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。

参考文献:

- [1] 国家海洋局. 2001 年中国海洋环境质量公报[EB]. <http://www.nmemc.gov.cn/jssl/gb2002.htm> 2002-03-10.
- [2] 国家海洋局. 沿海省市海洋环境质量公报[EB] <http://www.soa.gov.cn/bbs/yanhai.htm>. 2002-04-05.
- [3] Hudson R J M. Which aqueous species control the rates of trace metal uptake by aquatic biota? Observations and predictions of non-equilibrium effects [J]. *Sci Total Environ*, 1998, 219: 95-115.
- [4] Sunda W G, Huntsman S A. Processes regulating cellular metal accumulation and physiological effect: phytoplankton as model systems[J]. *Sci Total Environ*, 1998, 219: 165-181.
- [5] Wang Wen-Xiong. Metal uptake in a coastal *Diatom* influenced by major nutrients (N, P, And Si) [J]. *Wat Res*, 2001, 35: 315-321.
- [6] Morel A, Antoine D. Small critters - big effects[J]. *Science*, 2002, 296(5 575): 1 980-1 982.
- [7] 陈必链, 吴松刚. 钝顶螺旋藻对 7 种重金属的富集作用[J]. 福建师范大学学报, 1999, 15(1): 81-85.
- [8] 袁建军, 谢嘉华. 海洋生态环境污染研究概况[J]. 通报, 2001, 36(5): 6-8.
- [9] 李永祺, 丁美丽. 海洋污染生态学[M]. 北京: 海洋出版社, 1991, 343-387.
- [10] 周名江, 颜天. 中国海洋生态毒理学的研究进展[J]. 环境科学研究, 1997, 10(3): 1-6.
- [11] 王丕文. 海洋生态毒理学的研究进展[J]. 国外医学卫生分册, 2002, 29(1): 15-19.
- [12] 姜慧彬, 林碧琴. 重金属对藻类的毒性作用研究进展[J]. 辽宁大学学报, 2000, 27(3): 281-287.
- [13] 颜天. 中国有害赤潮信息[EB]. <http://www.china-hab.ac.cn/chinese/cczntp/ccywz.htm>. 2001-09-09.
- [14] 国家环保总局南京环境科学研究所. 中国生物多样性与自然保护信息网. <http://www.biodiv.org.cn/biodiversity/ecosystems/SEAS-ZH.HIM>. 2002-04.
- [15] 国家海洋局. 中国近海赤潮生物图谱[EB]. <http://www.soa.gov.cn/chichao/redtide/jzm3.htm>. 2002-03-03.
- [16] 刘东艳, 孙军, 唐优才, 等. 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, 2002, 32(1): 67-72.
- [17] Deviprasad P V, Chowdary Y B K. 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*, 1981, 47(4): 461-466.
- [18] Morelli E, Scarano G. Synthesis and stability of phytochelatin induced by cadmium and lead in the marine diatom [J]. *Marine Environmental Research*, 2001, 52: 393-395.
- [19] Kangwe J W, Hellblom F, Semesi A K, et al. Heavy metal inhibition of calcification and photosynthetic rates of the geniculate calcareous algae *Amphiroa tribulus* [J]. *Marine Science Development in Tanzania and Eastern Africa*, 2001, 1: 147-157.
- [20] 陈国蔚. 海藻学 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992. 55-59.
- [21] 刑黎峰, 孙明高, 王元军. 生物生长的 Richards 模型[J]. 生物数学学报, 1998, 13(3): 348-353.
- [22] 马知恩. 种群生态学的数学建模与研究[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1996, 11-18.
- [23] 张蕾, 王修林. 石油烃污染物对海洋浮游植物生长的影响——实验与模型[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(5): 804-810.
- [24] Olguin H F, Salibian A, Puig A. 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*, 2000, 1 514-1 522.

(下转第 52 页)

海洋与湖沼, 2002, 33(2): 113 - 120.

的 1 种反演方法[J]. 青岛海洋大学学报, 2003, 333
(2), 165 - 172.

[15] 吕咸青, 吴自库, 殷忠斌, 等. 渤、黄、东海潮汐开边界

Numerical modeling of tidal waves in Bohai Sea and Huanghai Sea

ZHOU Hua - min^{1,3}, GU Yi², LU Xian - qing

(1. Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003, China; 2. College of Information and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 3. College of Marine Science and Technology, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

Received: Jun., 25, 2003

Key words: Bohai sea the Huanghai sea, tides, numerical simulation.

Abstract: By applying two dimensional tidal equations, problems in tidal simulation of Bohai Sea and Huanghai Sea have been solved. The simulation process contains four major constituents (M_2 , S_2 , K_1 , O_1) and two shallow water constituents (M_4 , MS_4). The analysis shows that in the tidal simulation, the harmonic analysis of 14 day results upon stability yielded the best (the most reasonable) harmonic results. The averaged absolute differences between the simulated and observed are as follows. For M_2 tide, the averaged absolute difference of the amplitude is 4 cm and the averaged absolute difference of the phase-lag is 3.3° . For S_2 tide, they are 2 cm and 4.2° . K_1 tide gives 1 cm and 3.7° . And O_1 tide gives 2 cm and 5.5° . The results in the numerical simulation coincided with the tides observed in the areas.

(本文编辑:张培新)

(上接第 34 页)

Effects of Pb^{2+} on the growth of marine algae

ZHANG Ying - ying, WANG Xiu - lin, YANG Ru - jun, ZHAN Yu - jie SHI Xiao - yong
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Received: Dec., 2003, 15

Key words: lead ion; algae; growth model

Abstract: In designed batch culture experiments, effects of Pb^{2+} on the growth of 8 species of marine algae were tested. The experimental results showed that higher doses of Pb^{2+} inhibited the growth of *Heterosigma akashiwo* Hada, *Chaetoceros curcisetus*, *Skeletonema costatum* (Greville) Cleve, *Pheodactylum tricorruptum* Blhlin, *Platymonas subcordiformis*, *Platymonas helgolanidica* Kylin var *tsingtaoensis*, *Prorocentrum micans*, *Gymnodinium* sp. But, and lower doses promoted the growth of marine algae, excluding *Prorocentrummicans*, *Gymnodinium* sp. A growth mode. In consideration of Pb^{2+} effect on the growth of marine algae, we incorporated Logistic growth model with Lorentz equation and Gaussamp equation. Lorentz equation can describe the effect of Pb^{2+} on growth rate constant, while Gaussamp equation can describe the effect of Pb^{2+} on final biomass of algae. It was demonstrated an agreed results between from growth model and the experimental data.

(本文编辑:张培新)