

褶牡蛎对重金属的生物富集动力学特性研究

沈盎绿¹, 马继臻^{1,2}, 平仙隐¹, 沈新强¹

(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重点开放实验室, 上海 200090; 2.中国科学院海洋研究所, 山东青岛 266071)

摘要:应用实验生态方法研究了褶牡蛎对 8 种常见的重金属生物富集动力学特性, 得出了褶牡蛎对重金属的生物富集系数、生物半衰期以及生物富集曲线。结果表明, 到积累实验结束时褶牡蛎对 Pb、Zn、Cd、Cr、Ni 和 Hg 的生物富集系数分别是 15.60、26.53、60.06、7.61、5.82 和 47.88, 褶牡蛎对 Cu 和 As 的富集规律不明显, 生物富集曲线分别为 $y_{Pb}=0.4046e^{0.1168x} R^2=0.7378$, $y_{Zn}=0.0408x^2+0.2909x+59.969 R^2=0.9307$, $y_{Cd}=2.5263e^{0.0867x} R^2=0.7089$, $y_{Cr}=0.6832e^{0.0942x} R^2=0.8544$, $y_{Ni}=0.4178e^{0.0714x} R^2=0.6856$ 和 $y_{Hg}=0.0015x^2+0.0444x+0.0644 R^2=0.8301$, 以积累实验结束时的生物富集系数为基准, 褶牡蛎对这几种重金属的富集能力为 Cd>Hg>Zn>Pb>Cr>Ni; 到释放实验结束时褶牡蛎对 Pb、Zn、Cd、Cr 和 Hg 的生物半衰期分别是 23.1、13 031.7、67.7、32.9 和 36.1 d, 褶牡蛎是 Zn、Cd 和 Hg 的强的净积累者, 以释放实验结束时的生物半衰期为基准, 褶牡蛎对这几种重金属的排毒释放顺序为 Pb>Cr>Hg>Cd>Zn。

关键词:褶牡蛎; 重金属; 生物富集系数; 生物半衰期; 生物富集曲线

中图分类号: X503.225 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2009)04-0783-06

The Kinetic Characteristics of Bioconcentration of Heavy Metals in *Crassostrea plicatula*

SHEN Ang-lv¹, MA Ji-zhen^{1,2}, PING Xian-yin¹, SHEN Xin-qiang¹

(1.East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fisheries Sciences, Key Lab of Marine and Estuary Fisheries, Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, China; 2.Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Accumulation and elimination of eight heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni, As and Hg) in *Crassostrea plicatula* were investigated by using the controlled ecosystem experiment method. A semi-static system was maintained throughout a 15 day exposure period in different concentrations of heavy metals at (20±1) °C. During the uptake phase, water was changed on 5 days, and the test organism was fed with the blending of *Chlorella vulgaris* and *Platymonas* spp. each days. Four animals were sampled periodically and frozen immediately for the late analysis. Then, remaining *Crassostrea plicatula* were transferred to clean seawater for the elimination phase of 35 days, also, four animals were sampled and subjected to the same procedures described above. The BCF, biological half-life and bioconcentration curve of heavy metal in *Crassostrea plicatula* were gained. The results indicated that the BCF of Pb, Zn, Cd, Cr, Ni and Hg in *Crassostrea plicatula* were 15.60, 26.53, 60.06, 7.61, 5.82 and 47.88, respectively; The bioconcentration curve of Pb, Zn, Cd, Cr, Ni and Hg in *Crassostrea plicatula* were $y_{Pb}=0.4046e^{0.1168x} R^2=0.7378$, $y_{Zn}=0.0408x^2+0.2909x+59.969 R^2=0.9307$, $y_{Cd}=2.5263e^{0.0867x} R^2=0.7089$, $y_{Cr}=0.6832e^{0.0942x} R^2=0.8544$, $y_{Ni}=0.4178e^{0.0714x} R^2=0.6856$ and $y_{Hg}=0.0015x^2+0.0444x+0.0644 R^2=0.8301$, respectively, the ability of accumulation of Pb, Zn, Cd, Cr, Ni and Hg in *Crassostrea plicatula* were Cd>Hg>Zn>Pb>Cr>Ni. The biological half-life of Pb, Zn, Cd, Cr and Hg in *Crassostrea plicatula* were 23.1 d, 13 031.7 d, 67.7 d, 32.9 d and 36.1 d, respectively, *Crassostrea plicatula* was strong net accumulator of Zn, Cd and Hg, the ability of elimination of Pb, Zn, Cd, Cr and Hg in *Crassostrea plicatula* were Pb>Cr>Hg>Cd>Zn.

Keywords: *Crassostrea plicatula*; heavy metal; BCF; biological half-life; bioconcentration curve

“贻贝观察”技术于 20 世纪 60 年代在挪威等北欧国家提出, 70 年代末至 80 年代中期在美国^[1-2]等国家进一步发展, 目前澳大利亚^[3]、中国台湾^[4]、亚太地区^[5]

等国家和地区也进行了系统的监测, 并逐步发展和形成全球性的“国际贻贝观察”计划。我国于 1988—1993 年在南海尝试开展了“南海贻贝观察”技术体系基础研究工作, 初步探讨了“南海贻贝观察”体系的应用模式, 取得初步效果^[6]。

牡蛎是比较理想的重金属污染生物指示种, 它具有监测生物所需的属性。当前普遍用巨蛎属太平洋牡

收稿日期: 2008-06-20

基金项目: 科技部社会公益研究专项 (2005DIB3J021)

作者简介: 沈盎绿 (1980—), 男, 助理研究员, 研究方向为生态毒理学。

通讯联系人: 沈新强 E-mail: xinqiang_shen@hotmail.com

蛎(*O.gigas Thunberg*)作为温带海区重金属污染的指示种开展了不少研究^[7-9],以近江牡蛎作为热带海区重金属污染的指示种也进行了很多研究^[10-15]。本项目是中国国家社会公益研究专项“海洋贻贝观察”体系关键技术研究与应用子项目:东海区“海洋贻贝观察”体系关键技术研究与应用的一部分。东海区常见的经济牡蛎为褶牡蛎(*Crassostrea plicatula*),目前国内外在褶牡蛎对重金属的生物富集方面鲜有报道。本研究希望通过褶牡蛎对重金属的生物富集动力学特性研究,充实中国“海洋贻贝观察”体系,该体系的建立将使得我国的近岸海域污染监测体系与“国际贻贝观察”计划接轨,有利于加强国际合作,进一步促进和提高我国海域污染监测领域的技术水平。

1 材料与方法

1.1 材料

褶牡蛎取自浙江象山港,平均壳长(4.01±0.11)cm,壳宽(2.66±0.09)cm,体重(10.14±0.53)g;褶牡蛎为东海区常见经济贝类,实验前驯养两周,选择生长良好的个体进行实验。

实验用重金属主要包括铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)、铬(Cr)、镍(Ni)、砷(As)和汞(Hg),实验时配成混合浓度溶液,根据陆超华等^[10-15]在单一重金属对牡蛎污染情况的基础上,本实验配置各种重金属的理论混合浓度详见表 1。实验用重金属试剂购自中国标准化工公司。

表 1 重金属积累实验中混合液浓度
Table 1 Concentration of heavy metal in experiment

重金属	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Ni	As	Hg
混合液浓度/mg·L ⁻¹	0.10	0.10	0.50	0.10	0.40	0.10	0.10	0.02

1.2 方法

实验海水取自东海区,海水盐度为 25,实验期间水温控制在(20±1)℃,实验分为积累和排放两个部分,其中积累实验为期 15 d,释放实验为期 35 d。将贝类置于容积为 60 L 的水槽中进行试验,共计 100 只牡蛎,采用静态间歇换水方式,每 5 d 换 1 次水。实验期间每日投喂小球藻和扁藻的混合藻液 100 mL,以基本满足贝类的生长需要,实验期间充氧,使海水溶解氧保持在 6 mg·L⁻¹ 以上。对照组实验不添加重金属,其他与实验组一致。

贝类重金属积累实验时间为 15 d,取样间隔为第 0、2、5、8、11、15 d,每次随机抽取 4 只牡蛎进行分析,

样品量要满足分析需要;上述积累实验余下的个体置于干净海水中进行释放实验,因此,积累实验的第 15 d 贝类体内的重金属含量即为释放实验的第 0 d 贝类重金属体内含量,实验时间为 35 d,取样间隔为第 0、3、6、12、18、25、35 d,每次随机抽取 4 只牡蛎进行分析,样品量要满足分析需要。

1.3 样品分析

贝类生物体内重金属测定标准方法见 GB/T5009,牡蛎体内重金属含量单位为 mg·kg⁻¹,以湿重表示。具体见表 2。

表 2 贝类生物体内重金属测定方法
Table 2 Mensuration of heavy metal in organism of seashell

检测参数	方法	检验方法标准	检出限/ μg·g ⁻¹ ,湿重
铅	火焰原子吸收光谱法	GB/T5009.12—2003	0.05
铜	火焰原子吸收光谱法	GB/T5009.13—2003	0.01
锌	火焰原子吸收光谱法	GB/T5009.14—2003	0.005
镉	火焰原子吸收光谱法	GB/T5009.15—2003	0.006
总铬	石墨炉原子吸收光谱法	GB/T5009.123—2003	0.02
总汞	冷原子吸收光度法	GB/T5009.17—2003	0.000 5
砷	冷原子吸收光度法	GB/T5009.11—2003	0.005
镍	火焰原子吸收光谱法	GB/T5009.138—2003	—

1.4 数据统计方法

通过 Excel 2003 回归作图分析在不同时间段的贝类积累和排放规律;生物富集系数 BCF=[实验组生物体内重金属的含量(mg·kg⁻¹)-对照组生物体内重金属的含量(mg·kg⁻¹)]/实验水体中重金属的含量(mg·L⁻¹)。

2 结果与分析

2.1 重金属在褶牡蛎体中的积累效应

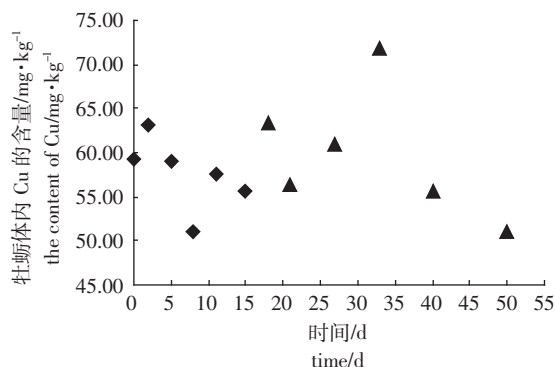
曝毒过程中,褶牡蛎软组织中各重金属组分的含量变化、生物富集情况和积累曲线见表 3、图 1~图 8。

在曝毒过程中,重金属 Cu 在牡蛎体内的积累规

表 3 褶牡蛎对 8 种重金属的生物富集系数(BCF)
Table 3 BCF of heavy metal in *Crassostrea plicatula*

实验时间/d	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Ni	As	Hg
2	—	2.58	5.31	30.23	0.65	2.70	—	14.57
5	—	9.64	1.63	17.92	1.19	3.87	—	—
8	—	13.10	10.09	47.53	1.55	4.72	—	25.87
11	—	9.60	20.33	53.52	1.67	9.56	—	43.26
15	—	15.60	26.53	60.06	7.61	5.82	—	47.88

注:“—”表示没有规律无法计算。



注:图中前15 d为累积实验,15~50 d为排放实验,下同。

图1 牡蛎对Cu的生物富集情况

Figure 1 Bioconcentration of Cu in *Crassostrea plicatula*

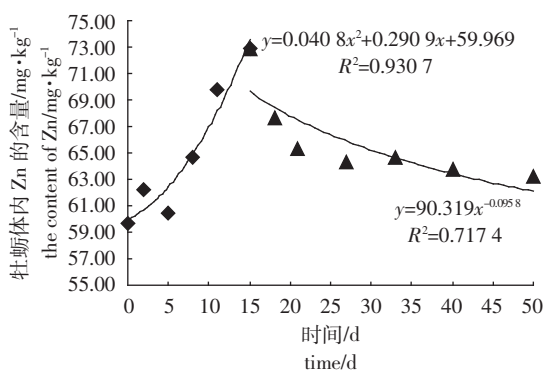


图3 牡蛎对Zn的生物富集曲线

Figure 3 Bioconcentration of Zn in *Crassostrea plicatula*

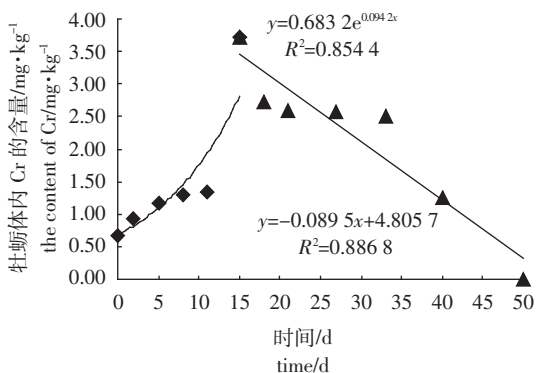


图5 牡蛎对Cr的生物富集曲线

Figure 5 Bioconcentration of Cr in *Crassostrea plicatula*

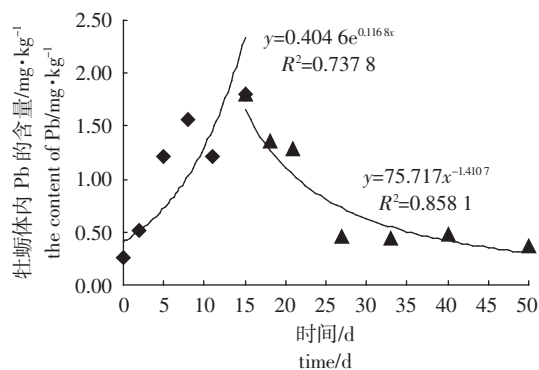


图2 牡蛎对Pb的生物富集曲线

Figure 2 Bioconcentration of Pb in *Crassostrea plicatula*

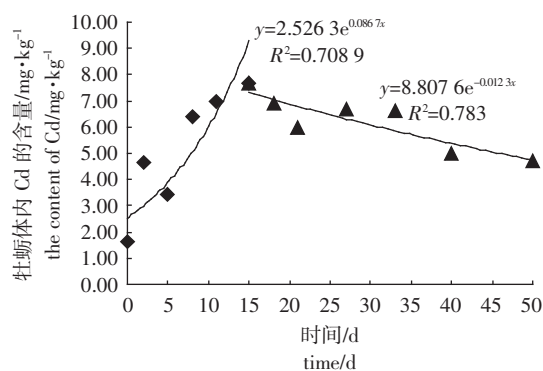


图4 牡蛎对Cd的生物富集曲线

Figure 4 Bioconcentration of Cd in *Crassostrea plicatula*

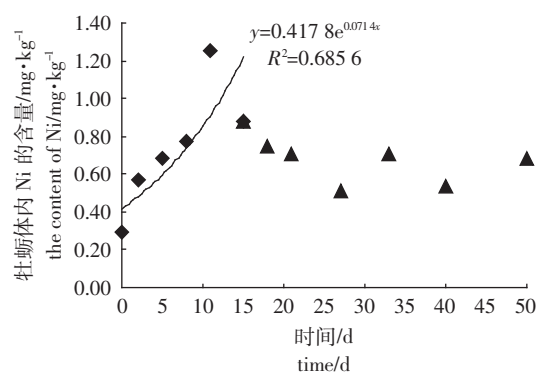


图6 牡蛎对Ni的生物富集曲线

Figure 6 Bioconcentration of Ni in *Crassostrea plicatula*

律并不明显(图1),在积累的各个时间内牡蛎体内Cu的含量在51.11~63.19 mg·kg⁻¹之间,变化幅度并不大,说明牡蛎本身已经含有相当多Cu的情况下对水体中Cu的富集不明显。重金属Pb在牡蛎体内积累规律整体上是呈一直上升趋势(图2),从牡蛎对Pb的BCF值可以看出,前2 d积累速率一般,BCF值为2.58,到第5 d时积累速率加快,后来积累速率有所减缓,快到积累实验结束时,积累速率又有所增加,BCF

值达到15.60,最后牡蛎体内Pb的含量达到1.81 mg·kg⁻¹,为牡蛎体内背景值的7.24倍。重金属Zn在牡蛎体内的积累规律整体上是呈一直上升趋势(图3),前5 d积累速率较慢,BCF值在6.0以下,后10 d积累速率较快,BCF值增至20.0以上,到第15 d时,牡蛎体内Zn的含量上升至72.88 mg·kg⁻¹,为牡蛎体内背景值的1.22倍。重金属Cd在牡蛎体内的积累规律整体上和Zn比较相似(图4),但是BCF值较高,到第

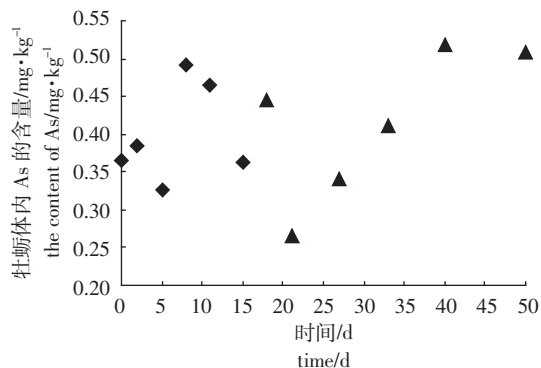


图7 牡蛎对 As 的生物富集情况

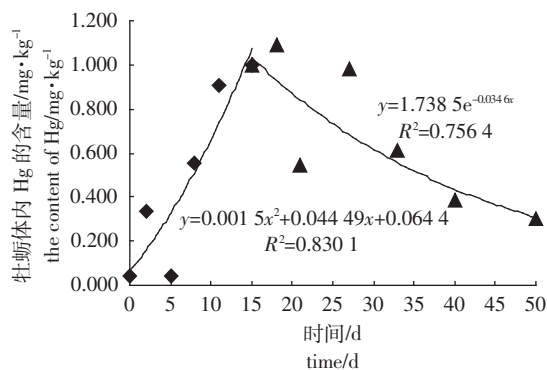
Figure 7 Bioconcentration of As in *Crassostrea plicatula*

图8 牡蛎对 Hg 的生物富集曲线

Figure 8 Bioconcentration of Hg in *Crassostrea plicatula*

15 d 时达到 60.06, 重金属 Cd 在牡蛎体内的含量达到 $7.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为牡蛎体内背景值的 4.64 倍, 说明整个积累实验过程中重金属 Cd 在牡蛎体内富集的较多。重金属 Cr 在牡蛎体内前 11 d 积累较慢(图 5), BCF 值都在 2.0 以下, 最后 4 d 积累速率大大加快, BCF 值达到 7.61, 重金属 Cr 在牡蛎体内的含量达到 $3.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为牡蛎体内背景值的 5.49 倍。重金属 Ni 刚开始在牡蛎体内积累较快(图 6), 于第 11 d 达到最高, BCF 值为 9.56, 牡蛎体内 Ni 的含量为 $1.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为牡蛎体内背景值的 4.20 倍。重金属 As 在牡蛎体内的积累规律并不明显(图 7), 在积累的各个时间段内, 牡蛎体内 As 的含量在 $0.33 \sim 0.49 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 变化幅度并不大, 说明牡蛎对 As 的富集并不是很明显。重金属 Hg 前 5 d 在牡蛎体内积累速率有起伏, 后来一路上升(图 8), 到积累实验结束时 BCF 值为 47.88, 牡蛎体内 Hg 的含量为 $0.998 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 为牡蛎体内背景值的 24.95 倍, 说明牡蛎对重金属 Hg 具有较强的富集能力。总的来说, 褶牡蛎对 6 种重金属的生物富集系数的值各有大小, 变化趋势也各有不同, 说明不同的重金属在褶牡蛎体内富集的差异性, 以积累实验结束时的生物富集系数为基准, 褶牡蛎对这几种重金属的富集能力为 $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni}$ 。

2.2 重金属在褶牡蛎体中的释放效应

曝毒后的褶牡蛎, 在释放过程中其软组织中各重金属组分的含量变化、衰减规律分别见表 4 和图 1~图 8。

在释放过程中牡蛎体内的重金属 Cu、Ni 和 As 衰减规律不明显(图 1、6 和 7)。重金属 Pb 的衰减较有规律, 其衰减回归曲线见图 2、表 4, 生物半衰期 $T_{1/2}$ 为 23.1 d, 到释放实验结束时, 牡蛎体内 Pb 的含量由积累实验结束时的 $1.81 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降为 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,

表 4 褶牡蛎的衰减规律以及生物半衰期

Table 4 The rule of attenuation and biological half-life in *Crassostrea plicatula*

重金属	衰减回归曲线	R^2	$T_{1/2}/\text{d}$
Cu	—	—	—
Pb	$y=75.717x^{-1.4107}$	0.858 1	23.1
Zn	$y=90.319x^{-0.0958}$	0.717 4	13 031.7
Cd	$y=8.8076e^{-0.0123x}$	0.783 0	67.7
Cr	$y=-0.0895x+4.8057$	0.886 8	32.9
Ni	—	—	—
As	—	—	—
Hg	$y=1.7385e^{-0.0346x}$	0.756 4	36.1

注: “—”表示没有规律。

降幅达 $1.44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 释放了原负载量的 79.6%, 同时该值是牡蛎背景值的 1.48 倍, 即经过 35 d 的释放实验, 牡蛎体内的 Pb 可以释放大部分, 说明牡蛎是 Pb 的净积累者。牡蛎体内重金属 Zn 的衰减也较有规律, 其衰减回归曲线见图 3、表 4, 生物半衰期 $T_{1/2}$ 为 13 031.7 d, 到释放实验结束时, 牡蛎体内 Zn 的含量由积累实验结束的 $72.88 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降为 $63.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅为 $9.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 释放了原负载量的 13.3%, 同时该值是牡蛎背景值的 1.06 倍, 说明经过 35 d 的释放试验, 牡蛎体内的 Zn 可以部分释放, 牡蛎是 Zn 的强净积累者。牡蛎体内重金属 Cd 的衰减也较有规律, 其衰减回归曲线见图 4、表 4, 生物半衰期 $T_{1/2}$ 为 67.7 d, 到释放实验结束时, 牡蛎体内 Cd 的含量由积累试验结束的 $7.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降为 $4.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅为 $2.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 释放了原负载量的 38.5%, 虽然牡蛎体内 Cd 的残留量有所减少, 但是该值是牡蛎背景值的 2.85 倍, 说明经过 35 d 的释放实验, 牡蛎体内的 Cd 只能部分释放, 牡蛎也是 Cd 的强的净积累者。牡蛎

体内重金属 Cr 的衰减也较有规律,其衰减回归曲线见图 5、表 4,生物半衰期 $T_{1/2}$ 为 32.9 d,到释放实验结束时,牡蛎体内 Cr 的含量由积累实验结束的 $3.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降为 0,降幅 100%,说明经过 35 d 的释放实验,牡蛎体内的 Cr 可以释放绝大部分。牡蛎体内重金属 Hg 的衰减也较有规律,其衰减回归曲线见图 8、表 4,生物半衰期 $T_{1/2}$ 为 36.1 d,到释放试验结束时,牡蛎体内 Hg 的含量由积累试验结束的 $0.998 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降为 $0.298 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降幅为 $0.700 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,释放了原负载量的 70.1%,虽然牡蛎体内 Hg 的残留量减少不少,但是该值是牡蛎背景值的 7.45 倍,说明经过 35 d 的释放实验,牡蛎体内的 Hg 只能部分释放,牡蛎也是 Hg 的强的净积累者。总的来说,褶牡蛎对这几种重金属的生物半衰期的值各有大小,变化趋势也各有不同,说明不同的重金属在褶牡蛎体内释放的差异性,以释放实验结束时的生物半衰期为基准,褶牡蛎对这几种重金属的排毒释放顺序为 $\text{Pb} > \text{Cr} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{Zn}$ 。

3 讨论

3.1 褶牡蛎和其他牡蛎对重金属的积累规律比较

在积累实验过程中,褶牡蛎体内的各个重金属含量随着积累时间的增加而上升,基本趋势比较一致。褶牡蛎对 6 种重金属的生物富集系数的值各有大小,变化趋势也各有不同,说明不同重金属在褶牡蛎体内富集的差异性,以积累实验结束时的生物富集系数为基准,褶牡蛎对这几种重金属的富集能力为 $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cr} > \text{Ni}$ 。翁焕新等^[14]研究得出在天然环境中牡蛎(*Crassostrea virginica*)对重金属的吸收并在体内的积累具有明显的选择性,这反映了牡蛎的新陈代谢对重金属的生物积累起着重要的作用,其中 Cd 在牡蛎体内容易富集与牡蛎贝壳主要为 Ca 有关,海水中 Cd 离子都有机会以替代 Ca 离子的方式进入牡蛎生物体内,所以牡蛎对 Cd 的富集能力较强,另外牡蛎在生理上对 Pb 和 Cr 有排斥作用。本实验中虽然 Cr 和 Pb 的浓度较高,但是在牡蛎体内的富集程度却较少,其中原因可能与翁焕新等研究的结果相一致。另外,陆超华等^[10-13]在研究近江牡蛎对 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的富集特性时发现,从对重金属的累积速率来看,近江牡蛎对这 4 种重金属的富集能力顺序为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Pb}$,与本实验结果有所差异,这可能是由于不同牡蛎种类,且牡蛎体内各种重金属的本底值不同所致,但是对 Pb 的富集能力相对来说均较差。其中王晓丽

等^[15]研究了牡蛎(*O. gigas Thunberg*)对 Hg、Cd、Pb 和 As 这 4 种重金属生物富集动力学研究,得出牡蛎对这 4 种重金属的富集能力顺序为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{As}$,由于两个实验牡蛎品种不一样,以及设置的重金属浓度也有较大的差异,因此得出以上不同的结果,但是整体上看牡蛎对 Hg、Cd 这两种重金属的富集能力较强,这可能是 Hg、Cd 的毒性较大,很容易与生物体内巯基结合有关,对 Pb、Cr 的富集能力则较弱。另外根据吴坚^[16]和 Roesijdsi^[17]等描述,软体动物解毒机制在于体内金属硫蛋白的作用,重金属能诱导金属硫蛋白合成,其作用是调节金属在体内的平衡,如果进入软体动物内细胞的重金属离子较高,且重金属使巯基组氨酸三甲基内盐生理学积累达到饱和,重金属离子的超量能激发新的巯基组氨酸三甲基内盐的 mRNA 的转译。这样,虽然重金属在细胞中可能得到异常高的富集,但大部分重金属是以一种无毒形式结合于新合成的巯基组氨酸三甲基内盐上。

3.2 褶牡蛎和其他牡蛎对重金属的释放规律比较

在排毒实验中,重金属在褶牡蛎与厚壳贻贝体内的衰减趋势基本一致,随着排毒实验时间的延长,体内重金属的含量也随之降低。褶牡蛎对这几种重金属的生物半衰期的值各有大小,变化趋势也各有不同,说明不同的重金属在褶牡蛎体内释放的差异性,以释放实验结束时的生物半衰期为基准,褶牡蛎对这几种重金属的排毒释放顺序为 $\text{Pb} > \text{Cr} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{Zn}$ 。陆超华等^[10-13]在研究近江牡蛎对 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的释放特性时发现,近江牡蛎是 Cd、Cu、Pb 和 Zn 的净积累者,近江牡蛎对这 4 种重金属的排毒释放顺序为 $\text{Pb} > \text{Cd} > \text{Cu} > \text{Zn}$,这与本实验研究结果基本一致,只是生物半衰期的大小有所不同,特别是对 Zn 的排出特性很相似,均较难排出。王晓丽等^[15]的研究结果表明以生物半衰期为指标,牡蛎(*O. gigas Thunberg*)对这 4 种重金属的排毒释放顺序为 $\text{As} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cd}$,牡蛎是 Hg、Cd、Pb 的强净积累者,这与本研究结果也颇类似,同时也说明越是牡蛎容易富集的重金属越不容易排出,越是牡蛎生理上排斥的重金属越是容易排出。

参考文献:

- [1] Farrington J W, Goldberg E D, Risebrough R W, et al. U. S. "Mussel Watch" 1976-1978: an overview of trace-metal, DDE, PCB, hydrocarbon, artificial radionuclide data[J]. *Environ Sci Technol*, 1983, 17: 490-496.
- [2] O'Connor T P. The national oceanic and atmospheric administration (NOAA) national status and trends mussel watch program[C]. national

- monitoring of chemical contamination in the coastal United States// Cothorn C R, Ross N P. (Eds.), Environmental Statistics, Assessment, and Forecasting. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, 1994: 331-349.
- [3] Peter Scanes. 'Oyster Watch': monitoring trace metal and organochlorine concentrations in Sydney's coastal waters[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1996, 33: 226-238.
- [4] Ming-Shiou Jeng, Woei-Lih Jeng, Tsu-Chang Hung, et al. Mussel watch: a review of Cu and other metals in various marine organisms in Taiwan, 1991-1998[J]. *Environmental Pollution*, 2000, 110: 207-215.
- [5] Monirith I, et al. Asia-Pacific mussel watch: monitoring contamination of persistent organochlorine compounds in coastal waters of Asian countries[J]. *Mar Pollut Bull*, 2003, 46: 281-300.
- [6] 陆超华. 近江牡蛎作为重金属污染生物指示种的初步研究[J]. 台湾海峡, 1994, 13(1): 14-20.
- LU Chao-hua. *Oyster Ostrea rivularis* as an indicator of heavy metals pollution[J]. *Journal of Oceanography of Taiwan Strait*, 1994, 13(1): 14-20.
- [7] B Gagnaire, H Thomas-Guyon, T Renault. In vitro effects of cadmium and mercury on *Pacific oyster, Crassostrea gigas* (Thunberg), haemocytes[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2004, 16: 501-512.
- [8] Maria Clara Reboucas do Amaral, Mauro de Freitas Rebelo, Joao Paulo Machado Torres, et al. Bioaccumulation and depuration of Zn and Cd in mangrove oysters (*Crassostrea rhizophorae*, Guilding, 1828) transplanted to and from a contaminated tropical coastal lagoon[J]. *Marine Environmental Research*, 2005(59): 277-285.
- [9] Gautier Damiens, Catherine Mouneyrac, Franc, et al. Metal bioaccumulation and metallothionein concentrations in larvae of *Crassostrea gigas* [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 140: 492-499.
- [10] 陆超华, 谢文造, 周国君. 近江牡蛎作为海洋重金属 Cu 污染监测生物的研究[J]. 海洋环境科学, 1998, 17(2): 17-23.
- LU Chao-hua, XIE Wen-zao, ZHOU Guo-jun. Study on *Crassostrea rivularis* as a biomonitor for copper pollution in sea water[J]. *Marine Environmental Science*, 1998, 17(2): 17-23.
- [11] 陆超华, 谢文造, 周国君. 近江牡蛎作为海洋重金属镉污染指示生物的研究[J]. 中国水产科学, 1998, 5(2): 79-83.
- LU Chao-hua, XIE Wen-zao, ZHOU Guo-jun. Studies on *Crassostrea rivularis* as a biological indicator of cadmium pollution[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1998, 5(2): 79-83.
- [12] 陆超华, 谢文造, 周国君. 近江牡蛎作为海洋重金属锌污染监测生物[J]. 中国环境科学, 1998, 18(6): 527-530.
- LU Chao-hua, XIE Wen-zao, ZHOU Guo-jun. *Crassostrea rivularis* as a biomonitor of zinc pollution of seawater[J]. *China Environmental Science*, 1998, 18(6): 527-530.
- [13] 陆超华, 周国君, 谢文造. 近江牡蛎对 Pb 的累积和排出 [J]. 海洋环境科学, 1999, 18(1): 33-38.
- LU Chao-hua, ZHOU Guo-jun, XIE Wen-zao. Accumulation and elimination of *Crassostrea rivularis* to lead[J]. *Marine Environmental Science*, 1999, 18(1): 33-38.
- [14] 翁焕新, Presley B J. 重金属在牡蛎中生物累积及其影响因素的研究[J]. 环境科学学报, 1996, 16(1): 51-58.
- WENG Huan-xin, Presley B J. Bioaccumulation of heavy metals in oyster (*Crassostrea virginica*) [J]. *Acta Scientiae Circumstance*, 1996, 16(1): 51-58.
- [15] 王晓丽, 孙 耀, 张少娜. 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.
- [16] 吴 坚. 微量金属对海洋生物的生物化学效应[J]. 海洋环境科学, 1991, 10(2): 58-64.
- WU Jian. Biochemical effects of marine organism by trace metal[J]. *Marine Environmental Science*, 1991, 10(2): 58-64.
- [17] Roesijadi G. Behavior of metallothionein-bound metals in a natural population of an estuarine mollusea[J]. *Mar Environ Res*, 1994, 38(4): 147-168.