

菲律宾蛤仔对 6 种重金属的生物富集动力学

苑旭洲^{1,2} 崔毅^{2*} 陈碧鹃² 崔正国² 杨凤¹

(¹大连海洋大学水产与生命学院, 116023)

(²农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘要 以菲律宾蛤仔为实验生物, 应用半静态双箱模型室内模拟了菲律宾蛤仔对混合暴露条件下 6 种重金属 Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As 的生物富集实验, 通过对菲律宾蛤仔体内重金属含量变化进行非线性拟合, 得到其对重金属的生物富集系数、生物富集动力学参数。结果表明, 到富集实验结束时菲律宾蛤仔对高、中浓度组中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的生物富集系数分别是 66.99、18.49、57.11、25.81 和 72.46、35.72、117.91、41.83, 对其低浓度组中 Hg 和 As 的富集规律不明显; 吸收速率常数 k_1 及生物富集系数均随外部水体金属浓度的增加而减少; 通过生物富集系数发现, 菲律宾蛤仔对 4 种重金属的富集能力由大到小为 $Pb > Cu > Cd > Zn$; 通过 χ^2 及 F 检验发现, 生物双箱动力学模型可较好反映混合暴露条件下菲律宾蛤仔对重金属的富集特征。

关键词 菲律宾蛤仔 重金属 生物富集 双箱动力学模型

中图分类号 S917.4 **文献标识码** A **文章编号** 1000-7075(2012)04-0049-08

Kinetic study on the bioconcentration of six heavy metals in *Ruditapes philippinarum*

YUAN Xu-zhou^{1,2} CUI Yi^{2*} CHEN Bi-juan² CUI Zheng-guo² YANG Feng¹

(¹College of Fisheries and Life Science, Dalian Ocean University, 116023)

(²Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

ABSTRACT Heavy metal pollution in filter-feeding bivalves has received more and more attentions. With regard to the studies in this field, the two-compartment kinetic model is a new mode for rapid determination of bioconcentration factor (BCF). With a mixed solution of six heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, and As), kinetic parameters of bioconcentration in *Ruditapes philippinarum* were measured using a two-compartment kinetic model. A semi-static system was maintained throughout a 15-day exposure period in different concentrations of heavy metals at 15.5 ± 2 °C. During the uptake phase, water was changed every day, sufficient to maintain relatively constant concentrations of heavy metals. At 0d, 2d, 5d, 8d, 11d and 15d, *R. philippinarum* was sampled, and the samples were frozen immediately for the following analysis. Kinetic parameters of bioconcentration were obtained from the two-compartment model by nonlinear curve fitting, including uptake rate constant (k_1), elimination rate constant (k_2)

国家海洋局海洋环境评价专项 [DOMEP (MEA)-02, DOMEP (MEA)-01-01]、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (20603022011002) 和山东省自然科学基金 (ZR2010CQ023) 共同资助

* 通讯作者。E-mail: cui@ysri.ac.cn, Tel: (0532) 85826332

收稿日期: 2012-03-20; 接受日期: 2012-04-30

作者简介: 苑旭洲 (1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋生态环境研究。E-mail: yxz19870521@163.com

and bioconcentration factor. The results showed that in the high and medium concentration group the BCF of Cu, Zn, Pb, and Cd in *R. philippinarum* were 66.99, 18.49, 57.11, 25.81 and 72.46, 35.72, 117.91, 41.83, respectively. Hg, As, and the low concentration group of Cu, Zn, Pb, Cd enrichment regularity was not obvious. The uptake rate constant and bioconcentration factor decreased with the increase of heavy metal exposure concentration in ambient seawater. The ability of accumulation of Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, and As in *R. philippinarum* were $Pb > Cu > Cd > Zn$. χ^2 and F tests for goodness of fit test showed that the fitting data of χ^2 value were less than 0.71 (critical value), which suggests that the fitting goodness was acceptable. Two-compartment kinetic model could fit well the accumulation of heavy metals in *R. philippinarum*.

KEY WORDS *Ruditapes philippinarum* Heavy metal Bioconcentration
Two-compartment kinetic model

菲律宾蛤仔 *Ruditapes philippinarum*, 隶属软体动物门 Mollusc, 双壳纲 Bivalvia, 帘蛤目 Veneroidea, 帘蛤科 Veneridae, 俗称蚶子、蛤蜊, 广泛分布在我国沿海地区。由于其生长速度快、养殖周期短、适应性强等原因, 成为我国四大养殖贝类之一。

随着近年来经济的发展, 海洋环境中重金属污染现象日趋突出(魏泰莉等 2002; 刘春颖等 2005)。大多数重金属毒性较大, 微量即可对生物产生毒性效应, 有些重金属还可在微生物作用下转化为毒性更强的金属化合物。生物体内重金属如果不被分解或排出, 则可能对机体产生毒性, 并通过食物链进入人体, 成为人类健康的安全隐患。生物富集系数(Bioconcentration Factor, BCF)是描述化学物质在生物体内累积趋势的重要指标, 现在已成为评价贝类安全的重要参数。Banerjee 等(1984)运用单箱(室)模型提出了一种快速简便的 BCF 测定法, 之后许多学者对其进行改进, 提出双箱动力学模型理论(Boisson *et al.* 1998; Kahle *et al.* 2002; 汪小江等 1991; 王修林等 1998; 薛秋红等 2001), 并应用于海洋生物的富集实验。目前国内采用双箱动力学模型研究贝类对于重金属富集的实验主要集中在牡蛎、贻贝和泥蚶等生物(王晓丽等 2004; 张少娜等 2004; 李学鹏等 2008), 而菲律宾蛤仔对重金属富集动力学方面的研究相对较少, 主要有乔庆林等(2006)对 4 种重金属富集实验研究、刘琼玉等(1997)对菲律宾蛤仔急性实验研究等, 但是对比多种重金属不同浓度条件下菲律宾蛤仔对重金属的富集动力学参数的研究较少。本研究以胶州湾地区广泛养殖的贝类-菲律宾蛤仔为研究对象, 首次通过对 3 组浓度梯度下 6 种重金属污染物 Cu、Zn、Hg、Pb、Cd 和 As 在菲律宾蛤仔体内的生物富集试验研究, 采用半静态双箱动力学模型, 探讨了菲律宾蛤仔对 Cu、Zn、Hg、Pb、Cd 和 As 6 种重金属的富集动力学参数, 旨在系统地认识其动力学特性, 提高对重金属污染的预测能力, 为水产品安全管理及更好利用贝类评测环境质量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 实验生物

实验用菲律宾蛤仔采自青岛红岛近海, 平均壳长 34.05 ± 1.74 mm, 壳宽 23.20 ± 1.13 mm, 体重 7.30 ± 0.98 g。实验前驯养 7d, 选择生长良好的生物个体进行实验。

1.1.2 实验海水

实验海水取自青岛近海海水, 实验海水经沉淀、过滤、充分曝气(24h 以上)后备用。水质分析结果, pH 8.0~8.2; 盐度 30.5~30.8; 溶解氧大于 6.0 mg/L; 氨氮 0.010~0.040 mg/L; 亚硝酸盐 0.030~0.050 mg/L; Cu 2.51 $\mu\text{g/L}$, Zn 4.54 $\mu\text{g/L}$, Pb 0.21 $\mu\text{g/L}$, Cd 0.32 $\mu\text{g/L}$, Hg 0.02 $\mu\text{g/L}$, As 11.30 $\mu\text{g/L}$, 以上结果符合国家 GB3097-1997 一类海水标准要求。

1.1.3 试剂与仪器

实验用氯化汞、氯化铅、氯化镉、氯化铜、氯化锌和亚砷酸钠均为上海国药试剂厂生产的分析纯试剂,分析用水均为 Millipore-F2BN 43517C 型超纯水装置制备的超纯水。分析仪器为日立 Z5000 型原子吸收分光光度计;PF6-3 非色散原子荧光光度计;美国 YSI556 型多功能水质分析仪。

1.2 研究方法

1.2.1 实验装置与方法

2011年9月在中国水产科学研究院黄海水产研究所水环境模拟实验室进行富集实验,实验采用半静态方法,每个聚乙烯水箱(30L)中加入12L含有混合重金属的海水,并放入100个菲律宾蛤仔。实验分高、中、低3个浓度组和1个空白对照组,每个实验组设两个平行组,其中铜浓度分别为0.005、0.050、0.100 mg/L,锌浓度分别为0.020、0.500和1.000 mg/L,铅浓度分别为0.001、0.050和0.100 mg/L,镉浓度分别为0.001、0.010和0.020 mg/L,汞浓度分别为0.000 05、0.000 50和0.001 0 mg/L,砷浓度分别为0.020、0.050和0.100 mg/L。所配制的不同浓度实验海水已扣除海水中6种重金属的本底值。

实验持续15d,期间海水平均温度为 $15.5 \pm 2^\circ\text{C}$,盐度为30.5~30.8;pH为8.0~8.2,用充氧机连续充氧,实验期间海水中溶解氧均在6.5 mg/L以上。以上数据每天于07:00和19:00各测定1次。实验期间以充氧机连续充氧,每24h更换1次同浓度的实验海水,以保持水体中金属浓度恒定和分布均匀。每天09:00定量投喂小球藻,为了不改变水体重金属浓度,将菲律宾蛤仔分别取出分别放入含有小球藻的容器中喂食0.5h。分别于第0、2、5、8、11、15天从不同浓度组中各取9只菲律宾蛤仔,然后将其匀浆、冷冻,备分析。

1.2.2 重金属分析

生物体中重金属分析按照GB17378.6-2007规定方法进行。铜、铅、镉的测定采用无火焰原子吸收分光光度法,锌的测定采用火焰原子吸收分光光度法,汞和砷采用原子荧光法。

1.3 数据处理

双箱动力学模型是在近几年发展起来的一类数学模型,主要用于重金属的生物富集研究,它能较好地描述污染物在水体与生物体之间的作用过程,并能模拟出达到生物富集平衡情况下的动力学参数。其主要描述如图1所示。

重金属在生物体内的富集和排出过程,在毒理动力学的研究中采用双箱动力学模型与一级动力学方程来评价。其中,含有重金属污染物的水体作为第一相,生物体作为第二相(Clason *et al.* 2000; Ritterhoff *et al.* 1997)。

$$\text{对于水相: } \frac{dC_w}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\text{对于生物体相: } \frac{dC_A}{dt} = k_1 C_w - (k_2 + k_M) C_A \quad (2)$$

式中, k_1 为生物富集速率常数, k_2 为生物排出速率常数, k_v 为水体挥发速率常数, k_M 为生物体的代谢速率常数, C_w 为水体重金属浓度(mg/L), C_A 为生物体内重金属浓度(mg/kg), t 为实验进行的时间(d)。

由于实验时间较短,故忽略水体中重金属污染物的自然挥发及生物体的代谢,即假设 k_v 和 k_M 均为零,由方程(1)、(2)推导可得:

$$C_A = C_0 + C_w \frac{K_1}{K_2} (1 - e^{-k_2 t}) \quad \text{富集过程}(0 < t < t^*) \quad (3)$$

$$C_A = C_w \frac{K_1}{K_2} (e^{-k_2 (t - t^*)} - e^{-k_2 t}) \quad \text{排出过程}(t > t^*) \quad (4)$$

式中, t^* 为富集阶段结束的天数(d), C_0 为实验开始前生物体内金属的含量(mg/kg)。由方程(3)和(4)对富集和排出进行非线性拟合可得到 k_1, k_2 。

理论平衡状态下BCF,生物半衰期($B_{1/2}$),分别用公式(5)、(6)得:

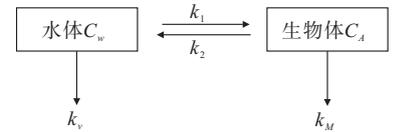


图1 生物富集双箱动力学模型
Fig.1 Model of two-compartment bioconcentration

$$BCF = \frac{k_1}{k_2} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_A}{C_w} \quad (5)$$

1.4 模型的拟合优度检验

本研究通过卡方检验结合判定系数 R^2 来评价该模型的拟合优度, 并采用 F 检验对模型整体的显著性进行检验, 以此验证双箱模型用于菲律宾蛤仔对重金属的生物富集研究的可行性。

2 结果与讨论

2.1 重金属的生物富集结果

由图2看出, 高浓度组中重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 在菲律宾蛤仔体内的含量随富集时间的增加而增加, 至富集阶段结束时, Cu、Zn、Pb、Cd 的浓度含量依次为 6.260、32.870、4.250、0.570 mg/kg, 分别是对照组(0.570、17.850、0.180、0.150 mg/kg)的 11.0、1.8、23.6、3.8 倍。

中浓度组中 Cu、Zn、Pb、Cd 在菲律宾蛤仔体内的含量在富集阶段呈现出跟高浓度组一样的趋势, 随积累时间的增加而浓度不断增加, 至累积阶段结束时, Cu、Zn、Pb、Cd 的浓度含量依次为 3.650、30.780、4.120、0.510 mg/kg, 分别是对照组(0.570、17.850、0.180、0.150 mg/kg)的 6.4、1.7、22.9、3.4 倍。

低浓度混合重金属污染物组中 Cu、Pb、Cd 在菲律宾蛤仔体内的富集含量很低, Zn 含量在第2天即达到最高富集浓度, 为 19.170 mg/kg, 是对照组(15.110 mg/kg)的 1.3 倍。

菲律宾蛤仔体内 Hg 含量随富集时间的增加出现先增加后降低的趋势。高浓度组菲律宾蛤仔体内 Hg 的最大含量是 0.027 mg/kg, 是对照组(0.003 mg/kg)的 9.0 倍; 中浓度组菲律宾蛤仔体内 Hg 最大含量是 0.040 mg/kg, 是对照组(0.001 mg/kg)的 40.0 倍; 而低浓度组菲律宾蛤对 Hg 的富集效果不明显, 这可能是由于所选取的低浓度组 Hg 的浓度偏低所致。

重金属 As 在高、中、低3个浓度组中在菲律宾蛤仔体内的富集规律并不明显, 在富集的各个时间菲律宾蛤仔体内 As 的含量在 0.350~0.440 mg/kg 之间, 变化幅度很小, 说明菲律宾蛤仔对 As 的富集并不是很明显。这主要是由于 As 是一种介于金属与非金属之间的类金属, 与金属的代谢吸收方式不同, 可通过有机形态的砷排出生物体内。

2.2 重金属生物富集阶段的曲线拟合

通过应用双箱动力学模型对菲律宾蛤仔富集试验结果进行生物曲线拟合, 由于低浓度菲律宾蛤仔对 Cu、Zn、Pb、Cd 重金属富集效果不明显, 只对高、中两个浓度组实验结果进行非线性拟合(图3~图6)。而重金属 Hg、As 在高、中、低3个浓度组中富集效果并不明显, 且没有显著的规律性。

由表1看出, 菲律宾蛤仔对重金属 Cu、Zn、Pb、Cd 的生物富集动力学参数具有如下特性:

- 1) 菲律宾蛤仔对不同重金属的吸收速率常数 k_1 随着外部水体中金属暴露浓度的增大而减少;
- 2) 菲律宾蛤仔对不同重金属的排出速率常数 k_2 随着外部水体中金属暴露浓度的增大而增大;
- 3) 除铜外, 菲律宾蛤仔对另外3种重金属的生物富集系数 BCF 基本随着外部水体浓度的增大而减少;

4) 菲律宾蛤仔对 Pb 和 Cu 的富集能力明显高于对 Cd、Zn 的富集能力, 对4种重金属的富集平均能力依次为, 高浓度组为 Pb>Cu>Cd>Zn, 中浓度组为 Cu>Pb>Cd>Zn, 而低浓度组富集效果不明显。

2.3 模型的拟合优度检验

在显著水平 $\alpha=0.05$ 下, χ^2 的临界值为 0.71, 各组拟合数据的 χ^2 值均小于 0.71, 说明由双箱模型得到的预测值与实测值无显著性差异, 拟合优度良好。F 的临界值为 7.71, 各组拟和数据 F 值均大于 7.71, 表明菲律宾蛤仔对这4种重金属的生物富集符合双箱模型。各组的拟合曲线判定系数 R^2 在 0.89~0.98 之间, 拟合程度良好。综上所述, 双箱动力模型适用于菲律宾蛤仔对 Cu、Zn、Pb、Cd 4种重金属的生物富集(表2)。

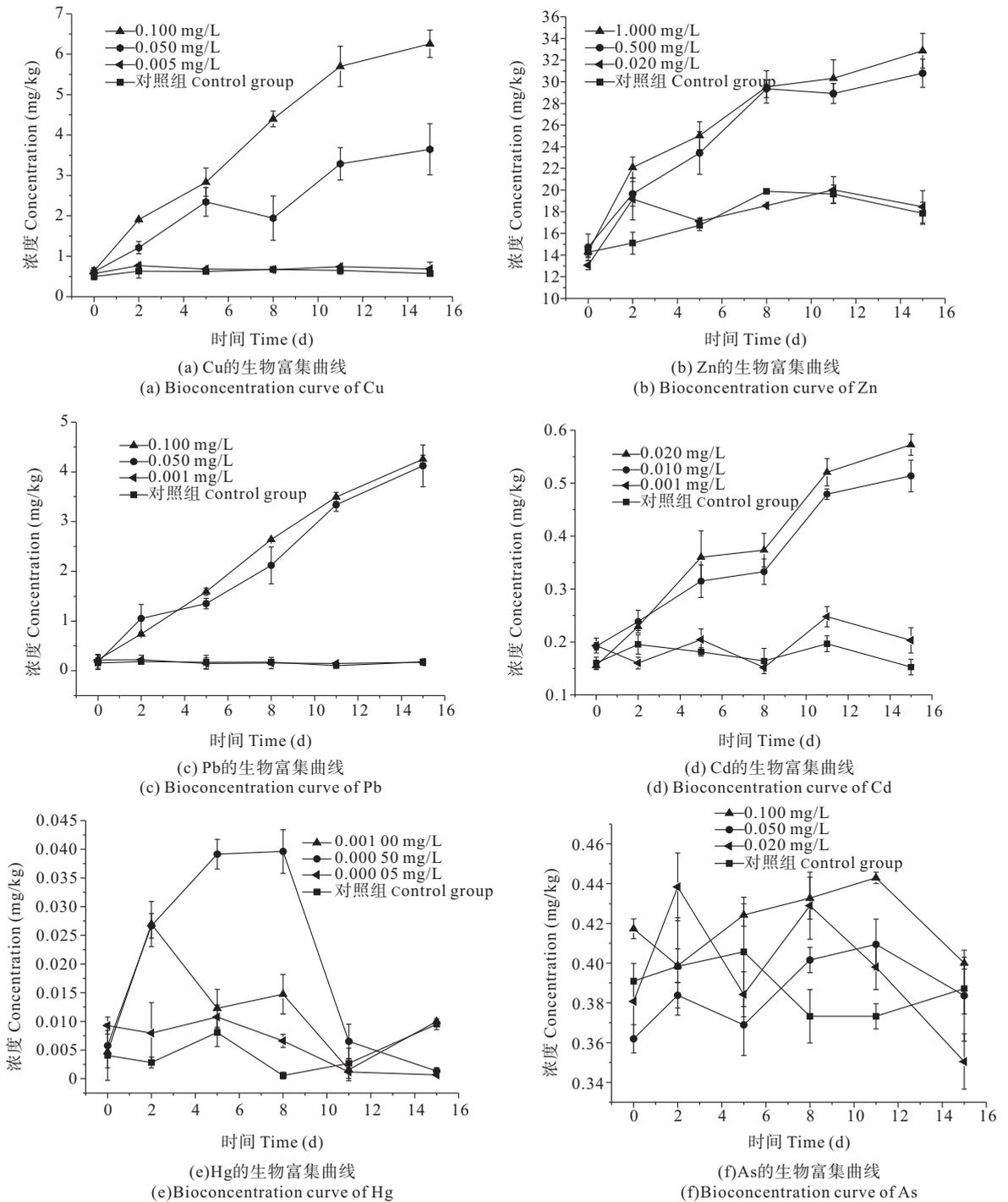


图 2 菲律宾蛤仔对 6 种重金属的生物富集曲线

Fig. 2 Bioconcentration and elimination curve of six heavy metals by *R. philippinarum*

2.4 讨论

本研究中富集实验得出的吸收速率常数 k_1 , 生物富集系数 BCF 变化趋势与李学鹏等(2008)对泥蚶富集动力学研究的结果基本一致。陆超华等(1998、1999)在研究近江牡蛎对 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的富集特性时发现, 近江牡蛎对这 4 种重金属的富集能力顺序为 $Zn > Cu > Cd > Pb$; 乔庆林等(2006)研究中发现, 菲律宾蛤仔对重金属富集能力顺序为 $Hg > Pb > Cd > As$ 。以上研究与本实验有所差异, 这是由于不同贝类对重金属的富集能力具有一定差异性, 同时重金属的富集受到受试生物个体大小、性别、年龄、繁殖状态及水体盐度、温度、pH 值等诸多因素的影响, 这些均会导致同种类生物在富集动力学参数方面的差异。

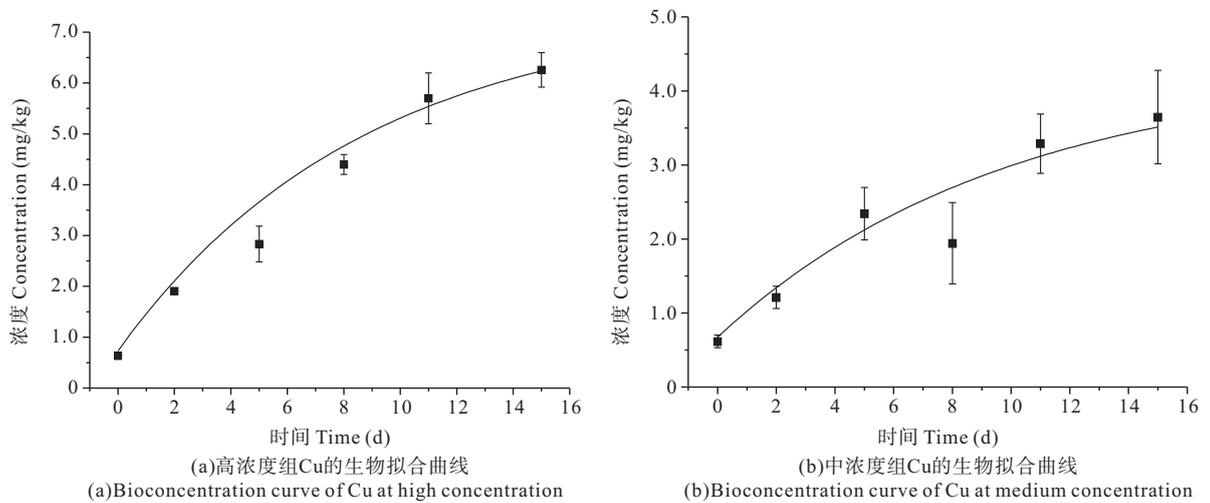


图3 菲律宾蛤仔对高、中浓度组 Cu 的生物拟合曲线

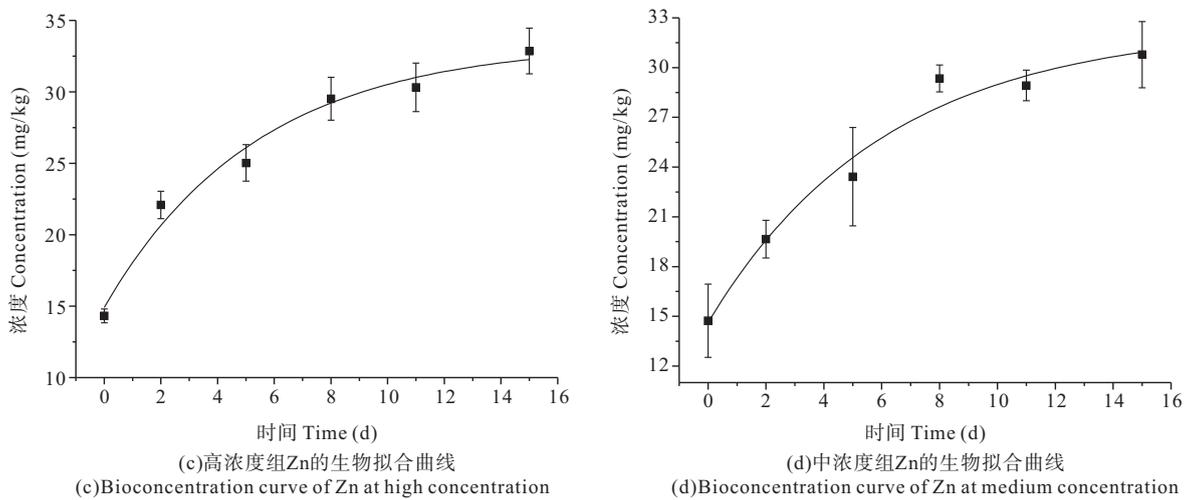
Fig. 3 Bioconcentration and elimination curve of Cu by *R. philippinarum* at high and medium concentrations

图4 菲律宾蛤仔对高、中浓度组 Zn 的生物拟合曲线

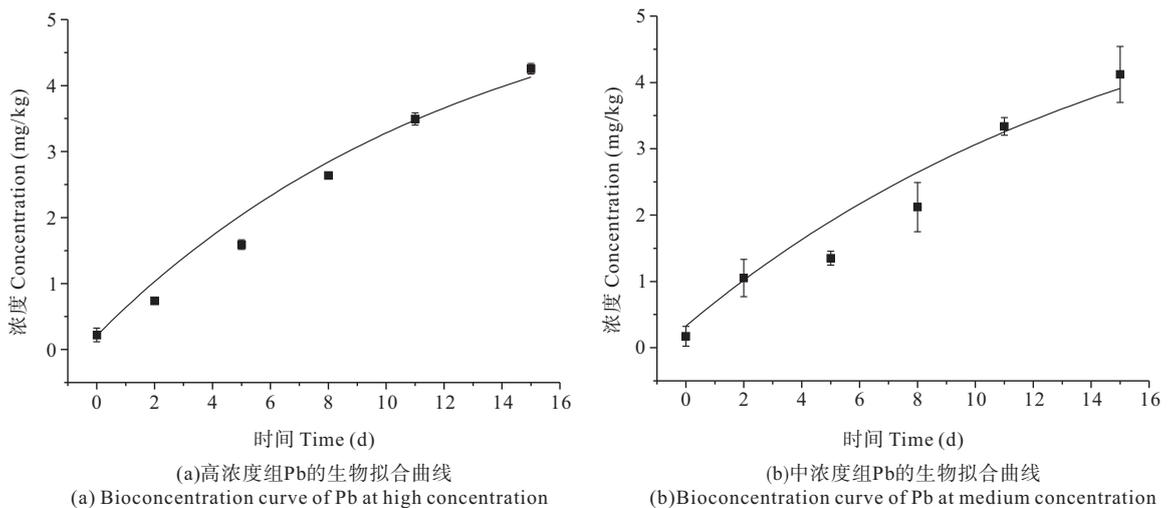
Fig. 4 Bioconcentration and elimination curve of Zn by *R. philippinarum* at high and medium concentrations

图5 高、中浓度组, 菲律宾蛤仔对 Pb、Cd 的生物拟合曲线

Fig. 5 Bioconcentration and elimination curve of Pb and Cd by *R. philippinarum* at high and medium concentrations

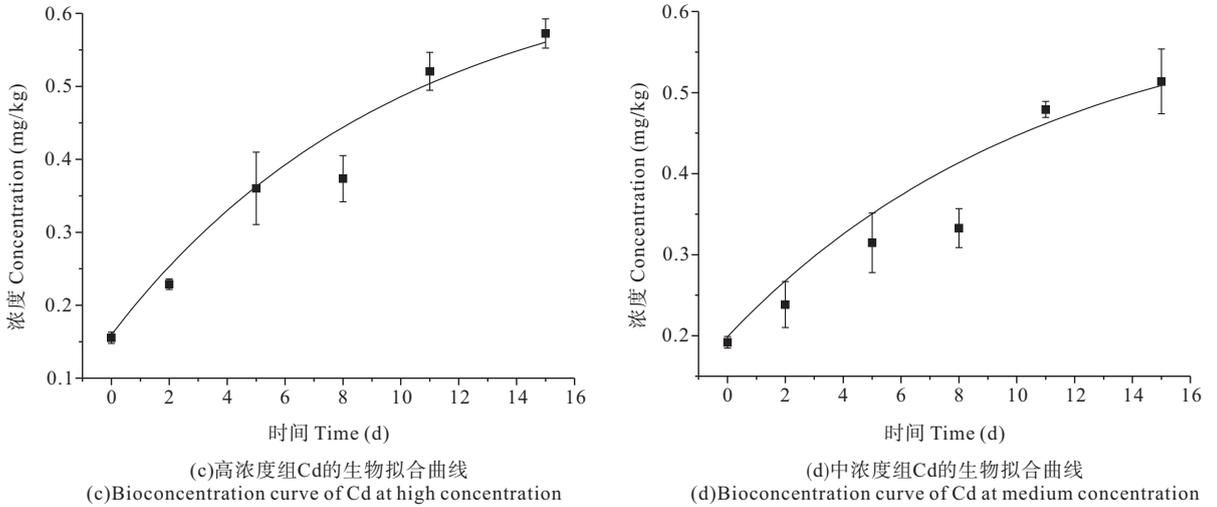


图 6 高、中浓度组,菲律宾蛤仔对 Pb、Cd 的生物拟合曲线

Fig. 6 Bioconcentration and elimination curve of Pb and Cd by *R. philippinarum* at high and medium concentrations

表 1 菲律宾蛤仔对 4 种重金属高、中浓度下的富集动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of bioconcentration of four heavy metals at different concentrations by *R. philippinarum*

重金属 Metal	金属浓度 Concentration of metal(mg/L)	k_1	k_2	BCF
Cu	0.100	7.70	0.114 9	66.99
	0.050	7.39	0.102 0	72.46
Zn	1.000	3.43	0.185 6	18.49
	0.500	5.82	0.162 8	35.72
Pb	0.100	4.41	0.077 1	57.11
	0.050	7.35	0.062 4	117.91
Cd	0.020	2.58	0.099 9	25.81
	0.010	3.77	0.090 0	41.83

表 2 双箱动力模型用于菲律宾蛤仔重金属生物富集的拟合优度检验信息

Table 2 Summary of statistical information to assess the goodness-of-fit for the two compartment models

组 Group	重金属 Metal	浓度(mg/L) Concentration	k_1	k_2	自由度 df	R^2	χ^2 值 χ^2 value	F 值 F value
高浓度 High concentration	Cu	0.100	7.70	0.114 9	4	0.96	0.18	126.94
	Zn	1.000	3.43	0.185 6	4	0.98	0.29	27.46
	Pb	0.100	4.41	0.077 1	4	0.97	0.21	513.09
	Cd	0.020	2.58	0.099 9	4	0.95	0.01	100.40
中浓度 Medium concentration	Cu	0.050	7.39	0.102 0	4	0.90	0.25	38.55
	Zn	0.500	5.82	0.162 8	4	0.98	0.18	27.33
	Pb	0.050	7.35	0.062 4	4	0.94	0.24	193.19
	Cd	0.010	3.77	0.090 0	4	0.89	0.02	91.35

实验室条件下生物体对单一化合物的积累和释放往往具有比较明显的规律,但在复合污染暴露条件下,由于重金属之间的互相促进、拮抗等影响因素的存在,使得重金属在生物体内的积累和释放规律变得极其复杂。在重金属混合暴露条件下的研究指出,重金属之间的互相协同、拮抗等复杂的作用,使得重金属在菲律宾蛤仔体内的富集规律变得比单一化合物富集要复杂(Kargin *et al.* 1999)。在自然水体中,往往是多种重金属同

时存在,本研究正是通过多种重金属混合暴露实验来模拟菲律宾蛤仔在自然状况下对重金属的富集规律。在实验过程中发现,Hg、As 两种重金属在复合污染条件下没有明显的富集规律,根据现有模型很难模拟出复合污染暴露条件下重金属 Hg、As 在生物体内的积累规律曲线方程,其原因有待进一步研究。在自然环境中的污染往往不是由一种污染物,而是由多种污染物构成的,为了比较客观地反映和监测生态环境的污染状况,进行复合污染条件下重金属的积累和代谢规律研究具有十分重要的意义。

3 结论

1)富集实验结束时,菲律宾蛤仔对高、中浓度组中 Cu、Zn、Pb 和 Cd 的生物富集系数分别是 66.99、18.49、57.11、25.81 和 72.46、35.72、117.91、41.83,对这几种重金属的平均富集能力为 $Pb > Cu > Cd > Zn$ 。

2)通过对 Cu、Zn、Pb、Cd 的拟合优度检验看出,在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下,中、高浓度组 χ^2 的拟合数据小于其临界值,各组 F 拟合数据的临界值均大于临界值,说明由双箱模型得到的预测值与实测值无显著性差异,拟合优度良好。

3)混合暴露条件下,菲律宾蛤仔生物体内 Cu、Zn、Pb 和 Cd 最高含量随着外界水体浓度的升高而增大,Hg 的富集浓度呈先增后降趋势,而 As 在高、中、低 3 个浓度组中富集规律不明显。

4)双箱动力模型能够揭示菲律宾蛤仔对混合暴露条件下 Cu、Zn、Pb、Cd 4 种重金属的生物富集特性。

参 考 文 献

- 王修林, 马延军, 郁伟军, 程 刚. 1998. 海洋浮游植物的生物富集热力学模型——对疏水性污染有机物生物富集双箱热力学模型. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 28(2): 299~306
- 王晓丽, 孙 耀, 张少娜, 王修林. 2004. 牡蛎对重金属生物富集动力学特性研究. 生态学报, 24(5): 1 086~1 090
- 乔庆林, 姜朝军, 徐 捷, 蔡友琼. 2006. 菲律宾蛤仔养殖水体中 4 种重金属安全限量的研究. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 25(1): 5~9
- 刘春颖, 张正斌, 张安慧, 郭博书, 宫海东, 刘莲生. 2005. 中国近岸部分海域海水中金属络合配位体浓度的研究. 海洋学报, 27(2): 54~62
- 刘琼玉, 洪华生, 蔡立哲. 1997. 重金属锌、铅对菲律宾蛤仔的急性毒性试验. 台湾海峡, 16(1): 50~54
- 汪小江, 黄庆国, 王连生. 1991. 生物富集系数的快速测定法. 环境化学, 10(4): 44~49
- 张少娜, 孙 耀, 宋云利, 于志刚. 2004. 紫贻贝(*Mytilus edulis*)对 4 种重金属的生物富集动力学特性研究. 海洋与湖沼, 35(5): 438~445
- 李学鹏, 励建荣, 段青源, 赵广英, 王彦波, 傅玲琳, 谢 晶. 2008. 泥蚶对重金属铜、铅、镉的生物富集动力学. 水产学报, 32(4): 592~600
- 陆超华, 周国君, 谢文造. 1999. 近江牡蛎对 Pb 的累积和排出. 海洋环境科学, 18(1): 33~38
- 陆超华, 谢文造, 周国君. 1998. 近江牡蛎作为海洋重金属 Cu 污染监测生物的研究. 海洋环境科学, 17(2): 17~23
- 陆超华, 谢文造, 周国君. 1998. 近江牡蛎作为海洋重金属镉污染指示生物的研究. 中国水产科学, 5(2): 79~83
- 陆超华, 谢文造, 周国君. 1998. 近江牡蛎作为海洋重金属锌污染监测生物. 中国环境科学, 18(6): 527~530
- 薛秋红, 孙 耀, 王修林, 张 军. 2001. 紫贻贝对石油烃的生物富集动力学参数的测定. 海洋水产研究, 22(1): 32~36
- 魏泰莉, 杨婉玲, 赖子尼, 张 琦, 刘 猛. 2002. 珠江口水域鱼虾类重金属残留的调查. 中国水产科学, 9(2): 172~176
- Banerjee, S., and Sugait, R. H. 1984. A simple method for determination bioconcentration parameters of hydrophobic compounds. Environ. Sci. Technol. 18(2): 79~81
- Boisson, F., Cotret, O., and Fowler, S. W. 1998. Bioaccumulation and retention of lead in the mussel *Mytilus galloprovincialis* following uptake from seawater. The Science of the Total Environment, 222(1-2): 56~61
- Clason, B., and Zauke, G. P. 2000. Bioaccumulation of trace metals in marine and estuarine amphipods: evaluation and verification of toxic kinetic models. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 57: 1 410~1 422
- Kahle, J., and Zauke, G. P. 2002. Bioaccumulation of trace metals in the copepod *Calanoides acutus* from the weddell sea (Antarctica): Comparison of two-compartment and hyperbolic toxicokinetic models. Aquatic Toxicology, 59(1-2): 115~135
- Kargin, F., and Cogun, H. Y. 1999. Metal interactions during accumulation and elimination of zinc and cadmium in tissues of the freshwater fish *Tilapia nilotica*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 63(4): 511~519
- Ritterhoff, J., and Zauke, G. P. 1997. Bioaccumulation of trace metals in Greenland Sea copepod and amphipod collectives on board ship: verification of toxicokinetic model parameters. Aquat. Toxicol. 40(1): 63~78
- Roesijadi, G. 1994. Behavior of metallothionein-bound metals in a natural population of an estuarine mollusca. Mar. Environ. Res. 38 (4) : 147~168
- Zauke, G. P., von Lemm, R., Meurs, H. G., and Butte, W. 1995. Validation of estuarine gammarid collectives (Amphipoda: Crustacea) as bio-monitors for cadmium in semi-controlled toxicokinetic flowthrough experiments. Environ. Pollut. 90(2): 209~219