

# 浒苔对镉、铅和铝的生物富集动力学研究

刘智禹<sup>1,2</sup>, 吴靖娜<sup>2</sup>, 李琳<sup>3</sup>, 杨妙峰<sup>2</sup>, 何传波<sup>3</sup>, 郑盛华<sup>2</sup>, 陈绍军<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002) (2. 福建省水产研究所, 福建厦门 361013)

(3. 集美大学生物工程学院, 福建厦门 361021)

**摘要:** 本文研究了浒苔对镉、铅和铝的富集作用, 在各养殖池中添加  $Cd^{2+}$  (5、20、80  $\mu g/L$ ),  $Pb^{2+}$  (5、20、80  $\mu g/L$ ) 和  $Al^{3+}$  (5、20、80  $\mu g/L$ ), 利用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-QMS) 测定浒苔中 Cd、Pb 和 Al 的含量, 并对其变化进行非线性拟合, 获取动力学参数。结果表明: 浒苔对 Cd、Pb 和 Al 的富集与暴露浓度呈正相关关系; Cd 和 Pb 的富集符合双箱动力学模型, 而 Al 符合 Logistic 动力学模型。其中浒苔中 Cd 的双箱模型回归富集速率常数  $K_a$  为 418.68、234.30 和 105.57, 富集系数为 1785.12、1429.67 和 625.69; Pb 的富集速率常数  $K_a$  为 1257.30、768.81 和 863.83, 富集系数 11028.95、50249.08 和 9119.79; 浒苔中 Al 的 Logistic 模型回归富集速率常数 0.39、0.42 和 0.46。浒苔对镉、铅和铝三种重金属具有较强的富集作用, 双箱动力学模型可显著预测 Cd 和 Pb 的富集, Logistic 模型可显著预测 Al 的富集。

**关键词:** 浒苔; 生物富集动力学; 镉; 铅; 铝

文章编号: 1673-9078(2014)10-154-158

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.10.026

## Kinetics of Cadmium, Lead and Aluminum Bioaccumulation by *Enteromorpha prolifera*

LIU Zhi-yu<sup>1,2</sup>, WU Jin-na<sup>2</sup>, LI Lin<sup>3</sup>, YANG Miao-feng<sup>2</sup>, HE Chuang-bo<sup>3</sup>, ZHENG Sheng-hua<sup>2</sup>, CHEN Shao-jun<sup>1</sup>  
(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China) (2. Fisheries Research Institution of Fujian, Xiamen 361013, China) (3. Bioengineering College of Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In this study, we investigated the accumulation of cadmium (Cd), lead (Pb), and aluminum (Al) by the alga *Enteromorpha prolifera*. The metal ions,  $Cd^{2+}$  (5, 20, 80  $\mu g/L$ ),  $Pb^{2+}$  (5, 20, 80  $\mu g/L$ ), and  $Al^{3+}$  (5, 20, 80  $\mu g/L$ ), were added to different culture ponds. Inductively coupled plasma mass spectrometry was used to determine the content of Cd, Pb, and Al in *Enteromorpha prolifera*. The changes in mineral content were fitted nonlinearly and their kinetic parameters were obtained. The results showed that the accumulation of Cd, Pb, and Al in *Enteromorpha prolifera* positively correlated with exposure concentration. Accumulation of Cd and Pb satisfied the two-compartment kinetic model, while Al fitted the logistic kinetic model. The two-compartment regression accumulation rate constants ( $K_a$ ) for Cd were 418.68, 234.30, and 105.57, while the bioaccumulation factors (BCFs) were 1785.12, 1429.67, and 625.69. For Pb,  $K_a$  values were 1257.30, 768.81, and 863.83, while the BCFs were 11028.95, 50249.08, and 9119.79. Logistic model regression accumulation rate constants for Al were 0.39, 0.42, and 0.46. *Enteromorpha prolifera* had relatively strong accumulation effect to Cd, Pb, and Al, which can be significantly predicted for Cd and Pb by the two-compartment model and for Al, by the logistic model.

**Key words:** *Enteromorpha prolifera*; bioaccumulation kinetics; cadmium; lead; aluminum

浒苔 (*Enteromorpha prolifera*) 制作海藻类食品越来越受到人们的欢迎, 近年来已开始进行人工养殖。但由于海洋环境中重金属污染现象日趋突出, 大量的

收稿日期: 2014-04-04

基金项目: 国家海洋公益专项 (201305015); 福建省海洋与渔业厅项目 (KJXH-2010-007); 厦门市科技局项目 (3502z20112010)

作者简介: 刘智禹 (1972-), 男, 博士, 教授级高工, 主要从事水产品加工技术研究、食品质量与营养

通讯作者: 陈绍军 (1952-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品加工及综合利用研究

重金属元素随废水排放及地表径流进入水生生态环境, 造成海洋环境污染<sup>[1]</sup>, 影响海洋藻类食品安全性。海藻对重金属的富集作用较强, 已有研究证实海藻对铜、铅、锌、镉等重金属具有较强的富集作用<sup>[2-3]</sup>, 龙须菜养殖过程中也会对海水中的镉和铜等重金属进行富集<sup>[4]</sup>, 福建沿海坛紫菜富集海水中 As 含量高达 28.85~63.03  $\mu g/g$  干重<sup>[5]</sup>。国内外对浒苔中重金属富集作用研究较少, 刘智禹等<sup>[1]</sup>对浒苔中镉和铅的富集安全性进行评估, 认为浒苔对镉和铅具有极强的富集作用, 作用最大可以达到 1882 倍和 11080 倍, 浒苔对镉

和铅具有极强的富集作用。

藻类作为海洋生态系统的初级生产者，其富集的重金属由于代谢较慢，容易进入食物链，因此研究藻类对重金属的富集规律对评估藻类安全性具有重要意义。藻类对重金属的富集作用可以采用动力学进行描述，目前国内外学者已通过各种模型对海带中 Au、Ag、Cu 和 Ni 富集<sup>[6]</sup>，龙须菜中 Cd、Cu 和 Pb 的富集<sup>[7]</sup>和海草中镉的富集<sup>[8]</sup>等进行研究，但未对浒苔中重金属富集模型进行研究。

本研究通过模拟海洋生长环境，采用动力学模型模拟浒苔对镉、铅和铝的富集作用，阐明养殖浒苔对不同浓度镉、铝和铅的富集规律，为探索浒苔富集重金属后的食用安全研究提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料与设备

#### 1.1.1 试验材料

采用1.2 m×1.2 m的竹架，在海区附上浒苔后，在石狮市水产技术推广站紫菜育苗池内进行养殖实验，定期采集样品。

#### 1.1.2 主要仪器和试剂

CdCl<sub>2</sub>、Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>、AlCl<sub>3</sub>均为化学纯。ICP-MS，Agilent 7700x，安捷伦科技有限公司；多功能极谱仪，HY-1E，青岛极普仪器有限责任公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 浒苔重金属富集实验及样品制备

浒苔采用海水养殖，从海区移入养殖池后加入试剂CdCl<sub>2</sub>、Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>和AlCl<sub>3</sub>，使不同养殖池海水中Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>和Al<sup>3+</sup>的浓度分别达到5、20、80 μg/L，对照组为不加重金属的海水。养殖池海水增氧采用从池底充气的办法，养殖初期（第4、7 d各换水1次）每3 d换水一次，中期（第9、11 d各换水1次）2 d换水一次，后期（第12 d各换水1次）1 d换水一次。换水后重新添加化学药品以保持原来的浓度。室内养殖池的光线采取自然光再加日光灯照射。

对刚刚移入养殖池的浒苔进行第一次采样，此后每3 d采集浒苔1次，养殖周期为12 d。采集的鲜浒苔经淡水洗净、烘干、装袋，编号备用。

#### 1.2.2 浒苔重金属测定方法

浒苔中Pb、Cd、Al的检测按SN/T 2208-2008《水产品中钠、镁、铝、钙、铬、铁、镍、铜、锌、砷、锶、钼、镉、铅、汞、硒的测定微波消解-电感耦合等离子体-质谱法》执行。

### 1.2.3 浒苔重金属富集动力学模型拟合

生物体对重金属的富集作用，常用稳态模型、双箱模型和生物动力学模型等进行描述<sup>[9]</sup>。由于本实验中浒苔对重金属的富集没有达到平衡，本实验不能采用稳态模型。根据双箱模型的原理<sup>[10]</sup>，重金属在海水中与生物体间的作用过程可以视为两相间的分配，用一级动力学过程进行描述，采用生物富集半静态双箱动力学模型对Al、Cd、Pb三种重金属的富集过程进行回归。双箱动力学模型描述如图1。

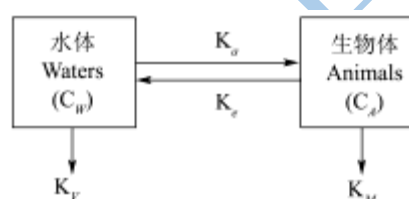


图1 双箱动力学模型

Fig.1 Two-compartment kinetic model

水体和生物体中的重金属富集可以采用以下方程表示<sup>[9, 11]</sup>，

在水体中可以表示为：

$$\frac{dC_w}{dt} = 0 \tag{1}$$

对于生物体可以表示为：

$$\frac{dC_a}{dt} = K_a C_w - (K_e + K_m + K_v) C_a \tag{2}$$

C<sub>w</sub>为水中重金属浓度(μg/L)，t为实验持续的时间(d)，C<sub>a</sub>为浒苔中重金属的浓度(μg/g)，K<sub>a</sub>为浒苔吸收速率常数，K<sub>e</sub>为浒苔排出速率常数，K<sub>v</sub>为挥发速率常数，K<sub>m</sub>为浒苔的代谢速率常数。由于本实验的重金属在体内均属难挥发，且浒苔代谢基本可以忽略，故可以将K<sub>v</sub>和K<sub>m</sub>视为零。由此可以从方程(1)和(2)推导出浒苔对重金属的富集和排出方程<sup>[7]</sup>：

富集过程：

$$C_a = C_0 + C_w \frac{K_a}{K_e} \times (1 - e^{-K_e t}) \quad 0 < t \leq t^* \tag{3}$$

排出过程：

$$C_a = C_0 + C_w \frac{K_a}{K_e} \times (e^{-K_a(t-t^*)} - e^{-K_e t}) \quad t^* < t \tag{4}$$

C<sub>0</sub>为浒苔体内重金属的初始含量(μg/g)，t\*为富集阶段实验的天数。采用方程(3)和(4)对浒苔重金属浓度进行非线性拟合，可以获得重金属的富集速率和排出速率。理论平衡态下，生物富集系数可以表示为：

$$BCF = \frac{K_a}{K_e} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_a}{C_w}$$

采用DPS软件，对不同重金属浓度富集作用进行双

箱动力学模型回归,以相关系数、方程显著性及系数的显著性进行评价,依次研究浒苔的Al、Cd和Pb的富集规律,由于Al的富集双箱动力学模型的拟合性差,系数不显著,经多种模型筛选后,Al的富集符合Logistic模型  $Y = a/(1+e^{(b-ct)})$ ,其中c为富集速率。

## 2 结果与讨论

### 2.1 浒苔对镉的富集动力学

#### 2.1.1 浒苔对镉的富集

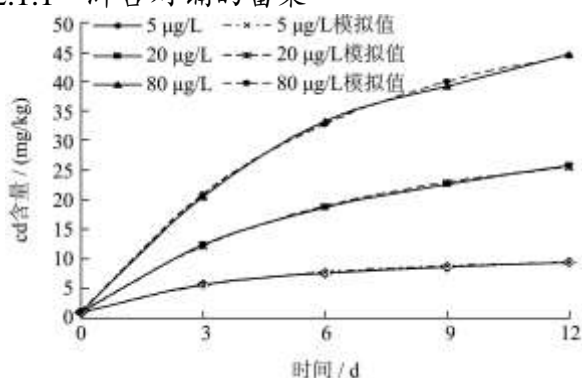


图2 浒苔中Cd的富集规律

Fig.2 Bioaccumulation trend of Cd by *Enteromorpha prolifera*

不同Cd浓度下养殖池养殖浒苔Cd含量变化如图

表1 浒苔富集镉的动力学参数

Table 1 Kinetic parameters of bioaccumulation of Cd by *Enteromorpha prolifera*

浓度 (µg/L)	相关系 数 R <sup>2</sup>	回归显 著性 p	Ka			Ke			Ka/Ke
			常数 Ka	标准误差	显著性 p	常数 Ke	标准误差	显著性 p	
5	0.999	<0.001	418.68	14.86	<0.001	0.23	0.012	<0.001	1785.12
20	0.999	<0.001	234.39	8.03	<0.001	0.16	0.0099	<0.001	1429.67
80	0.999	<0.001	105.57	3.70	<0.001	0.17	0.010	<0.001	625.69

### 2.2 浒苔对铅的富集动力学

#### 2.2.1 浒苔对铅的富集

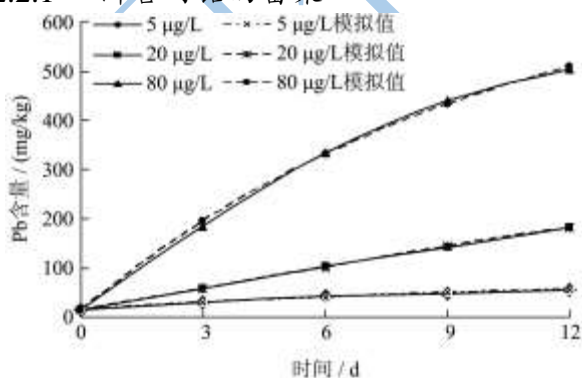


图3 浒苔中Pb的富集规律

Fig.3 Bioaccumulation trend for Pb by *Enteromorpha prolifera*

不同养殖池Pb浓度对浒苔中Pb含量变化影响见图3,从图中可以看出不同Pb浓度养殖池浒苔Pb含

量都呈随着时间增加而增加趋势,养殖池中Pb浓度越高,浒苔中Pb含量也越高。5 µg/L、20 µg/L和80 µg/L Cd浓度养殖池浒苔在12 d时Pb含量分别为55.40 mg/kg、182.94 mg/kg和503.63 mg/kg,分别为0 d时的4倍、13倍和36倍,为对应海水中Pb的11080倍、9147倍和6295倍,由此说明浒苔对Pb具有很明显的富集作用。

#### 2.1.2 浒苔对镉的富集动力学模型回归

浒苔对镉金属离子的富集动力学模型回归参数见表1。从表中可以看出不同浓度养殖池回归模型都达到极显著 ( $p < 0.001$ ),相关系数都在0.999以上,说明半静态双箱动力学模型可以很好地描述浒苔对Cd的富集作用,回归方程具有很好的拟合性。回归的富集速率常数和排出速率常数也都达到极显著水平 ( $p < 0.001$ ),富集速率常数Ka随海水中镉离子浓度的增加而减少,但与海水中镉浓度间的关系并非呈线性变化,富集系数分别为1785.12、1429.67和625.69,海水中镉离子浓度越高富集系数越小。对回归方程进行模拟运算,并用模拟数值进行作图(见图2),模拟值和测定值之间非常接近。因此说明半静态双箱动力学模型可以用于描述浒苔Cd富集规律。

量都呈随着时间增加而增加趋势,养殖池中Pb浓度越高,浒苔中Pb含量也越高。5 µg/L、20 µg/L和80 µg/L Cd浓度养殖池浒苔在12 d时Pb含量分别为55.40 mg/kg、182.94 mg/kg和503.63 mg/kg,分别为0 d时的4倍、13倍和36倍,为对应海水中Pb的11080倍、9147倍和6295倍,由此说明浒苔对Pb具有很明显的富集作用。

#### 2.2.2 浒苔对铅的富集动力学模型回归

浒苔对Pb<sup>2+</sup>的富集动力学模型回归参数见表2。从表中可以看出不同浓度养殖池回归模型都达到极显著 ( $p < 0.001$ ),相关系数都在0.998以上,说明半静态双箱动力学模型可以很好地描述浒苔对铅的富集作用,回归方程具有很好的拟合性。回归的富集速率常数和排出速率常数也都达到显著水平 ( $p < 0.05$ ),富集速率常数Ka随海水中铅离子浓度的增加呈现先减少后增加,富集系数分别为11028.95、50249.08和

9119.79, 海水铅浓度为 20 μg/L 时具有比另外两个浓度强的富集系数。对回归方程进行模拟运算, 并用模拟数值进行作图(见图 3), 模拟值和测定值之间非常接

近。因此说明半静态双箱动力学模型可以用于描述浒苔 Pb 富集规律。

表 2 浒苔富集 Pb<sup>2+</sup> 的动力学参数

Table 2 Kinetic parameters of bioaccumulation of Pb by *Enteromorpha prolifera*

浓度 / (μg/L)	相关系数 R <sup>2</sup>	回归显著性 p	Ka			Ke			Ka/Ke
			常数 Ka	标准误差	显著性 p	常数 Ke	标准误差	显著性 p	
5	0.998	<0.001	1257.30	69.50	<0.001	0.114	0.014	0.0040	11028.95
20	0.9999	<0.001	768.81	7.74	<0.001	0.015	0.0020	0.0048	50249.08
80	0.999	<0.001	863.83	41.63	<0.001	0.095	0.012	0.0040	9119.79

### 2.3 浒苔对铝的富集动力学

#### 2.3.1 浒苔对铝的富集

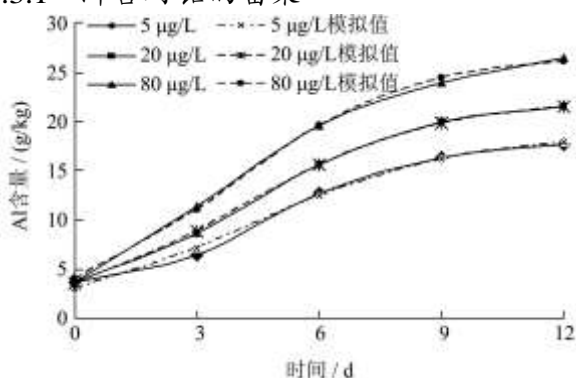


图 4 浒苔中 Al 的富集

Fig.4 Bioaccumulation of Al by *Enteromorpha prolifera*

不同 Al 浓度下养殖池生长的浒苔中 Al 含量呈增加趋势 (见图 4), 浓度越高, 浒苔中测得 Al 的含量也越高。三个不同浓度下前期 Al 的富集速度较快, 后期相对平缓, 在 12 d 时, 不同浓度 Al 养殖池浒苔的 Al 的含量分别为 17.60 g/kg、21.40 g/kg 和 26.42 g/kg,

表 3 浒苔富集铝的动力学参数

Table 3 Kinetic parameters of bioaccumulation of Al by *Enteromorpha prolifera*

浓度 / (μg/L)	回归方程	方程相关系数 R <sup>2</sup>	回归显著性	a		b		c	
				标准误差	显著性 p	标准误差	显著性 p	标准误差	显著性 p
5	Y=18.67/(1+EXP(1.66-0.39t))	0.9932	0.0069	1.07	0.0033	0.20	0.015	0.060	0.023
20	Y=22.25/(1+EXP(1.70-0.42t))	0.9997	<0.001	0.24	<0.001	0.046	<0.001	0.014	0.0011
80	Y=26.63/(1+EXP(1.73-0.46t))	0.9979	0.0021	0.69	<0.001	0.13	0.0056	0.039	0.0072

### 3 结论

3.1 本研究模拟海区养殖浒苔的生长环境, 在养殖池海水中加入重金属 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>和 Al<sup>3+</sup>, 使其浓度分别达到 5、20 和 80 μg/L, 通过测定浒苔中重金属含量的变化, 研究浒苔对各种重金属的富集作用。到 12 d 时, 各个浒苔样品的重金属都有较高的富集, 其中以 Al 的富集含量最高, 不同浓度下可以达到 17.60 g/kg、21.40 g/kg 和 26.42 g/kg, 而 Pb 含量分别为 55.40 mg/kg、182.94 mg/kg

和 503.63 mg/kg, 富集量最少的是 Cd, 其含量为 9.41 mg/kg、25.78 mg/kg 和 44.67 mg/kg, 海水中重金属浓度越高, 浒苔中相应的含量也越高, 成正相关关系, 这与 Wang 等人<sup>[7]</sup>的报道基本一致, 他认为在较低的重金属浓度下, 龙须菜对 Cd、Cu 和 Pb 的富集与暴露浓度成线性正相关。由此, 浒苔对 Cd、Pb 和 Al 都有较强的富集作用, 海区生长浒苔中 Cd、Pb 和 Al 的毒性及浒苔食用安全性有待于进一步评估。

#### 2.3.2 浒苔对铝的富集动力学模型回归

由于浒苔对铝的富集极强, 且不符合半静态双箱动力学模型, 为进一步描述其变化规律, 经模型分析确定 Logistic 模型具有较好的回归显著性, 采用该模型进行曲线进行非线性回归。方程为  $Y = a/[1 + \exp^*(b-ct)]$ , Y 表示浒苔中 Al 的富集量 (g/kg); a, b, c: 为模型回归常数项, t: 代表富集的天数。

Logistic 模型回归方程及显著性见表 3, 从表中可以看出不同 Al 浓度养殖池浒苔 Al 富集回归方程都达到极显著水平 (p<0.01), 相关系数都在 0.99 以上, 说明回归方程具有很好的拟合性, 能较好说明 Al 的富集规律。方程的常数项回归结果可以看出所有系数均达到显著水平回归方程模拟值和测定值之间非常接近 (见图 4), 说明 Logistic 模型可以很好描述浒苔中 Al 的富集规律。

3.2 水生生物对重金属的富集作用研究已有报道, 刘

智禹等<sup>[12]</sup>报道养殖南美白对虾对 Cd 的富集作用符合 Logistic 动力学模型; Malea 等<sup>[8]</sup>采用 Michaelis-Menten 模型描述海藻 (*Cymodocea nodosa*) 中重金属 Cd 的富集和平衡, 其富集速率随暴露浓度增加而增大; Li 等<sup>[6]</sup>研究海带中 Au、Ag、Cu 和 Ni 的富集模型认为这些重金属的富集作用符合伪二级动力学模型; Wang 等<sup>[7]</sup>研究龙须菜对 Cd、Cu 和 Pb 的富集作用符合双箱动力学模型。由此可见, 对于同一种金属不同的藻类所适用的动力学模型可能不同。浒苔中 Cd、Pb 和 Al 的富集动力学模型研究表明, Cd 和 Pb 的富集符合双箱动力学模型, 而 Al 符合 Logistic 动力学模型, 其对 Cd 和 Pb 的富集动力学模型与 Wang 等<sup>[7]</sup>报道龙须菜对 Cd 和 Pb 的富集动力学模型相一致。同时, 本试验发现浒苔对 Cd、Pb 和 Al 的富集动力学模型并不一致, 这可能是 Al 的富集量远远高于 Cd 和 Pb 的富集量导致双箱动力学模型无法适用。简敏菲等<sup>[13]</sup>评估了水生植物对 Cu、Pb、Zn 等重金属富集作用, 认为不同植物对重金属的富集有一定的选择性。可能是这种选择性决定了水生植物和动物各自对重金属富集的动力学模型。

3.3 在重金属 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>和 Al<sup>3+</sup>浓度为 5、20 和 80 μg/L 的海水中, 浒苔中 Cd 的双箱模型回归富集速率常数为 418.68、234.30 和 105.57, 富集系数为 1785.12、1429.67 和 625.69; 浒苔中 Pb 的双箱模型回归富集速率常数为 1257.30、768.81 和 863.83, 富集系数 11028.95、50249.08 和 9119.79; 浒苔中 Al 的 Logistic 模型回归富集速率常数 0.39、0.42 和 0.46。回归结果可以看出, 浒苔对重金属 Cd、Pb 和 Al 的富集速率常数 Ka 及生物富集因子 BCF 随海水中暴露重金属浓度增大而减少, 这与前人对泥蚶<sup>[4]</sup>、海藻<sup>[4]</sup>等对重金属富集作用的研究一致。

## 参考文献

- [1] 刘智禹. 浒苔对海水中重金属的富集研究及食用安全风险评估[J]. 福建水产, 2012, 34(1): 71-75  
LIU Zhi-yu. Accumulation study of heavy metal in seawater and edible safety security risk assessment for *Enteromorpha prolifera* [J]. Journal of Fujian Fisheries, 2012, 34(1): 71-75
- [2] Malea P, Kevrekidis T. Trace element (Al, As, B, Ba, Cr, Mo, Ni, Se, Sr, Tl, U and V) distribution and seasonality in compartments of the seagrass *Cymodocea nodosa* [J]. Science of The Total Environment, 2013, 463: 611-623
- [3] Cravo A, Bebianno M J. Bioaccumulation of metals in the soft tissue of *Patella aspera*: application of metal/shell weight indices [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 65(3): 571-586
- [4] 王增焕, 林钦, 李刘冬, 等. 大型海藻对重金属镉、铜的富集动力学研究[J]. 中国环境科学, 2013, 33(1): 154-160  
WANG Zeng-huan, LIN Qin, LI Liu-dong, et al. Kinetic study on the bioconcentration of cadmium and copper by large-sized seaweed *Gracilaria lemaneiformis* [J]. China Environmental Science, 2013, 33(1): 154-160
- [5] Yang G D, Zheng J P, Chen L, et al. Speciation analysis and characterisation of arsenic in lavers collected from coastal waters of Fujian, south-eastern China [J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1480-1485
- [6] Lin Li, He Yuan, Tian Chunyu, et al. Treatment of Au (II), Ag (I), Cu (II), Ni (II) from electroplating wastewater by laminaria japonica: biosorption, desorption and recycling [C][A]. Bioinformatics and Biomedical Engineering (iCBBE), 2010 4th International Conference on [C]: IEEE, 2010: 1-5
- [7] Wang Z, Wang X, Ke C. Bioaccumulation of trace metals by the live macroalga *Gracilaria lemaneiformis* [J]. Journal of Applied Phycology, 2013: 1-9
- [8] Malea P, Adamakis I-DS, Kevrekidis T. Kinetics of cadmium accumulation and its effects on microtubule integrity and cell viability in the seagrass *Cymodocea nodosa* [J]. Aquatic Toxicology, 2013, 144: 257-264
- [9] Clason B, Zauke G-P. Bioaccumulation of trace metals in marine and estuarine amphipods: evaluation and verification of toxicokinetic models [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2000, 57(7): 1410-1422
- [10] Kahle J, Zauke G-P. Bioaccumulation of trace metals in the copepod (*Calanoides acutus*) from the weddell sea (Antarctica): comparison of two-compartment and hyperbolic toxicokinetic models [J]. Aquatic Toxicology, 2002, 59(1): 115-135
- [11] Ritterhoff J, Zauke G-P. Bioaccumulation of trace metals in Greenland Sea copepod and amphipod collectives on board ship: verification of toxicokinetic model parameters [J]. Aquatic Toxicology, 1997, 40(1): 63-78
- [12] 刘智禹. 养殖南美白对虾对饲料中镉的富集规律研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(10): 37-41  
LIU Zhi-yu. Research of cadmium bioaccumulation in penaeus vannamei [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2011, 33(10): 37-41
- [13] 简敏菲, 弓晓峰, 游海, 等. 水生植物对铜、铅、锌等重金

属元素富集作用的评价研究[J].南昌大学学报(工科版), 2004,26(1):85-88

JIAN Min-fei, GONG Xiao-feng, YOU Hai, et al. Assessment of pollution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn on aquatic plants [J]. Journal of Nanchang University (Engineering & Technology), 2004, 26(1): 85-88

[14] 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

LI Xue-peng, LI Jian-rong, DUAN Qing-yuan, et al. Kinetic study on the bioconcentration of three heavy metals (Cu, Pb, Cd) in *Tegillarca granosa* Linnaeus [J]. Journal of fisheries of China, 2008, 32(4): 592-600

现代食品科技