

3种常见海洋贝类对重金属 Hg Pb 和 Cd 的积累与释放特征比较

陈海刚, 林 钦, 蔡文贵, 马胜伟, 王许诺, 贾晓平

(中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业部渔业生态环境重点开放实验室, 广东 广州 510300)

摘 要: 为了比较不同种类的海洋双壳类软体动物对重金属的积累和释放特征, 本文分别以南海海域常见的 3 种经济贝类菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝为生物材料, 采用静态暴露染毒方式研究了重金属 Hg、Pb、Cd 在这 3 种海洋贝类体内的积累和释放特征。结果表明, 单一浓度的 Hg ($0.020\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、Pb ($0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)、Cd ($0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 重金属混合液暴露 15 d 后测得 Hg 和 Cd 在近江牡蛎体内的蓄积量最大, 整个积累阶段蓄积量的平均值分别为 $49.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 湿重和 $7.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 湿重, 而 3 种贝类体内蓄积的 Pb 含量差别不大, 其平均值在 $1.08\sim 1.85\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 湿重范围变化; 在排放阶段, 蓄积于 3 种贝类体内的 Pb 和 Hg 的含量在释放过程的第 3 d 就明显下降, 其释放比例最高可达 72%, 最低也有 12% 左右, 但之后一直到释放阶段结束, Pb 和 Hg 的含量基本维持在一个浓度水平而未有显著变化, 而 Cd 在 3 种贝类体内的含量始终未发现有明显改变。通过比较我们还发现, 随暴露时间延长重金属在 3 种生物体内积累量的增加趋势具有很好的一致性, 并且近江牡蛎对 Hg、Pb、Cd 的富集作用最为明显, 积累阶段其平均生物富集系数 (BCF) 分别为 2 435.6、11.3、76.5 远高于菲律宾蛤仔 (分别为 53.7、18.5、19.5) 和翡翠贻贝 (分别为 121.8、1.1、15.2)。

关键词: 海洋双壳类; 重金属; 积累; 释放; 生物富集系数

中图分类号: X503.225 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)03-1163-05

Comparisons on the Accumulation and Elimination Characteristic of Hg, Pb and Cd in Three Kinds of Marine Bivalve Molluscs

CHEN Hai-gang, LIN Qin, CAI Wen-gui, MA Sheng-wei, WANG Xu-nuo, JIA Xiao-ping

(Key laboratory of Marine Fishery Ecology Environment and Pollution Monitoring & Control Techniques, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: The accumulation and elimination characteristic of Hg, Pb and Cd in different marine bivalve molluscs were compared using three kinds of marine bivalve molluscs(*Ruditapes Philippinarum*, *Ostrea Rivularis*, *Perna uiridis*) that exposed to the mixed solutions of heavy metals with the concentration of $0.020\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Hg, $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Pb and $0.10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd, and then three polluted shellfishes exposed to heavy metals were transplanted to the non polluted seawater after 15 days exposure. During the exposure period, the highest uptake of Hg was observed in *Ostrea Rivularis* and the average content measured at 5 different times was at the concentration of $49.61\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wet weight (WW), then higher uptake was $2.89\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ WW in the *Perna uiridis*, the concentration of $1.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ WW Hg accumulated in *Ruditapes Philippinarum* was the lowest. The highest uptake of Cd was at the concentration of $7.66\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ WW accumulated in *Ostrea Rivularis*, then *Perna uiridis* and *Ruditapes Philippinarum* were $1.95\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ WW and $1.52\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ WW respectively. The uptake of Pb accumulated in three kinds of marine bivalve molluscs varied at the higher concentration ranged from $1.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ WW to $1.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ WW but no obvious difference. During the elimination process, the concentration of Pb and Hg accumulated in three kinds of marine bivalve molluscs significantly decreased on the 3rd day, with the elimination rate 12%~72%, then the concentration level changed little through the following elimination process; however, the concentration level of Cd accumulated in three shellfishes changed slightly. The uptake and accumulation of heavy metals in three kinds of marine bivalve molluscs showed a similar trend, increasing with the exposure time. The bioconcentration factor (BCF) for heavy metal Hg, Pb and Cd was most significant in *Ostrea Rivularis* among three kinds of marine bivalve molluscs, with the average BCF be-

收稿日期: 2007-07-18

基金项目: 科技部科研院所社会公益研究专项(2005DIB3J021)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金 (中国水产科学研究院南海水产研究所 资助项目 Q007TS18, 2007ZD07, 2007ZD08)

作者简介: 陈海刚 (1980—), 男, 河南西华人, 研究实习员, 主要从事渔业生态环境与保护方面的研究。E-mail: hgchenes@163.com

通讯作者: 贾晓平 E-mail: jiaxiaoping53@163.com

ing 2 435.6, 11.3 and 76.5 for Hg, Pb and Cd, respectively, therefore it was a more excellent bio-indicator of marine heavy metals pollution involved in marine environment monitoring and evaluation.

Keywords: marine bivalve molluscs; heavy metals; accumulation; elimination; bioconcentration factor (BCF)

环境污染物在生物体内的富集程度是反映污染物生物可利用性和评价污染物来源及污染程度的重要指标之一,因此选择分布广、适应性强、对多种污染物具有较强富集能力的生物指示种越来越受到人们的重视^[1]。在“贻贝观察”体系中,双壳贝类软体动物是比较理想的污染物指示种,在环境科学研究领域得到了广泛的应用^[2-3],它们被用于研究海洋环境中有机氯农药、石油烃和重金属在生物体内的含量和分布,分析比较这类污染物质对目标生物的毒性效应和作用机理、进行水产品和渔业资源的安全评价以及对调查区域内环境污染程度进行评价等^[4-6]。

目前国内外用于海洋环境污染监测和研究的双壳贝类品种主要有帘蛤科、牡蛎科和贻贝科的种类。不同的贝类由于其生理结构、生活习性等方面的差异可影响生物体内污染物的富集和释放程度,即使是同一种生物,也会由于受到多种环境因素的影响使生物蓄积水平有所变化^[7],但几种重金属在不同贝类体内的积累与释放规律差异的比较至今尚未见有相关报道。本实验选取南海海域比较常见的 3 种养殖贝类菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝,比较分析了它们在单一浓度 Hg、Pb、Cd 重金属混合溶液中的积累特征和在未污染海水中对蓄积于体内重金属的释放特征,研究结果对于我们筛选适合的海洋环境污染监测和评价的指示生物,保证海产品品质安全、保障贝类养殖业的健康发展和人们饮食健康等都具有十分重要的意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

试剂: HgCl₂ (汕头市西陇化工厂,分析纯), Pb (CH₃COO)₂·3H₂O (汕头市西陇化工厂,分析纯), CdCl₂·2.5H₂O (汕头市西陇化工厂,分析纯)。

实验用水:取自中国科学院深圳大亚湾海洋生物综合试验站蓄水池,经砂滤、沉淀后的海水。盐度 30 左右,pH 8.0 左右,平均水温 18.5℃左右。

实验生物: 菲律宾蛤仔 (*Ruditapes philippinarum*), 壳长 2.0~3.9 cm, 购自广东阳江海滩养殖区;近江牡蛎 (*Ostrea rivularis*), 壳长 9.8~13.7 cm, 购自深圳蛇口牡蛎养殖区;翡翠贻贝 (*Perna uiridis*), 壳

长 5.4~8.2 cm, 购自深圳大鹏澳海域水产养殖区。

1.2 毒性实验步骤

暴露实验和释放实验均在容积约为 7 m³ 左右的长方形育苗池中进行,暂养 3~5 d 后选取健康成熟个体进行实验。积累阶段在每个育苗池放入 100 只近江牡蛎、200 只翡翠贻贝和 600 只菲律宾蛤仔,设两个平行组和一个空白对照。称取适量试剂后用蒸馏水溶解、倒入水池配成所需浓度,其浓度分别为 Hg: 0.020 mg·L⁻¹, Pb: 0.10 mg·L⁻¹, Cd: 0.10 mg·L⁻¹。积累实验进行 15 d, 分别在实验的第 0、2、5、8、11、15 d 取牡蛎 4 只、贻贝 6 只和蛤仔 12 只,然后剥离其软组织部分装入塑料密封袋中,迅速冷冻保存。实验期间每天用适量小球藻投喂生物 1 次,并且昼夜充氧,以满足生物基本生理需要。

积累阶段结束后,将每个水池中剩余的实验生物全部置于另外 3 个水池中,直接用砂滤后的清洁海水暂养。实验期间海水每 5 d 换 1 次,分别在释放阶段开始后的第 3、6、12、18、25、35 d 进行取样,冷冻保存。释放过程进行 35 d,期间每天投喂饲料和昼夜曝气,满足生物基本生理需要。

1.3 重金属含量分析

取生物体软组织部分进行重金属含量分析,具体参照 GB 17387.4-1998 《海洋监测规范》生物体内重金属 Hg、Pb、Cd 的测定方法进行^[8]。用 AFS2201a 型双道原子荧光光度计测定生物体内 Hg 的含量,用日立 Z-2000 型原子吸收分光光度计测定生物体内 Pb 和 Cd 的含量。BCF 用以下公式计算得到:

$$BCF = \frac{C_A - C_0}{C_W}$$

式中: C₀ 为实验开始前生物体内重金属的含量, C_A 为实验开始后生物体内重金属的含量, C_W 为水体污染物浓度。

2 结果

2.1 重金属 Hg 在 3 种贝类体内的富集和释放特征

图 1 和图 2 分别显示了在单一浓度的 Hg、Pb、Cd 混合溶液中暴露以后, Hg 在 3 种海洋贝类体内的富集和释放特征。从图 1 可以发现, Hg 在 3 种生物体内富集作用较为明显, 并随暴露时间延长蓄积量先是逐

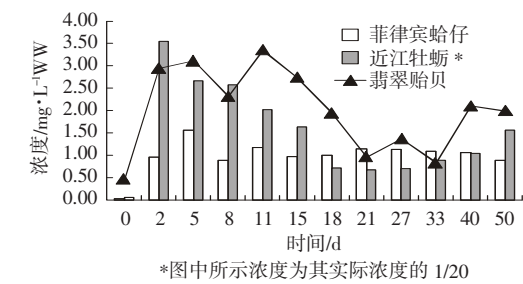


图 1 重金属 Hg 在 3 种海洋贝类体内的积累和释放特征
Figure 1 The accumulation and elimination characteristic of Hg in three kinds of marine bivalve molluscs

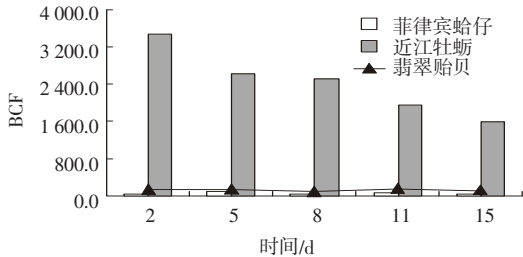


图 2 重金属 Hg 在 3 种海洋贝类体内的生物富集因子
Figure 2 Bioconcentration factor (BCF) for heavy metal Hg in three kinds of marine bivalve molluscs

渐增加,然后又有降低的趋势。菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝体内 Hg 的最大浓度高达 $1.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 湿重、 $70.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 湿重、 $3.11 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 湿重,分别是空白对照的 52.0、78.6 和 6.9 倍。图 2 表明,相对于其他两种生物,近江牡蛎对 Hg 的富集作用较为明显,其最大 BCF 为 3 493.8,远高于翡翠贻贝和菲律宾蛤仔。比较后发现,重金属 Hg 在近江牡蛎体内的含量是菲律宾蛤仔和翡翠贻贝体内含量的 20 倍左右。

在释放阶段,从图 1 中第 18 d 的 Hg 浓度变化可以发现,释放过程开始后近江牡蛎和翡翠贻贝体内的 Hg 就迅速下降,其浓度分别降低了 57% 和 29%,说明近江牡蛎和翡翠贻贝体内 Hg 的释放较快。但菲律宾蛤仔体内 Hg 的含量在释放阶段仅表现轻微的下降低趋势,并维持在一定的浓度值范围内,表明其体内 Hg 的释放较慢或排出较少。

2.2 重金属 Pb 在 3 种贝类体内的富集和释放特征

如图 3 和图 4 所示,分别显示了在 Hg、Pb、Cd 混合溶液暴露前后,Pb 在 3 种海洋贝类体内的富集和释放特征。从图 3 可以发现,Pb 在菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝体内积累量的增加趋势具有很好的一致性,随暴露时间延长而逐渐增加。在积累过程的第 15 d,菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝体内 Pb 的浓度分别为 2.60 、 1.78 、 $2.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 湿重,此时 3 种生物物的 BCF 分别为 24.6、13.4、1.7。从图 4 可以发现,菲

律宾蛤仔和近江牡蛎对 Pb 的富集作用比较明显,并随时间延长有轻微的增加趋势。比较 Pb 的 BCF 值大小,可以发现菲律宾蛤仔>近江牡蛎>翡翠贻贝。

从图 3 可以看出,菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝体内 Pb 的浓度在释放初始阶段迅速下降,在清洁海水中暴露 3 d 以后其浓度分别降低了 72%、12% 和 57%,表明 3 种生物对蓄积在体内的 Pb 释放速度较为明显。从第 21 d 开始,Pb 的含量变化呈现无规律的波动,但相对于空白对照,其含量仍维持在一个较高的浓度水平。

2.3 重金属 Cd 在 3 种贝类体内的富集和释放特征

图 5 显示了在 Hg、Pb、Cd 混合溶液暴露以后,Cd 在 3 种海洋贝类体内的富集和释放特征。同 Pb 在菲

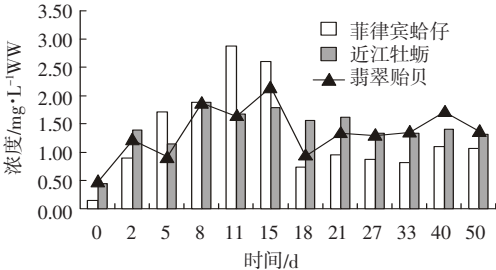


图 3 重金属 Pb 在 3 种海洋贝类体内的积累和释放特征
Figure 3 The accumulation and elimination characteristic of Pb in three kinds of marine bivalve molluscs

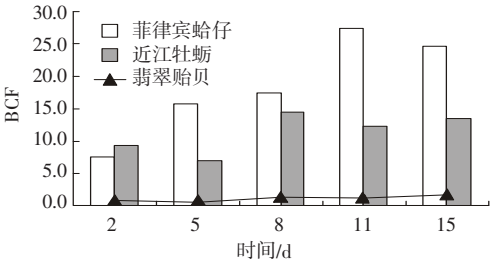


图 4 重金属 Pb 在 3 种海洋贝类体内的生物富集因子
Figure 4 Bioconcentration factor (BCF) for heavy metal Pb in three kinds of marine bivalve molluscs

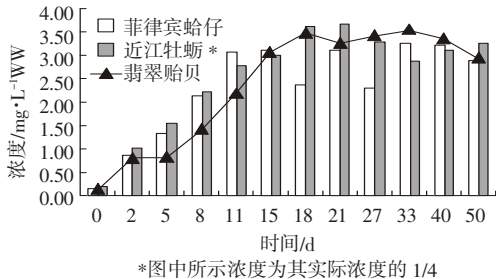


图 5 重金属 Cd 在 3 种海洋贝类体内的积累和释放规律
Figure 5 The accumulation and elimination characteristic of Cd in three kinds of marine bivalve molluscs

律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝体内积累量增加趋势相似,随暴露时间延长,Cd 含量逐渐增加,呈现比较明显的线性相关。但在释放阶段,3种生物体内的 Cd 含量却没有明显变化,表明蓄积于生物体内的 Cd 在清洁海水中很少排出。整个释放阶段菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝体内 Cd 含量维持在 2.85、13.15、3.31 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 湿重,分别是空白的 20、17 和 25 倍。

从图 6 可以看出,Cd 在 3 种生物体内的 BCF 大小为菲律宾蛤仔<近江牡蛎≤翡翠贻贝,并且随时间延长,菲律宾蛤仔和近江牡蛎的 BCF 都逐渐升高,表现出一定的生物适应过程,但翡翠贻贝 BCF 随时间的变化则相对比较稳定。

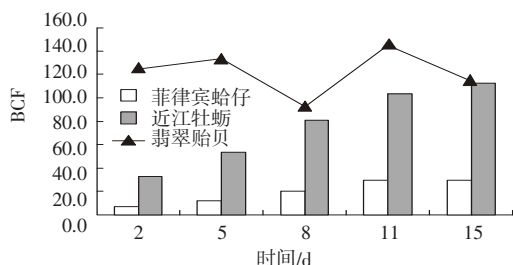


图 6 重金属 Cd 在 3 种海洋贝类体内的生物富集因子

Figure 6 Bioconcentration factor (BCF) for heavy metal Cd in three kinds of marine bivalve molluscs

3 讨论

有关双壳贝类实验室条件下积累重金属的研究,蔡立哲等^[9]、张少娜等^[10]、王晓丽等^[11]曾分别分析比较了重金属在蛤仔、贻贝和牡蛎体内的积累规律和释放规律。研究结果发现,双壳类软体动物对重金属的富集与水中离子浓度有关,在平衡状态时生物体内重金属含量随外部水体浓度的增加而增加,并且富集量随暴露时间的延长而升高。我们的研究结果也表明,随暴露时间延长,Hg、Pb、Cd 在菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝体内的蓄积量都有逐渐增加的趋势。但生物体对金属的富集系数 BCF 并不是随浓度增加而增强,在自然海区,菲律宾蛤仔对 Pb 的 BCF 可达 1 000 以上,刘明星等^[12]和蔡立哲等^[9]测得渤海和厦门海域菲律宾蛤仔对 Pb 的 BCF 分别为 1 900 和 1 128。在本实验中,3 种贝类均暴露于含 0.10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度 Pb 的混合溶液中,结果发现其对 Pb 的平均 BCF 分别为 18.5、11.3、1.1,远低于自然海水中生物对 Pb 的 BCF,张少娜等^[10]人的研究也指出紫贻贝体内 Hg、Pb、Cd、As 的 BCF 基本是随着外部水体金属浓度的增加而减少。

菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝分属于帘蛤

科、牡蛎科和贻贝科,是我国南北方沿海常见的经济贝类。牡蛎主要生活在水流变动较大的河流入海口区,通常附着于岩石底部,而贻贝和蛤仔主要生活在潮间带。当海域接受来自陆源的污染物时,潮间带和河口区生物最先接触这些物质,特别是营定居生活的贝类品种。因回避能力差、暴露时间较长、容易将有害物质富集于体内,因此污染物质在它们组织内的含量水平可以很好地指示海洋近岸环境污染程度^[2]。另外化合物生物效应的复杂性,使得污染物质在生物体内的积累和释放受生物因子(如种类、年龄、大小、性别、繁殖状态等)和非生物因子(如温度、盐度、pH、金属浓度、化学形态、暴露时间等)的影响^[13、14]。本研究比较了菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝对重金属 Hg、Pb、Cd 的积累和释放特征,从中可以发现,近江牡蛎对 Hg 和 Cd 都有较高的吸收,其含量相对于另外两种生物分别高达 20 倍和 4 倍。造成近江牡蛎对 Hg 和 Cd 具有较高积累量的原因可能在于近江牡蛎生物个体较大(其体长约是蛤仔和贻贝的 1.5~3 倍),过滤海水能力相对于蛤仔和贻贝要高很多,另外其自身生理特点可能也对 Hg 和 Cd 积累和释放有所影响。吕海燕等^[15]曾调查了浙江沿岸不同贝类生物体重金属含量的分布差异,结果发现贝类不同科间 Hg 含量以牡蛎科最高,其次为帘仔科,而贻贝科含量最低。同时我们也发现,在释放阶段近江牡蛎和翡翠贻贝对 Hg、Pb、Cd 的排出都较为迅速,表明这两种生物的生理特点可以较快地对金属浓度的改变作出反应,或者说可以比较敏感地反映周围环境中污染物质浓度的变化情况。一些研究发现,某些种类海洋生物能够根据海水中金属污染程度改变自己的生化和生理状态,从而引起吸收率和积累量的改变^[16]。另外 Kargin 等^[17]的研究指出重金属间会产生如协同、拮抗等复杂的作用,将使重金属积累量增加或减少,但本文只是研究了单一混合浓度条件下重金属在生物体内的积累和释放规律,因此 3 种重金属之间是否存在复杂的协同、拮抗作用还有待进一步研究。

近年来环境污染问题在我国日益严重并受到关注,特别是石油烃、重金属和农药污染在我国沿海地区尤为突出,海洋生物体内污染物的严重吸收和积累,已经对我国大部分海域水产品种的养殖、品质、安全和出口造成了不利影响,而海产品的质量直接关系人们的健康,因此,我国近岸养殖水域生态环境的质量监测与环境保护显得迫切重要。本文分析和比较结果提示我们,双壳贝类组织积累化学污染物的水

平与污染物质的生物利用性和浓度呈现一定的关系,比较适合作为指示生物监测海洋环境中的污染程度和水平。但与其他两种贝类比较,本研究中近江牡蛎对 Hg、Pb、Cd 的高积累和快排出的特征表明在海洋环境监测与评价中近江牡蛎更适合作为重金属污染的优先指示生物。

4 结论

(1) 经过比较发现,菲律宾蛤仔、近江牡蛎和翡翠贻贝对 Hg、Pb、Cd 都有较高的积累量,表明双壳类软体动物是一类能够比较真实反映沿海环境污染状况的比较敏感的指示生物。

(2) 3 种双壳类软体动物对 Hg、Pb、Cd 的积累与释放特征曲线具有相似的拟合度,表明尽管种类不同,但它们对金属的吸收机理可能是类似的,然而 3 种重金属之间是否存在复杂的协同、拮抗作用还有待进一步研究。

(3) Hg、Pb、Cd 在近江牡蛎体内的含量最高,可能和其个体较大,滤水量较多因而对重金属有较多吸收与积累有关。

(4) 尽管 3 种贝类都是比较常见的养殖品种,都可以作为指示环境污染程度的敏感生物,但近江牡蛎有对重金属高积累和快释放的特征,因此我们推荐优先选择近江牡蛎作为“贻贝观察”体系中的指示生物。

参考文献:

- [1] Phillips D J H, Rainbow P S. Biomonitoring of trace aquatic contaminants [M]. London: Elsevier Science, 1993.371.
- [2] Phillips D J H, Rainbow P S. Cosmopolitan biomonitors of trace metals [J]. *Mar Poll Bull*, 1993,26: 593–601.
- [3] 贾晓平, 林 钦, 李纯厚, 等. 南海贻贝观察: 广东沿海牡蛎体中 Zn 含量水平及其变化趋势[J]. *海洋环境科学*, 2000, 19(4):31–45.
- JIA Xiao-ping, LIN Qin, LI Chun-hou, et al. The south china sea mussel watch: concentrations and variation tendency of zinc in oysters collected from Guangdong coastal waters [J]. *Marine Environmental Science*, 2000,19(4):31–45.
- [4] 陈伟琪, 张路平, 王新红, 等. 厦门岛东部和闽江口沿岸经济贝类中持久性有机氯农药和多氯联苯的残留水平[J]. *台湾海峡*, 2001, 20(3):329–334.
- CHEN Wei-qi, ZHANG Luo-ping, WANG Xin-hong, et al. Residue levels of persistent organochlorine pesticides and polychlorinated biphenyls in shellfish samples from eastern Xiamen Island and Minjiang Estuary[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2001,20(3):329–334.
- [5] 林 钦, 贾晓平, 吕晓瑜. 珠江口海洋动物体的石油烃[J]. *海洋科学*, 1990,5:34–38.
- LIN Qin, JIA Xiao-ping, LU Xiao-yu. Petroleum hydrocarbons in marine

- animals from the pearl river estuary[J]. *Marine Science*, 1990,5:34–38
- [6] Meybeck M, Lestel L, Bonté P, et al. Historical perspective of heavy metals contamination (Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) in the Seine River basin (France) following a DPSIR approach (1950–2005) [J]. *Sci Total Environ*, 2007, 375(1–3):204–231.
 - [7] Valentine K M, Ronny B. Effects of temperature on scope for growth and accumulation of Cd, Co, Cu and Pb by the marine bivalve *Mytilus edulis* [J]. *Marine Environmental Research*, 2007, 63:219–233.
 - [8] 国家质量技术监督局. GB 17378.6–1998 海洋监测规范第 6 部分: 生物体分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1999. 7–46.
 - The state administration of quality technical supervision. GB17378.6–1998 "The specification for marine monitoring" Part 6:Organism analysis[M]. Beijing: Standards Press of China, 1999. 7–46.
 - [9] 蔡立哲, 洪华生, 洪丽玉. 菲律宾蛤仔对锌、铅的积累特征[J]. *环境科学学报*, 1999, 19(3):319–322.
 - CAI Li-zhe, HONG Hua-sheng, HONG Li-yu. Accumulation of zinc and lead in *Ruditapes philippinarum* and its tolerance[J]. *ACTA Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(3):319–322.
 - [10] 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 Shao-na, SUN Yao, SONG Yun-li, et al. Kinetic features of four heavy metals bioaccumulation of mussel *Mytilus Edulis*[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2004, 35(5):438–445.
 - [11] 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 Xiao-Li, SUN Yao, ZHANG Shao-na, 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.
 - [12] 刘明星. 渤海湾鱼类、甲壳动物、软体动物的痕量金属含量[J]. *环境科学学报*, 1983, (4):149–155.
 - LIU Ming-xing. The heavy metals contents in fish, crustacean, shellfish of the Bohai Bay[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1983,(4):149–155.
 - [13] Campbell P G C. Interactions between trace metals and aquatic organisms: a critique of the free-ion activity model[C]//Tessier A, Turner DR (Eds.). Metal speciation and bioavailability in aquatic systems. New York: Wiley, 1995. 45–102.
 - [14] 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.
 - [15] 吕海燕, 曾江宇, 周青松, 等. 浙江沿岸贝类生物体中 Hg、Cd、Pb、As 含量的分析[J]. *东海海洋*, 2001, 19(3):25–31.
 - LU Hai-yan, CENG Jiang-yu, ZHOU Qing-song, et al. Study on Hg, Cd, Pb and As in the shellfish along the coast of Zhejiang[J]. *Donghai Marine Science*, 2001,19(3):25–31.
 - [16] Blackmore G, Wang W X. Uptake and efflux of Cd and Zn by the green mussel *Perna viridis* after metal preexposure [J]. *Environ Sci Technol*, 2002, 36:989–995.
 - [17] Kargin F, Cogun H Y. Metal interactions during accumulation and elimination of zinc and cadmium in tissues of the freshwater fish *Tilapia nilotica*[J]. *Bull environ contamin toxicol*, 1999. 63(4):511–519.