

# 三丁基锡对我国水环境的污染状况及 对饮用水安全的威胁

田峰, 隋铭皓, 张可佳, 姚娟娟

(同济大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 综述三丁基锡的物化性质、它对水生生物和人类的毒性、工农业上的生产使用与限制、以及近年来我国水环境中的污染状况, 尤其对尚未受到重视的饮用水安全的威胁问题进行了论述。

**关键词:** 三丁基锡; 污染; 水环境; 饮用水; 安全

中图分类号: X52

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2010)02-0007-05

## Tributyltin pollution in China's water environment and its threat to drinking water safety

TIAN Feng, SUI Ming-hao, ZHANG Ke-jia, YAO Juan-juan

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The physical and chemical features of tributyltin (TBT), its toxicity to human and aquatic organisms, the industrial production, uses, and restrictive rules are introduced in this paper. The TBT pollution in China's water environment in recent years, especially its threat to safety of drinking water, which is gotten not much attention yet, are discussed too.

**Key words:** tributyltin; pollution; water environment; drinking water; safety

20世纪60年代以来,有机锡类化合物在工农业中广泛应用,其中主要作为船舶涂料使用的三丁基锡(tributyltin, TBT),因其巨大毒性而备受关注。70年代,人们发现了TBT的生物毒性,各国政府逐渐加强对TBT使用的限制。至今已有大量关于海水中TBT污染状况的调查研究。而作为饮用水水源的通航河流中,同样可能存在TBT污染,它对饮用水安全的威胁至今鲜有关注。

## 1 三丁基锡的物化性质与毒性

### 1.1 三丁基锡的物化性质

TBT是有机锡化合物的一种,其通式为 $(n - C_4H_9)_3Sn - X$ ,其中X代表一个通过杂原子共价键与锡相连的原子或基团,它可以是无机或有机酸根、氧或卤族元素等。TBT的物化性质在很大程度上由X的特性决定,尤其是水中或非极性溶剂中的溶解度和饱和蒸气压<sup>[1]</sup>。在纯水中,TBT会发生电离,产生 $Bu_3Sn^+$ 离子,类似于一元弱酸,其在水中的电离常数为 $pK_a = 6.25$ <sup>[2]</sup>。TBT在20℃的黑暗环境中稳定不挥发,但在光照下会逐步脱丁基转化为二丁基锡

(DBT)、单丁基锡(DBT),最终变成无机锡,半衰期长达89天以上<sup>[3]</sup>。

### 1.2 三丁基锡的毒性

从20世纪70年代到现在,国内外已经有大量研究证明了TBT对生物的生存、生长、发育、繁殖存在不良影响<sup>[4]</sup>,TBT是迄今为止人类投入海洋中最毒的物质之一<sup>[5]</sup>。TBT对海洋鱼类、甲壳类动物、软体动物和海洋藻类等的影响非常大,通过生物富集作用,TBT在痕量质量浓度(ng/L)下就可以产生急慢性毒性。很多生物的TBT致死浓度极低,在0.1~200 ng/mL<sup>[6]</sup>。TBT可导致牡蛎的生长抑制和壳空腔化、腹足动物的组织异常等不良生物反应<sup>[6]</sup>。1970年,Blaber首先发现TBT污染水域内存在软体动物性畸变的现象<sup>[7]</sup>。TBT作为一种内分泌干扰物,它引起的软体动物生殖逆向性变化与群体减少问题受到重大的关注。另外,关于TBT对哺乳动物或人类毒性的研究表明:TBT可以诱导P12神经细胞的调亡,可造成其不可逆损伤<sup>[8]</sup>;丁基锡能够明显抑制淋巴细胞的抗肿瘤作用<sup>[9]</sup>;较低浓度的TBT即可对人体生殖系统产生毒性,导致流产及胎儿畸形<sup>[10]</sup>,促进前列腺癌细胞增生<sup>[11]</sup>。

收稿日期:2009-09-28

基金项目:上海市自然科学基金资助项目(07ZR14116);上海市启明星计划资助项目(08QA14067);国家自然科学基金资助项目(50708067);全国优秀博士论文资助项目(2007B48)

作者简介:田峰(1985-),男,在读研究生,研究方向为原水中微量有机物去除技术;隋铭皓(1974-),女,博士,副教授,主要从事给水深度处理技术与理论研究,minghaosui@gmail.com。

## 2 国内外三丁基锡的生产、使用及限制

### 2.1 TBT 的生产和使用

TBT 是生物杀灭剂中的主要成分,可以控制多种生物的生长。它可用于木材防腐、船舶防腐剂涂料和纺织品抗菌以及工业水系统,如冷却塔、制冷水系统中抗真菌<sup>[12-14]</sup>。MBT 和 DBT 主要用于 PVC 材料的抗光和抗热稳定剂,DBT 也用作水溶清漆的粘结剂。广泛的应用使有机锡成为产量最大的化工原料之一。有机锡化合物的生产始于 1945 年,当时产量约为 500 t。1985 年,世界有机锡化合物产量约为每年 4 万 t,目前有机锡的年消费量达 5 万 t。我国有机锡的年生产量及消耗量也在迅速增加,北京某化学公司在 2002 年有机锡稳定剂年生产规模扩增至 3 500 t,其中丁基锡为 1 500 t。

### 2.2 国内外对 TBT 使用的限制

当认识到 TBT 的毒性后,各国政府采取了积极的控制措施。1976 年的莱茵公约把 5 种毒性特别大的有机锡列入严管的灰名单。20 世纪 80 年代中期,很多国家开始禁止在小型船舶上使用 TBT。在 1982 年法国率先在短于 25 m 的船舶上禁止使用有机锡防污涂料。在 1988 年之后,北美、英国、澳大利亚、新西兰、荷兰、丹麦、瑞士、日本和中国香港等国家和地区颁布类似的法规。世界海洋组织(IMO)通

过了《控制有害船底防污系统的公约》(Convention on the Control of Harmful anti-fouling Systems),要求从 2003 年 1 月 1 日起不再允许船舶使用含有机锡化合物的防污漆,从 2008 年 1 月 1 日起彻底禁止。欧盟、美国、西班牙等规定污水排放中 TBT 浓度的标准,美国还对工作场所的接触浓度做出规定。尽管已经有很多法规对三丁基锡的使用进行了限制,但三丁基锡还会在一定的时间内残留于水体中。

目前,我国只有香港地区对 TBT 在船只上使用进行管理和限制,大陆各种法律还没有对其使用进行限制,更没有任何行业标准规定三丁基锡的容许排放浓度。中国作为 IMO 的 A 类理事国,应尽快采取措施限制 TBT 的使用,防止 TBT 对水环境的进一步污染。

## 3 三丁基锡对我国水环境污染状况及对饮用水安全的威胁

国内外已有大量对水环境中 TBT 污染情况的调查研究。结果表明 TBT 在世界范围,包括我国在内的水体中存在严重污染。我国部分地区海水、淡水及底泥中 TBT 污染情况列于表 1、表 2 中。虽然调查时间基本上在 2000 年左右,但考虑到我国至今未采取任何 TBT 使用的限制措施,这些数据仍具有一定的代表性。

表 1 中国一些地区海水及淡水中 TBT 及其降解产物污染情况

编号	地点	时间	样品基质	MBT 质量浓度/ ng·L <sup>-1</sup> (干质量)	DBT 质量浓度/ ng·L <sup>-1</sup> (干质量)	TBT 质量浓度/ ng·L <sup>-1</sup> (干质量)	参考文献
1	青岛码头	1998.11.30	海水	—	5.0 ± 0.7	49.4 ± 3.4	[15]
2	天津第一航海站	1998.11.18	海水	—	60.3 ± 3.0	31.8 ± 1.8	[15]
3	天津船厂	1998.11.18	海水	243.3 ± 34.0	48.6 ± 3.9	322.4 ± 1.8	[15]
4	青岛北海船厂	1998.11.30	海水	—	24.0 ± 0.9	976.9 ± 30.0	[15]
5	大连新船厂 2	1998.12.08	海水	883.8 ± 56.5	185.5 ± 11.6	203.7 ± 23.0	[15]
6	东海连云港	1999.02.23	海水	106.0 ± 3.9	—	—	[15]
7	烟台黄海娱乐城	1999.08.24	海水	70.4 ± 5.9	—	28.0 ± 2.0	[15]
8	烟台夹河口西	1999.08.24	海水	54.4 ± 1.5	1.18 ± 0.01	—	[15]
9	烟台水产酒店	1999.08.25	海水	—	3.3 ± 0.2	1.2 ± 0.1	[15]
10	烟台冷库厂的喂养水域	1999.08.26	海水	—	5.42 ± 0.34	3.72 ± 0.24	[15]
11	秦皇岛煤炭港	1999.04.23	海水	77.9 ± 5.0	15.4 ± 0.7	—	[15]
12	烟台黄庄	1999.08.25	海水	—	2.44 ± 0.15	—	[15]
13	天津黄海船厂	1999.11.18	海水	34.1 ± 4.4	10.2 ± 0.8	17.2 ± 1.1	[15]
14	汕头港	2001.12	海水	17.2 ~ 183.2 <sup>①</sup>	—	nd ~ 2.8 <sup>①</sup>	[16]
15	汕头港	2002.08	海水	28.0 ~ 916.3 <sup>①</sup>	nd ~ 0.4 <sup>①</sup>	nd ~ 2.0 <sup>①</sup>	[16]
16	厦门港	2002.05	海水	62.4 ~ 1127.4 <sup>①</sup>	—	0.50 ~ 0.9 <sup>①</sup>	[16]
17	惠阳港	2002.03	海水	249.7 ~ 9765.1 <sup>①</sup>	—	1.0 ~ 1.8	[16]
18	渤海湾	2002 年夏	海水	—	7.07 ~ 64.84	nd ~ 9.07	[17]
19	广西北海	1998.12.08	淡水	125.2 ± 16.4	—	14.8 ± 1.5	[15]

续表

编号	地点	时间	样品基质	MBT 质量浓度/ ng·L <sup>-1</sup> (干质量)	DBT 质量浓度/ ng·L <sup>-1</sup> (干质量)	TBT 质量浓度/ ng·L <sup>-1</sup> (干质量)	参考文献
20	长江·江阴韭菜度	1999.02.17	淡水	132.3 ± 3.1	—	10.0 ± 0.8	[15]
21	杭州西湖旅游码头岳王段	1999.05.19	淡水	39.3 ± 3.0	7.2 ± 0.2	3.7 ± 0.1	[15]
22	钱塘江·杭州南星桥旅客交通港	1999.05.20	淡水	55.2 ± 4.1	2.1 ± 0.3	—	[15]
23	钱塘江·杭州三堡港	1999.05.20	淡水	—	2.3 ± 0.2	0.6 ± 0.06	[15]
24	黄浦江·上海游轮码头	1999.05.22	淡水	—	8.1 ± 0.6	10.6 ± 0.4	[15]
25	白洋淀	1999.08.08	淡水	202.9 ± 30.2	—	6.2 ± 0.4	[15]
26	云南滇池	1999.09.20	淡水	312.5 ± 9.0	95.2 ± 3.4	37.6 ± 2.4	[15]
27	黄河·花园口	1999.10.07	淡水	—	3.1 ± 0.3	—	[15]
28	黄浦江·上海复兴东路渡轮码头	1999.10.16	淡水	49.5 ± 1.5	8.5 ± 0.4	425.3 ± 9.0	[15]
29	长江·三峡港	1999.10.20	淡水	85.7 ± 4.7	1.5 ± 0.6	0.8 ± 0.02	[15]
30	杭州西湖	1999.10.20	淡水	82.8 ± 7.0	—	—	[15]
31	北京畅春园湖	1999.12.30	淡水	64.8 ± 6.6	—	—	[15]
32	北京福海湖	1999.12.30	淡水	—	4.96 ± 0.01	—	[15]
33	北京官厅水库	2000 年秋	淡水	37 ~ 243 <sup>①</sup>	2 ~ 3 <sup>①</sup>	—	[18]
34	北京永定新河	2002 年夏	淡水	—	33.48 ~ 46.16	—	[18]
35	三峡香溪河	2003.01	淡水	66.4	416.8	—	[19]
36	三峡晒网坝	2003.01	淡水	—	—	68.9	[19]
37	三峡望龙门	2003.01	淡水	79.1	71.8	—	[19]
38	太湖	2006.04	淡水	nd ~ 13.2 <sup>①</sup>	—	—	[20]

注:①其单位为 ng·L<sup>-1</sup>。

表 2 中国一些地区的底泥中 TBT 及其降解产物的浓度

编号	地点	时间	样品基质	MBT 质量浓度/ ng·g <sup>-1</sup> (干质量)	DBT 质量浓度/ ng·g <sup>-1</sup> (干质量)	TBT 质量浓度/ ng·g <sup>-1</sup> (干质量)	参考文献
1	北京圆明园富海	2001 发表	淡水底泥	19.7	—	0.46 <sup>①</sup>	[21]
2	太湖	2006.04 发表	淡水底泥	nd ~ 0.95 <sup>②</sup>	nd ~ 0.15 <sup>②</sup>	— <sup>②</sup>	[20]
3	闽江入海口,近岸	1996	入海口底泥	nd ~ 0.12 <sup>①</sup>	—	nd ~ 0.01 <sup>①</sup>	[22]
4	闽江入海口,远岸	1996	入海口底泥	0.03 <sup>①</sup>	0.03 <sup>①</sup>	0.02 <sup>①</sup>	[22]
5	珠江入海口	1996	入海口底泥	0.09 <sup>①</sup>	0.04 <sup>①</sup>	—	[22]
6	九龙江入海口,主河道 1	1996.05	入海口底泥	0.07 <sup>①</sup>	—	—	[22]
7	九龙江入海口,主河道 2	1999.06	入海口底泥	0.02 <sup>①</sup> ~ 0.73	0.06 <sup>①</sup> ~ 1.01	0.16 <sup>①</sup> ~ 2.57	[22]
8	九龙江入海口,厦门港	1999.06	入海口底泥	0.52 ~ 1.76	0.57 ~ 6.99	0.94 ~ 24.03	[22]
9	香港	1988—1989	海水底泥	—	—	nd ~ 1160 <sup>②</sup>	[23]
10	维多利亚港,香港	1994	海水底泥	12.62	1.53	0.91	[23]
11	清水湾,香港	1996	海水底泥	—	nd ~ 0.06 <sup>①</sup>	nd ~ 0.10 <sup>①</sup>	[22]
12	汕头港	2001.12	海水底泥	5.4 ~ 34.4	nd ~ 3.4	1.4 ~ 14.7	[16]
13	惠阳港	2002.03	海水底泥	34.0 ~ 103.2	nd ~ 0.4	2.8 ~ 10.2	[16]
14	厦门港	2002.05	海水底泥	4.8 ~ 39.2	—	6.9 ~ 174.7	[16]
15	汕头港	2002.08	海水底泥	4.8 ~ 20.9	—	0.3 ~ 5.4	[16]

注:①低于检测限;②表示的浓度不一定以干质量计。

从表 1 可以看出,目前我国海水遭到了严重的 TBT 污染。海水中污染水平从 < 0.5 ng/L 到 976.9 ng/L,污染比较严重的都集中在较大的港口、码头、船厂附近,如大连新船厂(203.7 ± 23.0 ng/L)<sup>[15]</sup>、天津船厂(322.4 ± 1.8 ng/L)<sup>[15]</sup>,其中青岛北海船厂的污染程度最高,达到 976.9 ± 30.0 ng/L<sup>[15]</sup>,远远超过

很多鱼类幼体和软体生物的致死浓度[如达到大鲍鱼幼体 *giant abalone larvae* 的 48 h LC<sub>50</sub> (437.6 ng/L)<sup>[24]</sup> 的 2 倍以上]。渤海湾的汕头港、厦门港和惠阳港, TBT 污染水平相对较低,而 MBT 的平均质量浓度也达到了 338.10、372.3、3 286.8 ng/L<sup>[16]</sup>,这应该来自于 TBT 的降解,说明这 2 个港口曾经存在

很严重的 TBT 污染。

相对于海水 TBT 污染调查,对淡水中 TBT 污染的研究较少。淡水中检测出 TBT 质量浓度从  $<0.5$  ng/L 到  $425.3 \pm 9.0$  ng/L。其中最高质量浓度水平样品取自上海复兴东路渡轮码头处黄浦江水 ( $425.3 \pm 9.0$  ng/L)<sup>[15]</sup>,这一浓度也超过了多种生物的急性毒性阈值。长江流域的三峡水库水体中也有显著的丁基锡污染:三峡水库水样中 MBT、DBT 和 TBT 的平均质量浓度分别为 12.1、40.7、8.5 ng/L<sup>[17]</sup>,其中望龙门和香溪河 2 个检测点的 MBT、DBT 浓度很高,但 TBT 基本未检出;而筛网坝和大溪沟却表现出 TBT 浓度较高,DBT、MBT 浓度较低的情况<sup>[17]</sup>。调查者认为前者可能主要因为 DBT、MBT 直接排入,如工业废水排入,农药使用;后者则是由频繁的船舶活动,船体涂料溶出引起的。西湖、钱塘江的污染情况相对较轻。太湖中基本未检出 TBT 或 DBT,只有微量的 MBT,这和太湖航运活动不多有关。值得重视的是北京市重要的水源地之一的官厅水库及其下游的永定河,受到严重的丁基锡、甲基锡的污染,其单甲基锡(MMT)、二甲基锡(DMT)和三甲基锡(TMT)污染的平均质量浓度分别达到了 259、239 ng/L 和 259 ng/L<sup>[18]</sup>,成为当地居民饮用水安全的重大隐患。

关于饮用水中 TBT 污染状况调查还鲜有报道。Nikolaou 等对希腊的水源地水库 Mornos、Marathonas、Yliki 与 Evinos 进行了为期一年的有机锡污染的研究,2005 年 5 月 Yliki 湖中检出 7 ng/L 的 TBT<sup>[25]</sup>。高俊敏等也对我国北方某水厂中有机锡污染进行过调查,在饮用水原水中同时检测出了 MBT、DBT、TBT 和 MPT 4 种有机锡,质量浓度分别为 111.4、78.8、11.4 ng/L 和 53.2 ng/L<sup>[26]</sup>。水体中 TBT 污染的主要来源是船舶上使用含 TBT 的防污涂料。我国饮用水源取自通航河流的情况众多,河道中 TBT 污染成为了饮用水安全的重大威胁,如上海现在最大水源地,供应全市 80% 饮用水的黄浦江,在松浦大桥取水口附近仍有船舶通航。虽然淡水 TBT 污染水平不及海水,但海水与河水、河道与港口本为同一水系,水流扰动和扩散转质作用会使河道的污染与港口趋于相同,并且海水倒灌更加重了这种情况,这就加大了对入海口附近的水源地威胁。如长江沿岸的陈行水库作为上海第二大水源地,位于长江入海口,存在海水倒灌问题,每年有多次咸潮<sup>[27]</sup>,虽然采取了很多防污措施,但 TBT 及其降解产物不可避免会进入水库。上海未来的水源地青草沙水库位于长江

入海口长兴岛上,附近多船坞、港口,它也会存在与陈行水库相同的问题。

在水环境中,由于 TBT 很容易脱离水相,进入底泥沉淀物中,底泥中富集了高浓度的 TBT 污染。1989 年,在香港西贡的海水养殖场底泥中高达 1 160 ng/g 的 TBT 污染<sup>[23]</sup>,如此高的污染水平与西贡码头频繁航行船只和养殖场内的渔网、木杆上使用的防污涂料有关。1999 年,厦门港的底泥污染水平为 0.94 ~ 24.03 ng/g(干质量)<sup>[22]</sup>;到 2002 年,在厦门港底泥样品检测出高达 174.7 ng/g 的较高污染程度<sup>[16]</sup>,这很可能是由于厦门港船运业迅速发展而导致水体 TBT 污染加剧。汕头和惠阳港也受到一定的污染,其 TBT 平均质量浓度(3.45、6.3 ng/g,干质量)低于厦门港(77.0 ng/g,干质量)<sup>[16]</sup>。与海港相比,对淡水底泥的调查还比较少,但可以推测船舶频繁活动的河流底泥中也应该存在一定浓度程度的 TBT 污染。

底泥中 TBT 降解速度相对于在水相中的降解速度较慢<sup>[28]</sup>,有研究报道底泥中 TBT 的半衰期可长达数年<sup>[29]</sup>。较少因为底泥对 TBT 的吸附是可逆的,受污染的底泥可能成为水体中污染的长期来源<sup>[30]</sup>。底泥沉淀物对 TBT 的吸附与解吸会受 pH 和盐度影响<sup>[31]</sup>。因为 TBT 从底泥上解吸也很容易,任何潮汐、风浪导致污泥的涌起,都会加速 TBT 的释放<sup>[32]</sup>,这使受污染底泥成为饮用水安全长期的潜在威胁。而底泥调查多来自河口、港口,缺少长期连续完善的整条河流的底泥污染分布和全面调查。

总之,我国 TBT 及其降解产物的污染问题,已广泛存在于各种水系,但尚未引起相应的重视,缺乏控制。TBT 对饮用水安全的威胁不容忽视,需要进一步的调查和评估。

#### 4 解决措施与研究展望

在我国的水环境中,存在着广泛严重的 TBT 污染。它不仅威胁着水生生物、水环境生态系统,更重要的是对人类的健康构成了威胁。我国应该尽早采取措施,积极应对威胁,保障人民的安全和健康。

(1) 出台相关法律法规,响应 IMO 公约,禁用 TBT 在船舶防污涂料中的使用;制定相关的使用和排污规范,限制其在各个行业中的使用,规定对含 TBT 及其降解产物污水的处理水平。从源头上消除 TBT 的污染,防止污染的进一步扩大。

(2) 由于底泥中吸附的 TBT 会发生解吸,底泥就成为一个长期的 TBT 的污染源。所以需要

饮用水源地及其相沟通的水体和上游做全面长期的监测,对污染状况和季节性变化做全面评估,对饮用水安全做出适当评价。

(3)研究现有水处理工艺对 TBT 的去除能力,研究 TBT 的去除工艺,保障饮用水的安全。笔者将对上述问题进行深入的研究。

(4)水厂中的污泥吸附了较高浓度的有机物,处理不当可能造成不良后果;而控制了污染源后,水体底泥将成为水中 TBT 污染的直接来源。这就需要研究污泥和底泥中的 TBT 的有效去除方法。

### 参考文献

- [1] Dubey S K, Roy U. Biodegradation of tributyltins (organotins) by marine bacteria[J]. *Appl Organometal Chem*, 2003, 17: 3 - 8.
- [2] Meador J P. Determination of a tissue and sediment threshold for tributyltin to protect prey species of juvenile salmonids listed under the US Endangered Species Act[J]. *Aquat Conservation Mar Freshw Ecosys*, 2002, 12: 539 - 551.
- [3] James M R, Carey C J H, Hale E J. Degradation of the Tri-n-butyltin Species in Water[J]. *Agric Food Chem*, 1983, 31(5): 1060 - 1065.
- [4] Heard C S, Walker W W, Hawkins W E. Aquatic toxicological effects of organotins: An overview[C]//Proceedings of the Organotin Symposium. OCEANS '89 Proceedings Volume 2. Piscataway: The IEEE Service Center, 1989: 554 - 563.
- [5] Hoch M. Organotin compounds in the environment: An overview[J]. *Appl Geochem*, 2001, 16: 719 - 743.
- [6] Meador J P. Predicting the fate and effects of tributyltin in marine systems[J]. *Rev Environ Contam Toxicol*, 2000, 166: 1 - 48.
- [7] Blaber S J M. The occurrence of a penis-like outgrowth behind the right tentacle in spent females of *Nucella lapillus*[J]. *Proc malac Soc Lond*, 1970, 39: 231 - 233.
- [8] Yamanoshita O, Kurasaki M, Saito T, et al. Diverse effect of tributyltin on apoptosis in PC12 cells[J]. *Biochem Biophys Res Commun*, 2000, 272(2): 557 - 562.
- [9] Whalen M M, Loganathan B G, Kannan K. Immunotoxicity of environmentally relevant concentrations of butyltins on human natural killer cells in vitro[J]. *Environ Res*, 1999, 81(2): 108 - 116.
- [10] Ema M, Harazono A, Miyawaki E, et al. Effect of the day of administration on the developmental toxicity of tributyltin chloride in rats[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 1997, 33(1): 90 - 96.
- [11] Yamabe Y, Hoshino A, Imura N, et al. Enhancement of androgen-dependent transcription and cell proliferation by tributyltin and triphenyltin in human prostate cancer cells[J]. *Toxicol Appl Pharmacol*, 2000, 169(2): 177 - 184.
- [12] Fent K. Worldwide occurrence of organotins from antifouling paints and effects in the aquatic environment[J]. *Handbook Environ Chem*, 2006, 5(5): 71 - 100.
- [13] Fent K, Muller M D. Occurrence of organotins in municipal wastewater and sewage sludge and behaviour in a treatment plant[J]. *Environ Sci Technol*, 1991, 25: 489 - 93.
- [14] Hoch M, Alonso-Azcarate J, Lischick M. Assessment of adsorption behavior of dibutyltin (DBT) to clay-rich sediments in comparison to the highly toxic tributyltin (TBT)[J]. *Environ Pollut*, 2003, 123: 217 - 27.
- [15] Jiang G B, Zhou Q F, Liu J Y, et al. Occurrence of butyltin compounds in the waters of selected lakes, rivers and coastal environments from China[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 115: 81 - 87.
- [16] 黄长江,董巧香,雷瓚,等.我国东南沿海3港口有机锡污染的调查[J]. *海洋学报*, 2005, 27(1): 57 - 63.
- [17] Gao J M, Hu J Y, Wan Y, et al. Butyltin compounds distribution in the coastal waters of Bohai Bay, People's Republic of China[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2004, 72: 945 - 953.
- [18] Liu J M, Jiang G B, Liu J Y, et al. Evaluation of methyltin and butyltin pollution in Beijing Guanting reservoir and its downriver Yongding River[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2003, 70: 219 - 225.
- [19] Gao J M, Hu J Y, Zhen H, et al. Organotin compounds in the three gorges reservoir region of the Yangtze River[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2006, 76: 155 - 162.
- [20] 杨瑞强,周群芳,张庆华,等.太湖水体中丁基锡化合物污染现状研究[J]. *环境科学*, 2006, 27(4): 661 - 663.
- [21] 刘程燕,江桂斌.顶空固相微萃取-气相色谱表面发射火焰光度检测法测定底泥中的丁基锡化合物[J]. *分析化学研究简报*, 2001, 29(2): 158 - 160.
- [22] Yuan D X, Yang D N, Wade Terry L, et al. Status of persistent organic pollutants in the sediment from several estuaries in China[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114: 101 - 111.
- [23] Lau-Wong M M. Tributyltin antifoulings: A threat to the Hong Kong marine environment[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1991, 20: 299 - 304.
- [24] Horiguchi T, Imai T, Cho H S, et al. Acute toxicity of organotin compounds to the larvae of the rock shell, *Thais clavigera*, the disk abalone, *Haliotis discus discus* and the giant abalone, *Haliotis madaka*[J]. *Marine Environmental Research*, 1998, 46(1/2/3/4/5): 469 - 473.
- [25] Nikolaou A D, Gatidou G M, Goufopoulos S K, et al. A one-year survey of organotin compounds in the reservoirs supplying the drinking water treatment plants of Athens, Greece[J]. *Desalination*, 2007, 210: 24 - 30.
- [26] 高俊敏,胡建英,郑泽根,等.北方城市给排水中有机锡污染调查研究[J]. *给水排水*, 2004, 30(7): 15 - 18.
- [27] 顾玉亮,乐勤.长江口陈行水源地盐水入侵分析及预报[J]. *城市给排水*, 2004, 18(2): 19 - 20.
- [28] 陈志琼,张斌.三丁基锡在河口微宇宙中的环境行为研究[J]. *环境污染与防治*, 2001, 23(5): 224 - 226.
- [29] Hwang H M, Oh J R, Kahng S-H, et al. Tributyltin compounds in mussels, oysters and sediments of Chinhae B, Korea[J]. *Mar Environ Res*, 1999, 47: 61 - 70.
- [30] Unger M A, MacIntyre W G, Huggett R J. Sorption behaviour of tributyltin on estuarine and freshwater sediments[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1988, 7: 907 - 915.
- [31] Schwarzenbach R P. Aqueous speciation and 1-octanol-water partitioning of tributyl- and triphenyltin: Effect of pH and ion composition[J]. *Environ Sci Technol*, 1997, 31: 2596 - 2602.
- [32] Berg M, Arnold C G, Muller S R, et al. Sorption and desorption behavior of organotin compounds in sediment-pore water systems[J]. *Environ Sci Technol*, 2001, 35: 3151 - 3157. ■