第8卷 第1期 海 洋 学 报 Vol.8, No.1
1986年1月 ACTA OCEANOLOGICA SINICA January, 1986

海洋环境中浮游植物对汞的摄取规律研究

许昆灿 吴丽卿 郑长春 陈世敢 詹秀美

(国家海洋局第三海洋研究所,厦门)

摘 要

本文研究了海洋环境中浮游植物对汞的摄取，提出了摄取方程及富集因子和百分摄取率方程，并用九龙江口的调查数据进行了验证。

为研究浮游植物对重金属的摄取，有必要探讨重金属在浮游植物细胞内的积累量与水介质中重金属浓度的关系．由于浮游植物细胞个体小，比表面积大，因此无疑地吸附过程对于浮游植物对重金属的摄取起着极为重要的作用．据此，一些研究者[1,2]试图用吸附方程来描述浮游植物对重金属的摄取量与水中重金属浓度的关系．他们根据各自的试验结果指出，当摄取体系处于平衡状态时，浮游植物细胞中的重金属含量与水中重金属浓度的关系可以用朗格谬等温吸附方程描述．本文拟用等温吸附方程描述海洋环境中浮游植物对汞的摄取．首先，应用弗鲁德里希型等温吸附方程，结合海洋环境条件，提出了海洋环境条件下描述浮游植物对汞的摄取方程，然后用九龙江口的调查数据进行验证．结果表明，弗鲁德里希型等温吸附方程适于描述海洋环境中浮游植物对汞的摄取．此外，本文还研究了浮游植物对汞的富集因子和百分摄取率与海水中生物活性汞浓度、叶绿素a含量的关系．

一、摄取方程

在稀溶液的固-液吸附体系中，弗鲁德里希型等温吸附方程的一般表示式如下：

$$x=kc^{1/n} \qquad (1)$$

式中，x和c分别为吸附处于平衡状态时，某一吸附质在吸附剂和溶液中的浓度；k和n为该吸附体系的特征系数，n总是大于1．式中吸附剂的量要保持一致．

若将浮游植物当作一种特殊的固体吸附剂，那么，它对海水中痕量汞的摄取可被看作是稀溶液的固-液吸附体系．因此，可以用弗鲁德里希型等温吸附方程来描述浮游植物的汞摄取量与海水中汞浓度的关系．但是，由于海水环境不象实验体系那样简单，而是一个多组分多过程的复杂体系，通常浮游植物的汞摄取量与海水中的生物活性汞浓度、浮游植物生物量、pH、温度和浮游植物种类等有关．然而，对于某一具体海区，在一般情况

本文1983年3月20日收到，修改稿1985年6月10日收到．

下浮游植物对汞的摄取量主要是受海水的生物活性汞浓度和浮游植物生物量的影响，海水的pH、温度和浮游植物种类组成等因素对浮游植物摄取汞的影响不显著，故可忽略不计．因此，应用弗鲁德里希型等温吸附方程来描述具体海区浮游植物对汞的摄取时，方程(1)应改为下式：

$$Y=\alpha\left(\frac{c_R}{c_P}\right)^{1/\beta} \tag{2}$$

式中，Y，c_R和c_P分别为浮游植物对汞的摄取处于平衡状态时，浮游植物的汞含量(ng Hg/g湿重)，海水的生物活性汞浓度（ng Hg/l）和浮游植物生物量（换成g湿重/l表示）．α和β为特定海区的特征系数，β应大于1．

式（2）即为在单位浮游植物现存量的条件下，浮游植物对汞的摄取方程．若以叶绿素a的浓度c_C（μg/l）代替式（2）中c_P，可令$c_P=bc_C$，b为叶绿素a与浮游植物生物量（湿重）的换算系数．故式（2）可改写为：

$$Y=\alpha\left(\frac{c_R}{bc_C}\right)^{1/\beta}=\frac{\alpha}{b^{1/\beta}}\left(\frac{c_R}{c_C}\right)^{1/\beta}$$

令$a=\alpha/b^{1/\beta}$

$$Y=a(c_R/c_C)^{1/\beta} \tag{3}$$

二、富集因子

浮游植物对重金属的摄取能力，通常用富集因子来衡量．根据富集因子定义，浮游植物对汞的富集因子D可用下式表达：

$$D=Y/c_R \tag{4}$$

将式（3）代入式（4），得：

$$D=a/(c_C^{1/\beta}\cdot c_R^{(1-1/\beta)}) \tag{5}$$

由式（5）可见，富集因子D与$c_C^{1/\beta}$和$c_R^{(1-1/\beta)}$的乘积成反比．

三、百分摄取率

为评价浮游植物在重金属地球化学循环中的作用，须了解浮游植物对重金属的摄取程度，故引入了百分摄取率的概念（以下简称摄取率）．摄取率定义为摄取体系中，转移到浮游植物中的重金属量与体系中重金属总量的百分比．根据此定义，浮游植物对汞的摄取率为：

$$E(\%)=\frac{Y\cdot c_P\cdot V_W}{Y\cdot c_P\cdot V_W+c_R\cdot V_W}\times 100 \tag{6}$$

式中，$E(\%)$为摄取率，V_W为该体系的海水体积（l）．

将式（6）变换为与富集因子D有关的方程，将式（4）代入式（6），得：

$$E(\%)=\frac{D\cdot c_P}{D\cdot c_P+1}\times 100 \qquad (7)$$

若$D\cdot c_P \ll 1$，式（7）可简化为：

$$E(\%)\simeq 100D\cdot c_P \qquad (8)$$

令　$c_P=bc_C$，

$$E\simeq 100b\cdot D\cdot c_C \qquad (9)$$

将式（5）代入式（9），得

$$E(\%)=100ab(c_C/c_R)^{(1-1/\beta)} \qquad (10)$$

由式（10）可见，摄取率$E(\%)$与$(c_C/c_R)^{(1-1/\beta)}$成正比，即与$c_C^{(1-1/\beta)}$成正比，与$c_R^{(1-1/\beta)}$成反比.

四、验　　证

本文提出的浮游植物对汞的摄取方程，能否符合海洋环境中的实际情况，这里利用九龙江口的调查结果进行了验证.

（一）调查

九龙江口的调查站位见图1. 样品均采自表层水. 调查时间自1980年11月至1981年7月. 海水的生物活性汞用冷原子吸收法直接测定[3]；浮游植物样品用浮游动物筛绢封口的浮游植物拖网采集，冷原子吸收法测定浮游植物的汞含量[4]；海水的叶绿素a含量用分光光度法测定[5]. 各项目的测定结果的月平均值列为表1.

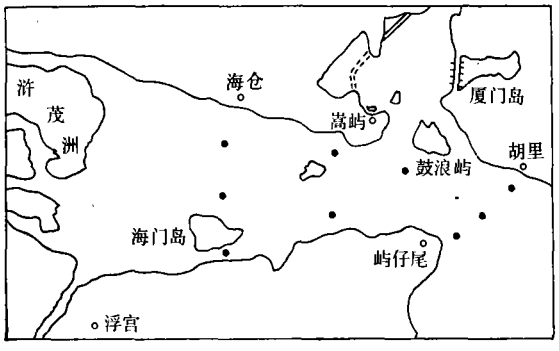

图1　九龙江口的调查站位

（二）摄取方程验证

表1列出的数据均为各测站同时观测结果的月平均值，因而可将各参数的数值看作是同一个摄取体系下的测定值. 假定调查时浮游植物对海水中汞的摄取处于动态平衡状态，那么测得的海水生物活性汞浓度和浮游植物的汞含量即作为在当时的浮游植物生物量的情况下浮游植物对海水中汞的摄取达到平衡时的数值.

表1 九龙江口浮游植物的汞含量及海水中生物活性汞和叶绿素a含量的月平均值

分析项目	1980年		1981年				
	11月	12月	1月	4月	5月	6月	7月
海水的生物活性汞浓度(ng Hg/l)	2.8	1.4	0.9	2.2	2.7	2.0	2.5
海水的叶绿素a含量(μg/l)	1.64	2.84	9.81	2.78	3.68	13.9	5.84
浮游植物的汞含量(ng Hg/g湿重)	25.5	28.1	8.5	15.6	18.4	13.1	14.0

根据九龙江口各月份调查的浮游植物汞含量Y，海水生物活性汞浓度c_R和叶绿素a含量c_C作"$Y-c_R/c_C$"的关系图（见图2），并按式(3)$Y=\alpha(c_R/c_C)^{1/\beta}$拟合，得$\alpha=19.5$，$\beta=10/3$，样品数$n=6$，相关系数$\gamma=0.93$，其相关方程如下式

$$Y=19.5(c_R/c_C)^{3/10} \tag{11}$$

根据计算，12月份的数据偏离大于二倍标准偏差，故不参与式(11)的统计．式(11)即为九龙江口海区浮游植物对汞的摄取方程，α值19.5和β值10/3分别为本海区的特征系数．根据式（11）绘制的相关曲线示于图2，由图2可见，其曲线具有Ⅰ型吸附等温线特征．由于式（11）的相关性显著，且$\beta>1$，故可认为本文建立的浮游植物对汞的摄取方程式(3)可用于描述海洋环境中浮游植物对汞的摄取规律．

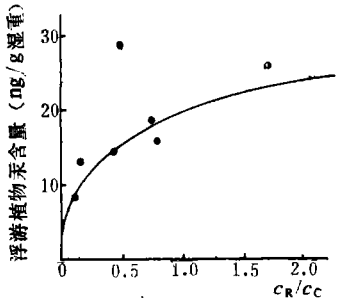

图2 浮游植物汞含量与c^R/c^C的关系

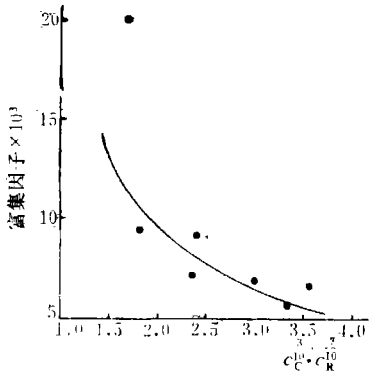

图3 富集因子与$c_C^{3/10}\cdot c_R^{7/10}$的关系

将式（11）中的α值和β值分别代入式（5），得九龙江口海区浮游植物对汞的富集因子式：

$$D=19.5\frac{1}{c_C^{3/10}\cdot c_R^{7/10}} \tag{12}$$

将实测数据代入式（12），作九龙江口海区D与$c_C^{3/10}\cdot c_R^{7/10}$的相关曲线（见图3），式(12)和图3表明，九龙江口浮游植物对汞的富集因子D，随$c_C^{3/10}\cdot c_R^{7/10}$的升高而降低．

九龙江口的调查结果表明，其富集因子D、叶绿素a与浮游植物生物量的换算因子b和叶绿素含量c_C的乘积远小于1，即$D\cdot b\cdot c_C\ll 1$，故其百分摄取率$E(\%)$可根据式（10）表示。

将式（11）中的α值、β值及叶绿素a含量与浮游植物生物量之间的换算因子b的数值代入式（10）可得九龙江浮游植物对汞的百分摄取率方程，见下式：

$$E(\%)=100\times 19.5\times 0.6\times 10^{-3}\times (c_C/R_R)^{7/10}$$
$$=1.17\times (c_C/c_R)^{7/10} \qquad (13)$$

换算因子b按下列数值计算：

1μg叶绿素$a\cong$60μg碳[6]（取其平均值）；1μg碳≅2μg浮游植物（干重）[7]；本工作的浮游植物干湿比为1=5，故1μg叶绿素a≃0.6×10^{-3}g浮游植物（湿重），即$b=0.6\times 10^{-3}$。

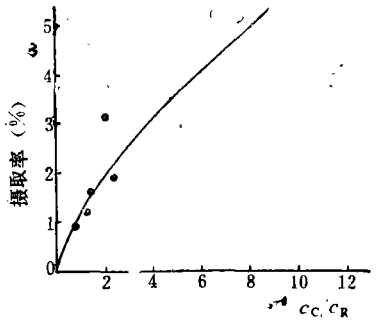

图4　九龙江口摄取率变化曲线

将实测数据代入式(13)作九龙江口的$E(\%)$与c_C/c_R的相关曲线(见图4)。由式（13）和图4可见，九龙江口海区浮游植物对汞的百分摄取率$E(\%)$与$(c_C/c_R)^{7/10}$成正比。

参　考　文　献

〔1〕 Davies, A. G., Pollution studies with marine plankton: Part II. Heavy metals, Advance in marine biology (eds. F.S.Russull and M. Yonge), London, New York and San Francisco, Vol. 15, 1978, 381—508.

〔2〕 Sunda, W. and Guillard, R. R. L., The relationship between cupric ion activity and the toxicity of copper to phytoplankton, *J. of Marine Research*, 34 (1976), 511—529.

〔3〕 许昆灿、吴丽卿、王瑞贤，差示冷原子吸收法直接测定海水中痕量汞，海洋学报，4(1982)，5：564—569.

〔4〕 郑长春，厦门邻近海域浮游植物的汞含量，台湾海峡，2(1983)，1：35—40.

〔5〕 陈世敢、陈兴群、詹秀美，厦门附近海域叶绿素含量的分布及其周年变化，台湾海峡，2(1983)，2：66—75.

〔9〕 Strickland, J. D. H. and T. R. Parsons, *A Practical Handbook of Sea Water Analysis*. (2nd ed.), 1977, 185.

〔7〕 Topping, G. and H. L. Windom, An overview of mercury in the marine environment, Discussion paper for 2nd meeting of ICES Working Group on Marine Chemistry, 1980, 5,