

# 虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)对铅和镉的生物富集与释放规律\*

崔正国<sup>1</sup> 苑旭洲<sup>1,2</sup> 崔毅<sup>1</sup> 陈碧鹃<sup>1①</sup> 李永霞<sup>1</sup> 梁峻<sup>3</sup> 赵学伟<sup>3</sup>

(1. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室 山东省渔业资源与生态环境重点实验室

中国水产科学研究院黄海水产研究所 碳汇渔业实验室 青岛 266071;

2. 山东恒诚检测科技有限公司 莱州 261400; 3. 獐子岛集团股份有限公司 大连 116001)

**摘要** 利用双箱模型模拟了虾夷扇贝在混合暴露条件下富集、释放铅和镉的动力学特征,通过测定不同规格虾夷扇贝、不同组织富集、释放过程中铅和镉的含量并进行非线性拟合,获得不同生长阶段虾夷扇贝对铅和镉的生物富集系数  $BCF$ 、吸收速率常数  $k_1$ 、释放速率常数  $k_2$ 、生物学半衰期  $B_{1/2}$  以及不同组织中铅和镉的富集参数。结果显示,大、小两种规格虾夷扇贝对铅的  $BCF$  分别为 1671、896,对镉的  $BCF$  分别为 7433、1123;不同规格虾夷扇贝对铅、镉的  $BCF$  顺序为:大规格>小规格;相同规格虾夷扇贝  $BCF$ :镉>铅,表明虾夷扇贝对镉的富集能力强于铅;铅、镉的  $B_{1/2}$  为:大规格>小规格,说明大规格的虾夷扇贝对铅、镉的代谢排出能力更强;铅在虾夷扇贝各组织中的富集顺序依次为:鳃>内脏团>闭壳肌,镉的富集顺序依次为:内脏团>鳃>闭壳肌。

**关键词** 虾夷扇贝;铅;镉;生物富集;双箱模型

中图分类号 S932.4 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2015)03-0116-09

虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*),隶属软体动物门(Mollusc),双壳纲(Bivalvia),珍珠贝目(Pteriacea),扇贝科(Pectinidae)。因其营养丰富,味道鲜美,深受人们的喜爱,并已在山东、辽宁等海域人工养殖。虾夷扇贝属底栖滤食性双壳贝类,对重金属有较强的生物富集能力,极易受到重金属的污染。铅(Pb)和镉(Cd)是重金属中毒性相对较强的两种,其中镉被认为是水环境污染最危险的物质之一,它的毒性效应,易富集,还可沿食物链传递,其蓄积具有隐藏性和不可逆性等特点(王夔,1996;张翠等,2007)。近年来,随着经济的发展,海洋环境中重金属污染的现象日益突出,食用受到重金属污染的贝类会对人类健康产生不良影响(魏泰莉等,2002;刘春颖等,2005)。马元庆等(2009)对山东半岛近海养殖贝类中的重金属污染状况进行了

调查研究,部分养殖区铅、镉超标严重,因此研究铅、镉在贝类体内的富集与释放规律,对正确评价铅、镉对养殖贝类和生态系统的影响,保证贝类产品质量和保障消费者食用安全显得尤为必要。

本研究以大连地区广泛养殖的虾夷扇贝为研究对象,采用半静态双箱动力学模型,探讨了不同规格虾夷扇贝及其不同组织对铅和镉的富集释放规律。旨在系统地认识虾夷扇贝富集、释放重金属的动力学特征,为贝类的重金属毒性效应研究提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 实验对象** 实验对象为大连海域养殖的虾夷

\* 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室开放基金(2011005)、国家海洋局海洋环境评价专项(DOMEP(MEA)-02、DOMEP(MEA)-01-01)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(20603022011002)共同资助。崔正国, E-mail: cuizg@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 陈碧鹃, 研究员, E-mail: chenbj@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2014-04-28, 收修改稿日期: 2014-05-27

扇贝,选取两种规格的扇贝:大规格(壳高:  $8.6 \pm 1.1$  cm、体重:  $70.4 \pm 28.8$  g),小规格(壳高:  $3.0 \pm 0.1$  cm、体重  $4.0 \pm 0.7$  g)。驯养 7–14 d 后,随机挑选健康的虾夷扇贝进行实验。

**1.1.2 实验海水** 理化条件对铅、镉的富集和释放产生影响,在实验过程中,需保证整个实验的理化条件基本稳定,以保证结果的准确性,具体的理化条件为:实验海水取自大连海域,实验海水经沉淀、过滤、消毒、充氧后备用。水质分析结果显示,pH 为 7.8–8.2;盐度为 30.5–30.8;溶解氧(DO)大于 6.5 mg/L;镉为 0.22  $\mu\text{g/L}$ ,铅为 0.21  $\mu\text{g/L}$ 。实验用海水符合渔业水质标准 GB11607-89。

**1.1.3 试剂与仪器** 氯化铅、氯化镉均为上海国药试剂厂生产的分析纯试剂,分析用水为 Millipore 超纯水。铅、镉采用日立 Z5000 型原子吸收分光光度计测定;pH、DO、温度和盐度采用美国 YSI 556 MPS 多参数仪测定。

## 1.2 实验设置与方法

实验于 2012 年 9 月在大连某集团原良种场进行。实验按照扇贝的规格分为大、小两组,每种规格设置两个平行实验和 1 个空白对照,实验组在海水中添加铅和镉的浓度均为 0.005 mg/L,持续充氧,保持实验期间海水中 DO 在 6.5 mg/L 以上。富集阶段进行 22 d,采样时间间隔分别为第 0、2、5、10、15、22 天;释放阶段进行 15 d,取样间隔为第 2、5、10、15 天。每次随机选取适量不同规格的虾夷扇贝,按要求取出整个贝体及闭壳肌、内脏、鳃各组织分别进行均浆、冷冻,备分析用。

## 1.3 样品分析

海水、虾夷扇贝体中铅、镉的测定均按照《海洋监测规范》GB17378-2007 采用无火焰原子吸收分光光度法进行。

## 1.4 数据处理

**1.4.1 模型构建** 虾夷扇贝富集、释放重金属采用双箱动力学模型,模型描述如图 1 所示(李学鹏等, 2008<sup>1)</sup>;苑旭洲等, 2012)。

假设铅、镉在虾夷扇贝体内的富集、释放过程符合 1 级动力学方程。其中,含有铅、镉的海水是第一相,虾夷扇贝体或组织作为第二相(Ritterhoff *et al.*, 1997; Clason *et al.*, 2000)。

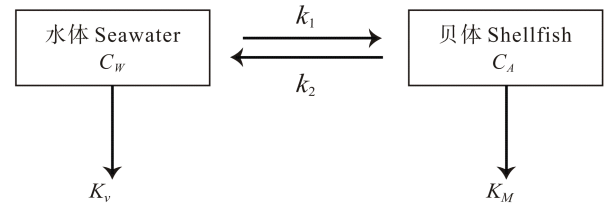


图 1 富集与释放铅、镉双箱动力学模型

Fig.1 Model of two-compartment for accumulation and elimination of Pb and Cd

$$\text{对于水体: } \frac{dC_w}{dt} = 0 \quad (1)$$

$$\text{对于贝体: } \frac{dC_A}{dt} = k_1 C_w - (k_2 + K_M) C_A \quad (2)$$

式中,  $k_1$  为虾夷扇贝富集铅、镉的速率常数,  $k_2$  为释放铅、镉的速率常数,  $K_v$  为水体挥发铅、镉的速率常数,  $K_M$  为虾夷扇贝代谢铅、镉的速率常数,  $C_w$  为第一相铅、镉的浓度(mg/L),  $C_A$  为第二相铅、镉的含量(mg/kg),  $t$  为富集与释放铅、镉的天数(d)。

由于实验时间相对较短(40 d 左右),故海水中铅、镉的自然挥发及虾夷扇贝的代谢可忽略不计,即  $K_v$  和  $K_M$  均为零,则方程(1)、(2)推导如下:

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

富集铅、镉过程 ( $0 < t < t^*$ ) (3)

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

释放铅、镉过程 ( $t < t^*$ ) (4)

式中,  $t^*$  为富集铅、镉的天数(d),  $C_0$  为实验开始前虾夷扇贝体内铅、镉的含量(mg/kg)。通过方程(3)和(4)对虾夷扇贝富集和释放铅、镉的过程进行非线性拟合,则得到  $k_1$ 、 $k_2$ 。

理想状态下虾夷扇贝对铅、镉的富集系数 BCF 的计算公式如下:

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

富集达到平衡时,虾夷扇贝体内铅、镉含量  $C_{A \max}$  如下表示:

$$C_{A \max} = BCF \times C_w \quad (6)$$

生物半衰期( $B_{1/2}$ )指的是贝类释放体内已积累金属的一半所需要的时间。公式如下:

$$B_{1/2} = \frac{\ln 2}{k_2} \quad (7)$$

1) 李学鹏. 重金属在双壳贝类体内的生物富集动力学及净化技术的初步研究. 浙江工商大学硕士研究生学位论文, 2008, 28–29

双箱模型的优点是可以通过非线性拟合来计算没有达到平衡(即理论的平衡状态)下虾夷扇贝富集铅、镉的动力学参数。

**1.4.2 模型验证** 利用  $F$  检验和卡方( $\chi^2$ )检验来验证双箱动力学模型用于模拟虾夷扇贝富集和释放铅、镉的可行性。其中,采用  $F$  检验检验双箱动力学模型整体的显著性,模型的拟合程度采用  $\chi^2$  检验结合判定系数  $R^2$  来验证。

## 2 结果

### 2.1 虾夷扇贝对铅、镉生物富集和释放的个体差异

不同规格虾夷扇贝体对铅、镉的富集和释放情况见图2。如图2所示,富集阶段,铅、镉在虾夷扇贝体内的含量随富集时间的延长而不断增加。至富集阶段结束时两个规格虾夷扇贝体内铅含量为2.54 mg/kg、4.06 mg/kg,镉含量为4.15 mg/kg、2.95 mg/kg。在释放阶段,铅、镉含量随释放时间的延长而明显降低,释放15 d与释放0 d相比,两个规格扇贝体内的铅、镉分别释放了50.46%、83.68%和74.87%、80.84%。数据表明,虾夷扇贝对铅、镉均具有较强的富集与释放能力。

### 2.2 虾夷扇贝对铅、镉生物富集和释放的组织差异

由图3(a)、图3(b)可知,虾夷扇贝不同组织对铅、镉的富集和释放存在较大差异。富集阶段,虾夷扇贝各组织中铅的含量随富集时间的增加而增加,至富集阶段结束时铅在大、小规格虾夷扇贝各组织中的富集浓度依次为:鳃>内脏团>闭壳肌。释放阶段结束,大小两个规格的扇贝内脏团、鳃、闭壳肌的铅含量明显

释放了48.65%、84.00%、64.52%和54.07%、66.43%、63.64%。因此可以看出,释放速率同富集速率:鳃>内脏团>闭壳肌。

由图3(c)、图3(d)可知,富集阶段镉在大、小规格虾夷扇贝体内不断被富集,镉在虾夷扇贝各组织中的富集浓度依次为:内脏团>鳃>闭壳肌。释放阶段,虾夷扇贝不同组织对镉的释放速度为内脏团最大,鳃和闭壳肌相差不大。

### 2.3 虾夷扇贝富集和释放铅、镉的非线性拟合

利用双箱动力学模型对虾夷扇贝富集释放铅、镉试验结果进行非线性拟合,如图4所示。通过曲线拟合,可得到虾夷扇贝富集铅、镉速率常数  $k_1$ , 释放速率常数  $k_2$ 。然后根据公式(5)–公式(7),可获得其他动力学参数  $BCF$ 、 $C_{A\max}$ 、 $B_{1/2}$ 。具体参数见表1。

**2.3.1 模型的拟合优度检验** 在显著水平  $\alpha=0.05$ , 自由度  $df=5$  下, 虾夷扇贝富集铅、镉阶段  $\chi^2$  的临界值为1.15,  $F$  临界值为6.61; 释放铅、镉阶段, 自由度  $df=4$  的条件下,  $\chi^2$  的临界值为0.71,  $F$  临界值为7.71。本研究富集和释放铅、镉阶段拟合数据的  $\chi^2$  值均小于其临界值(表1), 说明由双箱模型拟合得到的预测值与实测值不存在显著性差异, 非线性拟合优度良好。各组拟合数据  $F$  值均大于6.61、7.71, 表明虾夷扇贝对铅、镉的生物富集和释放符合双箱模型。各组的拟合曲线判定系数  $R^2$  在0.87–0.98之间, 说明非线性拟合程度良好。综上所述, 双箱动力学模型适用于虾夷扇贝对铅、镉的富集和释放过程的模拟。

### 2.3.2 虾夷扇贝对铅、镉的生物富集动力学特性

由双箱动力学模型拟合得到的不同规格虾夷扇贝

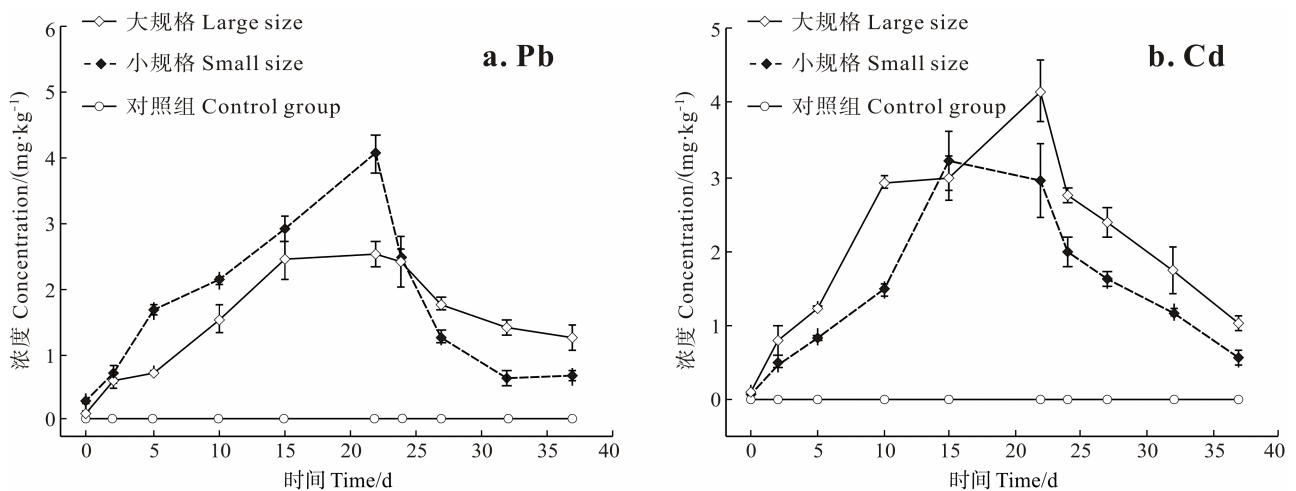


图2 不同规格虾夷扇贝对铅、镉的富集与释放曲线  
Fig.2 Accumulation and elimination curves of Pb and Cd by *P. yessoensis*

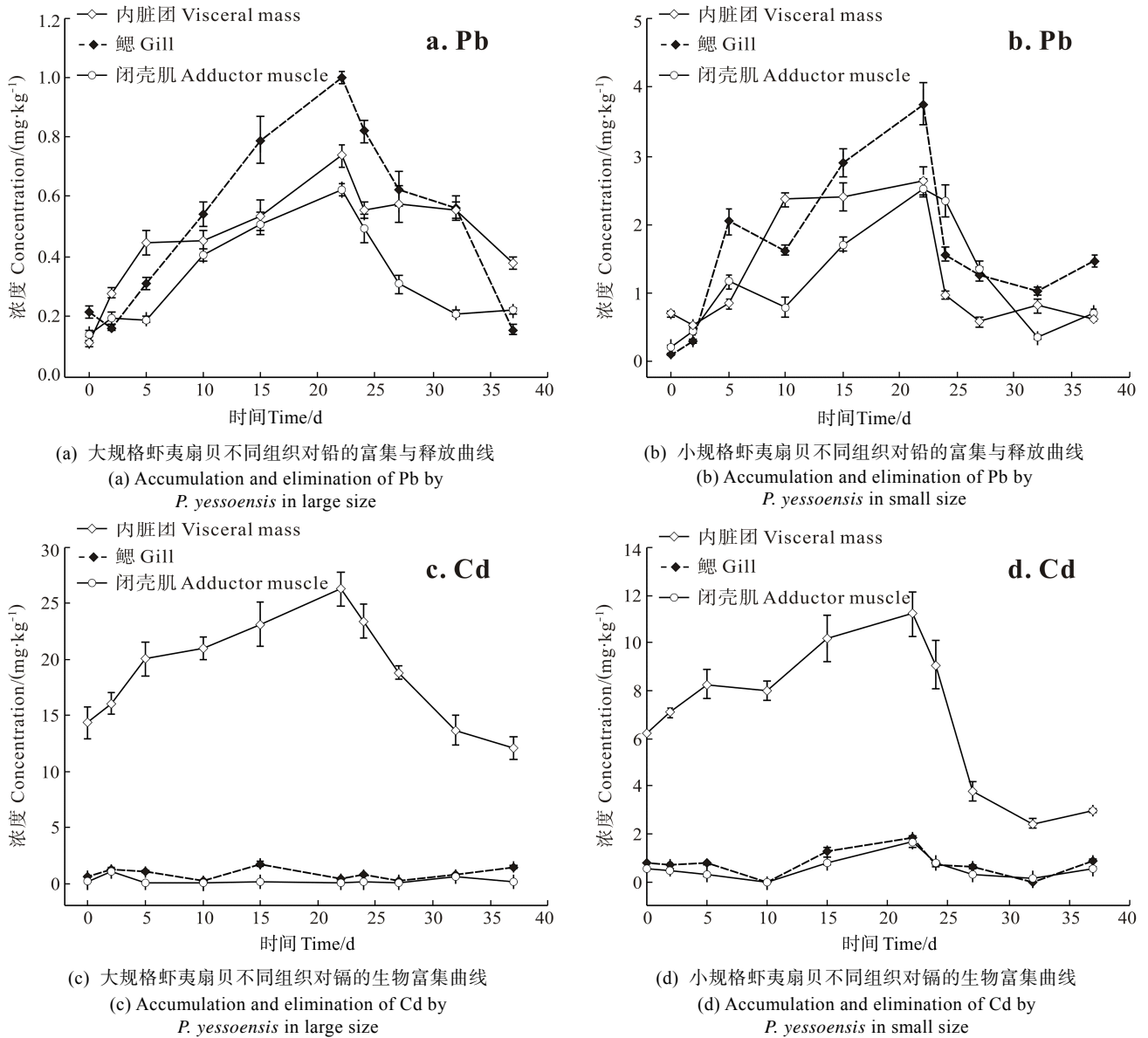


图 3 虾夷扇贝不同组织对铅、镉的富集与释放曲线

Fig.3 Bioconcentration and elimination of Pb and Cd in various tissues of *P. yessoensis*

对铅、镉的生物富集和释放的动力学参数见表 2。由表 2 可知, 大、小规格虾夷扇贝对铅的  $BCF$  分别为 1671、896; 对镉的  $BCF$  分别为 7433、1123。不同规格虾夷扇贝对铅、镉的  $BCF$  顺序为: 大规格>小规格。相同规格虾夷扇贝  $BCF$ : 镉>铅, 表明虾夷扇贝对镉的富集能力强于铅。模拟富集平衡条件下虾夷扇贝对铅、镉的最大富集浓度( $C_{Amax}$  值), 大规格虾夷扇贝对铅的  $C_{Amax}$  值为 8.35mg/kg、小规格为 4.48 mg/kg; 大规格虾夷扇贝对镉的  $C_{Amax}$  值为 37.16 mg/kg、小规格为 5.62 mg/kg。由达到富集平衡时虾夷扇贝对铅、镉的最大富集浓度可以看出: 大规格>小规格, 这在一定程度上也说明虾夷扇贝对镉的富集能力强于铅。

本实验室得到的铅、镉的生物学半衰期( $B_{1/2}$ )为:

大规格>小规格, 说明大规格的虾夷扇贝对铅、镉的代谢排出能力更强。对于同种规格的  $B_{1/2}$ , 大规格虾夷扇贝的  $B_{1/2}$ : 铅>镉, 小规格虾夷扇贝的  $B_{1/2}$ : 镉>铅(表 3)。

### 3 分析与讨论

#### 3.1 贝类富集重金属 $BCF$ 的计算

贝类是滤食性动物, 主要食物为有机碎屑、悬浮在海水中的微型颗粒和浮游生物等。另外, 贝类属于软体动物, 是较低等的生物。因此, 它们对重金属的富集和释放规律具有一定的相似性。贝类富集、释放重金属的过程受到很多因素的影响, 具体可分为生物

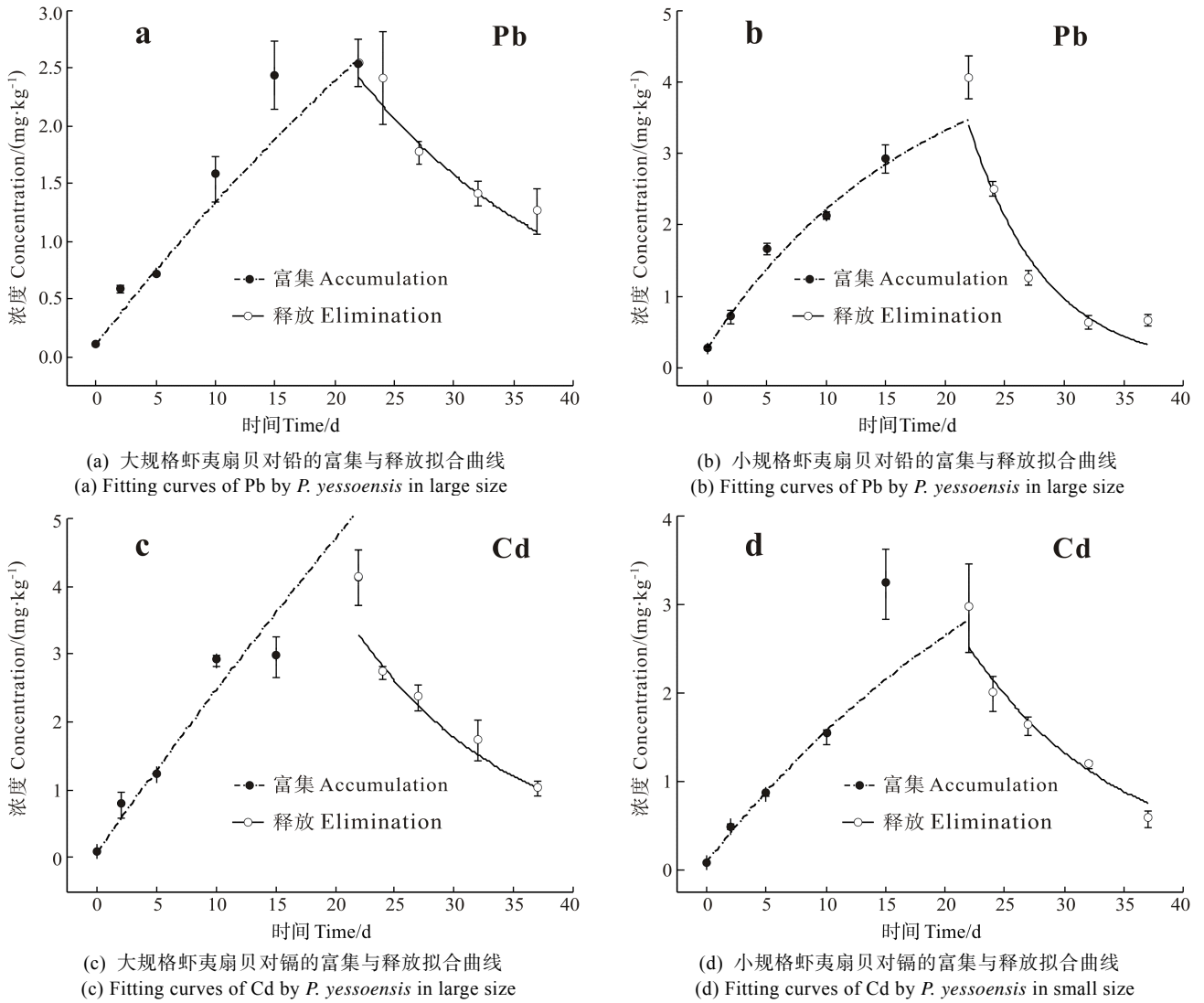


图4 虾夷扇贝对铅、镉富集与释放的拟合曲线  
Fig.4 Fitting curves of Pb and Cd by *P. yessoensis*

表1 双箱动力模型的拟合优度检验信息

Tab.1 Statistical information to assess the goodness-of-fit of the two compartment models

阶段 Phase	重金属 Heavy metals	自由度 df	$R^2$	$\chi^2$ 值 $\chi^2$ value	F 值 F value
富集 Accumulation	Pb	5	0.94	0.33	59.84
		5	0.98	0.17	206.44
	Cd	5	0.97	0.45	69.12
		5	0.98	0.57	31.59
释放 Elimination	Pb	4	0.91	0.07	28.41
		4	0.87	0.56	8.68
	Cd	4	0.96	0.25	21.57
		4	0.90	0.14	28.14

因素和非生物因素两类。生物因素主要涉及贝类本身，例如品种差异、性别、生长阶段、规格大小以及繁殖状态等；非生物因素主要是环境因素，例如贝类生存

表2 不同规格虾夷扇贝对铅、镉的富集动力学参数

Tab.2 Kinetic parameters of accumulation of Pb and Cd in *P. yessoensis*

重金属 Heavy metal	规格组 Size	$k_1$	$k_2$	BCF	$C_{Amax}$
Pb	大 Large	26.57	0.0159	1671	8.35
	小 Small	51.18	0.0572	896	4.48
Cd	大 Large	49.30	0.0066	7433	37.16
	小 Small	34.25	0.0305	1123	5.62

周围环境的温度、盐度、pH 值、溶解氧、有机质的含量、季节变化以及水动力输运条件等(励建荣等, 2007)。贝类富集、释放动力学参数  $BCF$ 、 $B_{1/2}$  的获得也在一定程度上受到计算方法的影响。较早实验的重金属富集参数是通过公式：

生物富集系数  $BCF =$  海湾扇贝体内重金属含量

表3 不同规格虾夷扇贝对铅、镉的释放动力学参数  
Tab.3 Kinetic parameters of elimination of Pb and Cd in *P. yessoensis*

重金属 Heavy metal	规格组 Size	$k_1$	$k_2$	$B_{1/2}$
Pb	大 Large	37.52	0.0537	12.90
	小 Small	110.01	0.1570	4.42
Cd	大 Large	62.40	0.0774	8.96
	小 Small	48.65	0.0805	8.61

(mg/kg)/养殖海水中重金属含量(mg/L)×100%

或: 生物富集系数  $BCF = [\text{实验组贝类体内重金属的含量(mg/kg)} - \text{对照组贝类体内重金属的含量(mg/kg)}] / \text{实验海水中重金属的含量(mg/kg)}$

双箱动力学模型通过非线性拟和一定程度上减少了实验过程中的偶然因素, 因而, 近年来重金属富集和释放的研究方法较多的采用双箱动力学模型, 但 Zauke 等(2008)认为, 不同研究者利用双箱动力学模型获得的动力学相关参数也存在差异, 原因包括实验对象不同、实验设计(如实验装置、海水中金属浓度)不同以及不同作者对模型的修正等(吴志宏等, 2011)。

### 3.2 不同贝类对铅、镉富集能力比较

在本研究重金属富集实验中, 虾夷扇贝体内的铅、镉含量随着积累时间的增加而上升, 基本趋势比较一致; 但相同规格虾夷扇贝对铅、镉的生物富集不同, 说明铅、镉在虾夷扇贝体内富集的差异性。表4列出了不同贝类、不同实验条件下、不同计算方法得到的生物富集系数。同等富集浓度下, 太平洋牡蛎(*Crassostrea gigas*)的重金属富集能力镉>铅(王晓丽等, 2004), 这个结果与虾夷扇贝相似; 而紫贻贝(*Mytilus edulis*)的重金属富集能力则是铅>镉, 其结果与虾夷扇贝相反。这可能是因为不同种类对重金属的富集能力存在差异。

海洋贝类对重金属的富集受到诸多因素影响, 主要有两大类, 一类是生物因子, 另一类是非生物因子。生物因子主要包括生物的个体大小、生长速度、器官、种间差异、性别、年龄以及繁殖状态等。非生物因子主要指各种理化因子, 如盐度、温度、浓度、pH值、底质中酸可挥发性硫化物和有机质的含量以及季节变化和水动力条件等。随重金属浓度升高和暴露时间延长, 重金属在贝体内的蓄积量都呈逐渐增加的趋势, 而生物富集因子和吸收速率常数均会随着外部水体浓度的增大而减小(王晓丽等, 2004; 励建荣等, 2007)。总的来说贝类对铅、镉的生物富集能力都较强, 从分子方面解释, 这可能与贝类体内金属硫蛋白(MT)的作用有关。研究表明, 贝类体内含有的MT, 重金属能诱导MT的合成, 同时MT又可以调

节重金属在生物体内的平衡(Damiens *et al*, 2006; Amiard *et al*, 2008)。随着贝类体内的铅、镉等重金属含量的升高, 重金属会使得巯基组氨酸三甲基内盐在贝类体内达到饱和, 过高含量的重金属离子会促进新的巯基组氨酸三甲基内盐的 mRNA 的转译。由于结合于巯基组氨酸三甲基内盐上的大部分重金属是没有毒性的, 因而重金属可以在贝类体内有较高含量的累积(吴坚, 1991; Roesijsdi, 1994)。翁焕新等(1996)对牡蛎容易富集镉的解释是, 镉离子和钙离子的半径相差不大, 海水中的镉离子容易替代钙离子进入牡蛎体内参与生物合成, 所以牡蛎对镉具有较强的富集能力。其他贝类富集镉的原理是否与此相关未见报道, 还需进行深入的研究。

### 3.3 不同贝类对铅、镉的释放能力比较

在虾夷扇贝释放铅、镉实验中, 随着实验时间的延长, 虾夷扇贝体内铅、镉的含量也不断降低, 铅、镉在虾夷扇贝体内的释放存在差异性。以释放实验结束时的生物半衰期为基准, 大规模虾夷扇贝的排毒释放顺序铅>镉, 小规模虾夷扇贝的则与之相反。另外, 通过本研究得到富集倍数: 铅(25.4倍、15.04倍)和镉(44.41倍、36.42倍), 以及释放结束后体内重金属与背景值的比值铅(2.40、1.54)和镉(1.74、1.30)(表1), 说明虾夷扇贝是铅和镉的净积累者。王晓丽等(2004)、沈鑫绿等(2009)利用生态动力学模型研究了太平洋牡蛎和厚壳贻贝对铅、镉的释放顺序为: 铅>镉, 是铅和镉的净积累者, 这与本研究的结果相似。张少娜等(2004)通过实验得到的紫贻贝对铅、镉的释放顺序也为: 铅>镉, 紫贻贝是铅和镉的强的净积累者。因此, 毒性较大的镉、铅等重金属易贝类体内累积, 而排出速率相对较慢。原因可能为铅、镉能诱导MT的合成, 同时铅、镉以一种无毒的形式结合在新合成的巯基组氨酸三甲基内盐上。

### 3.4 不同生长时期的虾夷扇贝对铅、镉富集和释放的影响

在重金属的富集过程, 本研究得到的不同规格虾夷扇贝对重金属的生物富集系数都为镉 > 铅, 原因可能是虾夷扇贝对镉的富集能力远远大于铅的富集而不受虾夷扇贝大小的影响。在重金属的释放过程, 通过以上的数据得到的结论是大小规格虾夷扇贝都是铅和镉的净积累者; 大规模虾夷扇贝的排毒释放顺序是铅>镉, 小规模虾夷扇贝的则是镉>铅, 推测这可能与铅、镉在虾夷扇贝体内的具体代谢途径或代谢能力有关, 因为不同生长时期的虾夷扇贝其体内的代谢途径和代谢能力有一定的区别。因此, 不同生长时期的虾夷扇贝对铅、镉的富集和释放有一定影响。

表4 不同双壳类对铅、镉生物富集参数  
Tab.4 Accumulation and elimination of Pb and Cd in various bivalves

双壳类 Bivalves	重金属 Heavy metal	试验方法 Experimental methods	拟合方式 Fitting methods	$C_w$ ( $\mu\text{g/L}$ )	$BCF$	$B_{1/2}(\text{d})$	参考文献 References
虾夷扇贝 <i>P. yessoensis</i>	Cd	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	5	1123(小规格) 7433(大规格)	8.6(小) 9(大)	本研究 This study
				0.5	$1.79 \times 10^{11}$	21	
栉孔扇贝 <i>Chlamys farreri</i>	Cd	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	5	28200	18.7	吴志宏等, 2011
				25	5670	173	
				50	3730	693	
海湾扇贝 <i>Argopectens irradians</i>	Cd	现场实验	计算* Calculating	4.11	1029	/	马元庆等, 2010
				0.062	1600	/	
牡蛎 <i>C. belcheri</i>	Cd	现场实验	分段(释放) Sectional fitting (Release)	0.083–0.086	2600–4100	/	Lim <i>et al</i> , 1998
			分段(富集) Sectional fitting (Accumulation)				
太平洋牡蛎 <i>C. gigas</i>	Cd	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	10	986.3	33.18	王晓丽等, 2004
				50	969.4	43.27	
				100	880.6	42.45	
紫贻贝 <i>M. edulis</i>	Cd	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	10	783.4	22.62	张少娜等, 2004
				50	924.4	27.05	
				100	851.3	73.54	
泥蚶 <i>Tegillarca granos</i>	Cd	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	6.32	1873.7	91.2	李学鹏等, 2008
				32.2	1250.5	63.59	
菲律宾蛤仔 <i>Ruditapes philippinarum</i>	Cd	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	67.1	724.55	68.63	乔庆林等, 2006
				10	378	23	
虾夷扇贝 <i>P. yessoensis</i>	Pb	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	5	1123(小规格) 7433(大规格)	8.6(小) 9(大)	本研究 This study
海湾扇贝 <i>Argopectens irradians</i>	Pb	现场试验	计算 Calculating	1.15	71	/	马元庆等, 2010
				0.102	2300	/	
牡蛎 <i>Crassostrea belcheri</i>	Pb	现场实验	同时拟合 Synchronous fitting	0.27–0.3	900–1800	/	Lim <i>et al</i> , 1998
太平洋牡蛎 <i>C. gigas</i>	Pb	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	10	675.6	19.88	王晓丽等, 2004
				20	446.1	20.34	
				40	692.2	50.76	
紫贻贝 <i>M. edulis</i>	Pb	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	10	1483.8	28.95	张少娜等, 2004
				20	1151.6	27.76	
				40	1367.5	33.67	
泥蚶 <i>Tegillarca granos</i>	Pb	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	1.93	3303.6	76.17	李学鹏等, 2008
				31	2369.5	108.3	
菲律宾蛤仔 <i>R. philippinarum</i>	Pb	室内模拟 Indoor simulation experiment	同时拟合 Synchronous fitting	60.87	2584.9	101.93	乔庆林等, 2006
				5	935	18	

### 3.5 虾夷扇贝不同组织对铅、镉富集和释放的影响

根据本研究的数据, 铅在虾夷扇贝各组织中的富集顺序依次为: 鳃>内脏团>闭壳肌。王凡等(2005a, b)的研究结果表明, 铅在栉孔扇贝各组织中的富集次序为: 鳃>内脏团>闭壳肌, 与本研究结果一致。鳃成为扇贝富集铅的主要部位可能与鳃的特殊结构与功能有关, 海水中的铅离子从鳃穿过, 使鳃成为扇贝吸收海水中铅的主要组织器官。

本研究得到的镉, 在虾夷扇贝各组织中的富集顺序依次为: 内脏团>鳃>闭壳肌, 这与王军等(2009)研究虾夷扇贝、马元庆等(2009、2010)研究海湾扇贝对镉的富集顺序的结果相一致。镉在虾夷扇贝内脏中有较高含量的富集可能 MT 有关, 扇贝的肝脏、肾脏等是 MT 的主要合成组织, MT 的含量相对较高, 可促进镉的合成与转化。

从以上铅、镉在虾夷扇贝各组织中的富集次序来看, 考虑到食用安全问题, 食用扇贝时建议食用贝柱。

### 参 考 文 献

- 王凡, 赵元凤, 吴益春, 等. 栉孔扇贝对 Cd 的累积和排出. 湛江海洋大学学报, 2005a, 25(4): 95-98
- 王凡, 赵元凤, 吴益春, 等. 栉孔扇贝对海水中 Pb 积累排放规律研究. 水产养殖, 2005b, 26(2): 1-6
- 王军, 翟毓秀, 宁劲松, 等. 养殖虾夷扇贝不同组织中重金属含量的分布. 海洋科学, 2009, 33(8): 44-47
- 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. 生态学报, 2004, 24(5): 1086-1090
- 王夔. 生命科学中的微量元素. 北京: 中国计量科学出版社, 1996, 850-885
- 马元庆, 唐学玺, 刘义豪, 等. 山东半岛近海贝类污染状况调查与评价. 海洋环境科学, 2009, 28(5): 562-565
- 马元庆, 秦华伟, 李磊, 等. 海湾扇贝体内重金属含量研究. 海洋湖沼通报, 2010, 1: 47-51
- 乔庆林, 姜朝军, 徐捷, 等. 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(自然科学版), 2006, 25(1): 5-9
- 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. 海洋学报, 2005, 27(2): 54-62
- 张翠, 翟毓秀, 宁劲松, 等. 镉在水生动物体内的研究概况. 水产科学, 2007, 26(8): 465-470
- 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. 海洋与湖沼, 2004, 35(5): 438-445
- 张聪, 陈聚法, 马绍赛, 等. 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, 2012, 33(5): 64-72
- 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. 水产学报, 2008, 32(4): 592-600
- 沈益绿, 马继臻, 平仙隐, 等. 厚壳蛤对重金属的生物积累及释放规律. 台湾海峡, 2009, 28(1): 52-59
- 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. 农业环境科学学报, 2009, 28(4): 783-788
- 吴志宏, 孙福新, 王颖, 等. 栉孔扇贝对镉的富集及释放规律的研究. 中国海洋大学学报, 2011, 41(10): 93-97
- 吴坚. 微量金属对海洋生物的生物化学效应. 海洋环境科学, 1991, 10(2): 58-64
- 苑旭洲, 崔毅, 陈碧碧, 等. 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, 2012, 33(4): 49-56
- 翁焕新, Presley BJ. 重金属在牡蛎中生物累积及其影响因素的研究. 环境科学学报, 1996, 16(1): 51-58
- 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. 中国水产科学, 2002, 9(2): 172-176
- 励建荣, 李学鹏, 王丽, 等. 贝类对重金属的吸收转运与累积规律研究进展. 水产科学, 2007, 1: 51-55
- Amiard JC, Journel R, Bacheley H. Influence of field and experimental exposure of mussels (*Mytilus* sp.) to nickel and vanadium on metallothionein concentration. Comp Biochem Physiol: Part C, 2008, 147(3): 378-385
- Clason B, Zauke GP. Bioaccumulation of trace metals in marine and estuarine amphipods: evaluation and verification of toxic kinetic models. Can J Fish Aquat Sci, 2000, 57: 1410-1422
- Damiens G, Mouneyrac C, Quiniou F, et al. Metal bioaccumulation and metallothionein concentrations in larvae of *Crassostrea gigas*. Environmental Pollution, 2006, 140(3): 492
- Lim PE, Lee CK, Din Z. The kinetics of bioaccumulation of zinc, copper, lead and cadmium by oysters (*Crassostrea iredalei* and *C. belcheri*) under tropical field conditions. The Science of the Total Environment, 1998, 216: 147-157
- Ritterhoff J, Zauke GP. Bioaccumulation of trace metals in Greenland Sea copepod and amphipod collectives on board ship: verification of toxicokinetic model parameters. Aquat Toxicol, 1997, 40: 63-78
- Roesijadi G. Behavior of metallothionein-bound metals in a natural population of an estuarine mollusca. Mar Environ Res, 1994, 38(4): 147-168
- Zauke GP. Toxicokinetic models as predictive tools in biomonitoring metals in zooplankton: a synthesis of ideas. Hydrobiologia, 2008, 614(1): 3-18



## Study on the Accumulation and Elimination of Pb and Cd in *Patinopecten yessoensis*

CUI Zhengguo<sup>1</sup>, YUAN Xuzhou<sup>1,2</sup>, CUI Yi<sup>1</sup>, CHEN Bijuan<sup>1①</sup>,  
LI Yongxia<sup>1</sup>, LIANG Jun<sup>3</sup>, ZHAO Xuewei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture; Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Carbon-Sink Fisheries Laboratory, Qingdao 266071; 2. Shangdong HengCheng Testing Technology Co., Ltd, Laizhou 261400; 3. Zhangzidao Fishery Group Co., Ltd., Dalian 116001)

**Abstract** The accumulation and elimination of heavy metals in shellfish are greatly affected by many factors including the type of the heavy metal, the size, tissue, and organ of the shellfish. External environmental factors are also involved such as the temperature, pH, and the concentrations of the heavy metal. Here we investigated the accumulation and elimination of two heavy metals (Pb and Cd) in *Patinopecten yessoensis* in a semi-static system. We measured the concentrations of Pb and Cd in different organs of *P. yessoensis* with different sizes. Using the two-compartment model with non-linear curve fitting, we obtained kinetic parameters such as bioconcentration factor (*BCF*), uptake rate constant ( $k_1$ ), elimination rate constant ( $k_2$ ) and biological half-life ( $B_{1/2}$ ). *P. yessoensis* had high capacity of the bioaccumulation and elimination of Cd and Pb. *BCF* for Pb in large-size scallops and small-size scallops were 1671 and 896 respectively, and the values for Cd were 7433 and 1123 respectively. This indicated that the size of *P. yessoensis* had impact on the accumulation of heavy metals, and that large-size scallops had higher capacity. Given the same size, *BCF* for Cd was higher than Pb, which implied a preference in the bioaccumulation of Cd. The accumulation of Pb in different organs showed the order gill> visceral mass> adductor muscle, and the order for Cd was visceral mass> gill> adductor muscle. The  $B_{1/2}$  for both Pb and Cd was higher in large-size *P. yessoensis*, which suggested that large-size scallops were more capable of eliminating Pb and Cd. The elimination rate of Cd in the visceral mass was the highest among the organs, and there was no difference between the gill and the adductor muscle. Our study provided insights into the toxic effects of heavy metals in shellfish.

**Key words** *Patinopecten yessoensis*; Pb; Cd; Bioaccumulation; Two-compartment model

① Corresponding author: CHEN Bijuan, E-mail: chenbj@ysfri.ac.cn