

# 重金属在小球藻-菲律宾蛤仔食物链上的传递与累积

汪远丽<sup>1,2</sup> 曲克明<sup>2\*</sup> 单宝田<sup>1</sup> 崔正国<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100)

(<sup>2</sup> 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

**摘 要** 在受控实验条件下,模拟了重金属铜、铅、镉在海水-小球藻-菲律宾蛤仔食物链中的累积和传递,测定了小球藻、菲律宾蛤仔对铜、铅、镉的富集系数以及铜、铅、镉在小球藻-菲律宾蛤仔食物链上的传递系数。结果显示,随着海水中重金属浓度的增加,小球藻、菲律宾蛤仔体内的重金属含量逐渐增大,小球藻对铜、铅、镉离子的富集系数变化范围分别为 1 626~3 161、3 295~7 799、5 438~9 313;蛤仔对 Cu、Pb、Cd 的富集系数变化范围分别为 364~821、1 089~1 936、245~736;生物传递因子变化范围分别为 0.22~0.26、0.25~0.46、0.03~0.14。在本实验条件下,小球藻对 Cu、Pb、Cd 的富集系数远大于菲律宾蛤仔,Cu、Pb、Cd 在小球藻-菲律宾蛤仔食物链上没有明显的生物放大效应。

**关键词** 小球藻 菲律宾蛤仔 重金属 食物链 富集

**中图分类号** X55; Q178.53 **文献识别码** A **文章编号** 1000-7075(2012)01-0079-07

## Transmission and accumulation of heavy metals in *Chlorella-Ruditapes philippinarum* food chain

WANG Yuan-li<sup>1,2</sup> QU Ke-ming<sup>2\*</sup> SHAN Bao-tian<sup>1</sup> CUI Zheng-guo<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(<sup>2</sup> Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071)

**ABSTRACT** Accumulation and transmission of heavy metals (Cu, Pb, and Cd) in *Chlorella-Ruditapes philippinarum* food chain was simulated under controlled conditions, and bioconcentration factors (BCF) of Cu, Pb, and Cd in *Chlorella* and *R. philippinarum* and biomagnification factors (BMF) of Cu, Pb, and Cd in *Chlorella-R. philippinarum* food chain were determined. The results showed that the concentrations of heavy metals in *Chlorella* and *R. philippinarum* increased with their concentrations in seawater. The BCFs of Cu, Pb, and Cd in *Chlorella* varied from 1 626 to 3 161, 3 295 to 7 799, and 5 438 to 9 313, respectively. The BCFs of Cu, Pb, and Cd in *R. philippinarum* varied from 364 to 821, 1 089 to 1 936, and 245 to 736, respectively. The BMFs of Cu, Pb, and Cd in the *Chlorella-R. philippinarum* food chain var-

国家科技支撑计划项目(2011BAD13B04)、国家海洋局专项(DOMEP(MEA)-02)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资助(20603022011002)共同资助

\* 通讯作者。E-mail: qukm@ysfri.ac.cn

收稿日期:2011-02-26;接受日期:2011-04-26

作者简介:汪远丽(1984-),女,硕士研究生,主要从事生态毒理学研究。E-mail: wyl1522@yahoo.cn, Tel: (0532)85836341

ied from 0.22 to 0.26, 0.25 to 0.46, and 0.03 to 0.14, respectively. Under the experimental conditions, the BCFs of Cu, Pb, and Cd by *Chlorella* were much larger than by *R. philippinarum* and the BMF showed that there was no obvious biomagnification effect in *Chlorella-R. philippinarum* food chain.

**KEY WORDS** *Chlorella* *Ruditapes philippinarum* Heavy metal Food chain Accumulation

重金属元素的环境污染一直以来都是国内外海洋生态环境研究的热点(Shuai *et al.* 2001; Liu *et al.* 1991; 刘发义等 1998)。重金属可通过食物链及生物的富集作用危害人体健康, 日益引起研究者的关注。微藻是水域中的主要初级生产者, 是海洋生物赖以生存的物质基础。小球藻 *Chlorella* 属于单胞藻, 直径 3~8  $\mu\text{m}$ , 具有较大的比表面积, 对环境中重金属有较强的吸附和富集作用, 并且可在较短时间内达到吸附平衡, 其吸附行为可以用 Langmuir 和 Freundlich 等温吸附模型描述(李志勇等 1997; 潘进芬等 2000; 吴能表等 2005)。双壳贝类属滤食性生物, 由于自身用于代谢的混合氧化系统存在缺陷, 体内重金属的释放比鱼类和甲壳类动物慢得多, 导致体内保持较高的富集含量。国内外研究者普遍认为, 贝类既能吸收溶解态重金属, 也能吸收食物中的颗粒态重金属(Wang *et al.* 1999a, b)。在海洋生物对某些元素累积过程中, 有超过 50% 来自食物相暴露, 例如硒, 生物体对其食物相累积可超过总累积量的 95% (Wang *et al.* 1998)。王文雄等(2004)发现在海洋生态系统中, 高浓度的金属一般都是通过食物链传递, 而关于重金属在海洋食物链中的积累与传递规律的研究, 目前少见文献报道。本工作研究了人工培养条件下, 重金属离子铜、铅、镉在海水、小球藻、菲律宾蛤仔中的积累和转移, 研究结果对深入探讨重金属污染物对海洋生态系统的影响, 评价海洋环境质量具有重要意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

小球藻 *Chlorella* 藻种由中国水产科学研究院黄海水产研究所提供, 采用 f/2 培养基培养, 光照强度为 4 000 lx, 光暗周期为 L/D=12/12, 温度为 20  $\pm$  1  $^{\circ}\text{C}$ , 盐度为 31~32.5, pH 为 8.07~8.20, 每天摇动 2~3 次。

菲律宾蛤仔采自青岛红岛养殖场, 选择体重 10 g、体长 4 cm 左右的健壮个体, 用灭菌的海水清洗干净后, 置于水族箱中暂养 7 d, 备用。

实验海水取自青岛海水浴场, 经沉淀, 温度为 20  $\pm$  1  $^{\circ}\text{C}$ , 盐度为 31~32.5, pH 为 8.07~8.20。培养用海水经孔径 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤、煮沸灭菌, 冷却后配制培养液。

### 1.2 小球藻对 Cu、Pb 和 Cd 等重金属的富集试验

设置 Cu、Pb 和 Cd 3 个实验组, 每组 3 个浓度系列, 即 10、50 和 100  $\mu\text{g/L}$ , 并设置 3 个平行样, 实验水量为 50 L, 接种密度为  $1 \times 10^4$  个/ml。

每天定时取藻液, 在紫外可见分光光度计 680 nm 处测定其吸光度值, 观察小球藻的生长情况(吕旭阳等 2009)。并从 3 个实验组的 3 个浓度系列分别取 200 ml 藻液, 用 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤, 收集滤液, 用原子吸收分光光度计测定滤液中的金属离子浓度, 间接计算小球藻积累的重金属含量。

### 1.3 菲律宾蛤仔通过滤食小球藻对重金属的富集试验

待小球藻对重金属富集达到平衡后, 投放菲律宾蛤仔, 开始菲律宾蛤仔通过摄食小球藻富集重金属的实验。实验设置如 1.2 所述的小球藻液。

该实验在 5 L 的敞口玻璃缸中进行, 实验水体 4 L, 投放菲律宾蛤仔 40 只。实验期间每天换藻液 1 次, 该

实验共持续 30 d。每天测定温度、盐度和 pH,并控制环境条件为:温度  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ,盐度  $31 \sim 32.5$ ,pH  $8.07 \sim 8.20$ 。在第 0、2、5、10、15、20、25、30 天取生物样,每组取 4 只,用去离子水冲洗外壳,然后剥离其软组织部分装入塑料密封袋中,迅速置于  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  冰箱中冷冻保存。

### 1.4 样品处理及测定分析方法

取 200 ml 藻液,用  $0.45 \text{ }\mu\text{m}$  滤膜过滤,收集滤液,滤液中重金属测定按 GB 17378.4-2007 规定方法进行;加去离子水使滤膜上的小球藻再悬浮,洗去残留金属溶液,过滤,重复洗涤两次后收集于塑料密封袋中,置于  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  冰箱中冷冻保存。小球藻、菲律宾蛤仔体内重金属测定标准方法见 GB 17378.6-2007,重金属含量均以湿重来表示。

$$\text{藻对重金属的富集系数 } BCF_Z = C_Z / C_W$$

$$\text{蛤仔对重金属的富集系数 } BCF_B = C_B / C_W$$

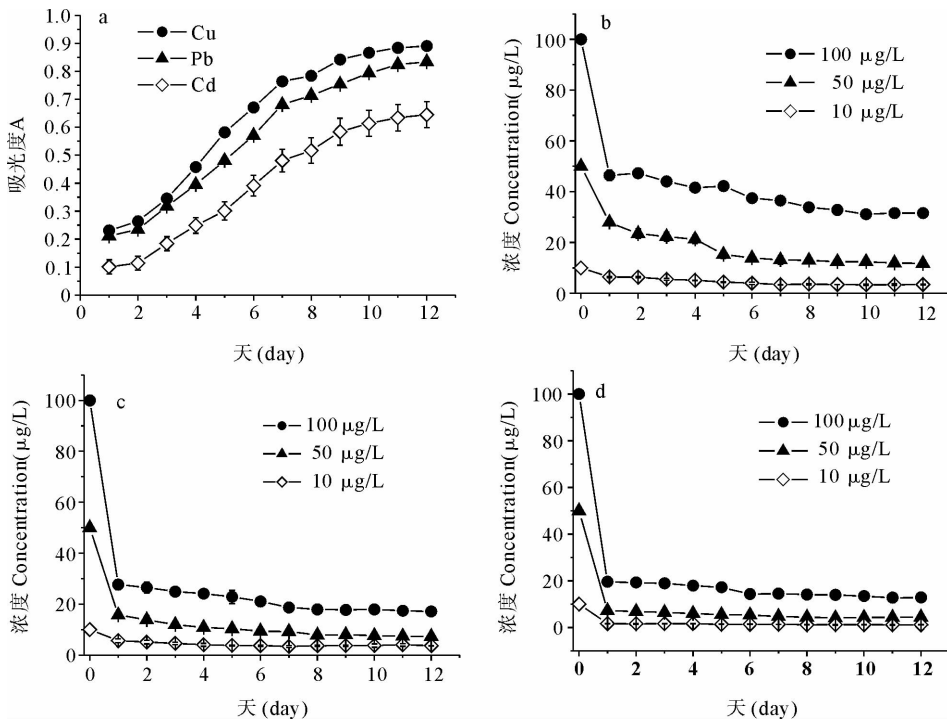
$$\text{小球藻到菲律宾蛤仔的传递系数 } BMF = BCF_B / BCF_Z$$

式中, $C_W$ 为水体中的重金属浓度(mg/L), $C_Z$ 为藻体中的重金属浓度(mg/kg), $C_B$ 为蛤仔体内的重金属浓度(mg/kg)。

## 2 结果

### 2.1 小球藻富集重金属的实验

图 1(a)显示小球藻分别在浓度为  $50 \text{ }\mu\text{g/L}$  的  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  溶液中的生长情况。小球藻的生长分为 4 个时期,第 1~3 天处于生长的延迟期,吸光度值基本不变,小球藻颜色微绿;第 4~7 天增加量明显,处于对数生长期,吸光度值加快增大,生长旺盛;第 8~15 天达到生长的稳定期,OD 增加平稳,生长正常;15 d 以后藻类开始进入死亡期,生长停滞,开始衰退。重金属对小球藻的毒性大小为: $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$ 。



a. 小球藻生长曲线;b. 水体中的 Cu 变化;c. 水体中的 Pb 变化;d. 水体中的 Cd 变化

a. Growth curve of *Chlorella*; b. Variation of  $\text{Cu}^{2+}$  concentration; c. Variation of  $\text{Pb}^{2+}$  concentration; d. Variation of  $\text{Cd}^{2+}$  concentration

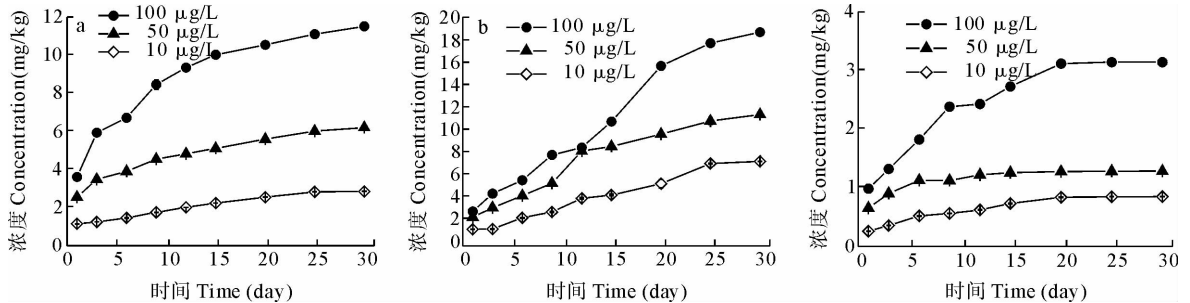
图 1 小球藻生长曲线及富集实验水体中  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的变化

Fig. 1 Growth curve of *Chlorella* and the concentration of  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  in seawater

图1(b)、(c)、(d)分别表示小球藻海水中 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 和 $\text{Cd}^{2+}$ 的浓度变化情况。由图1可看出,小球藻对 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 和 $\text{Cd}^{2+}$ 的吸附主要集中在第1天,其中小球藻对 $\text{Cd}^{2+}$ 的富集量最高,达到80%以上,在50 $\mu\text{g/L}$  $\text{Cd}^{2+}$ 溶液中小球藻的富集量最高达85.64%,占平衡时的93%,对 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 的富集量也分别在35.74%~53.57%、40.39%~72.32%。之后,小球藻富集重金属的速率逐渐降低。这是由于小球藻对重金属的富集起初是表面吸附起主导作用,即重金属是通过与藻细胞表面的官能基团如 $-\text{COOH}$ 、 $-\text{OH}$ 等发生配合反应,因而吸附速率较快(张亚楠 2003)。在第4~7天是小球藻的对数生长期,小球藻的生物量迅速增加,海水中的重金属浓度持续下降,对重金属的积累量增加,但累积速率降低,这是由于表面吸附的重金属主动转移至藻细胞内是个缓慢的迁移过程。第8天以后,小球藻体内的重金属与水体中的重金属浓度均保持稳定,即达到平衡状态。随重金属浓度的增加,小球藻体内的重金属含量增大。在 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 和 $\text{Cd}$ 的浓度为100 $\mu\text{g/L}$ 的体系中,达到平衡状态时,小球藻体内的重金属含量分别为51.32、56.41、64.04 $\text{mg/kg}$ ;水体中的金属含量分别为31.56、17.12、12.79 $\mu\text{g/L}$ 。

## 2.2 菲律宾蛤仔富集重金属试验

图2(a)、(b)和(c)显示菲律宾蛤仔体内 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 和 $\text{Cd}$ 含量随时间的变化曲线。由图2可知,菲律宾蛤仔对 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 的生物富集能力较强,蛤仔体内重金属的含量随着暴露时间的增加而显著上升,到第30天时升到最高,蛤仔体内的 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 最高浓度分别达到11.51、18.66、3.14 $\text{mg/kg}$ 。比较蛤仔对3种金属的吸收,蛤仔体内的重金属含量为 $\text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd}$ 。对单一金属不同浓度的比较,蛤仔体内的重金属含量随环境中金属离子浓度的增大而增加。如 $\text{Pb}^{2+}$ 为100、50、10 $\mu\text{g/L}$ 的浓度系列组,蛤仔体内的 $\text{Pb}$ 浓度分别为18.66、11.28、7.07 $\text{mg/kg}$ 。



a. 菲律宾蛤仔对 $\text{Cu}$ 的生物累积;b. 菲律宾蛤仔对 $\text{Pb}$ 的生物累积;c. 菲律宾蛤仔对 $\text{Cd}$ 的生物累积

a. Bioaccumulation of  $\text{Cu}^{2+}$ ; b. Bioaccumulation of  $\text{Pb}^{2+}$ ; c. Bioaccumulation of  $\text{Cd}^{2+}$

图2 菲律宾蛤仔对 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 的生物累积曲线

Fig. 2 Bioaccumulation of  $\text{Cu}$ ,  $\text{Pb}$  and  $\text{Cd}$  in *R. philippinarum*

## 2.3 重金属在海水-小球藻-菲律宾蛤仔食物链中的传递与放大

表1显示在试验的第30天时,重金属 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 在海水-小球藻-菲律宾蛤仔食物链中的富集情况。由表1可知,随水体中 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 浓度的增加,小球藻对 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 的富集量增加,富集系数 $BCF$ 先增大后减小。小球藻对 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$ 的最大富集浓度分别为51.32、56.41、84.04 $\text{mg/kg}$ ,富集系数 $BCF$ 最高值分别为3161、7799、9313。

随着系统中的 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 浓度的增加,蛤仔对 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 富集量增加,富集系数 $BCF$ 和传递系数 $BMF$ 值均呈现明显的降低趋势。蛤仔对 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 的富集系数 $BCF$ 变化范围分别为364~821、1089~1936、245~736,生物传递因子 $BMF$ 变化范围分别为0.22~0.26、0.25~0.46、0.003~0.14。蛤仔对 $\text{Cu}$ 、 $\text{Pb}$ 、 $\text{Cd}$ 的富集系数 $BCF$ 大小: $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$ ,生物传递因子 $BMF$ 的大小: $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$ 。

表 1 稳态时重金属在海水-小球藻-菲律宾蛤仔食物链中的分布

Table 1 The distribution of heavy metals in the food chain of seawater-*Chlorella-R. philippinarum* in steady-state

重金属 Heavy metal	重金属浓度 Heavy metal concentration				富集系数 Accumulation coefficient		
	$C_0$ ( $\mu\text{g/L}$ )	$C_W$ ( $\mu\text{g/L}$ )	$C_Z$ (mg/kg)	$C_B$ (mg/kg)	$BCF_Z$	$BCF_B$	$BMF$
Cu	10	3.47	10.97	2.85	3 161	821	0.26
	50	11.73	26.27	6.20	2 239	528	0.24
	100	31.56	51.32	11.51	1 626	364	0.22
Pb	10	3.65	28.47	7.07	7 799	1 936	0.25
	50	7.73	24.72	11.28	3 198	1 459	0.46
	100	17.12	56.41	18.66	3 295	1 089	0.33
Cd	10	1.15	6.25	0.847	5 438	736	0.14
	50	4.40	40.98	1.28	9 313	290	0.03
	100	12.79	84.04	3.14	6 570	245	0.03

注:  $C_0$ :藻液中的重金属浓度初始浓度;  $C_W$ :水体中的重金属浓度;  $C_Z$ :藻体中的重金属浓度;  $C_B$ :蛤仔体内的重金属浓度(mg/kg);  $BCF_Z$ :藻对重金属的富集系数;  $BCF_B$ :蛤仔对重金属的富集系数;  $BMF$ :小球藻到菲律宾蛤仔的传递系数

Note:  $C_0$ : Initial concentration of heavy metal;  $C_W$ : Concentration of heavy metal in seawater;  $C_Z$ : Content of heavy metal in *Chlorella*;  $C_B$ : Content of heavy metal in *R. philippinarum*;  $BCF_Z$ : BCF of *Chlorella*;  $BCF_B$ : BCF of *R. philippinarum*;  $BMF$ : Biomagnification factor from *Chlorella* to *R. philippinarum*

### 3 讨论

#### 3.1 小球藻对重金属的富集分析

重金属对微藻生长繁殖的影响,国内外都进行了大量工作。小球藻对重金属有较高的耐受性,又有较强的富集能力,常被用来处理含重金属的工业污水(浩云涛等 2001)。由本实验可知小球藻对于  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  具有很强的富集能力。在  $50 \mu\text{g/L}$  时,小球藻对 3 种重金属的吸附率最高,分别为 76.5%、91.2% 和 94.5%。单个金属离子的富集能力为  $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$ ,小球藻对  $\text{Cd}^{2+}$  的富集性能明显高于其他重金属离子,这与吴海锁等(2004)的研究结果一致。小球藻对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  3 种金属离子的平均吸附率分别为  $70.1\% \pm 5.8\%$ 、 $89.0\% \pm 2.0\%$  和  $77.0\% \pm 11.7\%$ 。李英敏等(2002)研究了活性小球藻对  $\text{Pb}^{2+}$  的生物吸附,指数生长期的的小球藻在吸附液 pH 值为 7 左右时对  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附能力最强,吸附率为 75%。吸附的动力学研究表明,小球藻可在较短时间内达到吸附平衡。小球藻对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  和  $\text{Zn}^{2+}$  的吸附可在 2~3 h 达到平衡(吴海锁等 2004),小球藻对  $\text{Pb}^{2+}$  吸附速度较快,10 min 即可达到平衡(李英敏等 2002)。杨红玉等(1990)测得绿藻中蛋白核小球藻对 Cd 的富集系数为 60~2 000,斜生栅藻对 Cd 的富集系数为 80~3 960,本研究获得小球藻对 Cd 的富集系数要高于文献值。

#### 3.2 菲律宾蛤仔富集小球藻中重金属分析

贝类基本上是滤食性动物,水体中以离子状态存在或吸附在有机体和有机颗粒表面的重金属在贝类滤食过程中摄入,形成重金属在贝类体内的富集(徐 韧等 2007)。将蛤仔放入经重金属暴露 7d 后的小球藻液中后,通过摄食小球藻和直接吸收水体中的溶解态重金属,蛤仔体内的金属含量显著升高。蛤仔对重金属的富集主要从胃含物中直接吸收重金属,或将胃含物中的重金属转化为金属硫蛋白而吸收于体内(Rainbow 1997)。随着蛤仔体内金属含量的升高,蛤仔生理上产生抑制作用,导致摄食率降低,吸附速率减慢,解析速度加快,进而减缓蛤仔体内金属含量的增加速率。

蔡立哲等(1998)测得菲律宾蛤仔对 Zn、Pb 的富集系数可达 1 000 以上。刘明星等(1983)测得渤海菲律宾蛤仔对 Zn、Pb 的富集系数均为 1 900。在  $\text{Cu}^{2+}$  为  $0.035 \sim 0.115 \text{ mg/L}$  的水体中,郭远明(2008)测得菲律宾蛤

仔对铜的富集系数范围为 854.6~468.5。乔庆林等(2006)测定菲律宾蛤仔对 Pb、Cd 的生物富集系数分别为 935、378。本实验测得蛤仔对不同浓度 Cu、Pb、Cd 的富集系数 *BCF* 变化范围分别为 364~821、1 089~1 936、245~736,与文献值相近。

### 3.3 重金属在食物链中传递分析与比较

生物累积可分为生物浓缩和生物放大两个部分。生物浓缩又称生物富集作用,指生物机体从环境介质中吸收并累积外来物质,且使生物体内该物质的浓度超过环境中浓度的现象。它突出累积者所处的环境介质是水。生物放大作用又称生物学放大,是指生物体内某种元素或难分解化合物的浓度随生态系统中食物链营养级的提高而逐步增大的现象(李健明 2002)。生物富集系数 *BCF* 描述了生物对水体中溶解相中重金属的富集,传递系数 *BMF* 描述生物对食物中重金属的吸收。重金属在环境中不会被降解,只会发生形态和价态变化,因而可在环境中长期存在。重金属污染物在环境中进行迁移时,一旦进入食物链,就可能由于生物浓缩和生物放大作用在生物体内累积。一般而言,污染物在沿着食物链的传递过程中,经过不同的营养级传递后其浓度被生物放大还是稀释,取决于食物链营养级的组成以及污染物自身的理化性质。

王文雄等(2004)发现在海洋生态系统中,高浓度的金属一般都是通过食物链传递,而非由水传递。污染物沿食物链的生物放大效应可以用生物放大因子即传递系数 *BMF* 衡量。当 *BMF* 大于 1 时,表明该污染物在食物链上具有生物放大效应(吴江平等 2010)。在本实验中,测得 Cu、Pb、Cd 在小球藻-菲律宾蛤仔食物链上的传递系数 *BMF* 变化范围分别 0.22~0.26、0.25~0.46、0.03~0.14,*BMF* 值均小于 1,说明 Cu、Pb、Cd 在小球藻-菲律宾蛤仔食物链上没有明显的生物放大效应。大多数金属经过食物链传递被生物富集的规律目前尚难以准确地掌握,但是对某些金属人们已经有了较深入的了解,例如沿浮游植物→浮游动物→鱼类这一浮游生物食物链的传递过程中,Cd 的浓度通常会随着营养级的升高而降低,Hg 却相反(王文雄等 2004)。而小球藻和菲律宾蛤仔对 Cu、Pb、Cd 的富集系数都很大,说明其生物富集能力很大,且小球藻对 Cu、Pb、Cd 的富集能力大于菲律宾蛤仔。

## 4 结论

本试验在受控环境条件下,模拟了重金属铜、铅、镉在海水-小球藻-菲律宾蛤仔营养食物链中的积累和传递情况。实验结论如下:

1) 小球藻对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的吸附集中在第 1 天,随后富集速率逐渐变慢,到第 8 天以后小球藻体内的重金属含量与水体中的重金属维持在稳定值,达到动态的平衡。

2) 小球藻对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  有较强的富集能力,随水体中的  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的浓度增加,小球藻对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的富集量增大,富集数 *BCF* 先增大后降低。小球藻对  $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的富集系数 *BCF* 值: $\text{Cd}^{2+} > \text{Pb}^{2+} > \text{Cu}^{2+}$ 。

3) 菲律宾蛤仔对 Cu、Pb、Cd 的生物富集能力较强,蛤仔体内重金属的含量随着时间的增加而显著上升,到第 30 天时升到最高,海水-小球藻-菲律宾蛤仔 3 部分的重金属含量相对稳定,形成动态平衡。

4) 随系统中的 Cu、Pb、Cd 含量的增加,蛤仔对 Cu、Pb、Cd 富集量增加,富集系数 *BCF* 和生物传递因子 *BMF* 值均呈现明显的降低趋势。蛤仔对 Cu、Pb、Cd 的富集系数 *BCF* 大小为  $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$ ,传递系数 *BMF* 的大小为  $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$ 。

5) 小球藻对 Cu、Pb、Cd 的富集系数 *BCF* 远大于菲律宾蛤仔,Cu、Pb、Cd 在小球藻-菲律宾蛤仔食物链上没有明显的生物放大效应。

## 参 考 文 献

王文雄,潘进芬. 2004. 重金属在海洋食物链中的传递. 生态学报,24(3):599~604

吕旭阳,张雯,杨阳,蔡小宁. 2009. 分光光度法测定小球藻数量的方法研究. 安徽农业科学,37(23):11 104~11 105

- 李志勇,郭祀远,李琳,蔡妙颜. 1997. 利用藻类去除与回收工业废水中的金属. 重庆环境科学,19(6):27~321
- 李建国. 2002. 环境污染在生物体内的浓缩、积累和放大. 生物学教学,27(3):38
- 李英敏,杨海波,刘艳,于媛,张欣华. 2002. 小球藻吸附水中  $Pb^{2+}$  影响因素的初步研究. 生物技术,12(1):12~13
- 刘明星,李国基,顾宏堪. 1983. 渤海湾鱼类、甲壳动物、软体动物的痕量金属含量. 环境科学学报,3(2):149~155
- 刘发义,吴玉霖. 1988. 重金属污染物在海洋生物体内的积累和解毒机理. 海洋科学,8(5):63~66
- 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
- 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,25(1):5~9
- 吴海锁,张洪玲,张爱茜,王连生,王连军. 2004. 小球藻吸附重金属离子的试验研究. 环境化学,23(2):173~177
- 吴江平,管运涛,李明远,勒军涛,张锡辉. 2010. 全氟化合物的生物富集效应研究进展. 生态环境学报,19(5):1246~1252
- 吴能表,付启昌,龙云,朱利泉,王小佳. 2005. 不同小球藻对工业废水中金属离子吸附能力的比较. 西南农业大学学报,27(1):111~113
- 张亚楠. 2003. 绿色巴夫藻的重金属胁迫效应及吸附能力的研究. 见:暨南大学硕士学位论文
- 杨红玉,王焕校. 1990. 某些绿藻对镉的富集作用及其毒性反应. 环境科学学报,10(1):65~72
- 浩云涛,李建宏,潘欣. 2001. 椭圆小球藻(*Chlorella ellipsoidea*)对 4 种重金属的耐受性及富集. 湖泊科学,13(2):158~162
- 徐韧,杨颖,李志恩. 2007. 海洋环境中重金属在贝类体内的蓄积分析. 海洋通报,26(5):117~120
- 郭远明. 2008. 海洋贝类对水体中重金属的富集能力研究. 见:中国海洋大学硕士学位论文
- 蔡立哲,刘琼玉,洪华生. 1998. 菲律宾蛤仔在高浓度锌铅水体中的金属积累. 台湾海峡,17(4):456~461
- 潘进芬,林荣根. 2000. 海洋微藻吸附重金属的机理研究. 海洋科学,24(2):31~34
- Liu, Z. K., and Lan, Y. F. 1991. The pollution of heavy metal and human health. Science Garden Plot, 1(2):35
- Rainbow, P. S. 1997. Trace metal accumulation in marine invertebrates: marine biology or marine chemistry. Mar. Bio. Assoc. 77(1):195~210
- Shuai, J. S., and Wang, L. 2001. Discussion about the health impact of heavy metal and the countermeasure. Environment and Exploitation, 16(4):62
- Wang, W. X. 1999. Effects of calcium and metabolic inhibitors on trace element uptake in two marine bivalves. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 236(1):149~164
- Wang, W. X. 1999. Delineating metal accumulation pathways for marine invertebrates. Science of the Total Environment, 237-238:459~472
- Wang, W. X., and Fisher, N. S. 1998. Accumulation of trace elements in a marine copepod. Limnology and Oceanography, 43(2):273~283