

文蛤养殖水体中重金属 Cu 的安全限量值研究

李磊¹, 王云龙¹, 沈新强^{1,*}, 沈盎绿¹, 黄厚见²

1. 中国水产科学研究院东海水产研究所 农业部海洋与河口渔业资源及生态重点开放实验室 上海 200090
2. 上海海洋大学 上海 201306

摘要: 通过引入沉积物因子 构建海水-底泥-生物体体系 应用半静态双箱动力学模型在室内模拟了沉积物暴露条件下文蛤(*Meretrix meretrix*) 对重金属 Cu 的生物富集实验。通过对富集与排出过程中文蛤体内重金属 Cu 的动态监测和监测结果的非线性拟合 得到了文蛤富集 Cu 的动力学参数: 吸收速率常数 k_1 为 71.18、排出速率常数 k_2 为 0.03、生物富集系数(bioconcentration factors, BCF) 平均值为 4 283.86。对模型的拟合优度检验结果显示 沉积物暴露条件下文蛤对重金属 Cu 的生物富集数据符合双箱模型。根据双箱动力学模型推算出来的文蛤养殖水体中 Cu 的安全限量值为 $0.017 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。实验结果表明 沉积物暴露条件下双箱动力学模型在一定条件下是可以应用于文蛤富集动力学研究的。通过对比室内模拟实验与实地调查所得 BCF 发现本研究得出的 Cu 的安全限量值略高于现有标准。

关键词: 文蛤; 养殖水体; Cu; 限量值

文章编号: 1673-5897(2012)2-182-07 中图分类号: X171 文献标识码: A

Safety Levels of Cu in *Meretrix meretrix* Farming Water

Li Lei¹, Wang Yunlong¹, Shen Xinqiang^{1,*}, Shen Anglv¹, Huang Houjian²

1. Key and Open Laboratory of Marine and Estuarine Fisheries Resources and Ecology of Ministry of Agriculture, East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China
2. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

Received 7 July 2011 **accepted** 30 August 2011

Abstract: The biological enrichment experiment of the metal Cu in *Meretrix meretrix* exposed to sediment was simulated using the semi-static two-compartment kinetic model under an established water-sediment-organism system by introducing the sediment factor. The kinetic parameters in the process of accumulation and elimination were obtained by nonlinear curve fitting. The uptake rate constant (k_1), elimination rate constant (k_2) and bioconcentration factors (BCF) were 71.18, 0.03 and 4 283.86, respectively. It was found that the metal Cu concentration in *M. meretrix* exposed to sediment fit well with the two-compartment kinetic model. According to the two-compartment kinetic model, safety levels of Cu in *M. meretrix* farming water was $0.017 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The experimental results indicated that the semi-static two-compartment kinetic model was suitable for estimating the bioconcentration of the metal Cu in *M. meretrix*. Compared BCF obtained from test with that got from local surveys in *M. meretrix* farming water, safety levels of Cu in *M. meretrix* in this study is higher than standards.

Keywords: *Meretrix meretrix*; farming water; Cu; safety levels

收稿日期: 2011-07-07 录用日期: 2011-08-30

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金项目资助(CARS-48); 国家科技支撑计划资助项目(2009BADB7B02)

作者简介: 李磊(1985-) 男 研究实习员 研究方向: 海洋生态。E-mail: zheyilee@126.com;

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: xinqiang_shen@hotmail.com

文蛤 (*Meretrix meretrix*) 俗称车螺、花蛤、黄蛤、贵妃, 属于软体动物门 (Mollusca)、双壳纲 (Bivalvia)、帘蛤目 (Veneroida)、帘蛤科 (Veneridae)、文蛤属 (*Meretrix*) 属于滤食性海洋双壳贝类^[1]。文蛤地理分布较广, 是中国、朝鲜和日本常见的经济贝类, 一般生活在河口附近沿岸的潮间带以及浅海区的细沙或泥沙滩中, 其中江苏省如东县滩涂养殖区是中国最主要的文蛤产地之一。

重金属是海洋环境中主要的污染物之一, 具有来源广、残留时间长、易于沿食物链转移富集和在某些条件下可以转化为毒性更大的金属有机化合物的特点, 对水生生物和人体健康构成潜在生态危险^[2]。其中由于海洋贝类自身用于代谢的混合氧化系统存在缺陷, 体内污染物的释放较鱼类和甲壳类动物相比慢得多, 因此海洋贝类对重金属具有很高的富集能力^[3-4]。出于食品安全方面的考虑, 世界上许多国家与组织均对贝类体内重金属含量设置了一定的安全限量^[5]。但这并未从源头上解决问题, 海洋贝类作为一种移动性较差, 生活方式固定的软体生物, 生存环境由水相、沉积相和生物相构成, 三者都可能成为贝类富集重金属的“源”, 通过呼吸、渗透作用和摄食行为在贝类体内富集, 其中通过水体途径富集的重金属占主要地位^[6], 因此, 如果能够控制海洋贝类生存环境, 特别是水体中的重金属含量并给出其安全限量值, 则为从源头上解决贝类质量安全问题提供了一条可行的途径。

在重金属的生物富集过程中, 由于重金属的吸收、富集、分布和毒理作用等方面具有显著的内在联系, 故可据此构建生物富集模型, 从而研究体系中各主要因素的变化对生物富集与排出效应的影响^[7], 并在此基础上依据相关生物质量标准可以推算生物养殖水体中的重金属限量值。目前利用生物富集模型对海洋贝类养殖水体中重金属限量值的研究较少, 使用双箱动力学模型取得了系列相关成果^[3, 8-9], 但模型的应用过程仅考虑了水相条件, 均未将海洋生物, 特别是海洋贝类生存环境中的沉积物因子纳入研究体系中。研究^[10]表明重金属排入水体中, 有 60% ~ 90% 以上都结合在悬浮沉积物的表面, 并且可以通过一系列的物理、化学和生物过程重新被释放出来, 造成水环境的“二次污染”^[10-11]。因此, 有必要在水相和生物相的基础上引入沉积物这个环境因子, 以使实验环境更加贴近海洋贝类的实际生存环境, 对重金属的富集动力学研究也更加精确。

同时, 现有研究方法均为室内模拟, 缺乏室内模拟实验结果与养殖区水体中重金属含量的实地验证比较。

本文在文蛤的重金属富集实验过程中通过引入沉积物暴露条件, 克服海水-生物体系缺陷, 构建完整的海水-底泥-生物体体系。以双箱动力学模型为基础, 通过对富集与排出过程文蛤体内重金属 Cu 含量的动态检测和对检测结果的双曲线拟合, 以及对模型的拟合优度检验, 探讨了双箱动力学模型用于沉积物暴露条件下文蛤对 Cu 的富集动力学研究的可行性。并由此推算出贝类养殖水体中的重金属限量值。同时在 2010 年对江苏省如东县文蛤养殖区水体中和文蛤体内 Cu 的含量进行了 4 个季度的实地调查, 通过室内模拟实验与实地调查所得 BCF 的对比分析验证了本研究结论。研究旨在系统地认识文蛤的富集动力学参数特性, 提出新的文蛤养殖区水体中 Cu 限量值, 以期对贝类体内重金属生态风险的预测、从源头上控制和解决贝类质量提供参考。

1 材料和方法 (Materials and methods)

1.1 文蛤养殖水体中重金属现场调查

在江苏省如东县文蛤养殖区设置了 10 个调查站位, 分别在 2010 年 3 月、5 月、8 月和 11 月采集水样和文蛤样品, 对水体中和文蛤体内 Cu 的含量进行分析。

1.2 实验材料

实验于 2010 年 4 ~ 8 月份在江苏省启东市金海岸水产研究所进行, 实验所用海水从自然海区抽取, 盐度为 20‰ ~ 21‰, pH 为 8.10 ~ 8.40, 进行沉淀和过滤, 充分曝气 (24 h 以上) 后备用, 实验所用沉积物从文蛤自然生活处挖取, 沉积物中 Cu 的含量符合《海洋沉积物质量 I 类标准》^[12]。实验中 Cu 的浓度调节使用国家标准物质研究中心生产有效期内标准溶液, 配置实验海水中 Cu 的浓度时已扣除了海水中 Cu 的本底浓度。

受试文蛤采自江苏省南通市如东县养殖区, 实验前首先将文蛤流水驯养 7 d, 然后挑选健康个体进行实验。实验文蛤的个体规格为: 平均壳长 3.21 ± 0.10 cm, 壳宽 2.66 ± 0.19 cm, 体重 8.86 ± 1.38 g。

1.3 实验方法

实验分为富集和排出两个阶段, 其中积累实验为期 46 d, 排出实验为期 35 d, 实验使用 300 L 的聚乙烯质容器, 底部铺设 15 cm 厚的沉积物, 每个实验容器内放入 200 个文蛤。Cu 的实验浓度梯度设定

以《中华人民共和国渔业水质标准》^[13]为基础,设为 $10 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,包括2个实验组和1个对照组。24 h 充氧,溶氧量 $> 5.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,实验期间水温为 $20.1 \sim 22.7^\circ\text{C}$ 。

富集阶段: 实验采用半静态双箱法进行富集实验。整个实验过程中加入海水量为 200 L,每 24 h 换水 1 次,换水量为 100%,每天换水时及时将行为异常或者死亡的贝类捞出。实验开始前采集沉积物及生物样品,以检测其污染物本底值。贝类饵料单独培养,为单细胞小球藻,每次在换水时进行投喂 0.5 h,并重新按照设定的浓度配置实验溶液。分别于第 1、3、6、11、22、37 和 47 天采集沉积物样品和生物样品,每次取 4 只生物样,取出后,剥壳取软体组织,匀浆,迅速冷冻,以备分析。

排出阶段: 富集阶段结束后,将每个容器中的实验溶液全部排出,在流水条件下进行贝类体内富集污染物的排出实验。分别于第 49、52、58、70 和 82 天采集沉积物样品和生物样品,每次取 4 只生物样,取出后,剥壳取软体组织,匀浆,迅速冷冻,以备分析。

1.4 样品分析

水体、沉积物与生物样品中的 Cu 含量分析均采用原子吸收分光光度计(SOLLAR M6,美国 Thermo 公司)测定其含量,具体分析方法参照《海洋监测规范》^[14]。

1.5 双箱动力学模型

双箱动力学模型^[4,15-16]通常假设污染物在生物体内的生物富集可近似看作是污染物在水相和生物体之间的两相分配过程,同时考虑到了吸收和排出两个过程,即生物体从环境中吸收、富集并排出污染物。富集和排出过程可用一级动力学过程进行描述。

其主要描述如下图所示:

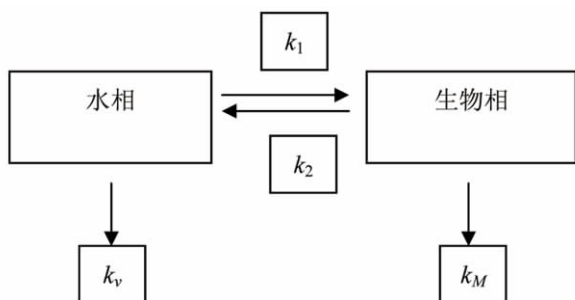


图1 生物富集双箱动力学模型

Fig. 1 Two-compartment kinetic model of bioconcentration

$$dC_A/dt = k_1 C_W - (k_2 + k_M) C_A \quad (2)$$

式中, k_1 为生物吸收速率常数; k_2 为生物排出速率常数; k_v 为挥发速率常数; k_M 为生物体的代谢速率常数; C_W 为水体污染物浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{Kg}^{-1}$); C_A 为生物体内污染物浓度 ($\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$)。在公式的推导过程中,忽略水体中污染物的自然挥发及生物体的代谢。

由方程(2)得出积累过程($0 < t < t^*$),其中 t^* 为积累阶段结束的天数(d):

$$C_A = C_0 + C_W k_1 / k_2 (1 - e^{-k_2 t}) \quad (3)$$

式中, C_0 为实验开始前生物体中的金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$)。排出过程($t > t^*$):

$$C_A = C_W k_1 / k_2 (e^{-k_2(t-t^*)} - e^{-k_2 t}) \quad (4)$$

由方程(3)、(4),通过非线性拟合得到 k_1, k_2 。理论中,平衡状态下,BCF 用以下公式得到:

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

1.6 模型的拟合优度检验

双箱动力学模型多用于水相,生物相两相条件下的富集动力学研究,对海水-沉积物-生物体3相条件下的模型应用还未见报道。故本文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,以此来验证双箱动力学模型应用于文蛤对 Cu 的富集动力学的可行性。显著性水平 α 取 0.05。

1.7 养殖水体中重金属限量值的确定

采用《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》^[17]标准中的 Cu 的安全限量 ($50 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$) 作为推算养殖水体中重金属限量值的依据,时间 t 定为 1 个养殖周期 365 d,根据公式(3)推算出文蛤养殖水体中相应海洋生物质量标准所对应 Cu 的安全限量值。其具体公式为:

$$C_{\text{水体限量值}} = (C_A - C_0) k_2 / k_1 (1 - e^{-k_2 t}) \quad (6)$$

2 结果与分析 (Results and analysis)

2.1 文蛤养殖区水体中和文蛤体内 Cu 含量

文蛤养殖区水体中 Cu 的平均浓度在 4 个季度间存在显著的差异 (One-way ANOVA, $F = 7.98$, $p < 0.05$, 表 1),其含量均符合《中华人民共和国渔业水质标准》^[13];文蛤体内 Cu 平均含量在 4 个季度间也存在显著的差异 (One-way ANOVA, $F = 18.99$, $p < 0.05$, 表 1),其含量均符合《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》的标准^[17]。BCF 值表现为 8 月 $>$ 5 月 $>$ 11 月 $>$ 3 月。

表 1 水体中 Cu 的平均浓度和文蛤体内 Cu 的平均含量
Table 1 Average concentrations of Cu in water
and *M. meretrix*

项 目	3 月	5 月	8 月	11 月
水体中 /($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	3.32	1.23	2.22	3.60
文蛤体内 /($\text{mg}\cdot\text{Kg}^{-1}$)	3.43	6.99	18.98	5.69
BCF	1 322.39	5 682.93	8 549.55	1 580.56

2.2 文蛤对 Cu 的生物富集拟合结果

通过对富集和排出过程中文蛤体内 Cu 的动态监测 并采用方程 (3) 和 (4) 对监测结果进行非线性拟合 得到文蛤对 Cu 的生物富集与排出曲线(图 2) 。

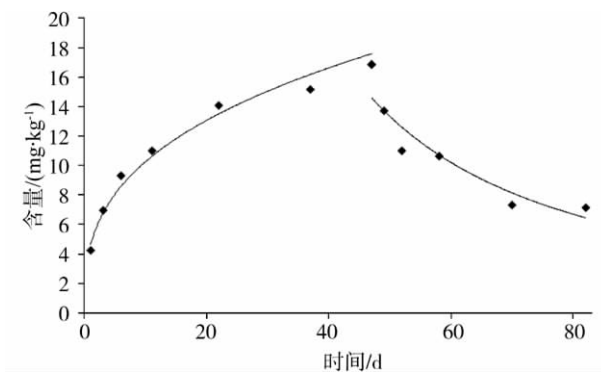


图 2 文蛤对 Cu 的生物富集曲线

Fig. 2 Bioconcentration curves of Cu in *M. meretrix*

2.3 文蛤对 Cu 的生物富集动力学参数

通过对 Cu 的富集与排出过程的曲线拟合 ,得到文蛤的吸收速率常数 $k_1 = 71.18$,排出速率常数 $k_2 = 0.03$,并通过方程 (5) 计算 $\text{BCF} = 2\,636.37$ 。

2.4 模型的拟合优度检验

在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 下 , χ^2 临界值为 12.592 ,实验拟合数据的 $\chi^2 = 0.40$,小于 12.592 ,说明由双箱动力学模型得到的预测值与实测值无显著性差异 ,拟合优度良好; 实验拟合数据的 $F = 159.42$,远大于临界值 5.99 ,这说明该模型拟合方程自变量与因变量之间关系显著 ,即文蛤对 Cu 的生物富集数据符合双箱动力学模型; 实验拟合曲线判定系数 $R^2 = 0.94$,说明该模型解释了因变量的 94% ,且显著性水平 p 低于 0.05 ,说明拟合程度良好。

2.5 养殖水体中重金属 Cu 限量值的推算

将文蛤对 Cu 的富集动力学参数 k_1 和 k_2 代入公式 (6) 可推算出采用《无公害食品水产品中有毒

有害物质限量》^[17] 为标准的文蛤养殖水体中 Cu 的安全限量值为 $0.017\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

3 讨论(Discussion)

3.1 模型应用的可行性分析

双箱动力学模型除了用于海洋贝类对重金属的生物富集研究外 ,也用于桡足类动物^[15] 和片足类生物^[16] 的富集实验 ,但以上研究均未考虑沉积物对研究可能产生的影响。目前研究已证明 ,重金属进入生物体内的途径主要有 3 种 ,分别是通过呼吸作用 ,由鳃进入体内 ,通过食物(包括底泥和食物链传递) 和体表渗透的作用进入体内^[18] 。而对于一些捕食蠕蠕生物或者底泥的无脊椎动物来说 ,来源于食物的重金属是其体内重金属生物富集的重要来源 ,甚至是主要的吸收方式^[19] 。如 Croteau 等^[18] 的研究表明 ,双壳贝类(*Corbicula fluminea*) 从食物中富集的 Cu 是从水中获得 Cu 的 2 倍; 马陶武等^[20] 通过对刮食底泥的软体动物铜锈环棱螺(*Bellamya aeruginosa*) 在沉积物暴露条件下重金属的生物积累研究表明 ,一定条件下 ,铜锈环棱螺通过摄食对沉积物中的重金属有明显的累积作用。本文实验下添加到水体中的 Cu 的浓度是固定的 ,但由于沉积物的存在 ,因此水体中主要存在溶解态和颗粒态(摄食颗粒和重新悬浮的沉积物微小颗粒) 两种形态的重金属。溶解态和食物颗粒态重金属均是双壳类动物累积重金属的重要途径^[21-22] 。本实验中文蛤的食物为单独培养的小球藻 ,并且与食沉积物的贝类习性不同 ,文蛤为滤食性生物 ,通过自身的出入水管道伸出沉积物面进行滤食 ,因此通过食物传递不是文蛤累积 Cu 的主要途径; 另据研究^[23] ,只有间隙水中的自由金属离子能直接产生生物效应 ,生物一般不能直接吸收沉积物颗粒中的重金属。吴星等^[24] 的研究也表明 ,即使是不同赋存形态颗粒态的重金属 ,其生物有效性也均非常弱 ,因此 ,悬浮的沉积物微小颗粒也非文蛤累积重金属的主要途径。故呼吸作用和渗透作用 ,即从水体中吸收重金属是本实验条件下文蛤累积 Cu 的主要途径。但沉积物-水界面的吸附-解吸行为仍然可能会影响 Cu 浓度的相对稳定。吸附-解吸是重金属在沉积物-水界面的物质传输过程之一 ,无论是水和悬浮沉积物之间还是底部沉积物和间隙水之间 ,都涉及到重金属在沉积物颗粒物相和水相之间的分配平衡过程即吸附-解吸作用^[25] ,尤其在低浓度时 ,吸附-解吸是重金属在固液两相中交换主要途径之一。本文中模型拟合优度检验结果表

明模型的应用情况良好,这说明沉积物-水界面的吸附-解吸行为对水体中重金属浓度影响不明显,即对文蛤累积和排出 Cu 影响较小。其主要原因是,在累积阶段,沉积物对重金属的吸附行为占据主导地位,且在很短时间内便可以达到吸附平衡^[26-28],即使有一定搅拌强度,而沉积物没有起动的情况下,其吸附状态与静止时沉积物吸附状态相近。图 3 表明,累积阶段沉积物中的 Cu 在经过明显的增加阶段后变动起伏较小。在排出阶段,沉积物对重金属的释放行为占据主导地位,研究表明^[28],释放行为在较短时间内便可达到释放平衡,释放平衡之前释放量占总释放量的 90% 以上,而后为释放平衡阶段,释放速率缓慢,只有少量重金属释放出来。本实验中重金属排出阶段在流水状态下进行,可认为生物在这一阶段只排出体内已富集的重金属,而从水体中重新吸收的金属近似为零,即沉积物释放的重金属对文蛤生活水体环境影响可以忽略,这种因生态习性而影响贝类富集重金属的主要来源在野外研究中也取得了类似的结果^[6]。综上所述,在本实验条件下,双箱动力学模型能够应用于沉积物暴露条件下文蛤对 Cu 的富集动力学研究。

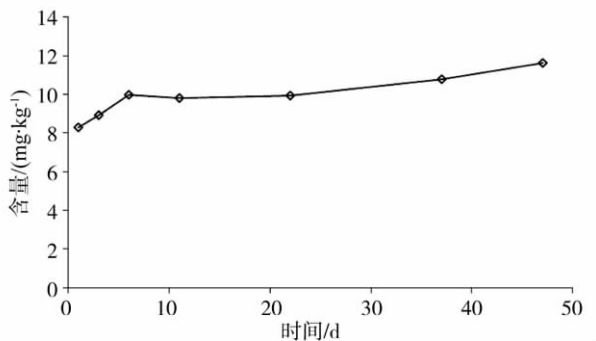


图 3 沉积物中 Cu 含量(湿重)与时间的关系

Fig. 3 Relationship between contents (wet weight) of Cu in sediment and time

3.2 室内模拟实验与实地调查所得 BCF 以及水产品养殖水体中重金属限量标准的对比分析

本实验过程为 4-8 月,与 5 月和 8 月实地调查所得 BCF 结果(表 1)相比较,室内模拟实验所得 BCF 明显低于实地调查所得 BCF,其原因是本文实验设置的 Cu 浓度高于养殖区水体中的 Cu 含量,这种 BCF 随着重金属浓度升高而降低的情况已经在众多研究中得到了验证^[4, 29-31]。此外,与本实验模型未考虑食物来源的 Cu 也有一定的联系,从表 1

可以看出,在文蛤摄食量大的 5 月及 8 月 BCF 值大约是 3 月及 11 月(摄食量低)的约 5~7 倍,这说明摄食来源中的重金属也是文蛤累积重金属的重要途径,这需要在后续研究中对模型进行改进。

相比较 GB 11607-89^[13]、NY/T 391-2000^[32] 和 NY 5052-2001^[33] 标准,本研究结果略高于上述 3 类标准,同时介于 GB 3097-1997^[34] I 类标准与 III 类标准之间(表 2)。与实地调查养殖区水体中 4 个季度 Cu 的平均浓度相比较,其值远远小于本文研究限量值,出产的文蛤质量符合《无公害食品水产品中有毒有害物质限量》标准^[17]。

表 2 文蛤养殖水体中 Cu 的安全限量值比较

Table 2 Comparison on safety concentrations limits of Cu in *M. meretrix* farming water

标 准	Cu 限量值/(mg·L ⁻¹)
中华人民共和国渔业水质标准(GB 11607-89)	0.01
绿色食品产地 环境质量标准(NY/T 391-2000)	0.01
无公害食品 海水养殖用水水质(NY 5052-2001)	0.01
I 类海水水质标准(GB 3097-1997)	0.005
II 类海水水质标准(GB 3097-1997)	0.010
III 类海水水质标准(GB 3097-1997)	0.050
本文研究限量值	0.017

通讯作者简介:沈新强(1951—),男,研究员,主要从事渔业生态与环境研究。

参考文献:

- [1] 徐凤山. 中国海洋双壳类软体动物[M]. 北京: 科学出版社, 1997, 1-333
- [2] Xu F S. Bivalve Mollusca of China Seas [M]. Beijing: Science Press, 1997, 1-333 (in Chinese)
- [3] Forstner U, Wittman G T W. Metal Contamination in Aquatic Environment [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979, 197-270
- [4] 乔庆林,姜朝军,徐捷,等. 双壳贝类养殖水体中 Hg、Pb、Cd 安全限量的研究[J]. 食品科学, 2007, 28(3): 38-41
- [5] Qiao Q L, Jiang C J, Xu J, et al. Safety levels of four heavy metals in *Ruditapes philippinarum* culturing water [J]. Food Science, 2007, 28(3): 38-41 (in Chinese)
- [6] Florence B. Bioaccumulation and retention of lead in the mussel *Mytilus galloprovincialis* following uptake from seawater [J]. Science of the Total Environment, 1998, 222(1-2): 55-61
- [7] 张卫兵,金明,周颖. 中国海洋贝类标准中重金属污染

- 指标的探讨[J]. 海洋科学. 2004, 28(2): 72-74
- Zhang W B, Jin M, Zhou Y. China's marine shellfish standard and heavy metal pollution index [J]. Marine Sciences, 2004, 28(2): 72-74 (in Chinese)
- [6] 徐韧, 杨颖, 李志恩. 海洋环境中重金属在贝类体内的蓄积分析[J]. 海洋通报, 2007, 26(5): 117-120
- Xu R, Yang R, Li Z E. Diffusion of heavy metals from marine environment to shellfish [J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(5): 117-120 (in Chinese)
- [7] 王亚伟, 魏源送, 刘俊新. 水生生物重金属富集模型研究进展[J]. 环境科学学报. 2008: 12-20
- Wang Y W, Wei Y S, Liu J X. Heavy metal bioaccumulation model of aquatic organisms: An overview [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(1): 12-20 (in Chinese)
- [8] 乔庆林, 姜朝军, 徐捷, 等. 菲律宾蛤仔养殖水体中4种重金属安全限量的研究[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2006, 25(1): 5-9
- Qiao Q L, Jiang C J, Xu J, et al. Safety levels of four heavy metals in *Ruditapes philippinarum* culturing water [J]. Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science Edition, 2006, 25(1): 5-9 (in Chinese)
- [9] 王剑萍, 李学鹏, 励建荣, 等. 泥蚶无公害养殖水体中铜、铅、镉安全限量研究[J]. 中国食品卫生杂志. 2008, 20(5): 434-437
- Wang J P, Li X P, Li J R, et al. Safety levels of Cu, Pb, Cd in non-pollution *Tegillarca granosa* of aquaculture water [J]. Chinese Journal of Food Hygiene. 2008, 20(5): 434-437 (in Chinese)
- [10] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 1-520
- [11] Vallee B L, Ulmer D D. Biochemical effects of mercury, cadmium, and lead [J]. Annual Review of Biochemistry, 1972, 41(1): 91-128
- [12] 中华人民共和国国家质量技术监督局. GB18668-2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002
- [13] 中华人民共和国国家质量技术监督局. GB11607-89 中华人民共和国渔业水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989
- [14] 中华人民共和国国家质量技术监督局. GB17378-2007 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007
- [15] Kahle J. Bioaccumulation of trace metals in the copepod *Calanoides acutus* from the Weddell Sea (Antarctica): Comparison of two-compartment and hyperbolic toxicokinetic models [J]. Aquatic Toxicology, 2002, 59(1-2): 115-135
- [16] Zauke G P, von Lemm R, Meurs H G, et al. Validation of estuarine gammarid collectives (Amphipoda: Crustacea) as biomonitors for cadmium in semi-controlled toxicokinetic flowthrough experiments [J]. Environmental Pollution, 1995, 90(2): 209-219
- [17] 中华人民共和国农业部. NY 5073-2006 无公害食品水产品中有毒有害物质限量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
- [18] Croteau M N, Luoma S N. Delineating copper accumulation pathways for the freshwater bivalve *Corbicula* using stable copper isotopes [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, 24(11): 2871-2878
- [19] Wang W X, Fisher N S. Delineating metal accumulation pathways for marine invertebrates [J]. Science of the Total Environment, 1999, (237-238): 459-472
- [20] 马陶武, 朱程, 王桂岩, 等. 锈环梭螺对沉积物中重金属的生物积累及其与重金属赋存形态的关系[J]. 应用生态学报, 2010, 21(3): 734-742
- Ma T W, Zhu C, Wang G Y, et al. Bioaccumulation of sediment heavy metals in *Bellamya aeruginosa* and its relations with the metals geochemical fractions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 734-742 (in Chinese)
- [21] Langston W J, Spence S K. Metal Speciation and Bioavailability in Aquatic Systems [M]. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1995, 407-478
- [22] Wang W X, Fisher N S. Assimilation of trace elements by the mussel *Mytilus edulis*: Effects of diatom chemical composition [J]. Marine Biology, 1996, 125(4): 715-724
- [23] Pagenkopf G K. Gill surface interaction model for trace-metal toxicity to fishes: Role of complexation, pH, and water hardness [J]. Environmental Science & Technology, 1983, 17(6): 342-346
- [24] 吴星, 贾永锋, 朱慧杰, 等. 沉积物中颗粒态镉的赋存形态对文蛤富集效率的影响[J]. 环境科学. 2010, 31(1): 179-184
- Wu X, Jia Y F, Zhu H J, et al. Influence of speciation on the bioavailability of particle-bound cadmium in sediments [J]. Environmental Science, 2010, 31(1): 179-184 (in Chinese)
- [25] Papelis C, Roberts P V, Leckie J O. Modeling the rate of cadmium and selenite adsorption on micro and mesoporous transition aluminas [J]. Environmental Science & Technology, 1995, 29(4): 1099-1108
- [26] 李改枝, 郭博书, 李景峰. 黄河水体表层沉积物与重金属交换吸附作用的研究[J]. 水处理技术, 2001, 27(5): 264-266
- Li G Z, Guo B S, Li J F. Study of liquid-solid interface interaction between surface layer sediments and Cu^{2+} , Pb^{2+} in the Yellow River [J]. Technology of Water Treatment, 2001, 27(5): 264-266
- [27] 任加国, 武倩倩. 海洋沉积物对重金属吸附特性研究[J]. 海洋环境科学, 2010, 29(4): 469-472
- Ren J G, Wu Q Q. Study on adsorption character of marine

- sediment on heavy metal [J]. Marine Environmental Science, 2010, 29(4): 469–472 (in Chinese)
- [28] 王继纲, 马启敏, 刘茜, 等. 渤海湾北部海域沉积物重金属 Cu、Zn 释放及动力学研究[J]. 海洋湖沼通报. 2007, (1): 69–73
- Wang J G, Ma Q M, Liu Q, et al. Release and kinetics of Cu, Zn from alongshore seabed sediments [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007, (1): 69–73 (in Chinese)
- [29] 张少娜, 孙耀, 宋云利, 等. 紫贻贝 (*Mytilus edulis*) 对 4 种重金属的生物富集动力学特性研究[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(5): 438–445
- Zhang S N, Sun Y, Song Y L, et al. Kinetic features of four heavy metals bioaccumulation of mussel *Mytilus edulis* [J]. Oceanologia ET Limnologia Sinica, 2004, 35(4): 438–445 (in Chinese)
- [30] 李学鹏, 励建荣, 段青源, 等. 泥蚶对重金属铜、铅、镉的生物富集动力学[J]. 水产学报, 2008, 32(4): 592–600
- Li X P, Li J R, Duan Q Y, et al. Kinetic study on the bioconcentration of three heavy metals (Cu, Pb, Cd) in *Te-gillarca granosa* Linnaeus [J]. Journal of Fisheries of China, 2008, 32(4): 592–600 (in Chinese)
- [31] 王晓丽, 孙耀, 张少娜, 等. 牡蛎对重金属生物富集动力学特性研究[J]. 生态学报. 2004, 24(5): 1086–1090
- Wang X L, Sun Y, Zhang S N, et al. Experiment researches on the kinetic characteristics of bioconcentration of heavy metals in *O. gigas Thunberg* [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(5): 1086–1090 (in Chinese)
- [32] 中华人民共和国农业部. NY/T 391-2000 绿色食品产地环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000
- [33] 中华人民共和国农业部. NY 5052-2001 无公害食品 海水养殖用水水质[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001
- [34] 中华人民共和国国家质量技术监督局. GB3097-1997 海水水质标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997 ◆