

有机锡污染与海产腹足类性畸变

施华宏¹, 黄长江²

(1. 暨南大学水生生物研究所, 广州 510632; 2. 汕头大学海洋生物研究室, 汕头 515063)

摘要: 综述了海产腹足类性畸变发生的原因和形态变化, 并对利用海产腹足类性畸变进行有机锡污染的生物监测、海产腹足类性畸变的生态毒理学等方面的研究进展及我国的研究现状作了详细的介绍。

关键词: 有机锡; 海产腹足类; 性畸变

Tributyltin (TBT) pollution and imposex in marine gastropod

SHI Hua-Hong¹, HUANG Chang-Jiang² (1. *Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China*; 2. *Marine Biology Institute of Science Center, Shantou University, Shantou 515063, China*). *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1711~1717.

Abstract: Organotin compounds, such as tributyltin (TBT) and triphenyltin (TPT) are widely used as biocidal additives in antifouling paints. They leach from paints into the water column and have caused damage to non-target organisms. Since their adverse effects on oyster farming in Arcachon Bay of France were revealed in 1980s, a number of studies have demonstrated that organotin compounds have distinct deleterious effects on aquatic ecosystems. Tributyltin (TBT) compounds exhibit the greatest toxicity of all organotins and have even been characterized as one of the most toxic groups of xenobiotics ever produced and deliberately introduced into the environment. Consequently, legislative restrictions were drawn up to reduce TBT concentrations in coastal waters and the application of TBT based paints was banned, with few exceptions, for all boats less than 25 m overall length.

Mollusks have been found to be one of the most sensitive groups of invertebrates among the broad variety of malformations caused by TBT in aquatic animals. Within dioecious prosobranch gastropods, organotin compounds are known to induce two different masculinization phenomena: imposex and intersex. The common feature of these phenomena is the gradual and concentration-dependent increase of virilization intensities in females resulting in female sterility. While in imposex-affected species, the entire female genital system is conserved but superimposed by male organs, such as, penis and /or vas deferens. In the periwinkle *Littorina littorea*, the only intersex-affected species described to date, the female pallial organs are modified toward a male morphological structure in lower intersex and then supplanted by the corresponding male formation, a prostate gland. The organ-level phenomena can be described by using evolutive schemes and numerical indices of effect can be developed to monitor organotin pollution in the field. The vas deferens sequence index (VDSI, average imposex stage in a sample of *Nucella*; $VDSI > 4$ indicates the some females are sterile), the relative penis size index (RPSI, measured as a percent-age of the male penis size in *Nucella*), and relative penis length index (RPLI, used in *Buccinum*), imposex incidence, or the average penis length of females can be used as index for imposex-exhibiting species. The intersex index (ISI, average intersex stage in a given sample), the incidence of sterile females, and the mean length of the prostate gland in females can be used for *Littorina littorea*; if $ISI > 1$ in *Littorina*, some

基金项目: 广东省重大科技兴海项目(A200005F02)、广东省自然科学基金(000792)资助项目

收稿日期: 2000-09-29 修訂日期: 2001-03-01

万方数据

作者简介: 施华宏(19~), 男, 湖北省人, 博士。主要从事水污染生态学研究工作。

females will have been sterilized. The ISI and VDSI provide very good estimates of the reproductive capability of females in analyzed populations and have been widely used in surveys all over the world.

It has been accepted that imposex is induced almost typically by TBT used in antifouling paints, based on results of laboratory experiments using the dogwhelk, *Nucella lapillus*. In the rock shell *Thais clavigera*, however, the potency of TPhT for promoting the development of imposex is estimated to be approximately the same as that of TBT during injection experiments. Imposex-affected species exhibit in general a higher TBT sensitivity than the intersex-developing snail, *L. littorea*, and imposex is more widespread. On the other hand, some prosobranch snails do not develop imposex even when exposed to high aqueous TBT concentrations or sampled in highly contaminated areas. There are some possible mechanisms to explain the masculinization of prosobranch snails and their different sensitivities to various organotin compounds. It seems clear that TBT exposure results in an increase of endogenous testosterone titers and Bettin, *et al.*, have found evidence for a competitive inhibition of the cytochrome P450-dependent aromatase. Feral and Le Gall reported that TBT inhibited the release of a neuroendocrine factor from the pleural ganglia, which was responsible for the suppression of penis formation in females, resulting in the development of imposex in TBT-exposed female *Ocenebra erinacea*, although the factor had not been identified.

In recent years, imposex in prosobranch gastropods has received much attention in Asia, too. A series of investigations have been made in Korean, Japan, Singapore, India, Malaysia and Indonesia. Several species are used as biomarkers and different indices are adopted even in the same species. Up to now, except in Taiwan and Hong Kong, no complete studies, such as, the effects of organotins on gastropods or field survey on the imposex in gastropods have been reported in mainland of China yet, let alone regulation. However, the average concentrations of tributyltin has reached 151 ng Sn/L in southeast China coastal waters, which was much higher than the highest limitation that most countries made. The concentration of tributyltins in sediments of Pearl River Delta ranges from 20 to 380 ng Sn/g (dry weight). Since the beginning of 2000, we have conducted a preliminary investigation on imposex in Southeast China and imposex was found to occur at least in *Thais luteostoma*, *T. clavigera*, *T. gradata*, *T. mutabilis*, *T. kippocastanum*, *Tonna learium*, *Babylinia lutosa*, *Nassarius siquing oreensis* and *Canthrus cecille*. The frequency of imposex in *T. clavigera* reached 100% in Haikou, Beihai, Shenzhen, Huizhou, Shantou and Zhanjiang harbor, more than 90% in Xiamen harbor. Most individual *T. clavigera* in Haikou, Zhanjing, Shenzhen and Huizhou were sterilized. Obviously, the coast of China has already been polluted for some time. With the development of economy and the increase of trade in China, marine traffic will be more frequent and the organotin contamination will be a more serious problem. So, it is urgent to conduct a further survey for the extent of imposex in marine gastropod caused by organotin contamination in Southeast China coastal waters so that a scientific basis and technical means can be provided for Chinese legislation and policy related to organotin compounds.

Key words: tributyltin (TBT); marine gastropod; imposex

文章编号:1000-0933(2001)10-1711-07 中图分类号:X145,X55 文献标识码:A

目前,有机锡化合物(Organotin compounds)广泛应用于工业、农业、交通和卫生等部门^[1]。其中,三丁基锡(tributyltin, TBT)由于对多种海洋污损生物具有长期有效的杀生效果,被大量用作船体涂层添加剂,以防止附着生物在船壳上的附着和生长,被称为海洋杀生剂^[2]。包括三丁基锡在内的有机锡防附着涂料自从 20 世纪 60 年代进入市场,就因良好的防污效果而倍受市场青睐。以致 80 年代中期以来,相继在世界各地的海水、底泥和生物中都发现了有机锡化合物的存在^[3]。

有机锡在防污的同时,也会对许多非目标生物造成毒害,并且被认为是迄今为止人为引入海洋环境中毒性最大的物质之一^[4]。有机锡对海洋生态系统会造成严重的影响,甚至造成不可逆转的破坏。研究表明,有机锡能干扰牡蛎的钙代谢,使其贝壳畸形加厚,含肉量下降,从而降低或丧失牡蛎的市场价值,这最终导致法国阿卡琼海湾(Arcachon Bay)的牡蛎养殖业一度陷入瘫痪,幼贻和成体都大幅度减产。在1977~1983年,当地的直接经济损失共达8.8亿法郎^[5]。同时有机锡还能导致海产腹足类雌性个体产生雄性的特征,也就是所谓的性畸变(Imposex)^[6],严重时导致雌性个体生殖失败。有机锡还可以蓄积在鱼、贝等生物体内,对人类健康产生不良影响^[7]。

1974年联合国海洋污染防治公约就已将有机锡列入必须控制的灰名单,1976年莱茵河公约又把5种毒性特别大的有机锡化合物列入严格要求限制的黑名单^[1]。1990年,海洋环境保护委员会(国际海洋组织的下属机构)第30届会议又通过第46号提案,建议“政府在管辖区内采取有效措施控制防污漆中三丁基锡对海洋环境的影响”^[8]。其后又提供了多份有机锡污染的调查报告和有关限制提议。各国因此纷纷开展了海水、底泥和海洋生物中有机锡化合物含量的调查,并且制定出相应的政策和环境保护法,禁止或限制有机锡化合物的生产、进口和使用^[8~10]。

在有机锡污染的生物毒性调查、法规制定以及禁令和法规效果评估等方面,海洋底栖软体生物一直是一类重要而有效的指示生物。特别是海产腹足类的性畸变现象在许多国家已被作为有机锡污染监测的一种简便而准确的判断工具。从1970年发现海产腹足类性畸变至今,有关海产腹足类性畸变发生的原因和形态变化、利用性畸变现象对有机锡污染进行监测和性畸变生态毒理学等方面的研究已取得了重大的进展。然而,我国除香港和台湾进行过这方面的研究之外,大陆至今尚无有关海产腹足类性畸变的研究报告,更谈不上限制生产和使用某些有机锡产品的相关法规^[11,12]。

1 性畸变现象

海产腹足类性畸变的形态表现因种而异,绝大多数种表现为Imposex现象,近年来又发现少数性畸变种表现为Intersex(间性)现象,而且其畸形程度与有机锡污染程度直接相关。因此,从开始研究海产腹足类性畸变起,其畸形程度的划分就同有机锡污染程度的评估紧密地联系在一起。

1.1 Imposex

Blaber于1970年首次在狗岩螺(*Nucella lapillus*)中发现海产腹足类的性畸变现象,也就是雌性个体中发育出不正常的雄性特征,包括阴茎和输精管的形成,严重时会导致输卵管的堵塞,阻碍受精的完成和卵囊的释放,使雌性成体不育,种群退化,甚至区域性绝种^[6,13]。Imposex一词最初于1971年由Smith引入,用以描述上述的性畸变现象^[14]。

20世纪80年代初陆续证实了英国西南海岸狗岩螺和其它一些海产腹足类普遍存在着性畸变现象。随后,大量实验证明海产腹足类性畸变同有机锡污染有关,尤以三丁基锡的影响最为显著^[15~17]。狗岩螺在三丁基锡浓度不到1 ng Sn/L的情况下就会产生性畸变^[18]。由于海产腹足类性畸变的易认性、不可逆性以及对有机锡反应的特殊性使之成为海洋有机锡污染的一种有效指标,而狗岩螺的高敏性和广布性使之成为一种理想的指示种^[19]。

Smith等人认为雌体阴茎的发达程度是一种易评估的指标,并且可能是最敏感的^[16]。后来英国西南海岸海产腹足类的性畸变到了几乎所有雌体都产生阴茎的严重程度,然而只根据阴茎的有无和发达程度却无法判断雌体是否有生殖能力。因为生殖能力的丧失是由输精管的形成,并最终导致输卵管阻塞所引起的,与阴茎有无没有直接关系。因此,要评估有机锡污染对海产腹足类种群影响的大小,必须对畸变的程度进行划分,并综合判断才是有效的。

Gibbs首次将海产腹足类性畸变划分为几个不同的发展阶段,并提出了用量化的方法来评估种群受影响的程度^[19]。他提出的一个指数称为RPS(Relative penis size),用于描述性畸变雌体在右触角(相当于雄性阴茎的位置)稍后处产生的阴茎大小,即雌体阴茎平均长度的立方与雄性阴茎平均长度的立方的百分比,并以此表示有机锡影响的程度。Gibbs引入的另一个指数称为VDS(Vas deferens sequences),用来表示在性畸变雌体的生殖乳突上长出的输精管的发展阶段。这种输精管往往先于阴茎而形成,严重时

会导致输卵管的堵塞。因此,在有机锡污染对种群生存能力影响的评估上,VDS 指数比 RPS 更为明确和有说服力。

Gibbs 提出的 VDS 包括 6 个阶段,具体划分如下^[19]:

- S₀ 正常,无雄性特征,生殖孔开放或位于生殖乳突中央,生殖乳突嵌入外套膜中。
- S₁ 外套膜腹面上皮朝生殖乳突内折,开始形成输精管前端。
- S₂ 在右触角稍后开始形成阴茎的边缘,输精管前端继续延伸。
- S₃ 小阴茎形成,同时从其基部开始形成输精管的另一端。
- S₄ 输精管的两端开始交汇,阴茎增大至与雄性的相似。
- S₅ 输精管增长超过生殖乳突,导致生殖孔异位、萎缩或消失,生殖外口受阻;泡状输精管支管在乳突周围出现,且常形成增生状。
- S₆ 生殖腔中包含有无法排出体外的败育卵囊,它们聚积在一起形成半透明、淡色的,甚至灰褐色的团状物。

通过检测雌体阴茎和输精管的发育程度,可以确定个体性畸变的程度,然后取性畸变个体 VDS 的平均数得到某一海区的种群平均 VDS 值。如果种群 VDS 的值大于 4,说明已含有不育的雌体,种群生存能力开始受到影响。

1.2 Intersex

有机锡污染还能使海产腹足类产生间性现象。Bauer 在研究滨螺(*Littorina littorea*)时发现,由于受有机锡污染的影响,滨螺雌体的生殖道发育受到干扰,甚至转化成具雄性化特征的结构,程度严重可导致生育失败^[20]。Bauer 将其称为间性,并根据其发达程度分为 4 个阶段:

- S₀ 正常个体,整个生殖道是一条封闭的管。
- S₁ 交配囊从腹面裂开,露出内裂片,因此,精子有可能溢到外套膜中而影响交配的成功率。
- S₂ 整个生殖道腹面裂开,这种开放的结构具有雄性特征,因为雄性的前列腺也是开放的。
- S₃ 生殖道的远端部分被前列腺所取代;在有些种类,开放的前列腺边缘融合为封闭的管,形成了一个更为雄性化的结构。
- S₄ 在 S₃ 的基础上形成一个有开放沟的阴茎。

从海产腹足类的这种性畸变发展过程可以看到,处于 S₁ 阶段的雌性成体会因交配过程中精子的流失而导致繁殖成功率下降;处于 S₂~S₄ 阶段的雌性成体则由于输精、受精过程无法完成而导致不育。但是,由于滨螺能产生浮游的缘膜或面盘幼体,幼体可以通过从轻污染区迁入得到补充,而狗岩螺的发育不经过此阶段,因此,海区滨螺种群数量会减少但不会绝迹,也不会朝雄性个体数量占优势的方向发展。

Bauer 用 ISI(intersex index)即雌性个体性畸变指数之和除以雌体总数作为滨螺性畸变程度的指数。如果 ISI 等于 0,表示所有个体都正常;大于 0 则表示受影响,将导致种群生殖能力下降。等于 1 表示绝大多数雌体刚刚开始形成输精管前端,大于 2 表明绝大多数雌体不育^[20]。

2 有机锡污染监测

由于有机锡的化学分析程序繁琐、费用昂贵,并且实测数据受干扰较大,极微量时还不易测出^[21]。生物监测则简便易行,更重要的是它直接反映了生态系统受影响的程度和有机锡污染的历史背景与积累。研究表明,海产腹足类性畸变程度与有机锡污染具有比较良好的量值关系,因而建立有机锡污染生物监测体系是海产腹足类性畸变研究的一个重要目的^[19]。

2.1 Imposex 体系

Gibbs 在 1987 年用 VDS 和 RPS 指数对狗岩螺性畸变程度的划分,形成了第一个较完整的有机锡生物监测体系^[19]。狗岩螺具有分布广、易识别、活动范围小和对有机锡高敏感的特点,以它作为有机锡污染的监测指示种已经得到广泛应用^[15,16,18]。

此后的研究数据相继发现了一些新的敏感种和易于辨认的性畸变特征^[22~23]。科学家们还发现海产腹足类发生 Imposex 的方式也有所不同,主要表现在阴茎和输精管出现的先后以及输精管发育过程上的

区别。Schulte-Oehlmann 将泥螺(*Hydrobia ulvae*)的性畸变分为 $S_{0\sim 4}$, 其中 $S_{1\sim 3}$ 又有两种不同的发展形式 a 和 b, a 表示先出现阴茎突起, 而 b 则先产生输精管^[24]。虽然目前仍广泛使用 RPS 和 VDS 作为评估指标, 但也有学者采用不同指标用以描述一些区域性种类的性畸变程度。如 Horiguchi 在疣荔枝螺(*Thais clavigera*)和瘤荔枝螺(*T. bronni*)上运用阴茎长度同壳高的比^[25], Tan 在蛎敌荔枝螺(*T. gradata*)中用阴茎的长、面积和重量作为指标^[26]。

2.2 Intersex 体系

自从 Bauer 发现滨螺的性畸变现象后, 学者们在法国、爱尔兰和德国进行了滨螺和狗岩螺性畸变的对比调查研究^[20]。结果表明, 在 TBT 超过 2.0 ng Sn/L 的环境中, 狗岩螺的 VDS 指数超过 4, 且种群开始受到雌体不育的威胁, 而滨螺的 ISI 值才开始大于 0。如果滨螺的 ISI 值达到 0.5 或更高, 所有狗岩螺的雌体不育, 种群面临绝灭。在整个调查中, 没有发现当滨螺的 ISI 指数超过 1 时仍有狗岩螺存在。

狗岩螺对有机锡的高敏感性使其更适用于污染相对较轻的海域, 而滨螺由于对有机锡污染的高耐性, 甚至能在狗岩螺绝迹的区域存在, 因而滨螺在有机锡重污区是一种很好的监测生物, 并且开始得到运用^[20, 27]。

3 生态毒理学研究

目前有机锡引起海产腹足类发生性畸变的毒理实验分野外和室内两种, 野外实验是把非污染区内没有发生性畸变的个体和污染区内发生性畸变的个体做上标记后互相转移, 然后取样观察和分析; 室内实验大多在具循环水系统的玻璃水箱中放入没有受污染的海产腹足类, 在水箱中插入涂有有机锡的棒, 用调节棒的没入深度来控制水中的有机锡含量, 或从腹足部注射不同浓度和类型的有机锡溶液, 观察和分析有机锡对腹足类的影响。

3.1 不同类型的有机锡化合物

Bryan 的注射实验表明, 三丁基锡对狗岩螺性畸变的影响最为显著、其次是四丁基锡(Tetrabutyltin TTBT)和三丙基锡(Tri-n-propyltin TPrT), 而三苯基锡(Triphenyltin TPhT)、二丁基锡(Dibutyltin DBT)和一丁基锡(Monobutyltin MBT)不能引起狗岩螺性畸变^[17]。Horiguchi 用三丁基锡、二丁基锡、一丁基锡、三苯基锡、二苯基锡(Diphenyltin DPhT)和一苯基锡(Monophenyltin MPhT)对疣荔枝螺进行注射实验, 三丁基锡和三苯基锡对引起性畸变有显著作用, 而其它有机锡化合物则没有或作用不明显^[23]。

3.2 不同的海产腹足类

并不是所有海产腹足类都会发生性畸变, 目前已发现共有 120 多种存在性畸变现象^[28], 其中新腹足类(Neogastropod)有 50 多种, 这一方面是由于该类种的敏感性, 另一方面是由于调查取样的易获性。在发生性畸变的海产腹足类中, 不同种类的腹足类的敏感度和畸变反应不尽相同。Gibbs^[22]根据种群的敏感性和雌体雄性化水平的不同, 把海产腹足类分为四类, 也就是某一种群中, 发生性畸变的雌体最终主要或只能发展到某一雄性化的水平(表 1)。

表 1 一些典型种的雄性化水平
Table 1 The masculinisation level of some typical species

L0	L1	L2	L3
无任何雄性化特征 No masculinisation	形成阴茎和输精管 Penis and vas deferens developed	输卵管受干扰, 不育 Oviduct function disrupted	雌生殖器被雄生殖器代替 Ovary-testis transformation
<i>Amphissa columbiana</i>	<i>Buccinum undatum</i>	<i>Neptunea phoenicia</i>	<i>Ocinebrina aciulata</i>
<i>Columbella rustica</i>	<i>Nassarius reticulatus</i>	<i>Haustrum haustorium</i>	<i>Ocenebra erinacea</i>
<i>Cominella glandiformis</i>	<i>Ilyanassa obsoleta</i>	<i>Hexaplex trunculus</i>	<i>Lepsiella scobina</i>
	<i>Searlesia dira</i>	<i>Nucella lima</i>	<i>Nucella lapillus</i>
	<i>Colus halli</i>	<i>Nucella lamellosa</i>	
	<i>Ocenebra lurida</i>	<i>Thais clavigera</i>	
		<i>Urosalpinx cinerea</i>	

即使同一个种,在不同生长阶段对 TBT 的敏感度差异也很大。Bryan^[18]的野外实验表明,狗岩螺成体在三丁基锡浓度为 107 ng Sn/L 的环境中 12 个月后发生性畸变,在 28 ng Sn/L 中至少需要 18 个月,而处于成长期的个体只要 1~2 ng Sn/L 就会发生性畸变,3~5 ng Sn/L 时就会导致不育^[4]。

3.3 机理研究

有机锡在极低的浓度下能对海产腹足类产生较大影响,原因是由于底泥对有机锡化合物的高吸附性、海产腹足类在低浓度下对有机锡的高富积性和有机锡化合物的高毒性。有机锡化合物进入水体后,能迅速且大量地被底泥吸附。海水中的有机锡由于生物降解、化学降解和光降解等作用,其半衰期一般为几个星期,然而当有机锡与悬浮颗粒物结合而转移到海底沉积物后就变得相当稳定,半衰期可延长至几个月甚至几年之久。因此,营底栖生活的海产腹足类不得不长期生活在有机锡污染的环境中。有机锡化合物通过食物链在海产腹足类富积,如在 1.5~18.7 ng Sn/L 的 TBT 中,狗岩螺的富积系数在 4~8 个月内达到 10^5 ,这也是肉食性的骨螺科(Muricidae)发生性畸变的种类比例较高的一个原因^[18]。

由于有机锡化合物能引起海产腹足类产生性畸变,因此它属于内分泌扰乱物质(Endocrine Disrupting Chemicals EDC),二噁英也是其中之一。Spooner 等人将雌性狗岩螺幼体放入三丁基锡浓度为 40 ng Sn/L 的海水中,结果阴茎较对照组增长,在实验 28d 后发现,类固醇中睾酮水平明显上升。用睾酮直接注入没有受三丁基锡污染的雌螺,发现产生了同三丁基锡污染一样的效果。这表明,三丁基锡是通过增加螺体内的睾酮水平来诱导性畸变发生的。他们还推测,三丁基锡能抑制负责将睾酮转化为雌二醇的芳香化酶的活性^[29]。

4 性畸变研究面临的问题

用海产腹足类性畸变进行有机锡污染监测是十分成功的,但仍有许多方面有待深入的研究和改进。

(1) 目前的研究较多侧重于性畸变的调查和生物监测体系的建立,而对性畸变的机理研究不足。

(2) 在调查中对指示种和易获种研究较多,而对其它种研究不多。有些深水种受有机锡污染或许会更严重,但由于不易采集而被忽视。

(3) 种的地理分布和性畸变特征表现的差异使目前已经形成的理论或发现的指示种难以直接应用到新的海域或不同历史时期。因此,多种类的监测体系和长期的调查研究是十分必要的。

5 我国的研究概况

世界上许多国家已广泛开展了海产腹足类性畸变的调查和研究。但迄今为至,我国在此领域几乎还是一片空白,甚至连有机锡污染方面的化学监测工作也做得很少。在海产腹足类性畸变研究方面,除香港和台湾以疣荔枝螺为指示种作了一些调查和实验研究以外^[11,12],大陆沿海地区还没有系统的调查或研究报告,更没有相应的生物监测体系或法规出台。

我国拥有宽阔的沿海海域,海洋运输业和渔业都发展较快,沿海地区海水养殖业非常发达^[30],有机锡污染问题的严重程度不容置疑^[21]。江桂斌^[21]对大连、天津、青岛和北海等地港口海区的调查结果表明,有机锡中的三丁基锡浓度范围平均达到 151 ng Sn/L,这一浓度远远高于目前各国制定的三丁基锡限制标准(20 ng Sn/L)^[8~10]。笔者最近的初步调查发现,广东省汕头港内对有机锡敏感的疣荔枝螺已经绝迹,湛江港内的疣荔枝螺也普遍到了不育的程度,福建省厦门港的疣荔枝螺和蛎荔枝螺等性畸变发生率都在 100%。

基于我国沿海有机锡含量较高和海产腹足类性畸变可能普遍存在的事实,以及有机锡曾对一些发达国家的海水养殖业产生严重不良影响的教训^[6],我国已迫切需要尽快开展海产腹足类性畸变的调查和研究工作,为制订有机锡的海水水质标准或渔业水质标准,定期监测有机锡的污染状况,颁布相应的法律法规提供科学依据和技术支持,以保护我国的海洋生态环境及海洋资源的可持续利用。

参考文献

万方数据

[1] 徐小白,等著,典型化学污染物在环境中的变化及生态效应. 北京:科学出版社,1998,99~175.

- [2] 周名江, 李正炎, 颜 天, 等. 海洋环境的有机锡及其对海洋生物的影响. *环境科学进展*, 1994, **2**(4): 67~76.
- [3] Stewart C and de Mora S J. A review of the degradation of Tributyltin in the marine environment. *Environ. Technol.*, 1990, **11**: 565~570.
- [4] Gibbs P E, Pascoe P L, Burt G R, *et al.* Sex change in the female dog-whelk, *Nucella lapillus*, induced by TBT from anti-fouling paints. *J. Mar. Biol. Asso. UK*, 1988, **68**: 715~731.
- [5] Alzieu C, Thibaud Y, Heral M, *et al.* Evaluation des risques dus à l'emploi des peintures antisalissures dans les zones conchilicoles. *Rev. Trav. Inst. Pêches Marit.*, 1980, **44**: 301~348.
- [6] Blaber S J M. The occurrence of a penis-like outgrowth behind the right tentacle in spent females of *Nucella lapillus* (L.). *Proc. Malac. Soc. Lond.*, 1970, **39**: 231~233.
- [7] Iwata H, Tanabe S, Mizuno T, *et al.* High accumulation of toxic butyltins in marine mammals from Japanese coastal waters. *Environ. Sci. Technol.*, 1995, **29**: 2959~2962.
- [8] Gibbs P E and Bryan G W. Reproductive failure in populations of the Dog-whelk, *Nucella lapillus*, caused by imposex induced by tributyltin from antifouling paints. *J. Mar. Biol. Asso. UK*, 1986, **66**: 767~777.
- [9] Evans S M, Leksono T and McKinnell P. Tributyltin pollution: A diminishing problem following legislation limiting the use of TBT-based anti-fouling paints. *Mar. Pollut. Bull.*, 1995, **30**: 14~21.
- [10] Environment Agency of Japan, 1991. *Chemicals in the Environment*. Environmental Health Department, Tokyo. (In Japanese) 9~12.
- [11] Blackmore G. Imposex in *Thais clavigera* (Neogastropoda) as an indicator of TBT (Tributyltin) bioavailability in coastal waters of Hong Kong. *J. Moll. Stud.*, 2000, **66**: 1~8.
- [12] Li-Lian Liu and Iu-Juan Suen. Organotins promoting the development of imposex in the oyster drill *Thais clavigera*. *J. Fish. Soc. Taiwan*, 1996, **23**(2): 149~154.
- [13] Oehlmann J and Bettin C. TBT-induced imposex and the role of steroids in marine snails. *Malacol. Rev. Suppl.*, 1996, **6**: 157~161.
- [14] Smith B S. Sexuality in the American mud-snail, *Nassarius obsoletus*. *Say. Proc. Malc. Soc. Lond.*, 1971, **39**: 377~378.
- [15] Cleary J J. Organotin and total tin in coastal waters of South-west England. *Mar. Pollut. Bull.*, 1985, **16**: 350~355.
- [16] Smith B S. Male characteristics on female mud snails caused by antifouling bottom paints. *J. Appl. Toxicol.*, 1981, **1**: 22~25.
- [17] Bryan G W and Gibbs P E. Comparison of the effectiveness of tributyltin chloride and five other organotin compounds in promoting the development of imposex in the dog-whelk *Nucella lapillus*. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 1988, **68**: 733~744.
- [18] Bryan G W, Gibbs P E, Burt G R, *et al.* The effects of tributyltin accumulation of adult dog-whelks, *Nucella lapillus*; long-term field and laboratory experiments. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 1987, **67**: 524~544.
- [19] Gibbs P E, Bryan G W, Pascoe P L, *et al.* The use of the dog-whelk, *Nucella lapillus*, as an indicator of tributyltin contamination. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 1987, **67**: 507~523.
- [20] Bauer B, Fioroni P, Ide I, *et al.* TBT effects on the female genital system of *Littorina littorea*; a possible indication of tributyltin pollution. *Hydrobiologia*, 1995, **309**: 15~27.
- [21] 江桂斌, 等. 有机锡化合物测定方法研究进展. *海洋环境科学*, 1999, **18**(31): 21~26.
- [22] Gibbs P E, Bebianno M J and Coelho M R. Evidence of the differential sensitivity of Neogastropods to tributyltin pollution with notes on a species (*Columbella rustica*) lacking the imposex response. *Environ. Technol.*, 1997, **18**: 1219~1224.
- [23] Horiguchi T, Shiraishi H M, Shimizu M, *et al.* Effects of triphenyltin chloride and five other organotin compounds on the development of imposex in the rock shell, *Thais clavigera*. *Environ. Pollut.*, 1997, **95**(1): 85~91.
- [24] Schulte-Oehlmann U, Oehlmann J P, Fioroni, *et al.* Imposex and reproductive failure in *Hydrobia ulvae* (Pennant) (Gastropoda, Prosobranchia). *Mar. Biol.*, 1997, **128**: 257~266.
- [25] Horiguchi T, Shiraishi H M, Shimizu M, *et al.* Imposex and organotin compounds in *Thais clavigera* and *Thais bronni* in Japan. *J. Mar. Biol. Assoc. UK*, 1994, **74**: 651~669.
- [26] Tan K S. Imposex in *Thais gradata* and *Chicoreus capinus* (Mollusca, Neogastropoda, Muricidae) from the Straits of Johor: A case study using penis length, area and weight as measures of imposex severity. *Marine Pollution Bulletin*, 1999, **39**(1~12): 295~303.
- [27] Schulte-Oehlmann U, Oehlmann J, Bauer B, *et al.* Toxicokinetic and -dynamic aspects of TBT-induced imposex in *Hydrobia ulvae* compared with intersex in *Littorina littorea*. *Hydrobiologia*, 1998, **378**: 215~225.
- [28] Oehlmann J, Stroben E, Schulte-Oehlmann U, *et al.* Tributyltin biomonitoring using prosobranchs as sentinel organisms. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*, 1996, **354**: 540~545.
- [29] Spooner N G, Gibbs P E, Bryan G W, *et al.* The effect of tributyltin upon steroid titres in the female dogwhelk, *Nucella lapillus*, and the development of imposex. *Marine Environmental Research*, 1991, **32**: 37~49.

[30] 朱宝馨, 海洋生物资源的开发及保护. 中国渔业经济研究, 1998, 5: 22~28.

