

# 珠海码头内铜污染现状及生态风险分析

马铭潞

(广东省特种设备检测研究院珠海检测院, 广东 珠海 519000)

**摘要:**以珠海码头作为调查船舶防污漆使用影响的对象,分析了珠海周边海域码头内表层沉积物与海水中的重金属含量,以 Cu 元素为讨论重点,对其进行污染程度与潜在生态危害的评估。结果表明,码头内表层沉积物中 Cu 含量明显高于码头外沉积物,离市区较近的香洲码头和金沙湾码头内沉积物受到中等至较高级别的 Cu 污染,海岛东澳岛码头海水易流通,因此受污染程度较低。使用 Hakanson 生态危害指数法对沉积物进行评估的结果为低潜在生态危害,但码头内海水中 Cu 元素含量已高于生态安全限值。探讨了码头内 Cu 污染现状及可能的发展趋势,以及 Cu 的毒性作用和潜在生态危害。

**关键词:**含铜防污漆,珠海码头,铜污染,潜在生态危害

中图分类号:X522;X824

文献标志码:B

文章编号:1674-6732(2016)03-0043-04

## Analysis on Current Status and Ecological Risk of Copper Pollution in Zhuhai Ports

MA Ming-lu

(Guangdong Zhuhai Special Equipment Inspection and Research Institute, Zhuhai, Guangdong 519000, China)

**Abstract:** Zhuhai ports were chosen as the objects to assess the effect on using antifouling paint from boats. The heavy metal contents of surface sediment and the seawater in Zhuhai ports were studied, with a focus on copper element. The pollution level and the potential ecological risk were assessed. The results showed that the surface sediment in the ports, such as the sediment from the Xiangzhou and Jinsha ports, which were close to the urban area, was exposed to middle to high level of copper pollution. Whereas the surface sediment outside the marine, such as the sediment from the Aodao Marina off the east island, was exposed to low level of copper pollution due to water circulation. The potential ecological risk was low as evaluated by Hakanson ecological risk index, but the copper concentration in sea water exceeded the ecological safety limit. The current status of copper pollution, the prospect, its toxicity and potential ecological risk were analyzed.

**Key words:** Copper-based antifouling paint; Zhuhai ports; Copper pollution; Potential ecological risk

船体防污一直是海洋船舶船体保护的重要内容,船体涂覆防污漆是主要的防护方式,可以减缓船体受损速度,延长船舶使用寿命。目前所使用的防污漆皆基于释放毒料杀死船体附着生物,使其自动脱落的机理,因此,添加的活性物质都是具有毒性的生物杀伤剂。

$Cu_2O$  是目前主要用于防污漆的生物杀伤剂,全球市场上 95% 以上的防污漆中使用的活性物质为  $Cu_2O$ <sup>[1]</sup>,添加质量分数通常为 40% ~ 60%。由于 Cu 元素存在于海水中,自然表层海水中  $\omega(Cu)$  为 0.03 ~ 0.25  $\mu g/kg$ ,且 Cu 是生命体的必需元素,生物体对 Cu 元素吸收与排出具有一定的调节能力,使自身保持较稳定的生理含量,生物蓄积性较低,以往认为含 Cu 防污漆的使用符合环保要求,其向海水中释放的 Cu 离子不会污染海洋环境及

危害生态系统,也不会通过食物链影响人类健康。且目前并没有关于 Cu 致癌性和急性毒性的相关数据与报道,因此 Cu 被视为低毒性元素。基于这些认识,含 Cu 防污漆的大量使用并未引起疑义,所以至今尚未评估含 Cu 防污漆的使用可能造成的海洋环境风险。

虽然海洋环境 Cu 污染问题并未引起人们重视,但在船厂、海港、码头等近海域,欧美等国家早已关注其 Cu 污染问题<sup>[2-3]</sup>。船厂、海港、码头等区域长期停靠大量船舶,船舶活动密集,同时会进行对船体表面清理、涂层修复及涂装等工作,大量防污漆释放于海水,使得海水 Cu 含量超标。胡朝晖

收稿日期:2015-12-04;修订日期:2015-12-28

作者简介:马铭潞(1988—),女,助理工程师,大学本科,研究方向为水质监测。

等<sup>[4]</sup>考察了我国几个渔港内 Cu 污染现状,发现沉积物中铜含量较高,具有高的潜在生态风险,并推断其可能源于船体防污漆的使用。

珠海市是我国重要的船舶制造基地,为调查源于防污漆所造成的海水污染现状,以珠海市区、海岛码头为研究样本,分析了码头内重金属,尤其是 Cu 元素污染现状。通过文献和调研分析,探讨含 Cu 防污漆的使用可能造成的海洋环境铜污染问题,以及对海洋生态系统及人类健康的影响。

### 1 研究方法

由于海洋环境污染源有多种,包括工业、生活污水排放、人类农业活动、船舶航运等,实验分别在码头内及码头外临近海域采集样品,在假设码头内外采样地点受到相似的工业、生活污水排放的影响下,通过数据对比,分析码头内停靠的船舶对该海域环境的影响。

每个点位各采集样品 3 份,同时各取 3 份海水样品。根据《海洋监测规范第 5 部分:沉积物分析》(GB 17378.5—2007),分别从珠海市香洲游艇码头、金沙湾游艇码头和东澳岛码头采集表层 0 ~ 2 cm 沉积物样品,经 115 °C 干燥后,研磨、过 160 目尼龙筛,再各取 0.1 g 样品以硝酸、高氯酸和氢氟酸混合酸为消解液进行微波消解,同时做空白试样。消解后样品经赶酸过程,10 mL 定容,再以电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP - AES)检测元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn,对样品检测数据取其平均值进行数据分析。相同采样点的海水样品,经过滤后,直接进行 ICP - AES 检测。

利用 Hakanson 生态危害指数法对检测结果进行评价<sup>[5]</sup>。单金属元素污染程度采用污染系数  $C_f$  评定,生态危害以潜在生态危害指数  $E_r$  评定,重金

属综合潜在生态危害采用生态危害指数 RI 评定。如式(1~3)所示,其中评价参比值  $C_n$  设为全球工业化前沉积物中重金属的最高背景值, $C_s$  为表层沉积物中元素浓度, $E_r$  为第  $i$  种元素的潜在生态危害指数。实验中所使用的评价参比值  $C_n$  和毒性系数  $T_r$  见表 1,污染程度及生态危害评价依据见表 2。

$$C_f = C_s / C_n \quad (1)$$

$$E_r = C_r \times T_r \quad (2)$$

$$RI = \sum_i^n E_r^i \quad (3)$$

表 1 重金属污染程度及生态危害评价参比值和毒性系数<sup>[6]</sup>

元素	Hg	Cd	As	Cu	Pb	Cr	Zn
$C_n / 10^{-6}$	0.25	1	15	50	70	90	175
$T_r$	40	30	10	5	5	2	1

表 2  $C_f$ 、 $E_r$  和 RI 值的评价标准

污染系数 $C_f$	潜在生态危害系数 $E_r$	潜在生态危害指数 RI
范围	范围	范围
污染程度	潜在生态危害程度	总潜在生态危害程度
$C_f < 1$	$E_r < 40$	$RI < 135$
低	低	低
$1 \leq C_f < 3$	$40 \leq E_r < 160$	$265 \leq RI < 525$
中	较高	较高
$C_f \geq 6$	$160 \leq E_r < 320$	$RI \geq 525$
很高	高	很高
	$E_r \geq 320$	很高

### 2 结果与讨论

#### 2.1 沉积物中金属含量分析

沉积物中金属含量见表 3。

由表 3 可见,码头内沉积物中 Cr、Cu 和 Zn 含量明显高于对应的码头外沉积物。相应地,香洲游艇码头内沉积物中 Cr、Cu 和 Zn 含量分别为码头外样品的 3.9 倍、22.8 倍和 10.8 倍,金沙湾游艇码头高出 4.3 倍、5.2 倍和 6.1 倍,东澳岛码头高出 1.7 倍、7.3 倍和 5.7 倍。由于在码头内外的采样地点距离较近,所以假设采样地点受到源于工业

表 3 珠海码头内外海域表层沉积物重金属含量

项目	香洲码头外			金沙湾码头外			东澳岛码头外		
	$w / 10^{-6}$	$w / 10^{-6}$	比例 <sup>①</sup>	$w / 10^{-6}$	$w / 10^{-6}$	比例 <sup>①</sup>	$w / 10^{-6}$	$w / 10^{-6}$	比例 <sup>①</sup>
As	23.0	24.5	1.1	15.0	650	43.3	12.4	23.7	1.9
Cd	1.4	1.1	0.8	0.9	3.9	4.3	1.4	1.0	0.7
Cr	34.6	135.4	3.9	37.1	160.1	4.3	20.5	34.7	1.7
Cu	9.1	207.4	22.8	17.2	89.3	5.2	3.3	24.0	7.3
Hg	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Pb	62.9	46.3	0.7	31.5	81.0	2.6	35.2	63.7	1.7
Sn	96.1	43.4	0.4	180.2	24.5	0.1	5.9	7.2	1.2
Zn	21.5	233.1	10.7	77.8	472.3	6.1	12.1	68.9	5.7

①码头内、外表层沉积物中金属含量的比例。

废水、生活污水排放的影响相同,则码头内海域表层沉积物中更高的重金属含量主要是受到船舶活动的影响。Cr、Cu 和 Zn 元素都可能存在于船舶涂料之中,尤其是 Cu、Zn 元素,在目前的防污漆产业中,以 Cu<sub>2</sub>O、CuS、CN、代森锌或吡啶硫酮锌等作为生物杀伤剂,尤以 Cu<sub>2</sub>O 的应用最为广泛;同时,Zn 元素还用于船舶防锈颜料。

珠海位于珠江入海口,对比于珠江口区域和珠海近岸海域沉积物质量的文献值见表 4。实验中香洲、金沙滩码头外海域表层沉积物的质量水平与文献参考值接近,而码头内 Cr、Cu 和 Zn 含量显著高于历年来珠海近岸海域表层沉积物的水平。东澳岛码头远离城区,且为开放式码头,易于污染物扩散稀释,因此码头内外海域沉积物质量差别不大,受污染程度较低。

表 4 历年珠海近岸海域表层沉积物金属含量 10<sup>-6</sup>

年份	Cd	Cr	Pb	Hg	Cu	Zn
2004 年 <sup>[7]</sup>	—	91.31	58.1	—	52.8	175
2006 年 <sup>[8]</sup>	1.52	57.65	100.03	—	120.86	199.03
2009 年 <sup>[9]</sup>	0.48	45.8	57.2	0.2	61.9	157.8

### 2.2 海域污染程度及潜在生态危害评价

表层沉积物中 Cu、Cr、Zn 污染系数见图 1。由图 1 可见,对于 Cr、Cu 和 Zn 元素,香洲码头与金沙滩码头外采样区域受到的污染程度皆为低-中等,而码头内沉积物污染程度为中-较高水平。香洲码头外与金沙滩码头外海域表层沉积物中铜污染系数分别为 0.2 和 0.3,基本没有受到 Cu 污染;而香洲码头内表层沉积物中 Cu 污染系数高达 4.1,污染程度较高,金沙滩码头内沉积物 Cu 污染程度为中等。东澳岛码头远离市区,海水流通,污染物易扩散稀释,Cu 污染系数为 0.5,污染程度较低。

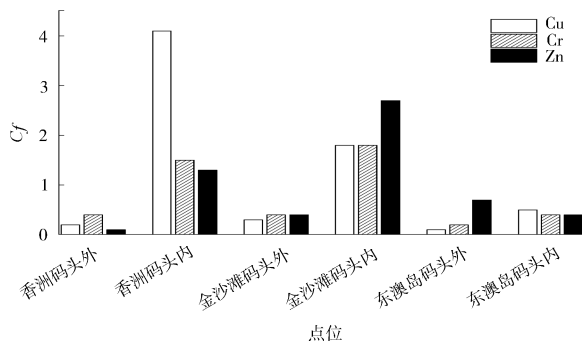


图 1 表层沉积物中 Cu、Cr、Zn 污染系数

目前珠海市区码头内 Cu 污染现象已较为明显,海岛码头 Cu 污染尚未观察到。按 C<sub>f</sub> 进行判断,所有采样点都存在较明显的 As 和 Cd 污染,尤其是金沙滩码头,经多次采样测试,其表层沉积物中 As 和 Cd 浓度皆比较高。香洲码头和东澳岛码头内表层沉积物中 As 和 Cd 浓度未明显高于码头外。As 和 Cd 元素毒性较强,对海洋环境危害性大,早被欧美国家禁用于船舶涂料,《环境标志产品技术要求船舶防污漆》(HJ 2015—2012)中也对 2 种元素规定了其在防污漆中使用的限量要求,所以不会大量用于防污漆。

以潜在生态危害指数 E<sub>r</sub> 评定金属元素可能造成的生态危害。见表 5,所有采样点 As 和 Cd 生态危害水平较高,其他元素的 E<sub>r</sub> 皆 < 40,生态危害水平较低。香洲码头与金沙滩码头表层沉积物中 Cu 的潜在生态危害指数为 20.5 和 9.0,高于码头外海域的 1.0 和 1.5,但仍处于低潜在生态危害水平,即按照 Hakanson 生态危害指数法,珠海码头的 Cu 污染尚不会对海洋生态环境造成影响。

表 5 珠海码头内外海域表层沉积物质量评价

项目	香洲码头外		香洲码头		金沙滩码头外		金沙滩码头		东澳岛码头外		东澳岛码头	
	C <sub>f</sub>	E <sub>r</sub>	C <sub>f</sub>	E <sub>r</sub>	C <sub>f</sub>	E <sub>r</sub>	C <sub>f</sub>	E <sub>r</sub>	C <sub>f</sub>	E <sub>r</sub>	C <sub>f</sub>	E <sub>r</sub>
As	1.5	1.5	1.6	1.6	1.0	10	43.3	433	0.8	8	1.6	16
Cd	1.4	42	1.1	33	0.9	27	3.9	117	1.4	42	1.0	30
Cr	0.4	0.8	1.5	3.0	0.4	0.8	1.8	3.6	0.2	0.4	0.4	0.8
Cu	0.2	1.0	4.1	20.5	0.3	1.5	1.8	9.0	0.1	0.3	0.5	2.4
Hg	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0.9	4.5	0.7	3.5	0.4	2.0	1.1	5.5	0.5	2.5	0.9	4.9
Zn	0.1	0.1	1.3	1.3	0.4	0.4	2.7	2.7	0.7	0.7	0.4	0.4
RI	63		77		42		571		54		54	

### 2.3 海水中 Cu 元素含量分析

进一步采集考察区域的海水样品进行铜元素含量分析。评价标准为我国海水水质中铜元素的限量标准,以及 EPA 规定的海水中铜离子持续浓度基准  $3.1 \mu\text{g/L}$ , EPA 标准旨在保护水生生物不会受到低浓度污染物长期作用所造成的慢性毒性影响,见表 6。

表 6 码头内外海域海水中  $\rho(\text{Cu})$   $\mu\text{g/L}$

采样点	香洲码头外	香洲码头	金沙滩码头外	金沙滩码头	东澳岛码头外	东澳岛码头
$\rho(\text{Cu})$	2.8	18.7	12.2	17.9	2.1	1.8

由表 6 可见,香洲码头和金沙滩码头内海水中  $\rho(\text{Cu})$  约为  $18 \mu\text{g/L}$ , 劣于我国二类海水水质标准,且远高于 EPA 规定的限值;东澳岛码头内外海水中  $\rho(\text{Cu})$  差别不大,是由于码头为开放式,受涨落潮的影响,污染物较易于扩散。

研究表明,当  $\rho(\text{Cu}) > 3.1 \mu\text{g/L}$  时,会对海洋生物造成影响, $\rho(\text{Cu}) = 3.0 \sim 10.0 \mu\text{g/L}$  时,蚌、蚝、扇贝、海胆、甲壳纲动物等会显现出减弱的或不正常的胚胎生长、发育、产卵和习性<sup>[10]</sup>。当  $\rho(\text{Cu}) = 5 \sim 25 \mu\text{g/L}$  时,即可致死海洋无脊椎动物<sup>[11]</sup>。据此估计,2 个码头区域的海洋生态系统已经受到显著影响。虽然利用 Hakanson 生态危害指数法<sup>[12-13]</sup> 评估码头内表层沉积物质量,Cu 污染程度属于低生态危害,但是,海水中可溶性 Cu 元素浓度已超出海洋生物所能承受的范围。

我国对于含 Cu 防污漆的使用仍处起步阶段,随着“中国用于防污漆生产的 DDT 替代项目”在 2014 年的完成,含 Cu 防污漆的使用将占据市场主导地位,我国近海环境,尤其是港口、码头内的 Cu 污染现象将加剧。

### 2.4 近岸海域 Cu 污染现状及危害

含 Cu 防污漆在欧美等国家应用较早且更为普遍,其港口、码头内的 Cu 污染问题在上个世纪已然显现。目前,欧美等国家紧密监测近海 Cu 浓度,美国部分海湾和港口区域已进行对 Cu 污染的监管,瑞典、荷兰、丹麦等国家禁止在某些区域的游艇上使用含 Cu 船壳漆。我国并没有含 Cu 防污漆使用的限制条例。作为世界造船大国,并曾一度超越韩国而成为世界第一造船大国,我国海洋涂料的需求量年均增速超过 20%,并仍有巨大的发展潜力<sup>[14]</sup>,而船舶涂料占据海洋涂料需求量的 90% 以上;同时,防污漆中

氧化亚 Cu 使用的市场份额也在扩大。

我国每年含 Cu 防污漆的用量在快速增长,其对海水中 Cu 含量的影响将会日益显著。参考欧美等国家的发展经验,出台相关控制使用条例,鼓励非释放型防污漆的开发与推广应用,是保护我国近海域免受防污漆污染的解决办法。

海域 Cu 污染会影响到海产品质量,危害人体健康。实地考察发现,香洲游艇码头外区域的岩石上生长有大量牡蛎,而金沙滩游艇码头附近有牡蛎养殖场。随着珠海船舶、游艇产业的发展,以及含 Cu 防污漆的大量推广使用,珠海近岸海域中 Cu 污染为题会愈发严重,并通过海产品进入人类食物链。虽然人体具有代谢 Cu 的能力,但过量摄入 Cu 仍会造成机体损伤。 $\text{Cu}^{2+}$  在细胞内蓄积会催化羟自由基( $\cdot\text{OH}$ )生成,促使氧化反应的发生,可造成细胞膜脂质过氧化增强和 DNA 损伤,破坏细胞膜,生物生长、繁殖发生异常,促使生物畸变甚至死亡。氧化损伤促进衰老,而机体衰老可能引发多种疾病,这在老年人中表现较为明显。

文献<sup>[15]</sup>表明,神经退行性疾病、动脉硬化、糖尿病等都可能与人体内过多的铜、铁元素相关。Cu 的富集还会影响生物对其他金属元素的代谢活动,Cu、Zn 离子在生物体内的富集会提高生物体对 Cd、Hg 元素的吸收<sup>[16]</sup>,进而引发中毒。Morris 等<sup>[17]</sup>对日常摄入不同的食物与微量元素营养品的目标人群进行连续 6 年的观察统计,结果显示,Cu 摄入量较高的五分之一人群,若其同时摄入高脂肪,认知能力衰减速度提高了 3 倍多。同时,衰老会降低 Cu 代谢能力,老年人血浆内 Cu 浓度更高<sup>[18]</sup>,老年人摄入 Cu 的危害性更大。

### 3 结语

珠海码头内 Cu 污染问题显著。这种污染极有可能是源于码头内船体上含 Cu 防污漆的使用;虽然目前其潜在生态危害水平较低,但随着船舶产业发展以及含 Cu 防污漆的推广使用,其对海洋环境 Cu 浓度的影响将日益显著。海域 Cu 污染会影响海洋生态系统,并进入人类食物链而对人体造成危害。海水中 Cu 元素含量超出限值会杀伤海洋生物,危害海洋生态系统,并通过在生物体内富集而进入人类食物链,而 Cu 的过度摄入会促进人体衰老,引发认知能力下降等神经退行性慢性疾病。

海洋环境 Cu 污染问题需要引起足够的重视,

应尽早评估含氧化亚铜防污漆使用的环境风险,同时鼓励开发环保型替代产品,彻底杜绝船体防污漆的使用对海洋环境的污染。

## [参考文献]

- [1] DETTY M R, CIRIMINNA R, BRIGHT F, et al. Environmentally benign sol-gel antifouling and foul-releasing coating [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2014, 47(2): 678-687.
- [2] SCHIFF K, DIEHL D, VALKIRS A. Copper emissions from antifouling paint on recreational vessels [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 48(3-4): 371-377.
- [3] BERTO D, BRUSA R B, CACCIATORE F, et al. Tin free antifouling paints as potential contamination source of metals in sediments and gastropods of the southern Venice lagoon [J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 45: 34-41.
- [4] 胡朝晖, 张干, 丘耀文, 等. 我国渔港沉积物的重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *地球化学*, 2010, 39(4): 297-304.
- [5] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control - A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-100.
- [6] 孙元敏, 陈彬, 黄海萍, 等. 中国南亚热带海岛海域沉积物重金属污染及潜在生态危害[J]. *中国环境科学*, 2011, 31(1): 123-130.
- [7] 李团结, 龙江平, 刘激. 珠江口底质重金属分布特征及其生态危害性评价[J]. *热带地理*, 2009, 29(4): 316-318.
- [8] 吕文英, 周树杰. 珠江口沉积物中重金属形态分布特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(10): 4607-4608, 4621.

(上接第24页)

## [参考文献]

- [1] 耿师科. 谈挥发性有机物对人类生存环境的影响[J]. *内蒙古石油化工*, 2006, 32(12): 93-94.
- [2] 胡璟珂, 马健生. 地下水中挥发性有机污染物测定研究[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(1): 307-308, 323.
- [3] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. 地表水环境质量标准: GB 3838—2002 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [4] 中华人民共和国卫生部, 国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准: GB 5749—2006. [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [5] 许秀艳, 朱擎, 谭丽, 等. 水中挥发性有机物的分析方法综评[J]. *环境科学*, 2011, 32(12): 3606-3612.
- [6] 马康, 张金娜, 何雅娟, 等. 水中挥发性有机物分析前处理技术研究进展[J]. *化学通报*, 2011, 74(9): 822-826.
- [7] 张泽林. 生活饮用水中挥发性有机物检测方法的研究及应用[J]. *中国环境监测*, 2008, 24(1): 13-16.
- [8] 邓敏军, 梁柳玲, 杨安平, 等. 气相色谱-质谱法测定水中24种挥发性有机物的含量[J]. *理化检验-化学分册*,

- [9] 钱晓佳, 段舜山. 珠海近岸海域表层沉积物中的重金属及生态危害评价[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(9): 2123-2129.
- [10] CARSON R T, DAMON M, JOHNSON L T, et al. Conceptual issues in designing a policy to phase out metal-based antifouling paints on recreational boats in San Diego Bay [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90: 2460-2468.
- [11] HODSON P V, BORGMANN U, SHEAR H. Copper in the environment part II: health effects, Wiley-Interscience [J]. J. O. Nriagu (ED), New York, 1979: 307.
- [12] 赵小健. 基于 Hakanson 潜在生态风险指数的某垃圾填埋场土壤重金属污染评价[J]. *环境监控与预警*, 2013, 5(4): 43-49.
- [13] 吴建兰, 沈红军. 南通市濠河沉积物重金属污染特性及生态环境风险评价[J]. *环境监控与预警*, 2012, 4(4): 42-50.
- [14] 汪焕心. 浅析我国海洋涂料市场发展快、潜力大的原因[J]. *广州化工*, 2011, 39(19): 1-3.
- [15] BREWER G J. Risks of copper and iron toxicity during aging in humans [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2010, 23(2): 319-326.
- [16] LIU F J, WANG W X. Differential influences of Cu and Zn chronic exposure on Cd and Hg bioaccumulation in an estuarine oyster [J]. *Aquatic Toxicology*, 2014, 148: 204-210.
- [17] MORRIS M C, EVANS D A, TANGNEY C C, et al. Dietary copper and high saturated and trans fat intakes associated with cognitive decline [J]. *Archives of Neurology*, 2006, 63(8): 1085-1088.
- [18] MERKER K, HAPKE D, RECKZEH K, et al. Copper related toxic effects on cellular protein metabolism in human astrocytes [J]. *Biofactors*, 2005, 24(1-4): 255-261.

2012, 48(5): 576-579.

- [9] 袁海勤, 唐松林, 杨旭, 等. 长江饮用水源地18种挥发性有机物的自动监测应用研究[J]. *环境监控与预警*, 2014, 6(6): 24-26.
- [10] 李晔. 饮用水中挥发性有机物的吹扫捕集-气相色谱/质谱测定法[J]. *职业与健康*, 2011, 27(12): 1370-1372.
- [11] 张芹, 曹凡海, 王少青. 吹扫捕集/GC-MS法测定水中26种挥发性有机物[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2013, 35(3): 1-4.
- [12] 李丽君, 郝原芳, 祝彬, 等. 吹扫捕集-气质联用方法测定水中25种挥发性有机物[J]. *环境化学*, 2011, 30(3): 1-2.
- [13] 肖娅, 黄桂荣. 气相色谱法测定水和废水中氯乙烯方法的探讨[J]. *环境监控与预警*, 2009, 1(1): 27-28.
- [14] 赖永忠. 固相微萃取法同时分析源水中54种挥发性有机物[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(8): 94-99.
- [15] US EPA Method 524.2, Measurement of purgeable organic compounds in water by purge and trap capillary column Gas Chromatography/mass Spectrometry.
- [16] 邵鸿飞, 冀克俭, 邓卫华, 等. 绿色分析化学技术研究进展[J]. *化学分析计量*, 2008, 17(1): 78-81.