

天津潮间带泥螺(*Bullacta exarata*)对重金属镉的累积与释放特征

陈楠, 刘宪斌, 田胜艳, 刘占广, 孙莲娜, 李国锋

(天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津科技大学, 天津 300457)

摘要:生物对重金属的累积与释放实验对研究生物修复、污染物生态毒性和环境风险评价有着十分重要的意义。通过对天津潮间带底栖生物泥螺进行室内镉累积与释放实验,研究了泥螺体和肝脏对镉的累积与释放特征。整个实验过程分为累积和释放两个阶段,实验样品经冷冻、干燥、研磨、混匀和称量后,采用原子吸收分光光度法进行测定。结果表明,泥螺对镉的累积周期为 14 d,其身体和肝脏中镉的质量分数均呈现先升高后降低的趋势,在第 7 d 达到最大值,其中肝脏的累积能力要大于身体;泥螺对镉的释放周期为 12 d,在第 9 d 趋于稳定。泥螺对镉的累积与释放不仅与其自身的生活习性有关,还与其栖息环境密切相关。在自然环境中,应当严格控制镉的人为输入,尤其是含镉工业废水的排放。

关键词:泥螺;重金属;镉;累积;释放

中图分类号:X174 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)09-1687-06

Accumulation and Elimination Characteristics of Heavy Metal Cadmium in *Bullacta exarata* from Intertidal Zone of Tianjin, China

CHEN Nan, LIU Xian-bin, TIAN Sheng-yan, LIU Zhan-guang, SUN Lian-na, LI Guo-feng

(Tianjin Key Laboratory of Marine Resource and Chemistry, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Cadmium accumulation and elimination of organism have important influence on bioremediation, pollutant ecological toxicity and environment risk assessment. The characteristics of cadmium accumulation and elimination in *Bullacta exarata* body and liver, which were from the intertidal zone of Tianjin, were studied in our laboratory. The entire experiment included two parts, accumulation and elimination. The samples were frozen, dried, grinded, blended and weighed, then measured by Atomic Absorption Spectrometry (AAS). The result showed that the accumulation period was 14 d. The mass fractions of cadmium in body and liver were from high to low, the maximum was at 7 d. The accumulation in liver was greater than that in body. And, the depuration period was 12 d, the stable point was at 9 d. The accumulation of cadmium in *Bullacta exarata* related not only with their life behaviour but also with their habitats. In the natural environment, the human input of cadmium should be strictly controlled, particularly the discharge of the cadmium industrial waste water.

Keywords: *Bullacta exarata*; heavy metal; cadmium; accumulation; elimination

随着工农业生产的迅速发展,人类不仅对自然资源的需求水平不断提高,而且对环境污染的方式也发生着重大的变化。有毒、有害污染物质以各种形式不断输入环境,使环境污染进一步加剧。重金属作为主

要的海洋污染物之一,易被生物体吸收富集,转化为毒性更大的金属有机化合物,再经食物链传递,危害人体健康^[1]。镉是一种生物非必需的毒副作用很强的重金属元素,因其毒性大,应用广泛而成为一种主要的海洋污染物。研究表明,镉在水生生物体内极易进行富集,并通过食物链影响人体健康^[2]。长期以来,人们比较重视溶解在水里的重金属对生物的影响,而忽略了沉积物中重金属对生物所产生的作用。进入海洋环境中的镉,有相当一部分进入沉积物,并对底栖生

收稿日期:2010-04-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2007CB407306-2)

作者简介:陈楠(1984—),女,山西人,硕士研究生,主要从事环境生态学研究。E-mail:ch19840612@126.com

通讯作者:刘宪斌 E-mail:lsb0688@tust.edu.cn

物造成影响^[3]。沉积物的毒性效应受到沉积物环境,特别是沉积物物理化学性质的影响。因此,仅仅依靠化学分析结果作为沉积物质量评价的标准有一定的局限性,而进行生物体的累积及释放实验则可以比较直接地说明污染物与生物效应之间的关系,对于更客观地进行沉积物重金属环境质量评价和重金属危害的风险评估有十分重要的意义。

泥螺(*Bullacta exarata*)作为一种重要的大型滩涂底栖贝类,是天津潮间带底栖生物群落的先锋种群。它能够吞食大量的有机碎屑、泥沙,并附带吞食附着在碎屑泥沙之上的重金属物质,可以用其体内污染物质量分数的变化来评价、判断、分析其对某种污染物质的累积特征^[4]。本文利用染毒实验研究泥螺对重金属镉(近海沉积物中镉的来源主要有润滑油、柴油、轮胎、电池、电镀工业、有色金属生产、钢铁冶炼、杀虫剂、煤和石油的燃烧以及磷肥、垃圾焚烧等^[5])的吸收机理及其在泥螺体内的迁移和分布,对于评价重金属在环境中的迁移转化有着重要的意义。有关底栖生物受重金属污染情况的研究已有不少报道,但多偏重于重金属在生物体内的累积效应的研究^[6-9],对于生物对重金属释放的研究甚少。本文中选取的镉属于高毒性重金属的一种,研究泥螺对镉的累积和释放规律无疑对天津海岸带的生态风险评价有重要价值。

1 材料与方法

1.1 样品采集

采样区域位于天津海滨浴场南侧的潮间带,泥螺现已成为该潮间带底栖生物群落的先锋种群。于2009年4月中旬,采集该区表层沉积物、海水及泥螺(*Bullacta exarata*),装入玻璃瓶内,运回实验室。

1.2 化学试剂

氯化镉(购自天津市苏庄化学试剂厂,分析纯)、浓硝酸(购自天津风船化学试剂有限公司,优级纯)、高氯酸(购自天津市东方化工厂,优级纯)。

1.3 实验准备

1.3.1 背景值分析

将采集的生物样品放入-20℃冰箱内,短时间内进行背景值分析。沉积物样品在室温条件下自然风干后,剔除较大的砾石、动物残骸、木屑等杂物,研磨,过筛,室温下保存备用。实验室测定了两种沉积物(S1、S2)的理化性质(表1)。

1.3.2 泥螺的驯养

选择体长、体重大致相同的成年健壮的泥螺(本

表1 两种沉积物的理化性质

Table 1 Two sediments physicochemical properties

沉积物	有机碳的质量分数(foc)	pH	机械组成	颜色
S1	(0.12 ± 0.02)%	7.98	细沙	黄
S2	(1.08 ± 0.03)%	7.87	粉沙、粘土	褐

实验所用个体平均湿重 1.32 g, 平均壳高 1.09 cm) 70 只放入两个事先准备好的玻璃缸中(50 cm×20 cm×40 cm), 每个玻璃缸中放入 35 只, 驯养 7 d, 每日定时观察、记录泥螺生存状况。驯养期间缸底部铺有 10~20 cm 厚的底泥(沉积物灭菌), 要有一定的坡度(模拟其野外生存状态), 表面覆盖 500 mL 左右的海水。在驯养期间采用自然光照、温度(25±1)℃、不投饵、海水盐度(2.5±0.1)%、pH 8.0±0.1, 用微型充气泵间歇曝气。如 7 d 内泥螺死亡个体数小于 10%, 则该批泥螺可以用于染毒实验。

1.4 染毒实验

首先制备染毒沉积物: 将镉 0.02 g(以氯化镉中镉的含量计)溶于一定量的丙酮中, 加入部分供试沉积物(S2), 放入通风橱内, 待丙酮完全挥发后(1~2 d)与剩下的沉积物混合(沉积物的总质量为 2 kg), 搅拌均匀, 在通风橱内放置 7 d, 形成一定浓度的镉污染沉积物(质量分数为 10 mg·kg⁻¹), 并于暗处低温环境下放置一个月, 让其充分混合均匀。驯养期结束后, 铺设在每个玻璃缸的表层, 进行泥螺对镉的累积实验。

在整个实验过程中, 每日早、中、晚各测一次泥螺生存的温度、盐度、pH, 与驯养期间保持一致。

1.5 样品分析

1.5.1 样品采集

从泥螺暴露在镉污染环境之日算起, 分别于 1、3、5、7、10、12、14 d 取样^[10], 每次取 4 只, 取出后放置在盐度为(2.5±0.1)%的海水中清肠 12 h, 然后将其洗净剥离弃壳并分离肝脏, 放置培养皿中冷冻。

将暴露在镉污染环境 14 d 后的泥螺移入清洁海水中进行排除实验, 分别于 1、3、5、7、10、12 d 取样, 每次取 4 只, 取出后将其洗净剥离弃壳并分离肝脏, 放置培养皿中冷冻。

1.5.2 样品前处理

生物样品经冷冻、干燥、研磨、混匀、称量后, 按照《海洋监测规范》经湿法消解后待测。具体做法如下: 称取(1±0.001)g 干样于 100 mL 烧杯中, 加入 4 mL 硝酸, 盖上表面皿, 在电热板上低温加热至无气泡产生, 冷却后, 加入 2 mL 硝酸和 4 mL 高氯酸, 再加热至溶

液呈透明的淡黄色。移开表面皿蒸发至白烟冒尽,残留物用 10 mL 盐酸溶液加热溶解,冷却后,全量转入 25 mL 量瓶中。定容转移过程中,消化杯至少用超纯水润洗 3 次,以降低损失和减小误差。用水稀释至标线,制得样品消化液,同时制备分析空白试液。定容后用火焰原子吸收分光光度计测定 Cd^{2+} 含量^[11]。

1.5.3 样品分析

分析仪器为 WFX-1B 型原子吸收分光光度计,待测元素为镉,吸收波长为 228.8 nm,灯电流 1.0 mA,狭缝 0.1 nm,燃烧高度 6.0 mm,空气流速 320 L·h⁻¹,乙炔流速 80 L·h⁻¹,阻尼为 2,检出限(W)为 0.08×10^{-6} 。

采用下列公式计算生物体样品中的镉含量^[11]:

$$W_{\text{Cd}} = \frac{\rho_{\text{Cd}} V}{M}$$

式中: W_{Cd} 为生物体干样中镉含量, $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$; ρ_{Cd} 为从标准曲线上查得的镉的浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$; V 为样品消化液的体积, mL; M 为样品的称取量, g。

2 结果与讨论

2.1 环境背景值

染毒沉积物中有机碳的质量分数为 $(1.08 \pm 0.03)\%$ (测定采用重铬酸钾氧化-还原容量法^[12]),能够保证整个实验过程中,泥螺的食物来源不受限制。沉积物中镉的背景质量分数为 $0.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,染毒质量分数理论值为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,染毒后镉的质量分数为 $8.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,染毒率约为 89%。实验开始之前,测得泥螺体内镉的背景质量分数为 $0.69 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,肝中镉的质量分数为 $1.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。实验一周后,进行背景值校正,备用缸中泥螺体内镉的质量分数为 $0.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,泥螺肝中镉的质量分数为 $1.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可以认为在本次实验过程中,镉的背景质量分数值基本不变。

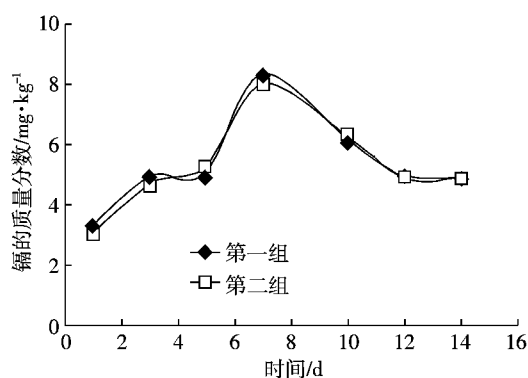


图1 泥螺体(除肝脏)对镉的累积

Figure 1 Accumulation of Cd in *Bullacta exarata* (except for liver)

2.2 实验数据分析

2.2.1 累积阶段:泥螺体(除肝脏)及肝脏内镉的质量分数随时间的变化特征

由图 1、图 2 可见,泥螺体和肝脏对镉的累积均呈现先升高后降低的趋势,在第 7 d 达到最大值,随后逐渐降低并趋于稳定。李永富等^[3]在研究菲律宾蛤仔对镉的累积特征时,发现随时间的增加,其体内镉的含量呈现先快速增加的趋势,在 24 h 内其蓄积速率最大,96 h 后生物体内镉的质量分数出现缓慢下降的趋势,之后达到平衡状态,这和本研究的结果一致。这也可以从重金属在生物体内的吸收累积的两种方式得到解释,重金属在生物体内的吸收累积可以分为体表吸附和透过体表吸收或两者兼而有之。重金属被体表吸附一般指金属被体表黏液、肠胃黏液或呼吸时被鳃所滞留,以这种方式吸附的重金属在生物生命活动减弱时可以重新释放出来,主要受到生物摄食活动及生命活动的影响。就累积的量来讲,泥螺肝脏与泥螺体相比,存在明显的组织差异性。肝脏组织由于可以快速合成金属硫蛋白而使重金属得以大量累积,所以肝脏成为重金属累积的重要靶器官,当达到一定的程度时,即可引起中毒现象,造成致命的损伤。

在对泥螺进行为期 14 d 的染毒实验中,相同时间段内,肝脏中镉的累积量是身体的 2~5 倍。肌肉对重金属的亲合性要远低于肝脏,镉在其他生物体内的累积量也遵循内脏远远大于肌肉的规律。而且在之前的研究中发现泥螺体内其他部位重金属的含量也远远小于肝脏中重金属的累积量。可见,肝脏和其他组织相比,有较强的富集和累积有毒物质的能力。虽然肝脏中含有大量的酶,但对于重金属的代谢能力还是有限的。肝脏属于软组织,在食物链的传递过程中,会影响到下一个营养级。因为捕食者多以摄食软组织为

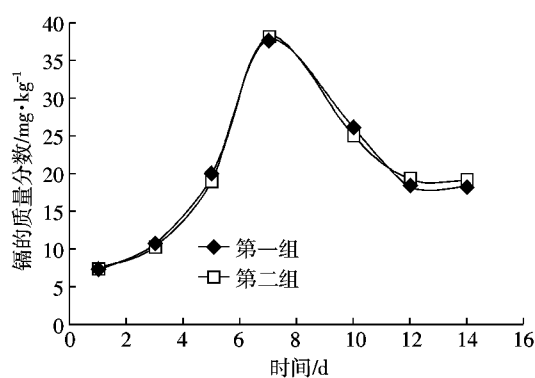


图2 泥螺肝脏对镉的累积

Figure 2 Accumulation of Cd in *Bullacta exarata*'s liver

主,从而对更高营养级的生物造成一定的威胁。颜涛等^[2]研究了河南华溪蟹对镉的吸收和累积规律,发现不同的器官具有明显的组织差异。由于各组织器官的结构、功能不同,导致镉在体内累积量不同,由于其解毒功能的差异性,最终使组织内镉的累积呈现不同的分布,其中肝脏中镉的含量远远大于肌肉。李玉环等^[13]对海湾扇贝研究发现,其对镉有较强的累积能力,随着时间的延长,内脏对镉的累积能力远远高于肌肉。衣铭明等^[14]对长期喂含乌贼内脏粉饲料的海鲈进行镉含量测定,结果是肌肉中镉含量与天然生长对照组相差不大,而内脏中镉含量远远高于自身肌肉镉含量和天然生长对照组的内脏镉含量。翟毓秀等^[15]用莱氏拟乌贼等头足类及其加工下脚料作为高含镉原料配制饲料喂养大菱鲆亲鱼,发现镉主要蓄积在内脏中,其含量远远大于肌肉。

一般认为重金属进入底栖生物体内的途径有三条,即通过呼吸作用由鳃进入体内,通过食物由消化道进入体内和通过体表渗透进入体内,最后都进入血液流经全身,从而在各个部位蓄积。由于肝脏在体内起着解毒作用,血液中的重金属大部分被肝脏截留而积蓄在肝内^[15]。在肝脏中, Cd^{2+} 的积累在一定程度上与金属硫蛋白(MT)的诱导作用有关。 Cd^{2+} 能激活肝胰腺中MT基因的转录,MT基因得到大量表达,使得肝胰腺MT含量较高,进入体内多余的重金属离子将和MT结合,在体内被储存起来,使 Cd^{2+} 在泥螺肝脏中形成较高浓度的累积^[2]。底栖生物对重金属镉具有很强的累积能力,这不仅与生物体自身的生活习性有关,还与其栖息环境密切相关。在本实验过程中,镉在沉积物中的质量分数要远远高于在海水、空气中的质量分数,所以在整个染毒实验中,泥螺体内镉的累积主要来自于对底泥的摄食,通过其他途径如海水、大气

中吸收的镉可以忽略不计。

2.2.2 释放阶段:泥螺体(除肝脏)及肝脏内镉的质量分数随时间的变化特征

由图3、图4可以看出,泥螺体对镉的释放呈现逐渐降低的趋势,在第9d即达到平衡。重金属离子从泥螺体内排除的途径包括排泄物、胆汁、皮肤和粘液,排除途径要多于吸收途径^[1]。一般底栖动物生活在受重金属污染的环境中,重金属在其体内累积占主导,一旦远离污染环境,则排除占主导,生物体发挥自身的解毒功能,将毒物向外释放,以求保持内环境的稳定。不同的底栖动物对体内积累的镉排出规律不同^[16]。本实验发现,将染毒14d的泥螺移至天然海水中,其体内的镉就开始释放,7d后镉的排除率为22%,肝脏排除率为28%。王凡等^[17]的研究结果显示,染毒18d栉孔扇贝放入清洁海水中,在11d的排放试验期间,鳃、肌肉、内脏团中镉蓄积量随排放时间的增加逐渐下降,排放第11d,栉孔扇贝内脏团内累积的镉排出率达38.11%,鳃中镉的排出率达65.41%,肌肉中镉排出率达66.18%。赵元凤等^[18]研究关于牙鲆对镉蓄积和排放规律,在牙鲆染毒13d后,将牙鲆移入清洁海水中,结果表明,随排放时间增加,各组织镉蓄积量明显下降,排放至第15d时各组织镉排出率为内脏团(80.66%)>鳃(73.66%)>肌肉(56.84%)。陆超华等^[18]在近江牡蛎作为海洋重金属镉污染监测生物的研究中发现,将近江牡蛎从处于12d的镉暴露状态移入天然海水之后,体内的镉就开始排出,但排出速度较慢,至试验末期(第35d)其体内累计的镉排出率为29%。试验结果的不一致可能与试验所做的吸收积累时间不同有关系,也可能与泥螺及牡蛎等生物对重金属的高同化率和低排出速率有关系。所以,对于镉污染严重环境中生长的泥螺,收获后即使经较长时间的净化,

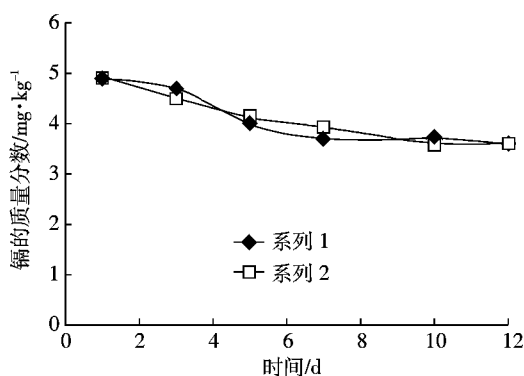


图3 泥螺体(除肝脏)对镉的释放

Figure 3 Elimination of Cd in *Bullacta exarata* (except for liver)

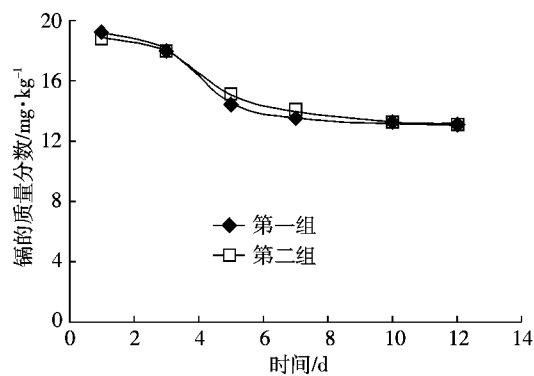


图4 泥螺肝脏对镉的释放

Figure 4 Elimination of Cd in *Bullacta exarata*'s liver

其残留量仍然很高,对人的身体健康会产生威胁,建议不要食用。有资料显示^[10],盐度会影响底栖生物对重金属的累积能力,镉在底栖动物体内的累积能力还会随着盐度的增加而下降,本实验中海水的盐度控制在2.5%~2.8%,和天然海水的盐度基本一致,所以盐度变化对生物体重金属的累积能力不在本实验的考虑范围之内。

镉作为一种毒性很强的元素,其主要来自于生命过程中的环境,在体内的蓄积主要源于环境的影响,其对生物的有害影响是多方面的,首先是使一定的活性传递机制受阻,肾受损伤,酶受危害以及内分泌系统受影响,使生物机能失调。Loubourdis 等^[19]用不同浓度的 CdCl₂ 对湖蛙蝌蚪进行 15 d 和 30 d 的处理,结果表明镉可以延缓蝌蚪的生长。Nebeker 等^[20]用镉对美西螈的幼体处理 14 d,结果是幼体的体重明显减少。Flament 等^[21]用镉 1 019 μmol·L⁻¹(约 1 mg·L⁻¹)处理 54 期蝶螈蝌蚪,可以诱导蝶螈蝌蚪的变态延缓,在对照蝶螈蝌蚪 100%完全变态后,处理组蝌蚪在 9 个月后才开始变态。在本实验中,生活在被镉污染的环境中的泥螺表现出行动迟缓,身体发黑等症状。镉可以对生物体造成很多有害的影响,应引起足够的关注。

3 结论

(1)泥螺对镉的累积周期大约为 14 d,释放周期约为 12 d。累积阶段,体内和肝脏中镉的质量分数均呈现先增高后降低的趋势,在第 7 d 达到最大值。释放阶段,约在第 9 d 趋于稳定。泥螺对镉的累积和释放特征不仅与其生活习性有关,还与其栖息环境密切相关。

(2)泥螺肝脏对镉的累积能力大约是身体的 2~5 倍,对食物链中下一个营养级有较大的影响。

(3)在整个实验过程中,模拟泥螺野外生存的环境,其体内镉的主要来源是通过摄食获取。所以在自然环境下,应当严格控制镉的人为输入,尤其是工业废水的排放。

参考文献:

- [1] 赵元凤,吕景才,吴益春,等.海水中镉对牙鲆的生物有效性研究[J].应用生态学报,2005,16(3):563-567.
ZHAO Yuan-feng, LV Jing-cai, WU Yi-chun, et al. Bioavailability of cadmium in seawater to *Paralichthys olivaceus* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 563-567.
- [2] 颜涛,马文丽,王兰,等.镉在河南华溪蟹主要组织器官中的累积[J].山西大学学报(自然科学版),2008,31(4):622-625.
YAN Tao, MA Wen-li, WANG Lan, et al. Accumulation of cadmium acute exposure in the tissues of freshwater Crab *Sinopotamon henanense* [J]. *Journal of Shanxi University(Natural Science Edition)*, 2008, 31(4): 622-625.
- [3] 李永富,罗先香,樊玉清,等.海洋沉积物中镉及不同形态镉的生物有效性[J].生态环境,2008,17(3):909-913.
LI Yong-fu, LUO Xian-xiang, FAN Yu-qing, et al. Bioavailability of cadmium in different fractions of sediment by *Ruditapes philippinarum* [J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3): 909-913.
- [4] 李树国.泥螺的生物学[J].水利渔业,2005,25(4):42-43.
LI Shu-guo. Biology of *Bullacta exarata* [J]. *Watering and Fishing*, 2005, 25(4): 42-43.
- [5] 姜中鹏.天津塘沽潮间带沉积物重金属及 POPs 评价研究[D].天津:天津科技大学,2007.
JIANG Zhong-peng. Assessment of heavy metals and POPs in sediment from Tanggu Intertidal Zone, Tianjin [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2007.
- [6] 陈爱华.底栖动物对重金属生物可利用性的研究进展[J].齐鲁渔业,2007,24(7):40-42.
CHEN Ai-hua. Study progress on the heavy metal bioavailability of benthic fauna [J]. *Shandong Fisheries*, 2007, 24(7):40-42.
- [7] 李丽娜,陈振楼,许世远,等.长江口滨岸潮滩底栖动物泥螺受铜污染的毒理学研究[J].海洋环境科学,2004,23(3):24-27.
LI Li-na, CHEN Zhen-lou, XU Shi-yuan, et al. Study on toxicity test of benthic fauna, *Bullacta exarata*, polluted by copper in the tidal flat of Changjiang estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2004, 23(3): 24-27.
- [8] 李丽娜,陈振楼,许世远,等.长江口滨岸潮滩底栖泥螺受铅污染的急性毒理试验[J].海洋湖沼通报,2005(2):88-92.
LI Li-na, CHEN Zhen-lou, XU Shi-yuan, et al. Acute toxicity test on benthic fauna, *Bullacta exarata*, polluted by lead in the tidal flat of Changjiang estuary [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2005, (2): 88-92.
- [9] 叶属峰.滩涂湿地泥螺(*Bullacta exarata*)的空间分布、重金属积累特征及其生态经济价值评估[D].上海:华东师范大学,2001.
YE Shu-feng. Studies on the spatial distribution, accumulation characteristics of heavy metals and assessments on the ecological economic values of *Bullacta Exarata* in the intertidal wetlands [D]. Shanghai: East China Normal University, 2001.
- [10] Tham C Hoang, Emily C Rogevich, Gary M Rand, et al. Copper uptake and depuration by juvenile and adult Florida apple snails (*Pomacea paludosa*) [J]. *Ecotoxicology*, 2008, 17(7):605-615.
- [11] 国家质量技术监督局. GB/T 17378.3—1998.海洋监测规范第6部分:生物体测定[S].北京:海洋出版社,1998.
State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T 17378.3—1998, The standard of marine monitoring Section 6: Organism Determination [S]. Beijing: National Oceanic Bureau, 1998.
- [12] 国家质量技术监督局. GB/T17378.3—1998.海洋监测规范第5部分:沉积物测定[S].北京:海洋出版社,1998.
State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T17378.3—1998, The Standard of Marine Monitoring Section 5: Sediment Determination [S]. Beijing: Marine Publishing House, 1998.

- nation [S]. Beijing: National Oceanic Bureau, 1998.
- [13] 李玉环, 黄海, 王佃伟. 海湾扇贝体内重金属镉富集和消除规律的研究[J]. 微量元素与健康研究, 2008, 25(5): 30-33.
- LI Yu-huan, HUANG Hai, WANG Dian-wei. Study of accumulation and elimination of the heavy metal cadmium in *Argopecten irradians* [J]. *Studies of Trace Elements and Health*, 2008, 25(5): 30-33.
- [14] 衣铭明, 陈民山, 郝林华, 等. 鲈鱼对浮性配合饵料中镉的积累[J]. 海洋水产研究, 1998, 19(1): 74-80.
- YI Ming-ming, CHEN Min-shan, HAO Lin-hua, et al. Accumulation of cadmium from floating compound feed fed Giant Perch [J]. *Marine Fisheries Research*, 1998, 19(1): 74-80.
- [15] 翟毓秀, 杨学松, 宁劲松, 等. 镉在大菱鲆体内蓄积规律及对生长和食品安全影响初探[J]. 海洋水产研究, 2005, 26(4): 26-30.
- ZHAI Yu-xiu, YANG Xue-song, NING Jin-song, et al. Preliminary studies on the accumulation rule of cadmium in farming turbot and its effect on turbot growth and food safety [J]. *Marine Fisheries Research*, 2005, 26(4): 26-30.
- [16] 张翠, 翟毓秀, 宁劲松, 等. 镉在水生动物体内的研究概况[J]. 水产科学, 2007, 26(8): 465-468.
- ZHANG Cui, ZHAI Yu-xiu, NING Jin-song, et al. Research on cadmium in aquatic animals [J]. *Fisheries Science*, 2007, 26(8): 465-468.
- [17] 王凡, 赵元凤, 吕景才, 等. 水生生物对重金属的吸收和排放的研究进展[J]. 水利渔业, 2007, 27(6): 1-3.
- WANG Fan, ZHAO Yuan-feng, LV Jing-cai, et al. Research of heavy metals in absorption and emission [J]. *Watering and Fishing*, 2007, 27(6): 1-3.
- [18] 陆超华, 谢文造, 周国君, 等. 近江牡蛎作为海洋重金属镉污染监测研究[J]. 中国水产科学, 1998, 5(2): 79-83.
- LU Chao-hua, XIE Wen-zao, ZHOU Guo-jun, et al. Studies on *Crasostrea rivularis* as a biological indicator of cadmium pollution [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1998, 5(2): 79-83.
- [19] Vogiatzis A K, Loubourdis N S. Cadmium accumulation in liver and kidneys and hepatic metallothionein and glutathione levels in *Rana ridibunda*, after exposure to CdCl_2 [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1998, 34(1): 64-68.
- [20] Nebeker A V, Schurtema G S, Ott S L. Effects of cadmium on growth and bioaccumulation in the northwestern Salamander *Ambystoma gracile* [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1995, 29(4): 492-499.
- [21] Flament S, Kuntz S, Chesnel A, et al. Effect of cadmium on gonadogenesis and metamorphosis in *Pleurodeles waltl* (*Urodele amphibian*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2003, 64(2): 143-153.