

混合暴露条件下菲律宾蛤仔 不同组织对几种重金属的富集与释放特征

姜会超 刘爱英* 宋秀凯 孙国华 刘丽娟

(山东省海洋生态修复重点实验室 山东省海洋资源与环境研究院,烟台 264006)

摘要 应用双箱动力学模型模拟了菲律宾蛤仔在 Pb、Zn、Cu、Cd、Cr、Hg 和 As 7 种重金属混合暴露条件下,内脏团、鳃、斧足及基部和外套膜组织对重金属的生物富集与释放实验,并通过非线性拟合得到菲律宾蛤仔各组织对 7 种重金属的富集速率常数 k_1 、排出速率常数 k_2 、生物富集系数 BCF 、生物半衰期 $B_{1/2}$ 、富集平衡时生物体内重金属含量 C_{Amax} 等动力学参数。结果表明,1) 重金属在菲律宾蛤仔不同组织器官中的富集具有选择性,理论平衡状态下,Cu、Cd、As、Pd 在各组织的含量分布(C_{Amax}): 内脏团 > 斧足及基部 > 鳃 > 外套膜;Cr 分布规律(C_{Amax}): 内脏团 > 鳃 > 斧足及基部 > 外套膜;Hg 分布规律(C_{Amax}): 斧足及基部 > 外套膜 > 鳃 > 内脏团;Zn 分布规律(C_{Amax}): 斧足及基部 > 鳃 > 外套膜 > 内脏团。2) 菲律宾蛤仔对不同重金属的富集系数存在显著差异($P < 0.05$),对 Cu 富集程度最高,其富集系数范围为 1514.0 - 4818.0;其次是 Cd 和 Hg,富集系数范围分别为 104.5 - 975.4, 255.9 - 447.4;As、Cr、Pb、Zn 离子在菲律宾蛤仔体内富集程度较低,其富集系数均在 300 以内。3) 菲律宾蛤仔对重金属的释放能力较差,双箱动力学模型可较好地反映混合暴露条件下菲律宾蛤仔对重金属的富集特征,但不适合对其释放特征进行描述。

关键词 菲律宾蛤仔;富集;释放;重金属;双箱动力学模型

中图分类号 X503.225 文献标志码 A 文章编号 1000-7075(2014)03-0082-09

The characteristics of heavy metal accumulation and release in *Ruditapes philippinarum* tissues and organs during the exposure of mixed heavy metals

JIANG Hui-chao LIU Ai-ying* SONG Xiu-kai SUN Guo-hua LIU Li-juan

(Shandong Provincial Key Laboratory of Restoration for Marine Ecology,

Shandong Marine Resource and Environment Research Institute, Yantai 264006)

ABSTRACT Biological accumulation and release of heavy metals in *Ruditapes philippinarum* have been observed in previous studies. However the specific process in individual tissues remained unclear. In this study, we used two-compartment bio-concentration model to evaluate the kinetic parameters of the biological accumulation and release of seven heavy metals (Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Hg, and As) in different tissues and organs of *Ruditapes philippinarum*, including visceral mass, gill, foot part and mantle tissues. In the experiments *R. philippinarum* was exposed to water containing all seven heavy metals. The uptake rate constant (k_1), elimination rate constant (k_2), bio-concentration factor (BCF), biological half-lives ($B_{1/2}$), and equilibrium concentration *in vivo* (C_{Amax}) of heavy metals

山东省科技发展计划项目(2009GG10009044)、烟台市科技发展计划项目(2011457)和国家自然科学基金项目(41206094)共同资助

* 通讯作者。E-mail: aiyingl@163.com

收稿日期:2013-05-26;接受日期:2013-07-12

作者简介:姜会超(1984-),男,硕士,研究实习员,主要从事海洋生态毒理研究。E-mail: jianghuichao2008@163.com, Tel:18153518100

were determined with non-linear curve fitting method. The results were summarized below: (1) Different heavy metals were accumulated with a preference in major organs and tissues of *R. philippinarum*. The C_{Amax} of Cu, Cd, As and Pb in *R. philippinarum* followed the order: visceral mass > foot part > gill > mantle tissues; the C_{Amax} of Cr: visceral mass > gill > foot part > mantle tissues; Hg (C_{Amax}): foot part > mantle tissues > gill > visceral mass; Zn (C_{Amax}): foot part > gill > mantle tissues > visceral mass. (2) *BCFs* of seven heavy metals in *R. philippinarum* were significantly different ($P < 0.05$). Cu was the most accumulated heavy metal in *R. philippinarum* with a *BCF* range of 1514.0 – 4818.0, followed by Cd and Hg with a *BCF* range of 104.5 – 975.4 and 255.9 – 447.4, respectively. As, Cr, Pb and Zn were accumulated at a lower level with the *BCF* values below 300. The weakest accumulation was observed for As, and the *BCF* values in foot part, gill and mantle tissues were 56.0, 53.1, and 47.4 respectively. The *BCF* of Zn in visceral mass was 61.9. (3) After 25 days, concentrations of heavy metals in the major organs and tissues of *R. philippinarum* were still at high levels, which indicated *R. philippinarum* had weak ability to release heavy metals. Although the two-compartment kinetic model efficiently described the accumulation of heavy metals in *R. philippinarum* with most fitting indicators (*R*) above 0.9, it was not suitable for the simulation of the release phase, for example, the *R* values of Pb and Cu were only 0.110 and 0.230 respectively.

KEY WORDS *Ruditapes philippinarum*; Accumulation; Release; Heavy metals; Two-compartment kinetic model

菲律宾蛤仔 *Ruditapes philippinarum* 隶属软体动物门、双壳纲、帘蛤目、帘蛤科, 俗称蛤蜊, 广泛分布在我国沿海地区, 具有生长速度快、养殖周期短、适应性强等特点, 为我国最重要的贝类养殖品种之一, 养殖规模逐年扩大(张国范等 2010)。随着工业的快速发展, 海洋环境中重金属污染现象日趋突出, 重金属富集到水生生物体内, 再通过食物链传递给食用者, 给人类健康造成严重危害。由于环境中的重金属以单个元素存在的情况较少, 而多以数种元素复合存在。因此, 混合暴露实验更能客观真实地反映重金属在菲律宾蛤仔体内的富集与释放特征(陈海刚等 2008b)。苑旭州等(2013)从总体水平上报道了混合暴露条件下菲律宾蛤仔对 6 种重金属的富集特征, 但对于蛤仔不同组织部位对重金属富集及释放特征的差异未有涉及, 本研究在现有研究菲律宾蛤仔对重金属富集及释放特征的基础上, 采用双箱动力学, 在 7 种重金属混合暴露条件下进行了研究, 进一步分析了蛤仔不同组织部位对重金属的富集及释放特征, 为我国菲律宾蛤仔的安全养殖和质量控制提供科学依据。对于了解重金属在菲律宾蛤仔体内的分布、富集、迁移和生态环境保护都具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

菲律宾蛤仔于 2011 年 10 月取自山东省烟台市牟平蛤仔养殖场, 壳长 3.0 – 3.5 cm。取用牟平蛤仔养殖场符合国家渔业水质标准的海水作为菲律宾蛤仔的养殖实验用水, 该水重金属离子本底浓度见表 1。实验在 6 个 1000 L 的聚乙烯水箱中进行, 3 个为实验对照组, 另外 3 个为平行实验组, 实验水体 800 L, 实验期间海水平均温度为 $(16.0 \pm 0.5) ^\circ\text{C}$, 盐度为 (29.5 ± 0.3) , 水体充氧。实验所用药品 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_4\text{Zn} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 、 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 、 HgCl_2 均为国产分析纯。

1.2 实验方法

参考国家渔业水质标准(GB11607-89)对重金属含量的规定, 同时根据 Pb、Zn、Cu、Cd、Cr、Hg 和 As 7 种重金属

菲律宾蛤仔急性毒性试验的结果,对目标重金属暴露浓度进行设计,暴露浓度配制过程中扣除本底值见表1。

表1 养殖海水重金属本底值及暴露浓度

Table 1 The background levels of heavy metals and exposure concentration

	Cd	Cr	Cu	Zn	Hg	Pb	As
本底浓度 Background concentration (mg/L)	0.00054	0.00011	0.0034	0.038	0.000055	0.0015	0.0015
暴露浓度 Exposure concentration (mg/L)	0.040	0.100	0.015	0.500	0.002	0.100	0.100

实验分为富集和释放两个阶段,富集阶段进行35 d,释放阶段进行25 d,整个实验过程持续60 d,每天少量投喂螺旋藻粉,藻粉中铅、镉、汞、砷等重金属含量均符合GB/T 17243-1998《饲料用螺旋藻粉》的限量要求。富集实验在经过清洗与曝晒过的1000 L聚乙烯水箱中进行,水箱中放入约400个菲律宾蛤仔,加入800 L含有不同重金属浓度的实验用水,每天换水一次,加入一定量的重金属母液使重金属含量保持在实验所需浓度,每组设3个平行,在富集实验第0、7、10、20、30、35天分别从各平行组水箱中随机取菲律宾蛤仔10个,分组织器官制样。富集阶段结束后,排出实验用水,清洗水箱,用上述符合国家渔业水质标准的海水对菲律宾蛤仔进行释放实验,每天换水一次,并在释放实验的第0、5、10、15、25天,从各平行组水箱中随机取菲律宾蛤仔10个,分组织器官制样。对照组不添加重金属,重金属浓度为养殖海水本底值(表1),整个实验过程同实验组一致。

菲律宾蛤仔分内脏团、鳃、斧足及基部、外套膜四部分组织取样以及整个软体部取样,样品装袋冷冻保存,待检测。样品参照GB17378.6-2007《海洋监测规范》生物体内重金属的测定方法。

1.3 数据处理与实验应用模型

生物双箱动力学模型(Kahle *et al.* 2002)认为,污染物在生物体内的富集可近似看作是污染物在生物体和水体之间的两相分配过程,其富集、排出过程可用一级动力学过程进行描述,目前对于该模型的应用研究较多(Clason *et al.* 2003; 王晓丽等 2004),主要描述如下(图1)。

图1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 为水体的挥发常数, k_m 为生物的代谢速率常数, 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)。

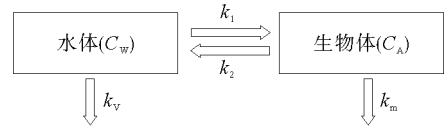


图1 生物富集双箱动力学模型

Fig.1 Model of two-compartment bioaccumulation

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

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

在公式的推导过程中,忽略水体中重金属的自然挥发及生物体的代谢。则由方程(2)得:

富集阶段($0 < t < t^*$, t^* 为富集阶段结束的天数):

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

C_0 为实验开始前菲律宾蛤仔体内重金属的含量(mg/kg干重), C_w 为水体中重金属浓度(mg/L), C_A 为菲律宾蛤仔体内重金属的含量(mg/kg干重)。

排出阶段($t > t^*$):

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

由公式(3)、(4)对富集和排出过程中菲律宾蛤仔体内重金属含量的动态检测结果进行非线性拟合,得到 k_1 、 k_2 值。

生物富集系数BCF由公式(5)计算:

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

重金属的生物学半衰期指的是生物体内的金属排出一半所需的时间,用公式(6)计算:

$$B_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_2} \tag{6}$$

富集达到平衡时,生物体内重金属的含量 C_{Amax} 由公式(7)计算:

$$C_{Amax} = BCF \times C_w \tag{7}$$

即使没有达到浓度平衡,双箱动力学模型也可以用来计算理论上平衡状态下的动力学参数。数据处理采用 Excel 2010、SPSS 11.5 和拟合软件 Origin 7.5。

2 结果

2.1 混合暴露下菲律宾蛤仔各组织对7种重金属的富集及释放特征

由图2可知,在富集阶段,菲律宾蛤仔各组织对7种重金属均表现出明显的富集过程,随着富集时间延长,各组织中重金属含量不断增加。菲律宾蛤仔不同组织对重金属富集程度存在显著差异($P < 0.05$)。

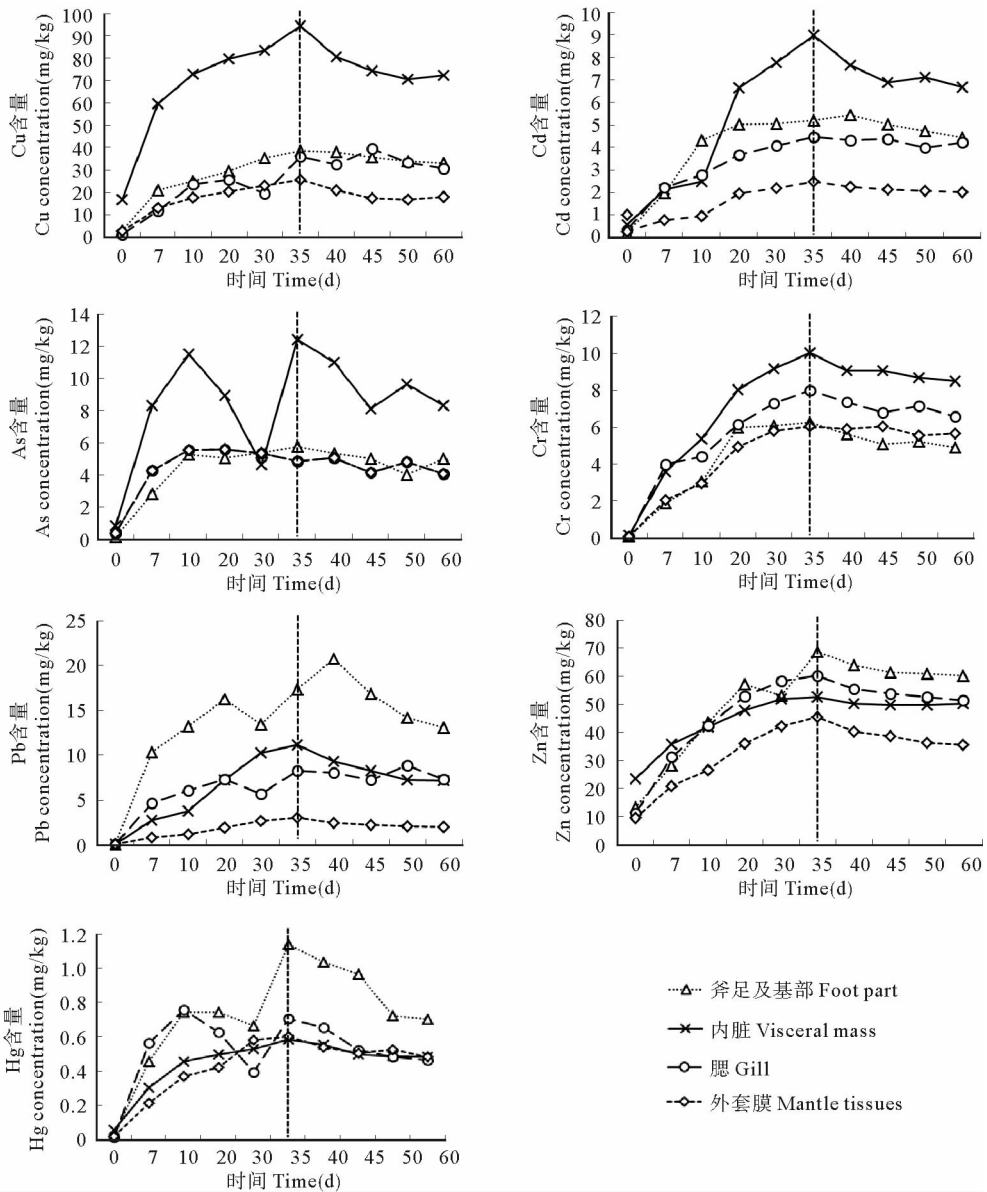


图2 重金属混合暴露条件下菲律宾蛤仔各组织对不同重金属的积累和释放

Fig.2 Accumulation and release of heavy metals by different tissues and organs of *R. philippinarum* under mixed exposure

富集结束时,Cu、Cd、As、Cr 4种重金属在菲律宾蛤仔内脏团组织中含量分别为94.32、8.98、12.40、10.01 mg/kg,较对照组分别提高了5.7、16.0、15.4及77.6倍;在外套膜组织中含量最低,分别为25.32、2.46、4.84、6.03 mg/kg,较对照组分别提高了11.8、9.3、13.3及87.4倍。Cu和As在菲律宾蛤仔鳃、外套膜和斧足及基部3组织中含量差别不大,范围分别为25.32-38.42、4.84-5.76 mg/kg。富集第10天,As在内脏团组织中达到较高含量(11.49 mg/kg),之后开始下降,富集结束时又达到峰值(12.40 mg/kg)。Cd在菲律宾蛤仔不同组织中的富集差异显著($P < 0.05$),富集结束时Cd在菲律宾蛤仔体内含量分布为内脏团(8.98 mg/kg) > 斧足及基部(5.20 mg/kg) > 鳃(4.46 mg/kg) > 外套膜(2.46 mg/kg)。Cr在菲律宾蛤仔斧足及基部和外套膜中富集趋势较为一致,富集结束时Cr含量分别为6.23、6.03 mg/kg。

Pb和Zn在菲律宾蛤仔各组织中富集趋势较为一致。富集结束时,Pb和Zn在斧足及基部组织中含量最高,其次是内脏团和鳃组织,在外套膜中的含量均为最低。菲律宾蛤仔对Pb表现出较强的富集能力,富集结束时,斧足及基部、内脏团、鳃和外套膜4组织中Pb含量分别为17.36、11.12、8.26、3.012 mg/kg,较对照分别提高了652.6、475.2、550.7、83.0倍。Zn在菲律宾蛤仔体内含量较高,富集结束时,斧足及基部、内脏团、鳃和外套膜4组织中Zn含量分别为68.48、52.36、60.12、45.361 mg/kg,但由于菲律宾蛤仔体内Zn本底值较高,因此较对照组分别仅提高了5.2、2.2、5.4及4.9倍。

富集第10天,Hg分别在菲律宾蛤仔斧足及基部和鳃组织中达到较高含量,分别为0.74、0.76 mg/kg,之后随着时间延长,Hg含量有所降低。富集结束时,各组织中Hg含量分布为斧足及基部(1.14 mg/kg) > 鳃(0.70 mg/kg) > 外套膜(0.60 mg/kg) > 内脏团(0.58 mg/kg),较对照组分别提高了44.0、57.2、31.5及10.7倍。

菲律宾蛤仔不同组织对7种重金属的释放特性较为相似,各组织重金属含量随着释放时间的延长而减少,表现出较为明显的排出过程,但重金属排出速度较为缓慢。在释放试验第25天,各组织中重金属含量虽然有所降低,但与对照组相比仍维持在较高的水平。

2.2 混合暴露下菲律宾蛤仔各组织对7种重金属富集与释放动力学参数

由表2可知,除内脏团对As富集规律与模型拟合度较低外(0.611),其他各组织对7种重金属的富集规律与双箱动力学模型拟合度均较高,说明双箱动力学模型可以较好地解释混合暴露下菲律宾蛤仔对重金属的富集规律。在释放阶段,各组织对重金属的释放规律与双箱动力学模型拟合度明显低于富集阶段,菲律宾蛤仔鳃组织对Pb和Cu的释放规律与双箱动力学模型拟合度仅为0.110、0.230。双箱动力学模型并不能合理地解释混合暴露条件下菲律宾蛤仔对重金属的释放规律。

由图2可知,在35d富集实验结束时,菲律宾蛤仔各组织对7种重金属的吸收虽然有所放缓,但尚未达到平衡。根据双箱动力学模型可以计算出理论平衡状态下的动力学参数,结果如表2所示。理论平衡状态下,Cu、Cd、As、Pd在各组织器官含量分布(C_{Amax})为内脏团 > 斧足及基部 > 鳃 > 外套膜,富集系数(BCF)为内脏团 > 斧足及基部 > 鳃 > 外套膜。菲律宾蛤仔各组织器官对Cd、Pb的半衰期($B_{1/2}$)为鳃 > 斧足及基部 > 外套膜 > 内脏团,对As的半衰期($B_{1/2}$)为外套膜 > 鳃 > 斧足及基部 > 内脏团,对Cu的半衰期($B_{1/2}$)为斧足及基部 > 鳃 > 内脏团 > 外套膜。Cr在理论平衡状态下,各组织器官含量分布(C_{Amax})为内脏团 > 鳃 > 斧足及基部 > 外套膜,富集系数(BCF)为内脏团 > 鳃 > 斧足及基部 > 外套膜,释放阶段Cr离子半衰期($B_{1/2}$)为外套膜 > 内脏团 > 鳃 > 斧足及基部。Hg、Zn与其他5种重金属差异较大,在菲律宾蛤仔斧足及基部中的含量明显高于其他组织($P < 0.05$),理论平衡状态下,Hg在各组织器官的含量分布(C_{Amax})为斧足及基部 > 外套膜 > 鳃 > 内脏团,富集系数(BCF)为斧足及基部 > 外套膜 > 鳃 > 内脏团,Zn含量分布(C_{Amax})为斧足及基部 > 鳃 > 外套膜 > 内脏团,富集系数(BCF)为斧足及基部 > 鳃 > 外套膜 > 内脏团。

2.3 菲律宾蛤蚧对7种重金属富集系数的差异

由图3可以看出,在实验暴露浓度的7种重金属水环境中,菲律宾蛤仔对不同重金属的富集系数(BCF)存在显著差异($P < 0.05$)。菲律宾蛤仔斧足及基部、鳃及外套膜3组织对7种重金属的富集选择性较为一致,Cu离子在3组织中的富集程度均为最高,其富集系数分别为2351.0、1896.0、1514.0,其次是Hg离子,富集系数

表 2 菲律宾蛤仔各组织器官对不同重金属的生物动力学参数

Table 2 The kinetic parameters of bioaccumulation and release of heavy metals by different tissues and organs of *R. philippinarum*

重金属 Heavy metal	组织 Tissues	C_0 (mg/kg)	C_w (mg/L)	积累阶段 Accumulation			释放阶段 Release	
				$C_A = C_0 + C_w(k_1/k_2)(1 - e^{(-k_2t)})$			$C_A = C_w(k_1/k_2)(e^{-k_2(t-t^*)} - e^{(-k_2t)})$	
				R^2	BCF	C_{Amax}	R^2	$B_{1/2}$
Cu	内脏团 Visceral mass	16.490	0.015	0.978	4818.0	72.27	0.693	61.1
	斧足及基部 Foot part	2.561	0.015	0.980	2351.0	35.26	0.641	209.4
	鳃 Gill	0.894	0.015	0.777	1896.0	28.44	0.230	139.5
	外套膜 Mantle tissues	2.143	0.015	0.983	1514.0	22.71	0.637	40.1
Cd	内脏团 Visceral mass	0.563	0.04	0.973	975.4	39.02	0.734	60.2
	斧足及基部 Foot part	0.184	0.04	0.932	131.7	5.27	0.838	91.9
	鳃 Gill	0.308	0.04	0.986	105.8	4.23	0.416	241.5
	外套膜 Mantle tissues	0.263	0.04	0.980	104.5	4.18	0.836	85.9
As	内脏团 Visceral mass	0.807	0.1	0.611	84.0	8.40	0.672	41.7
	斧足及基部 Foot part	0.122	0.1	0.933	55.1	5.51	0.363	82.3
	鳃 Gill	0.363	0.1	0.965	49.5	4.95	0.454	101.2
	外套膜 Mantle tissues	0.600	0.1	0.942	41.6	4.16	0.595	117.7
Pb	内脏团 Visceral mass	0.023	0.1	0.999	285.6	28.56	0.868	34.8
	斧足及基部 Foot part	0.027	0.1	0.954	159.1	15.91	0.626	45.7
	鳃 Gill	0.015	0.1	0.915	72.1	7.21	0.110	238.2
	外套膜 Mantle tissues	0.036	0.1	0.999	57.4	5.74	0.788	38.4
Cr	内脏团 Visceral mass	0.129	0.1	0.996	111.8	11.18	0.794	110.7
	斧足及基部 Foot part	0.050	0.1	0.965	76.1	7.61	0.778	73.5
	鳃 Gill	0.043	0.1	0.988	80.9	8.09	0.744	97.9
	外套膜 Mantle tissues	0.069	0.1	0.997	73.1	7.31	0.593	217.3
Zn	内脏团 Visceral mass	23.340	0.5	0.995	61.9	30.93	0.413	453.0
	斧足及基部 Foot part	13.260	0.5	0.929	13.4	6.70	0.734	38.6
	鳃 Gill	11.080	0.5	0.994	103.9	51.93	0.816	113.6
	外套膜 Mantle tissues	9.350	0.5	0.998	90.1	45.05	0.850	69.2
Hg	内脏团 Visceral mass	0.055	0.002	0.972	255.9	0.51	0.792	84.0
	斧足及基部 Foot part	0.026	0.002	0.810	447.4	0.89	0.905	31.6
	鳃 Gill	0.012	0.002	0.788	298.8	0.60	0.880	35.2
	外套膜 Mantle tissues	0.019	0.002	0.971	333.9	0.67	0.763	86.2

分别为 447.4、298.9、333.9。As、Cd、Cr、Pb 及 Zn 5 种重金属在斧足及基部、鳃及外套膜 3 组织富集程度较低,富集系数均在 200 以内,As 离子在斧足及基部、鳃及外套膜 3 组织富集系数最低,分别为 56.0、53.1、47.4。菲律宾蛤仔内脏团组织对重金属的富集选择性与其他组织有所差异,内脏团对 Cu 离子富集系数高达 4818.0,远高于对其他重金属的富集,其次是 Cd 离子,富集系数为 975.4,对其他 5 种重金属富集系数较低,均在 300 以下,其中 Zn 离子在内脏团富集系数最低,仅为 61.9。综上所述,菲律宾蛤仔各组织对 Cu 离子的富集系数最高,其次是 Cd 和 Hg 离子,对 As、Cr、Pb 和 Zn 离子富集系数普遍较低。

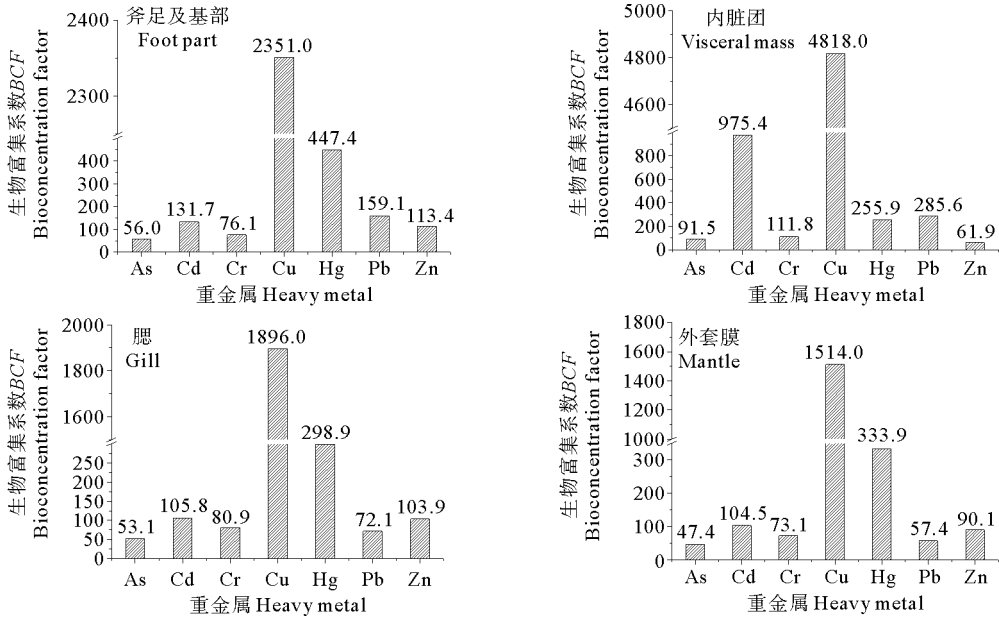


图3 菲律宾蛤仔对不同重金属生物富集系数 BCF 的差异

Fig. 3 The BCF of 7 heavy metals by different tissues and organs of *R. philippinarum*

3 讨论

3.1 重金属在菲律宾蛤仔体内含量分布

重金属在生物体内的分布不是均一的,在菲律宾蛤仔不同组织内的富集具有明显选择性。实验暴露浓度下,除 Hg 和 Zn 离子外,其他 5 种重金属在内脏团中的富集程度明显高于其他组织,As、Cd、Cu、Pb 离子在菲律宾蛤仔体内含量 (C_{Amax}) 分布规律为内脏团 > 斧足及基部 > 鳃 > 外套膜, Cr 离子含量 (C_{Amax}) 分布规律为内脏团 > 鳃 > 斧足及基部 > 外套膜。而 Hg 和 Zn 离子在菲律宾蛤仔斧足及基部中富集系数最高,在内脏团中富集系数反而最低,其含量 (C_{Amax}) 分布规律分别为斧足及基部 > 外套膜 > 鳃 > 内脏团,斧足及基部 > 鳃 > 外套膜 > 内脏团。研究表明,内脏团是鱼(罗国钧 2000)、虾(李来好等 1995)、蟹(Canli *et al.* 1995; 孙平跃等 2003)、贝类(蔡立哲等 1999)等水生生物体内重金属富集的主要部位,它们对重金属的富集能力明显高于肌肉等组织,内脏团是水生生物的主要解毒和排泄器官,可以快速大量合成金属硫蛋白(MT)而使重金属得以大量蓄积(Chandra *et al.* 2003)。鳃是菲律宾蛤仔的呼吸器官,具有十分宽广的表面积用来与水进行交换,因此吸附重金属的几率较大(苏文等 2010)。目前具有代表性的用来解释重金属进入水生生物呼吸器官的假说是竞争位点理论,该理论认为金属离子进入细胞前,先与细胞表面的接受点结合,其结合能力大小会直接影响到重金属进入细胞的速率和量(陈海仟等 2010)。斧足、基部、外套膜等肌肉组织中重金属的含量较少,主要

表3 渔业水质标准下重金属在菲律宾蛤仔体内的理论最大含量

Table 3 Theoretical maximum of heavy metals in *R. philippinarum* under water quality standard for fishery

重金属 Heavy metal	渔业水质标准(mg/L) Water quality standard for fishery	BCF	C_L (mg/kg)	重金属限量值(mg/kg) Limit value of heavy metal		
				第一类	第二类	第三类
As	0.05	57.54	2.88	1.00	5.00	8.00
Cd	0.005	329.35	1.65	0.20	2.00	5.00
Cr	0.1	85.47	8.55	0.50	2.00	6.00
Cu	0.01	2644.75	26.45	10.00	25.00	50.00
Hg	0.0005	333.99	0.17	0.05	0.10	0.30
Pb	0.05	143.55	7.18	0.10	2.00	6.00
Zn	0.1	92.32	9.23	20.00	50.00	100.00

C_L : 现行渔业水质标准条件下,7种重金属在菲律宾蛤仔体内富集的理论最大含量, $C_L = BCF \times$ 渔业水质标准, BCF 为菲律宾蛤仔整个软体部分的富集系数
重金属限量值: GB18421-2001 规定的三类生物质量重金属限量值

与菲律宾蛤仔的代谢过程有关。重金属进入生物体后先经过内脏团器官吸收,以一定的方式对其毒性进行消解处理,只有当内脏团中重金属饱和后,才会加快向肌肉组织转移(王克行 1996)。本实验富集结束时,Hg和Zn离子在斧足及基部中的含量明显高于内脏团组织,一方面可能是在实验暴露浓度下,内脏团对Hg和Zn离子的吸收已经达到饱和,继续吸收的Hg、Zn离子,大部分转移到斧足及基部组织中。另一方面可能是由于实验在混合暴露条件下进行,各离子之间存在互相促进、拮抗、竞争等影响因素,导致重金属在生物体内的积累和释放规律变得复杂(Kargin *et al.* 1999)。

3.2 菲律宾蛤仔对不同重金属富集系数的差异

重金属在菲律宾蛤仔不同组织间的富集具有明显的选择性,同样,菲律宾蛤仔对不同重金属富集系数也存在明显差异($P < 0.05$)。实验暴露浓度下,菲律宾蛤仔对Cu离子富集程度最高,其富集系数范围为1514.0 - 4818.0;其次是Cd和Hg离子,富集系数范围分别为104.5 - 975.4、255.9 - 447.4;As、Cr、Pb、Zn离子在菲律宾蛤仔体内富集程度较低,其富集系数均在300以下。相似研究在牡蛎(王晓丽等 2004;张聪等 2012)、泥蚶(齐秋贞 1987)、鱼类(孟晓红 1997)和蟹类(陈海仟等 2010)中均有报道。牡蛎对Cu、Cd的富集系数高达9300、1600,远高于对As离子(56.7)的富集,中华绒螯蟹各组织器官对Cd离子的富集(6 - 3148)高于对Pb离子的富集(5 - 51),与本研究相似。苑旭洲等(2012)从总体水平上研究菲律宾蛤仔对不同重金属富集系数差异时发现,蛤仔对Pb离子的富集系数要高于Cu离子,与本研究相反。产生这种差异的原因,一方面可能是由取样部位不同引起的,另一方面可能与暴露浓度差异有关。Rainbow (1993)指出,海洋生物对重金属的富集实际上取决于金属进出生物体的速率,暴露浓度的差异会显著影响相对速率的变化,进而导致富集系数的差异。蛤仔对重金属的富集系数随着暴露浓度的升高而降低,在高浓度组蛤仔对重金属离子的富集系数Pb(57.11)低于Cu(66.99)离子,而在中浓度组对Pb富集系数为117.91,远高于Cu(72.46)离子(苑旭洲等 2012)。

3.3 混合暴露条件下双箱动力学模型适应性

混合暴露条件下菲律宾蛤仔对7种重金属的富集规律比较符合双箱动力学模型,但菲律宾蛤仔对重金属的释放规律与双箱动力学模型拟合度较低,如鳃组织对Pb和Cu离子的释放与模型拟合度仅为0.110、0.230。在释放阶段,虽然各种金属含量随着时间的延长有所降低,但下降幅度缓慢,释放结束时各组织内的重金属含量仍然维持在较高的水平,说明积累于菲律宾蛤仔体内的重金属短期内很难排出。有研究表明,海洋生物难以排出已进入体内的重金属,重金属在生物体内的排出,主要通过金属硫蛋白解毒机制得以实现(陈海刚等 2008)。双箱动力学模型是近年来发展起来的一种数学模型,在海洋生物上的应用多见于单一暴露条件下的富集与释放动力学研究,缺乏混合暴露条件下,重金属在生物体内代谢方面的相关报道。本研究表明,双箱动力学模型可以较好地解释混合暴露条件下,重金属在菲律宾蛤仔体内的富集规律,但由于混合暴露条件下,重金属之间拮抗、竞争以及金属硫蛋白特殊解毒机制等因素,重金属在生物体内释放规律变得极其复杂,使得双箱动力学模型难以合理地解释混合暴露条件下,菲律宾蛤仔对重金属的释放规律。

3.4 菲律宾蛤仔对养殖水体的要求

根据双箱动力学模型得出的菲律宾蛤仔对不同重金属的富集系数,可以推测出,在现行渔业水质标准条件下,7种重金属在菲律宾蛤仔体内富集的理论最大含量(C_L)(表3)。除Zn离子外,其他6种重金属在菲律宾蛤仔体内的理论最大含量均超过第一类生物质量限量要求,其中,Cu、Hg已超过第二类生物质量标准,Cr和Pb超过了第三类生物质量标准。一方面可以推测现行生物质量标准对Cr和Pb的限量要求可能过于严格,另一方面,渔业水质标准对水体中Cr、Pb的限量要求是否过于宽松,现行渔业水质标准能否满足菲律宾蛤仔等水生生物的健康生长值得商榷。

参 考 文 献

- 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): 1086-1090
- 王克行. 1996. 虾蟹类增养殖学. 北京: 中国农业出版社, 13-15
- 齐秋贞. 1987. 菲律宾蛤仔的生活史. 水产学报, 11(2): 111-119
- 孙平跃, 王斌. 2003. Zn, Cu 和 Pb 在无齿相手蟹体内的积累和分布. 海洋环境科学, 22(1): 43-47
- 张国范, 闫喜武. 2010. 蛤仔养殖学. 北京: 科学出版社, 1-3
- 张聪, 陈聚法, 马绍赛, 徐勇, 赵俊. 2012. 褶牡蛎对水体中重金属铜和镉的富集动力学特性. 渔业科学进展, 33(5): 64-72
- 李来好, 杨贤庆, 郝淑贤, 刁石强, 石红, 吴燕燕, 周婉君, 李刘冬, 陈培基. 2006. 罗非鱼、南美白对虾对重金属富集的研究. 热带海洋学报, 25(4): 61-65
- 陈海刚, 林钦, 蔡文贵, 马胜伟, 王许诺, 贾晓平. 2008a. 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. 农业环境科学学报, 27(3): 1163-1167
- 陈海刚, 贾晓平, 林钦, 马胜伟, 蔡文贵, 王增焕. 2008b. 混合暴露条件下近江牡蛎对重金属的积累与释放特征. 应用生态学报, 19(4): 922-927
- 陈海仟, 张美琴, 吴光红, 陈玲珍, 潘道东. 2010. 中华绒螯蟹对 Pb 和 Cd 的富集与释放特性. 水生生物学报, 34(4): 828-836
- 苏文, 吴惠丰, 廖春阳, 薛钦昭, 曲莹. 2010. 锌铅暴露条件下菲律宾蛤仔消化腺和鳃内金属和金属硫蛋白的变化. 中国科学院研究生院学报, 27(4): 456-462
- 苑旭洲, 崔毅, 陈碧鹃, 崔正国, 杨凤. 2012. 菲律宾蛤仔对 6 种重金属的生物富集动力学. 渔业科学进展, 33(4): 49-56
- 罗国钧. 2000. 鲫鱼体内重金属的分布和积累规律研究. 渝州大学学报(自然科学版), 17(1): 56-61
- 孟晓红. 1997. 金属镉在鱼体中的生物富集作用. 广东微量元素科学, 4(1): 8-11
- 蔡立哲, 洪华生, 洪丽玉. 1999. 菲律宾蛤仔对锌、铅的积累特征. 环境科学学报, 19(3): 319-322
- Canli M, Furness RW. 1995. Mercury and cadmium uptake from seawater and from food by the Norway lobster *Nephrops norvegicus*. Environ Toxicol Chem 14: 819-828
- Chandra SK, Chary NS, Kamala CT and 2 others. 2003. Fractionation studies and bioaccumulation of sediment-bound heavy metals in Kolleru Lake by edible fish. Environ Int 29: 1001-1008
- Clason B, Langston WJ, Zauke GP. 2003. Bioaccumulation of trace metals in the amphipod *Chaetogammarus marinus* (Leach, 1815) from the Avon and Tamar estuaries (UK): comparison of two-compartment and hyperbolic toxicokinetic model. Mar Environ Res 55: 359-384
- Kargin F, Cogun HY. 1999. Metal interactions during accumulation and elimination of zinc and cadmium in tissues of the freshwater fish *Tilapia nilotica*. B Environ Contam Tox 63: 511-519
- Kahle J, Zauke GP. 2002. Bioaccumulation of trace metals in the copepod *Calanoides acutus* from the Weddell Sea (Antarctica): comparison of two-compartment and hyperbolic toxicokinetic models. Aquat Toxicol 59: 115-135
- Rainbow PS. 1993. The signification of trace metal concentration in marine invertebrates. Boca Raton: Lewis Publisher, 4-23