

文章编号: 1000-0615(2006)06-0801-05

## 海湾扇贝对海水中镉的富集规律研究

季相山<sup>1</sup>, 赵燕<sup>1</sup>, 丁雷<sup>1</sup>, 陈松林<sup>2</sup>, 王雪鹏<sup>1</sup>, 岳永生<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学动物科技学院, 山东泰安 271018;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东青岛 266071)

**摘要** 本文利用原子吸收分光光度法研究镉暴露实验中海湾扇贝不同器官组织富集、排放镉的过程及影响因素。水体中镉通过被动扩散进入海湾扇贝鳃, 根据吸附等温线并结合直线拟合结果得海湾扇贝鳃对镉的单层饱和结合量为  $2.12 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  干重。鳃对镉的富集量和富集速率与水相中镉浓度成正相关关系, 最高浓度组 ( $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的镉富集量和富集速率分别为  $(1.5 \pm 0.52) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  干重和  $(0.375 \pm 0.13) \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 。随着养殖时间的延长, 海湾扇贝鳃、内脏和肌肉镉富集量逐渐增加, 14 d (336 h) 后, 内脏和鳃中镉富集达到平衡, 但肌肉中镉富集是否达到平衡, 尚需进一步研究。盐度对海湾扇贝鳃、内脏和肌肉镉富集速率无显著影响 ( $P > 0.05$ )。富集在海湾扇贝体内的镉不断被排出, 其中鳃的排放率最大, 达到了 38.3%, 其次是内脏、肌肉。

**关键词** 海湾扇贝, 镉, 富集, 排放

中图分类号: S 917 文献标识码: A

## Research on cadmium bioaccumulation in *Argopecten irradians*

Ji Xiang-shan<sup>1</sup>, Zhao Yan<sup>1</sup>, Ding Lei<sup>1</sup>, Chen Song-lin<sup>2</sup>, Wang Xue-peng<sup>1</sup>, Yue Yong-sheng<sup>1</sup>

(1. Animal Science Institute, Shandong Agriculture University, Taian 271018, China;

2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

**Abstract**: Cadmium is ubiquitous in the human environment and has been recognized as one of the most deleterious heavy metal pollutants. Pollution of sea by cadmium as a component of industrial wastes leads to a considerable increase in its concentration in aquatic animals. But, considerable difference in the sensitivity to cadmium among shellfish has been reported. This work was an attempt to investigate cadmium bioaccumulation in various tissues of bay scallop *Argopecten irradians* and the factors influencing cadmium bioaccumulation during simulated pollution. Cadmium in the seawater entered the gill of bay scallop by passive pervasion. The Langmuir isotherms were employed to describe the gill surface binding activity of cadmium. The binding capabilities were  $2.12 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  dry wt. The cadmium exposure results indicated: the bioaccumulation amount in tissues increased with the addition of cadmium concentration in seawater. When the cadmium concentration in the seawater was  $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , after 4 days, the bioaccumulation amount in the gill was  $(1.5 \pm 0.52) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  dry wt and the accumulation velocity was  $(0.375 \pm 0.13) \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ . At the same time, the bioaccumulation amount in the viscera was  $(7.19 \pm 0.83) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  dry wt and the accumulation velocity was  $(1.79 \pm 0.21) \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ . But the accumulation number in the muscle was the least [ $(0.005 \pm 0.0009) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1}$  dry wt]. During of 19 days exposure in seawater containing  $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  cadmium, the bioaccumulation in the gill, viscera and muscle increased with the extension of feeding time. After 14 (336 h) days, the cadmium accumulation in the gill, viscera was close to saturation. But the cadmium in the muscle was far from saturation. In fact, when the storage capacity limits of the liver and kidney are reached, cadmium accumulation in muscle is stimulated. The reported results show that salinity affects cadmium accumulation in various tissues of the tropical fiddler crab *Uca rapax*. In the present study, we found that there was not significant effects of salinity on cadmium accumulation in various tissues of *Argopecten irradians* ( $P > 0.05$ ). When the bay scallop was bred in unchlorinated,

收稿日期: 2006-08-01

资助项目: “十五”国家重大科技专项(2001BA804A29)和农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室开放课题(实开2005-02)

作者简介: 季相山(1977-),男,硕士,助教。主要从事水产动物遗传育种和水生毒理学等方面的研究工作。E-mail: xsji@sdau.edu.cn

通讯作者: 岳永生, Tel: 0538-8242647, E-mail: yysheng@sdau.edu.cn

aerated well water, the cadmium accumulated in the body was eliminated significantly. The excretion rate in the gill was 38.3%.  
**Key words:** *Argopecten irradians*; cadmium; bioaccumulation; excretion

近年来,近岸海域的重金属污染愈来愈严重<sup>[1-3]</sup>,镉等重金属进入水体后,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>。镉摄入人体内部被吸收后,排出非常缓慢,在人体的半衰期很长,约为16~38年<sup>[6]</sup>。镉在人体内累积过多,对肾脏、肝脏、骨骼等都有较大的毒害作用。因此,水产食品的安全、养殖区域的水质都是人们非常关心的问题<sup>[7]</sup>。

镉等重金属在生物体内的富集路线较复杂,水体中的镉通过被动扩散进入鳃部<sup>[8]</sup>,而鳃与血液之间的分配成正相关关系,进入血液的镉又与金属硫蛋白等结合而富集在肾脏、肝脏等内脏器官中<sup>[9]</sup>。而海湾扇贝(*Argopecten irradians*)的鳃对水相中镉的吸附是否可用吸附等温式热力学平衡模型来描述,海湾扇贝镉富集的影响因素及排出规律等都未有人研究过。本研究在测定海湾扇贝各组织吸收积累镉的基础上,探讨了海湾扇贝对水相镉的吸收积累特征及影响因素,以为食品安全政策的制定、渔业环境检测和无公害健康养殖等提供有益的参考资料。

## 1 材料与方法

### 1.1 海湾扇贝的养殖、处理

海湾扇贝采自蓬莱大季家镇某扇贝养殖场,在山东东方海洋科技股份有限公司进行养殖实验。养殖容器为10 L的水族箱,每箱放养扇贝40只,每天换水2次,水体温度维持在18.6~19.5℃。用鼓风机充氧,溶氧水平在5 mg·L<sup>-1</sup>以上。

**镉浓度对海湾扇贝镉富集影响的实验** 先在洁净的海水中暂养2 d,然后向各箱中添加不同量的镉母液(445 μmol·L<sup>-1</sup>),使镉离子成不同浓度梯度:0 μmol·L<sup>-1</sup>,0.08 μmol·L<sup>-1</sup>,0.2 μmol·L<sup>-1</sup>,0.4 μmol·L<sup>-1</sup>,1 μmol·L<sup>-1</sup>,2 μmol·L<sup>-1</sup>。养殖4 d后,每个梯度中取样3只,采鳃、内脏和肌肉组织备分析测定用。

**排放实验** 在含2 μmol·L<sup>-1</sup>镉的海水中养殖4 d后,转到无镉的洁净海水中,第0 d、4 d、8 d和12 d各取样3只,采鳃、内脏和肌肉组织备分析测定用。

**镉的吸收动力学实验** 在含2 μmol·L<sup>-1</sup>镉的海水中养殖海湾扇贝,第2 h、8 h、24 h、2 d、4

d、6 d、8 d、11 d、14 d、17 d、19 d各取样3只,采鳃、内脏和肌肉组织备分析测定用。

**盐度对海湾扇贝镉富集影响的实验** 在盐度分别为20‰、25‰和30‰的海水中,添加镉母液(445 μmol·L<sup>-1</sup>)使镉离子浓度为2 μmol·L<sup>-1</sup>,养殖4 d后各取样3只,采鳃、内脏和肌肉组织备分析测定用。

### 1.2 分析方法

样品置80℃烘箱中烘干24 h后,放入三角瓶中,立即加入10 mL浓硝酸,再加入3 mL高氯酸,过夜,放在电热板上慢慢加热,待棕色烟雾尽后,继续加热直至冒白烟,大约1 min后取下,冷却,转移到10 mL容量瓶中,定容、待测。样品测定采用原子吸收分光光度法在飞利浦SP9原子吸收分光光度计上进行。乙炔流量20,空气流量35,电流6 A,观察高度6 cm,积分时间3 s。

### 1.3 数据分析

所有数据都用SPSS软件进行统计分析,并表示成平均数±标准误差的形式。对各组间数据用SPSS软件进行方差分析。采用Langmuir吸附等温式拟合海湾扇贝鳃对镉的结合。

## 2 结果

### 2.1 镉浓度对海湾扇贝镉富集的影响

在不同镉浓度体系中,养殖4 d的海湾扇贝鳃对水相中镉的吸附可以用Langmuir吸附等温式热力学平衡模型描述,吸附等温线见图1。随水相中镉浓度增加,鳃对镉的富集量明显上升,但上升幅度逐渐下降,4 d后,最高浓度组(2 μmol·L<sup>-1</sup>)的镉富集量为(1.5±0.52) μmol·g<sup>-1</sup> dry wt,富集速率为(0.37±0.13) μmol·(g·d)<sup>-1</sup>。根据吸附等温线并结合直线拟合结果可得海湾扇贝鳃对镉的单层饱和结合量为2.12 μmol·g<sup>-1</sup>。

由图2可见海湾扇贝内脏与肌肉在不同镉浓度体系中对镉的富集情况。随水相中镉浓度增加,内脏的镉富集量逐渐上升,但上升幅度渐缓,而肌肉对镉的富集量增加不显著( $P>0.05$ )。各组织中,海湾扇贝内脏的镉富集量最大,最高浓度组(2 μmol·L<sup>-1</sup>)4 d后达到(7.19±0.83) μmol·g<sup>-1</sup> dry wt,富集速率为(1.79±0.21) μmol·(g·d)<sup>-1</sup>。肌肉对镉的富集量最小,4 d后,最高浓度

组为  $(0.09 \pm 0.034) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{dry wt}$  ,与对照无显著差异 ( $P > 0.05$ ) 。

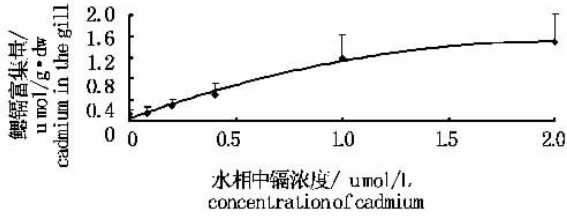


图1 海湾扇贝鳃对水相中镉富集的 Langmuir 等温线拟合结果

Fig. 1 The results of Langmuir fitting of accumulation of cadmium in *Argopecten irradians* gill

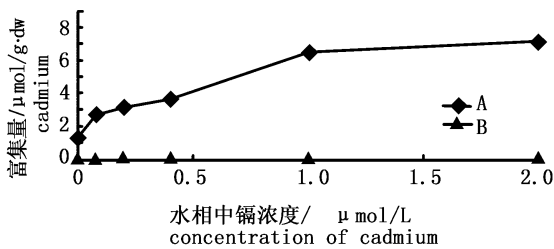


图2 海湾扇贝内脏、肌肉对水相中镉富集

Fig. 2 Accumulation of cadmium in *Argopecten irradians* viscera and muscle

注 :A - 内脏 B - 肌肉  
notes :A - viscera B - muscle

### 2.2 海湾扇贝对镉的排放

在 12 d 的排放实验中 ,海湾扇贝各组织中镉的富集量逐渐较少(图 3)。鳃的镉排出率最高 ,为 38.3% ,鳃镉含量从  $(1.98 \pm 0.12) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{dry wt}$  下降到  $(1.22 \pm 0.16) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{dry wt}$ 。肌肉的镉排出率最低 ,为 17.1% ,肌肉镉含量从  $(0.099 \pm 0.005) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{dry wt}$  下降到  $(0.082 \pm 0.006) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{dry wt}$ 。内脏的镉排出率为 25.8%。排出顺序 鳃 > 内脏 > 肌肉。

### 2.3 海湾扇贝对镉的吸收动力学

在含  $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的海水中养殖海湾扇贝 ,其鳃、内脏和肌肉中镉富集情况随养殖时间的变化见

图 4。随着养殖时间的延长 ,海湾扇贝鳃、内脏和肌肉中镉富集量逐渐增加。内脏团中镉富集量增加最快 ,其富集速率为  $(0.50 \pm 0.34) \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  ,达到平衡后镉富集量为  $(9.50 \pm 0.89) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{dry wt}$ 。鳃中镉的富集速率仅次于内脏 ,为  $(0.28 \pm 0.23) \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$  ,达到平衡后镉富集量为  $(5.36 \pm 0.86) \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{dry wt}$ 。而肌肉中镉的富集速率最慢 ,为  $(0.01 \pm 0.002) \mu\text{mol} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$ 。14 d (336 h) 后 ,海湾扇贝内脏和鳃中镉富集量就达到平衡。但肌肉中镉富集量是否达到平衡尚需进一步研究。

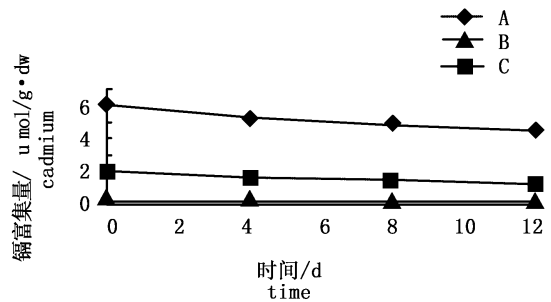


图3 海湾扇贝对镉的排放结果

Fig. 3 Elimination of cadmium from *Argopecten irradians* tissues

注 :A - 内脏 B - 肌肉 C - 鳃  
notes :A - viscera B - muscle C - gill

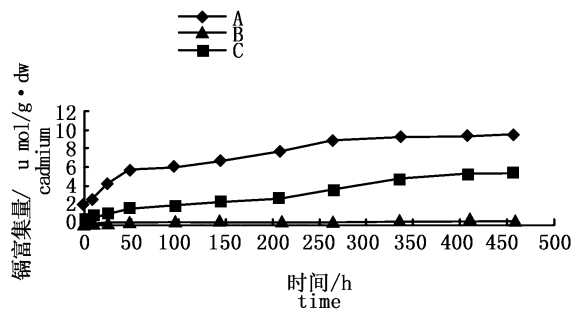


图4 海湾扇贝各组织镉富集量随养殖时间的变化

Fig. 4 Accumulation of cadmium in *Argopecten irradians* tissues with the breeding time

注 :A - 内脏 B - 肌肉 C - 鳃  
notes :A - viscera B - muscle C - gill

### 2.4 盐度对海湾扇贝镉富集的影响

在其他条件相同时 ,盐度对海湾扇贝鳃、内脏和肌肉镉富集速率无显著影响 ( $P > 0.05$ ) (图 5)。

随盐度变化,肌肉和鳃中镉富集速率几乎不变;内脏镉富集速率略有增加。

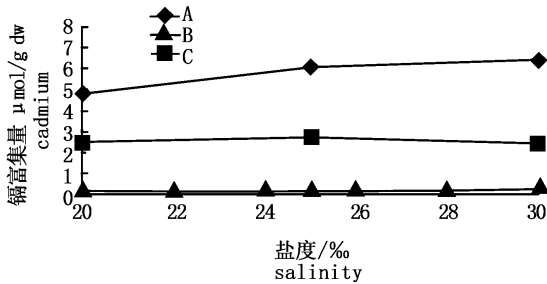


图5 盐度对海湾扇贝镉富集的影响

Fig. 5 Effect of salinity on accumulation of cadmium in *Argopecten irradians* tissues

注:A-内脏 B-肌肉 C-鳃

notes :A - viscera ;B - muscle ;C - gill

### 3 讨论

#### 3.1 镉污染与镉富集的关系

由于生活和工业污水的排放,近海海水中重金属污染日益严重<sup>[1-3]</sup>。2002年我国水产食品镉含量检测表明,软体类、甲壳类镉污染比鱼类严重,少数地区软体类镉富集量超过了国家标准<sup>[7]</sup>。本实验显示,海湾扇贝镉富集能力较强,在含 $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的海水中养殖4 d后,鳃中镉富集量达到了 $1.5 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dry wt}$ ,肌肉中镉富集量也达到了 $0.09 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dry wt}$ 。并且,海湾扇贝镉富集量随海水中镉含量的增加而明显上升,鳃对镉的单层饱和结合量达到了 $2.12 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ dry wt}$ 。因此,必须加强养殖海区水质检测和管理。

#### 3.2 镉富集的过程及组织差异

镉的富集过程较为复杂,镉等重金属从水相到鳃部的移动是被动扩散或易化扩散穿过鳃细胞钙通道的过程,该过程可以用Langmuir方程来描述,并据此求得海湾扇贝鳃对镉的单层饱和结合量为 $2.12 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{ 干重}$ 。镉等重金属在鳃与血液之间的分配往往成正相关关系。之后,重金属再通过血液传输到内脏其他器官。

众多研究报道均显示,重金属在水产动物体内

各组织富集量差异显著,肾脏、肝脏等都是重金属的重要靶器官<sup>[10-12]</sup>。本实验也发现,镉在海湾扇贝各组织中富集次序为:内脏>鳃>肌肉。在含较高浓度镉( $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )的海水中养殖海湾扇贝14 d后,在内脏中的镉富集量是肌肉的45倍。因此,从饮食安全角度来讲,食用贝柱比食用整体贝肉安全<sup>[10]</sup>。镉在内脏中的富集量大于肌肉与金属硫蛋白的诱导作用有关。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,抑制或使酶失活,引起中毒症状<sup>[9]</sup>。海湾扇贝的肝脏、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,进入体内的镉大量富集在海湾扇贝的内脏中。

#### 3.3 镉的排放

在含 $2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Cd}$ 的海水中养殖海湾扇贝,镉不断被其内脏、鳃等器官富集,第14天,内脏和鳃中镉富集达到平衡,平衡时间较短。所以,在养殖生产中,很难通过缩短养殖周期来减少镉的富集。12 d的镉排放实验发现,鳃的排放率最高,为38.3%。王凡等<sup>[10]</sup>在栉孔扇贝对镉的蓄积和排放实验中得出,11 d后,栉孔扇贝鳃和肌肉对镉的排放率都达到了65%以上。无论如何,在镉污染较严重的海区养殖的扇贝,收获前一段时间,在洁净的海水里养殖并肥育一段时间,对减少镉等重金属污染是很有效的。

#### 3.4 盐度对镉富集的影响

据报道,盐度下降将使蟹的富集速率上升<sup>[13]</sup>。陆超华<sup>[14]</sup>也认为,近江牡蛎对镉的富集量随水体盐度的下降而呈上升趋势,这表明,在盐度较低的河口地区养殖蟹和近江牡蛎将使其对镉的富集量增大。本实验发现,在其他条件相同时,盐度对海湾扇贝鳃、内脏和肌肉镉富集速率无显著影响( $P > 0.05$ )。这可能与海湾扇贝的耐盐范围较窄,实验中无法设计更宽的盐度范围有关;也可能是盐度对镉富集的影响有较大的种间差异。该实验说明,在镉污染重的近河口地区养殖海湾扇贝同样会大量富集镉。

## 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 ] Christine de Conto Cinier, Michelle Petit-Ramel, Rene Faure, 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, 137 - 143.
- [ 6 ] 孟晓红. 金属镉在鱼体中的生物富集作用[ J ]. 广东微量元素科学, 1997, 3( 1 ) : 8 - 11.
- [ 7 ] 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.
- [ 8 ] 吴 坚. 微量金属对海洋生物的生物化学效应[ J ]. 海洋环境科学, 1991, 10( 2 ) : 58 - 62.
- [ 9 ] 吴众望, 潘鲁青. 重金属离子对凡纳滨对虾肝脏 MT 含量的影响[ J ]. 水产学报, 2005, 29( 5 ) : 715 - 718.
- [ 10 ] 王 凡, 赵元凤, 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.
- [ 11 ] 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[ J ]. 生态学报, 2004, 24( 5 ) : 1086 - 1090.
- [ 12 ] Gebriel Nunez-Nogueira, Philip S. Raibow. Cadmium uptake and accumulation by the decapod crustacean *Penaeus indicus* [ J ]. Marine Environmental Research, 2005, 60 : 339 - 354.
- [ 13 ] Zanders I P, Rojas W E. Salinity effects on cadmium accumulation in various tissues of the tropical fiddler crab *Uca rapax* [ J ]. Environmental Pollution, 1996, 94( 3 ) : 293 - 299.
- [ 14 ] 陆超华, 谢文造, 周国君. 近江牡蛎作为海洋重金属镉污染指示生物的研究[ J ]. 中国水产科学, 1998, 5( 2 ) : 79 - 83.

## 欢迎订阅 2007 年《上海水产大学学报》

《上海水产大学学报》是上海水产大学主办的以水产科学为主的综合性学术刊物。主要反映自然科学各学科的科研成果, 促进学术与教学研究的交流与繁荣。主要刊载渔业资源、水产养殖和增殖、水产捕捞、水产品保鲜与综合利用、渔业水域环境保护、渔船、渔业机械与仪器、渔业经济与技术管理以及基础研究等方面的论文, 调查报告, 研究简报, 综述与评述, 简讯等, 并酌登学术动态和重要书刊的评价等。目前《上海水产大学学报》已同时被中文核心期刊要目总览定为中文核心期刊、中国科学院文献情报中心定为中国科技论文统计源期刊、中国科学技术信息研究所定为中国科技核心期刊。

本刊为双月刊, 大 16 开, 国内外公开发行。每期定价 10 元。全年定价 60 元( 含邮费)。国际标准刊号: ISSN 1004 - 7271, 国内统一刊号: CN 31 - 1613/S。国内邮发代号: 4 - 604, 国外发行代号: 4822 Q。读者可在当地邮局订阅, 也可直接汇款至编辑部订阅。

编辑部地址: 上海市军工路 334 号, 上海水产大学 38 信箱, 邮编 200090

联系电话 021 - 65710892, 传真 021 - 65710232。E-mail: xuebao@shfu.edu.cn