

## 栉孔扇贝对重金属的富集效应研究

马元庆\*, 张秀珍, 孙玉增, 靳洋, 刘义豪, 孙珊, 魏潇

(山东省海洋水产研究所, 山东烟台 264006)

**摘要:** 2009年6-12月在烟台四十里湾某栉孔扇贝养殖区进行现场监测, 研究表明, 栉孔扇贝对重金属的富集有明显的选择性, 对Cd的富集系数高达25495, 对铜富集系数为1453, 对铅的富集系数为258。对镉的富集与其生长周期呈显著正相关, 而Cu、Pb随其生长时间的增加在体内的增加趋势并不明显。栉孔扇贝各组织中重金属Cd的含量具有明显差异, 闭壳肌中Cd含量仅为内脏团中的1/5。研究发现, 栉孔扇贝的主要饵料浮游植物对重金属Cd的富集效率远大于Pb、Cu, 滤食浮游植物是栉孔扇贝富集重金属的主要途径。文中还对栉孔扇贝的人体消费标准进行了初步研究, 给出了人体消费参考量。

**关键词:** 栉孔扇贝; 重金属; 镉; 富集系数; 人体消费标准

**中图分类号:** X174; S917

**文献标识码:** A

栉孔扇贝 (*Chlamys farreri*), 俗名干贝蛤、海扇, 属软体动物门 (Mollusca)、瓣鳃纲 (Lamellibranchia)、珍珠贝目 (Pterioidea)、扇贝科 (Pectinidae)、扇贝属 (*Pecten*)。主要产于我国山东长岛、威海、蓬莱、石岛、文登和辽宁大连、长山岛等地, 栉孔扇贝经济价值很高, 除在沿海产地常年可以吃到鲜贝外, 为了保鲜和运输方便, 多数将其闭壳肌取出冷冻后运销各地, 称为冻扇贝柱或冻鲜贝。用扇贝闭壳肌制成的干品——干贝, 是海产八珍之一。近年来, 近岸海域的重金属污染愈来愈严重<sup>[1-3]</sup>, 重金属进入水体后, 首当其冲的受害者是藻类, 然后是水生动物, 特别是滤食性的水生动物如贝类等<sup>[4-5]</sup>。重金属摄入人体内部被吸收后, 排出非常缓慢, 如果在人体内累积过多, 将对人体有较大的毒害作用, 因此水产食品的安全是人们非常关心的问题<sup>[6]</sup>。有关海洋生物重金属富集的研究很多, 对于不同器官组织的富集研究也较多, 但多见于实验室暴露实验等<sup>[7-18]</sup>, 本文通过现场监测栉孔扇贝不同生长阶段各组织及其饵料生物对重金属的富集情况, 规避了实验室暴露条件下贝类自身对高浓度重金属的沾污作用, 研究了栉孔扇贝的饵料对重金属的富集情况,

并对栉孔扇贝的食用安全性进行了评价, 以期为食品安全政策的制定、大众饮食习惯的参考及海洋贝类重金属含量标准的制定提供有益的资料。

### 1 材料与方 法

#### 1.1 样品的采集与保存

在山东烟台四十里湾某养殖区设站, 分别于2009年6-12月每月采集一次栉孔扇贝样品, 并对养殖区的水质、沉积物、悬浮物中重金属进行监测。采样和保存方法按照《海洋监测规范》<sup>[19]</sup>进行。

#### 1.2 测定方法

**检测方法** 海水、沉积物中重金属按照《海洋监测规范》GB 17378—2007测定; 悬浮物样品用微孔滤膜过滤2~3 L海水制得, 干燥后将悬浮物与滤膜一同消解, 同时做空白测定, 检测方法按《海洋监测规范》GB 17378—2007执行; 栉孔扇贝样品的检测, 先将样品开壳, 分别制得整贝、闭壳肌、内脏团、瓣鳃样品各200 g, 按照《食品卫生检验方法》<sup>[20]</sup>测定。

**试剂与仪器** 硝酸、盐酸、APDC-DDTC、环己烷、甲基异丁基甲酮为优级纯; 氨水需经等温

收稿日期:2010-03-24 修回日期:2010-07-07

资助项目:海洋公益专项重点项目(200805031);国家科技支撑计划(2009BADB7B02)

通讯作者:马元庆, E-mail:erma0402@163.com

扩散纯化处理;铜、铅、镉标准溶液(中国计量科学研究院)、贻贝标准品(国家海洋局二所)作质控样;微孔滤膜( $\varnothing 47$  mm Whatman)、BP211D 型电子天平(梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司)、微波消解系统(意大利 Milestone)、AA800 原子吸收光谱仪(美国 Perkin Elmer)。

### 1.3 评价方法

重金属评价采用单因子评价模式,计算公式:

$$P_i = C_i/S_i$$

式中, $P_i$  为重金属  $i$  的污染指数, $C_i$  为重金属  $i$  的检测数据, $S_i$  为重金属  $i$  的评价标准<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 栉孔扇贝对重金属富集的组织差异

以贻贝标准品做质控样,检测栉孔扇贝不同组织中重金属 Cu、Pb、Cd 的含量,检测结果见表 1。从表 1 可以看出,栉孔扇贝体内各组织 Cd 含量(湿重):内脏团 > 瓣鳃 > 闭壳肌,这与季相山等<sup>[22]</sup>对海湾扇贝富集 Cd 的研究结论一致。内脏团中 Cd 含量最高,为 30.0 mg/kg,闭壳肌中 Cd 含量最低,为 5.38 mg/kg;Cu 含量(湿重):内脏团 > 闭壳肌 > 瓣鳃,内脏团中 Cu 含量最高,为 11.6 mg/kg,瓣鳃中 Cu 含量最低,为 2.08 mg/kg;Pb 含量(湿重):内脏团 > 瓣鳃 > 闭壳肌,但各组织中 Pb 含量并无显著差异。

表 1 栉孔扇贝不同组织中重金属含量(湿重)

部位 site	Cd	Cu	Pb
整体软体组织 whole soft form	13.30	2.56	0.233
闭壳肌 adductor	5.38	2.83	0.154
内脏团 visceral mass	30.00	11.60	0.392
瓣鳃 branchia	5.83	2.08	0.178
贻贝标准品检出值 <sup>1</sup> mussel Standard	4.24	7.33	1.900
人体消费标准 <sup>2</sup> human consumption standards	0.20	100.00	1.500

注:1. 贻贝标准品标准值 Cd: (4.5 ± 0.5); Cu: (7.7 ± 0.9); Pb: (1.96 ± 0.09); 单位: mg/kg。2. 澳大利亚国家卫生和医学研究理事会制定<sup>[23]</sup>。

Notes: 1. Cd: (4.5 ± 0.5) mg/kg, Cu: (7.7 ± 0.9) mg/kg, Pb: (1.96 ± 0.09) mg/kg; 2. Formulated by Australian National Health and Medical Research Council.

关于贝类不同组织对重金属蓄积的差异性,一些学者也进行了相关的研究, Bustamant 等<sup>[24]</sup>

将 *Chlamy varia* 分成消化腺、肾脏、性腺和肌肉几个部分,对不同组织的重金属含量进行研究,结果表明,消化腺和肾脏中积累的重金属含量最高,而肌肉中含量最低。从测定结果来看,重金属 Cd、Cu 在内脏团中的富集量明显大于在其他组织内的富集量,这与金属硫蛋白的诱导作用有关<sup>[25]</sup>。金属硫蛋白能与多种金属结合,而且,当水体受重金属污染,或将重金属注入体内,均能诱导它的产生。重金属主要与体内新合成的金属硫蛋白结合,当超过动物合成金属硫蛋白的速度和结合能力时,重金属即与大分子蛋白结合,抑制或使酶失去活性,引起中毒症状<sup>[26]</sup>。动物的肝脏、肾脏等组织的金属硫蛋白含量较高,并且是主要的合成单位,因此,进入体内的 Cd、Cu 大量富集在栉孔扇贝的内脏中。各组织对铅的富集却并无明显差异。

### 2.2 栉孔扇贝对重金属富集的个体差异

栉孔扇贝在不同生长阶段体内重金属的含量存在差异,通常生长时间长的个体内重金属含量要高于生长时间短的个体(图 1),随着生长时间的增加栉孔扇贝体内 Cd 含量明显增加,但 Cu、Pb 随着生长时间的延长在栉孔扇贝体内的增加趋势并不明显。随着生长时间增加,栉孔扇贝体内重金属的含量差距在不断增大,这说明栉孔扇贝对 Cd 的富集效率大于其对 Cu、Pb 的富集。

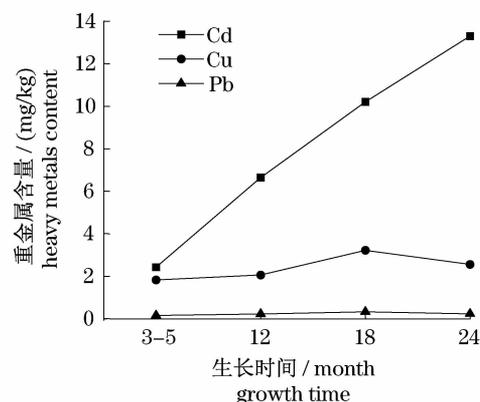


图 1 不同生长阶段栉孔扇贝体内重金属含量

Fig. 1 Content of Pb, Cd, Cu in different growth phase of *C. farreri*

### 2.3 浮游生物对重金属的富集

悬浮物中的重金属检测结果见表 2,从表 2 可以看出,7-9 月份悬浮物中重金属 Cu 的平均

含量(干重)为 27.6 mg/kg, Pb 为 20.0 mg/kg, Cd 为 1.11 mg/kg。与 8 月份该养殖区中表层沉积物中重金属含量相比, 悬浮物中 Cu 的含量基本持平, Pb 含量略高, Cd 含量则远高于表层沉积物中 Cd 含量。由于表层沉积物主要是由水体中沉降的悬浮颗粒和有机碎屑组成, 因此表层沉积物中重金属应与水体中悬浮物(主要包括悬浮颗粒和有机碎屑)中重金属含量相当, 但监测结果显示, 悬浮物中 Cd 含量却达到了表层沉积物中 Cd 含量的 6.4 倍。分析认为, 水样经抽滤后, 留在滤膜上的除悬浮颗粒、有机碎屑外, 还有浮游植物, 这说明可能是由于浮游植物对水体中重金属富集导致了悬浮物中的 Cd 和 Pb 的含量高于表层沉积物中的含量, 而浮游植物对 Cu 的富集不明显。悬浮物中重金属含量可以用公式表示:

$$\rho = \frac{\rho_{1i} \times M_1 + \rho_{2i} \times M_2 + \rho_{3i} \times M_3}{M_1 + M_2 + M_3}$$

式中,  $\rho$  表示悬浮物中重金属浓度;  $\rho_{1i}$ 、 $\rho_{2i}$ 、 $\rho_{3i}$  分别表示悬浮颗粒、有机碎屑、浮游生物中第  $i$  种重金属浓度;  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $M_3$  分别表示悬浮颗粒、有机碎

屑、浮游生物质量(干重)。由于  $M_3$  仅占  $M_1 + M_2 + M_3$  极小的比例, 而且  $\rho_{1i}$  和  $\rho_{2i}$  应与沉积物中重金属含量相当, 因此从公式中可以算出, 如果要使  $\rho$  值达到表层沉积物中 Cd 含量的 6.4 倍,  $\rho_{3i}$  须做出很高的贡献, 即浮游植物富集水体中的 Cd, 且富集程度很高。从表 2 可以看出, 7 月 21 日、8 月 7 日和 9 月 9 日该海域的浮游植物优势种为中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*)、丹麦细柱藻 (*Leptocylindrus danicus* Cleve)、三角角藻 (*Ceratium tripos*)、赤潮异湾藻 (*Heterosigma akashiwo*) 和反曲原甲藻 (*Prorocentrum sigmoides*), 说明这几种藻类可能对重金属 Cd 有极强的富集能力, 对 Pb 有一定的富集, 对 Cu 的富集不明显。从浮游植物数量看, 8 月 7 日该海域浮游植物数量高达 8 224 000 cell/L, 但悬浮物中 Cd 的量却低于 7 月 21 日和 9 月 9 日该海域悬浮物中的 Cd 含量, 说明可能中肋骨条藻、丹麦细柱藻、三角角藻对 Cd 的富集能力远大于赤潮异湾藻和反曲原甲藻。关于藻类富集重金属的报道较多<sup>[27-28]</sup>。

表 2 悬浮物中重金属含量  
Tab. 2 Content of heavy metals in suspended solids

取样日期 sampling date	悬浮物(mg/L) suspensions	干重(mg/kg) dry sample weight			浮游植物数量(cell/L) no. of phytoplankton	优势种 dominant species
		Cu	Pb	Cd		
7-21	9.10	34.9	23.35	1.06	39 952	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i> 丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve
8-7	9.14	19.2	21.7	0.451	8 224 000	赤潮异湾藻 <i>Heterosigma akashiwo</i> 反曲原甲藻 <i>Prorocentrum sigmoides</i>
9-9	7.94	28.6	14.9	1.81	9 884.16	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i> 三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>
沉积物(8-10) sediment	—	28.5	16.8	0.173	—	—

#### 2.4 栉孔扇贝对重金属的富集系数

富集系数又称生物浓缩系数、生物浓缩率、生物积累率、生物积累倍数、生物吸收系数等, 是生物体内某种元素或化合物的浓度与其所生存的环境中该物质的浓度的比值。可表示生物富集、浓缩、积累、放大和吸收能力与程度的数量关系。

栉孔扇贝的富集系数以如下公式计算:

$A_x$  (重金属富集系数) = 栉孔扇贝体内重金属含量 (mg/kg) / 养殖海水中重金属含量 (mg/L)  $\times 100\%$

采用前苏联科学家彼列尔曼等<sup>[29]</sup>于 1965 年对生物吸收系数 ( $A_x$ ) 的规定, 当  $A_x > 1$  时, 说明

该元素在栉孔扇贝体内富集。

对实验海域海水水质的监测结果表明, 各站位 Cd、Cu、Pb 的含量均符合一类海水水质标准, 说明水体环境中 Cd、Cu、Pb 的含量很低, 因此可以忽略海水中重金属对栉孔扇贝沾污作用。计算结果表明, 成体栉孔扇贝对 Cd 的富集系数为 25 495, 对 Cu 的富集系数为 1 453, 对 Pb 的富集系数为 258, 这说明上述重金属在栉孔扇贝体内富集, 并且栉孔扇贝对重金属的富集有明显的选择性, 镉的富集系数最高, 铅的富集系数最低。由于栉孔扇贝主要滤食海水中浮游植物和有机碎屑, 考虑到浮游植物自身对海水中重金属的富集

作用,因此上述计算结果应该是,重金属从海水→浮游植物→栉孔扇贝的生物放大效应。Fang<sup>[30]</sup>研究了翡翠贻贝(*Perna viridis*)通过海水、藻类、沉积物均能富集重金属 Cd,且通过海水途径富集 Cd 的效率是其通过藻类或沉积物途径富集镉效率的 3 至 9 倍,但其结论是在高浓度 Cd 含量的模拟实验条件下得到的。从表 2 可以看出,8 月沉积物中重金属 Cu、Cd、Pb 的监测结果均符合《海洋沉积物质量》一类标准,这说明在水环境和沉积环境没有受到重金属污染的情况下,栉孔扇贝体内重金属 Cd 依然有较高的含量。由于栉孔扇贝自身有强大的滤食能力,因此,其体内重金属主要是通过不断滤食藻类而富集。由于栉孔扇贝体内含量与水体和沉积物中 Cd 含量没有很好的对应关系,因此栉孔扇贝不是重金属 Cd 的理想指示生物。

### 2.5 栉孔扇贝不同组织质量评价

从表 3 可以看出,栉孔扇贝中 Cu、Pb 的含量符合评价标准,栉孔扇贝软体部分、内脏团、闭壳肌和瓣鳃中 Cd 的含量均超过了评价标准,其中内脏团中 Cd 含量是标准值的 7.50 倍,栉孔扇贝整体软体组织中 Cd 含量是标准值的 3.33 倍。欧盟、美、日、韩、澳等都对贝类中重金属限量有明确规定<sup>[31]</sup>,但这些标准均是对不同贝类中重金属做统一的限量规定。监测发现,不同贝类体内重金属的含量差异很大。相同水体环境条件下,扇贝、牡蛎中重金属 Cd 含量较高,成体栉孔扇贝和夏威夷扇贝中 Cd 含量比成体海湾扇贝高,这可能与他们的生长周期有关;太平洋牡蛎(*Ostrea gigas thunberg*)中 Cd 含量比褶牡蛎(*O. plicatula*)高,这可能与他们的个体差异有关。其它贝类如缢蛏(*Sinonovacula constricta*)、杂色蛤(*Venerupis variegata*)、四角蛤(*Macra veneriforznis*)和文蛤(*Mercenaria linnaeus*)等贝类中 Cd 含量远低于扇贝和牡蛎,这可能与他们的生长方式有关。因此,现行贝类标准对不同贝类中重金属限量做统一规定是否科学还需深入论证。

### 2.6 栉孔扇贝人体消费标准的初步研究

研究表明,栉孔扇贝中超标重金属主要是 Cd。Cd 是对动物和人体有毒的重金属,进入机体后可作用于全身各器官和系统,但主要分布于肝脏和肾脏,能通过消化道、呼吸道或皮肤等途径

进入体内,但 Cd 在动物体内吸收的主要部位是十二指肠。研究发现,在人体内,Cd 的半衰期长达 7~30 年,可蓄积 50 年之久,能对多种器官和组织造成损害。Cd 具有致癌性,国际癌症研究署(IARC)把镉归类为第一类人类致癌物;美国国家毒理学计划(NIIP)也把镉确认为人类致癌物。因此,对人体 Cd 消费标准的研究格外重要。

表 3 栉孔扇贝中重金属评价  
Tab. 3 Evaluation of heavy metals in *C. farreri*

部位 site	单项污染指数 $P_i$		
	Cd	Cu	Pb
整体软体组织 whole soft form	3.33	0.0512	0.233
闭壳肌 adductor	1.35	0.0566	0.154
内脏团 visceral mass	7.50	0.232	0.392
瓣鳃 branchia	1.46	0.0416	0.178

澳大利亚国家卫生和医学研究理事会规定贝类中 Cd 人体消费标准为 0.2 mg/kg,从表 1 可以看出,栉孔扇贝各组织中 Cd 含量均高于这一标准要求。钟宁等<sup>[32]</sup>指出,食入的镉吸收性较差,对人来说仅有 3%~8% 被吸收,其余大部分(约 95%)经由粪便排出体外,因此以浓度标准作为人体消费的限量规定不如以总量控制作为人体消费的限量规定科学。世界卫生组织规定人体通过食物一周摄入 Cd 的量不应超过 0.4~0.5 mg。如以 0.5 mg 为人体一周摄入 Cd 的限量值,以 5% 为人体对食品中 Cd 的吸收系数,以 Cd 为限量标准,则人体一周摄入食物的限量为

$$M_{Cd} = \frac{0.5}{\frac{\sum \rho_i m_i}{\sum m_i} \times 5\%}$$

式中, $M_{Cd}$ 表示以 Cd 为限量标准人一周可食用食物的限量(kg); $\rho_i$ 表示第  $i$  种食物中 Cd 浓度(mg/kg); $m_i$ 表示第  $i$  种食物的质量(kg)。

假设只以 Cd 为限量标准且以栉孔扇贝为唯一食物,则如果食用整鲜贝,以检测值 13.3 mg/kg(表 2)为  $\frac{\sum \rho_i m_i}{\sum m_i}$  值,则人一周食用鲜贝肉的参考值为 0.75 kg,以每千克贝(含贝壳)出肉(整体)0.25 kg 计算,换算到整贝(含贝壳)的量为 3.0 kg;如果只食用鲜贝丁,以检测值 5.38 mg/kg(表 2)为  $\frac{\sum \rho_i m_i}{\sum m_i}$  值,则人一周可食用鲜贝丁的

参考值为 1.86 kg,以每千克贝(含贝壳)出鲜贝丁 0.1 kg 计算,换算到整贝(含贝壳)的量为 18.6 kg。由于世卫组织给出的人体通过食物周摄入 Cd 量的限值是人一周摄入所有食物中 Cd 含量的总和,因此上述给出的人体周消费栉孔扇贝的参考量要比人体实际允许的消费量小得多。某种食品的人体消费标准的研究,除需考虑人的食物结构外,还应充分考虑地域环境、生活习惯以及人体自身等条件的差异。

### 3 讨论

#### 3.1 栉孔扇贝对重金属的富集

对栉孔扇贝各组织中重金属含量研究表明,栉孔扇贝各组织对重金属的富集具有明显的差异和选择性,内脏团对重金属 Cu、Cd 的富集能力大于闭壳肌,而栉孔扇贝各组织中的 Pb 含量无显著差异。栉孔扇贝对 Cd 的富集能力明显大于其对 Cu、Pb 的富集。栉孔扇贝对 Cd 的富集与其生长周期呈显著正相关,但 Cu、Pb 随生长时间增加在栉孔扇贝体内的增加趋势并不明显。

#### 3.2 栉孔扇贝饵料对重金属的富集

现场监测结果表明,栉孔扇贝的饵料生物浮游植物对 Cd 有很高的富集效率,对 Pb 有一定的富集能力,对 Cu 的富集不明显。经过海水→饵料(浮游生物)→栉孔扇贝这一生物放大过程,栉孔扇贝对 Cd 的富集系数为 25 495,对 Cu 的富集系数为 1 453,对 Pb 的富集系数为 258,说明上述重金属在栉孔扇贝体内富集且对重金属的富集有明显的选择性,Cd 的富集系数最高,Pb 的富集系数最低。虽然目前关于藻类富集重金属的研究较多<sup>[27-28]</sup>,但多集中于水体中重金属污染治理方面的应用研究,而对水产品与其饵料生物对重金属的富集之间的相关性研究尚不多见。

#### 3.3 食用安全评价

从饮食安全角度来讲,食用贝柱比食用整体贝肉安全。镉为致癌物质,由于贝柱中 Cd 含量仅为内脏中的 1/5,因此建议食用栉孔扇贝时尽量食用贝柱,少食或不食内脏。目前各国对贝类中重金属限量值规定相差很大,美国对贝类中重金属 Cd 的限量规定是欧盟的 4 倍,是日本的 2 倍。因此,现行贝类标准对不同贝类中重金属的限量做统一的规定是否科学需深入论证。开展不同贝类对重金属的富集机理研究,弄清各种贝类

的人体消费标准是目前亟需解决的一项重要工作。

#### 参考文献:

- [1] 贺广凯. 黄渤海沿岸经济贝类中重金属残留量水平[J]. 中国环境科学,1996,16(2):96-100.
- [2] 魏泰莉,杨婉玲,赖子尼,等. 珠江口水域鱼虾类重金属残留的调查[J]. 中国水产科学,2002,9(2):172-176.
- [3] 刘春颖,张正斌,张安慧,等. 中国近岸部分海域海水中金属络合配位体浓度的研究[J]. 海洋学报,2005,27(2):54-62.
- [4] 陈必链,吴松刚. 钝顶螺旋藻对 7 种重金属的富集作用[J]. 福建师范大学学报,1999,15(1):81-85.
- [5] de Conto Cinier C, Petit-Ramel M, et al. Cadmium bioaccumulation in carp (*Cyprinus carpio*) tissues during long-term high exposure: analysis by inductively coupled plasma-mass spectrometry [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1997, 38(2):137-143.
- [6] 王竹天,王茂起,韩宏伟,等. 2002 年我国水产食品中镉含量监测及分析[J]. 卫生研究,2004,33(4):473-474.
- [7] Radlowska M, Pempkowlak J. Stress-70 as indicator of heavy metals accumulation in blue mussel *Mytilus edulis* [J]. *Environment International*, 2002, 27:605-608.
- [8] 张少娜. 经济贝类对重金属的生物富集动力学特性的研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2003.
- [9] Catsiki V A, Florou H. Study on the behavior of the heavy metals Cu, Cr, Ni, Zn, Fe, Mn and <sup>137</sup>Cs in an estuarine ecosystem using *Mytilus galloprovincialis* as a bioindicator species: the case of Thermaikos gulf, Greece [J]. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2006, 86(1):31-44.
- [10] Orescanin V, Lovrencic I, Mikelic L, et al. Biomonitoring of heavy metals and arsenic on the east coast of the Middle Adriatic Sea using *Mytilus galloprovincialis* [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2006, 245(2):495-500.
- [11] 黎小正,兰柳春. 广西沿海牡蛎体 Pb 含量水平与相关标准评价[J]. 广西科学院学报,2007,23(3):163-165.
- [12] 陈海刚,林钦,蔡文贵,等. 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[J]. 农

- 业环境科学学报,2008,27(3):1163-1167.
- [13] 李淑丽,孙咏红,于丽华. 紫贻贝对海水中镉富集规律的研究[J]. 西安文理学院学报(自然科学版),2008,11(1):57-60.
- [14] 刘琴. 重金属 Pb、Cd 和 Cr 在泥蚶中的行为研究[D]. 中国海洋大学,2008.
- [15] 郭远明. 海洋贝类对水体中重金属的富集能力研究[D]. 中国海洋大学,2008.
- [16] 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.
- [17] 沈益绿,马继臻,平仙隐,等. 厚壳贻贝对重金属的生物积累及释放规律研究[J]. 台湾海峡,2009,28(1):52-59.
- [18] 沈益绿,马继臻,平仙隐,等. 褶牡蛎对重金属的生物富集动力学特性研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(4):783-788.
- [19] 国家海洋环境监测中心. GB 17378—2007 海洋监测规范[S]. 中国标准出版社,2008.
- [20] 中国疾病预防控制中心营养与食品安全所,北京市疾病预防控制中心,江苏省疾病预防控制中心. GB/T 5009—2003 食品卫生检验方法(理化部分)[S]. 中国标准出版社,2004. 2.
- [21] 王军,翟玉秀,宁劲松,等. 养殖虾夷扇贝不同组织中重金属含量的分布[J]. 海洋科学,2009,33(8):44-46.
- [22] 季相山,赵燕,丁蕾,等. 海湾扇贝对海水中镉的蓄积规律研究[J]. 水产学报,2006,30(6):801-805.
- [23] 张丽. 福建莆田后海围垦养殖区几种生物体内重金属的含量分析及评价[J]. 环境,2006,7(40):100-101.
- [24] Bustamante P, Miramand P. Evaluation of the variegated Scallop *chlamys varia* as a biomonitor of temporal trends of Cd, Cu and Zn in the field[J]. Environ Pollut,2005,138:109-120.
- [25] 吴众望,潘鲁青. 重金属离子对凡纳滨对虾肝胰脏 MT 含量的影响[J]. 水产学报,2005,29(5):715-718.
- [26] 王凡,赵元风,吴益春,等. 栉孔扇贝对 Cd 的累积和排出[J]. 湛江海洋大学学报,2005,25(4):95-98.
- [27] 陆开彤,唐建军,蒋德安. 藻类富集重金属的特点及其应用展望[J]. 应用生态学报,2006,17(1):118-122.
- [28] 况琪军,胡征宇,赵先富,等. 藻类生物技术在水环境保护中的应用前景探讨[J]. 安全与环境学报,2004,4:6-48.
- [29] 彼列尔曼 A N. 后生地球化学[M]. 北京:科学出版社,1975:7.
- [30] Fang Z Q. Comparative studies on uptake pathway of Cadmium by *Perna viridi*[J]. Journal of Ocean University of China,2006,5(1):49-54.
- [31] 穆迎春,马兵,宋怿,等. 主要贸易国贝类产品安全卫生控制的化学污染项目和限量规定[J]. 中国水产,2010,2:74-75.
- [32] 钟宁,曾清如. 环境和饲料中的镉对畜禽的毒性研究进展[J]. 微量元素与健康研究,2005,22(3):38-42.

## The research of heavy metal enrichment in *Chlamys farreri*

MA Yuan-qing<sup>\*</sup>, ZHANG Xiu-zhen, SUN Yu-zeng, JIN Yang, LIU Yi-hao, SUN Shan, WEI Xiao  
(Shandong Marine Fisheries Research Institute, Yantai 264006, China)

**Abstract:** An *in situ* experiment was performed at a *Chlamys farreri* culture zone of Yantai Si-Shili Bay to learn more about the heavy metal concentration in the tissues and the food organisms of *C. farreri* at different growth stages and to carry out food safety evaluation on *C. farreri* for human consumption. *C. farreri* samples were monthly collected from June to December in 2009. At the same time, the heavy metals were monitored in sea water, sediments and suspended solids (SS). The method for monitoring heavy metals in sea water and sediments complied with The Specification for Marine Monitoring (GB 17378—2007). By filtering 2–3 L seawater with microfiltration membrane, the samples of SS were obtained, which would be digested together with filtration membrane after desiccation, while doing a blank determination. The monitoring method complied with The Specification for Marine Monitoring (GB 17378—2007). The *C. farreri* were tested in conformity to Methods of Food Hygienic Analysis (GB/T 5009—2003), and 200g samples were respectively obtained as whole soft form, adductor, visceral mass and lamellibranch. The results showed that there is significant variation and selectivity of heavy metal concentration in different tissues of *C. farreri*, of which the enrichment coefficient of Cd is as high as 25 495, the content of Cd in adductor muscle being 1/5 of that in visceral mass, while the enrichment coefficient of Cu and Pb are 1 453 and 258, respectively. The results indicated that the enrichment process of Cd was positively correlated with the growth cycle of *C. farreri*, while the enrichment of Cu and Pb is in a faint-correlation with its growth cycle, which may be elucidated by the comparatively higher enrichment coefficient of Cd than those of Pb and Cu in phytoplankton, the main feeding source of *C. farreri*. The results from quality appraisal of *C. farreri* showed that the content of Cu and Pb conforms to the evaluation criteria, while the content of Cd exceeded in whole soft form, visceral mass, adductor and lamellibranch. The value of Cd content in visceral mass is 7.50 times greater than the normal, and in the whole soft form it is 3.33 times greater than the normal. In addition, a preliminary study on human body consumption standard was performed in the paper, and reference intake of *C. farreri* for humans was put forward. If it is eaten wholly, the weekly reference intake of the fresh will be 0.75 kg, i. e. 3.0 kg including the weight of shell; if just adductor muscle is eaten, its weekly reference intake will be 1.86 kg, i. e. 18.6 kg including the weight of shell.

**Key words:** *Chlamys farreri*; heavy metal; cadmium; enrichment coefficient; human ingestion standard

**Corresponding author:** MA Yuan-qing. E-mail: erma0402@163.com