

北江沉积物汞污染现状与评价初步研究

丁小勇^{1,2,3}, 陈来国², 张卫东³, 许振成², 彭晓春², 商立海⁴

(1.西南大学化学化工学院, 重庆 400715; 2.环境保护部华南环境科学研究所城市环境研究中心, 广州 510655; 3.重庆市环境科学研究院, 重庆 400020; 4.中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002)

摘要:为了了解北江沉积物中汞污染现状、来源并评价其污染程度,在北江流域共采集 19 个沉积物样,用原子吸收法(AAS)和冷原子荧光法(CVAFS)分别测定了其总汞(THg)和甲基汞(MeHg)含量,比较了甲基化率,并用污染指数法对测定结果进行了评价。结果表明,北江沉积物 THg 含量为 73.7~3 517 ng·g⁻¹(干重),均值为 607.6 ng·g⁻¹,MeHg 含量为 0.392~2.384 ng·g⁻¹,均值为 1.302 ng·g⁻¹,韶关冶炼厂为重要污染源。各采样点甲基化率差异较大,进一步研究影响甲基化的因素具有重要意义。沉积物中 THg、MeHg 平均污染指数分别为 3.04、26.04,表明均为中度污染。

关键词:北江;沉积物;总汞;甲基汞;评价

中图分类号:X833 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)02-0357-06

Preliminary Study on Pollution Status and Assessment of Mercury in Sediment from the Beijiang River

DING Xiao-yong^{1,2,3}, CHEN Lai-guo², ZHANG Wei-dong³, XU Zhen-cheng², PENG Xiao-chun², SHANG Li-hai⁴

(1.College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2.Center for Research on Urban Environment, South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Guangzhou 510655, China; 3.Chongqing Academy of Environmental Science, Chongqing 400020, China; 4. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China)

Abstract: Mercury in environment has become the major concern in recent years due to its highly toxic to human and biota. In this study, nineteen sediment samples were collected along the Beijiang River to examine concentrations and sources of mercury, as well as methylmercury. Also, the pollution levels of mercury and its compound were assessed based on comparison with other studies. Total mercury (THg) and methylmercury (MeHg) were determined by atomic absorption spectroscopy (AAS) and cold vapor atomic fluorescence spectrometers (CVAFS), respectively. Furthermore, methylation rates were calculated for all samples and pollution degrees of mercury in sediment were evaluated using pollution index methods. The results showed that THg concentrations in sediments ranged from 73.7 to 3 517 ng·g⁻¹ dry weight, with an average of 607.6 ng·g⁻¹, and MeHg concentrations ranged from 0.392 to 2.384 ng·g⁻¹ dry weight, with an average of 1.302 ng·g⁻¹, respectively. Clearly, wastewater from Shaoguan smelting factory was an important point source for mercury in sediment. In addition, methylation rates varied significantly among samples, suggesting that factors influencing methylation is still unclear. Thus, more studies are needed to explore the relationships between these important factors and methylation rates of mercury in sediment. Based on the average pollution index of THg ($F=3.04$) and MeHg ($F=26.04$) in sediment, the Beijiang River suffered from medium pollution of THg and MeHg.

Keywords: the Beijiang River; sediment; total mercury; methylmercury; assessment

汞是一种高毒性的人体非必需元素,所有形态的汞对人类和动物都具有强的毒性^[1],其中以有机汞化

合物(尤其是甲基汞)的毒性最强。甲基汞的毒性是无机汞的几百倍,能通过血脑屏障和胎盘,引起中枢神经系统的永久损伤和胎儿水俣病(ATSDR, 1997)^[2]。由于环境汞污染不断加剧,汞已被公认为“全球性污染物”^[3]。沉积物是水体生态系统的重要组成部分,是水体各种营养物、污染物的汇和源^[4],同时沉积物也是汞甲基化的主要场所^[5]。截止目前,关于珠江三角洲地区

收稿日期:2009-06-27

基金项目:国家环保公益项目(200809011);北江镉污染应急课题(0202043)

作者简介:丁小勇(1984—),男,硕士研究生,主要研究方向为环境监测及环境影响评价。E-mail:xyding2008@163.com

通讯作者:陈来国 E-mail:chenlaiguo@scies.org

沉积物汞污染报道极少,早期郑习健等^[6]对珠江广州河段底泥的研究已表明汞污染严重。

北江是珠江流域第二大水系,干流河道长 468 km,流域面积占全珠江流域面积 10.1%,至三水市与西江相通,进入珠江三角洲河网区。北江流域地处亚热带,境内高温多雨,年均降雨量约 1 800 mm,汛期(4—9 月)降雨量占年降雨量的 80%。多年平均径流量为 482 亿 m^3 ,是沿线的韶关、清远、肇庆和佛山等城市的主要饮用水源地。研究区内典型工业污染源大致可以分为三类:(1) 矿山开采产生的含重金属酸性废水,包括分布在北江上游的凡口铅锌矿、乐昌铅锌矿以及大宝山矿区等;(2) 冶炼厂排出的废水和废气,如上游韶关冶炼厂;(3) 电子垃圾处理产生的废水、废渣和废气,如北江下游的清远市的石角和龙塘镇。

北江上游众多的采矿业和金属冶炼厂可能造成较严重的汞污染,而对珠江主要水系之一的北江沉积物汞(尤其是甲基汞)污染研究尚未开展。本研究测定了北江沉积物中总汞(THg)和甲基汞(MeHg)含量,并对其污染水平进行了简单评价,这为了解该地区汞污染状况和制定有效控制对策具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集和前处理

2009 年 4 月,用不锈钢抓斗式采样器在北江干流及支流上共采集了 19 个表层沉积物样品(图 1),由于北江属沙质河道,部分河段未采集到沉积物。沉积物样品装入聚乙烯密封袋,排除空气,运回实验室置于 -20°C 冰箱保存至分析。消解沉积物样前,先用冷冻干燥机(EYELA, FDU-2100)干燥,再用玛瑙研钵研磨,过 100 目筛。

1.2 沉积物分析测定

THg :称取约 0.2 g(精确到 0.000 1 g)样品,加入 5 mL 王水, 95°C 水浴 5 min,再加入 5 mL 超纯水和 1.0 mL BrCl ,继续消解 30 min 后,定容至 25 mL,密封,放置 24 h 以上,加入 200 μL 盐酸羟胺^[7],取 5 mL 样品于还原瓶用 1 mL SnCl_2 还原,用原子吸收法(AAS)双光路测汞仪(上海华光, F732-S)测定。

MeHg :采用 HNO_3 和 CuSO_4 溶液浸提, CH_2Cl_2 萃取并结合水相乙基化、恒温气相色谱-冷原子荧光(GC-CVAFS)测定仪(Brooks Rand, Model III)测定^[8]。

1.3 质量保证与质量控制

为了保证分析数据的质量,分析沉积物样的同时,采用完全相同的分析程序测定沉积物标准物质

GSD-5 (GBW07305)(中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所提供)和 IAEA-356(International Atomic Energy Agency)中 THg 和 MeHg 含量。结果表明测定值与标准值吻合较好, THg 与 MeHg 回收率分别为 $85.61\% \pm 0.35\%$, $101.79\% \pm 18.11\%$ 。同时测定实验空白,并按 10%的比例随机测定样品平行样,平行样分析结果相对偏差均低于 10%。

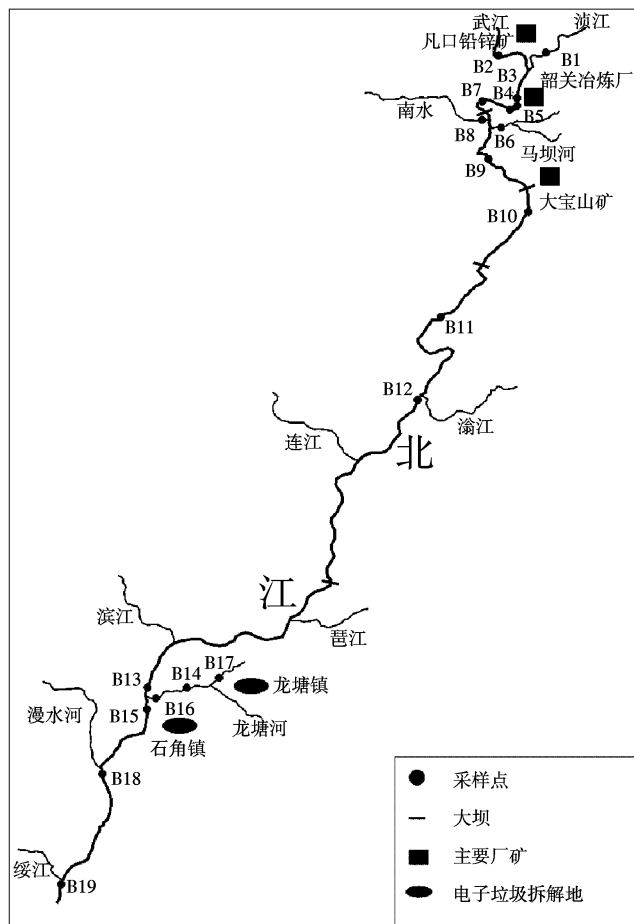


图 1 采样点图

Figure 1 Map of sampling sites

2 结果与讨论

2.1 沉积物 THg 和 MeHg 的浓度水平

如表 1 所示,北江干流与支流沉积物(以干重计,下同) THg 的浓度范围为 $73.7 \sim 3\,517 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$,最大值在韶关冶炼厂排口下游(B5),最小值位于北江下游马房(B19),前者为后者含量的 48 倍,沉积物 THg 平均含量为 $607.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。韶关冶炼厂排放口(B4)处 THg 含量高达 $35\,849 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

北江干流与支流 MeHg 的浓度范围为 $0.392 \sim$

2.384 ng·g⁻¹(表 1),最大值位于南华水厂(B11),最小值在大坑口下(B10),最大值是最小值的 6 倍,沉积物 MeHg 平均含量为 1.302 ng·g⁻¹。韶关冶炼厂排放口(B4)处 MeHg 含量高达 8.603 ng·g⁻¹。

对比其他研究区域(表 2),北江流域沉积物 THg 含量低于曾遭汞严重污染的松花江^[9]、葫芦岛市的五里河、茨山河、连山河^[10],高于黄浦江上游^[11]、黄河中下游^[12],也高于美国 South Florida^[13]、俄罗斯 Anadyr^[14]和法国 Seine^[15]河口沉积物,表明北江汞污染已较为严重。北江沉积物 MeHg 含量低于法国 Seine^[15]河口沉积物,高于美国 South Florida^[13]和俄罗斯 Anadyr^[14]河口沉积物。

2.2 THg 和 MeHg 的空间分布特征

从 THg 的空间分布(图 2)可见,如果以韶关冶炼厂排污口(B4)为北江干流上下游的分界点,上游的 3 个采样点(B1、B2 和 B3)THg 含量相对北江干流均值(594.3 ng·g⁻¹)较低,B3 明显高于 B1、B2,原因可能是由于 B3 位于城市下游且在冶炼厂排口的上游,大坝蓄水造成该点 THg 明显升高,这可能与大坝对汞的“滞留”效应有关,与白薇扬^[16]等对阿哈水库,冉祥滨^[17]等对三峡水库大坝汞的研究结果一致。冶炼厂下游沉

表 2 不同河流沉积物总汞和甲基汞含量比较
Table 2 Concentration comparison of THg and MeHg in sediments from different rivers

研究区域	采样时间	THg/ ng·g ⁻¹	MeHg/ ng·g ⁻¹	参考文献
松花江	2005	13~1 543(610)	—	[9]
葫芦岛市五里河	2007	37~16 070(9241)	—	[10]
葫芦岛市茨山河	2007	344~132 500(52450)	—	[10]
葫芦岛市连山河	2007	215~19 550(5126)	—	[10]
黄浦江上游	2006	48~417	—	[11]
黄河中下游	2008	14~103	—	[12]
South Florida Estuaries, USA	1998	1~219 (20)	0.001~0.49 (0.078)	[13]
Anadyr Estuary, Russia	1998	77~2 100(339)	0.06~0.62(0.24)	[14]
Seine Estuary, France	1999	300~1 000(460)	0.1~6 (2.3)	[15]
北江	2009	74~3 517(607.6)	0.392~2.384 (1.302)	本研究

注:括号内为平均含量。

积物 THg 含量也明显偏高,且随距离增大而呈快速下降趋势,呈明显的点源污染特征,可能表明冶炼厂是北江汞污染的明显点源。Heaven 等^[18]在 Nura 河流域邻近排污口沉积物中发现了高含量汞,并随距离迅速下降,绝大部分集中在距排污口 25 km 的河道。冶炼厂排污口 THg 含量高达 35 849 ng·g⁻¹,进一步证明了点源污染的可能性。韶关冶炼厂是中国第三大锌生产商,年生产锌达 16~17 万 t,还生产包括铅、镉在内的多种金属产品。张少庆^[10]等对曾受锌冶炼厂废水污染的葫芦岛市茨山河表层沉积物的研究结果也证明汞污染源于锌冶炼厂直接排放。B9、B10 干流采样点相对于 B7 采样点 THg 含量略微上升,可能与支流南水 THg 含量较高(2 275 ng·g⁻¹)有关;滙江入北江河口下游 B12 采样点 THg 也较 B11 采样点偏高,可能与韶关大宝山地区的采矿活动有关,大宝山矿是一座大型多金属硫化物伴生矿床,以铁、铜等为主,大宝山矿区废水经横石河入滙江,最终进入北江,该矿区自 20 世纪 70 年代开采以来,所产生的大量含重金属污水直接排放到河水中,已造成该区域下游生态环境的严重恶化。有研究^[19]报道,受大宝山地区采矿活动影响,附近支流沉积物铊含量高达 3.22 mg·g⁻¹,是中国浅海沉积物中铊的丰度(0.30 mg·g⁻¹)的 10 倍。经过江水稀释和沉积物吸附,距 B12 较远的干流采样点(B13、B15、B18、B19)THg 含量快速降低,并在 B19 达到最小值。清远的石角和龙塘是著名的电子垃圾拆解

表 1 北江沉积物(干重)总汞和甲基汞含量
Table 1 Concentrations of THg and MeHg in sediments from the Beijiang River

样品编号	采样地点	断面性质	THg/ng·g ⁻¹	MeHg/ng·g ⁻¹
B1	滨江腊石坝	干流	172.2	1.534
B2	武汉十里亭	干流	201.7	1.004
B3	韶冶排口上游	干流	362.0	0.737
B4	韶冶排放口	排污口	35 849	8.603
B5	韶冶排口下游	干流	3 517	1.027
B6	马坝河	支流	680	1.463
B7	孟洲坝下游	干流	533	1.667
B8	南水北江入河口	支流	2 275	2.215
B9	白沙镇下	干流	619.2	2.143
B10	大坑口下	干流	636.5	0.393
B11	南华水厂	干流	488.1	2.384
B12	英德大桥下	干流	588.1	1.114
B13	山塘船厂对面	干流	141.7	1.089
B14	龙塘河黄布村	支流	77.6	0.628
B15	石角镇	干流	207.9	2.136
B16	龙塘河北丫	支流	80.0	0.809
B17	龙塘河 105 国道	支流	97.4	1.415
B18	大塘	干流	184.8	0.614
B19	马房	干流	73.7	1.066

地,有研究报道^[19-20]电子垃圾拆解地区土壤和河流中 Hg 含量明显高于一般城市和河流,本研究电子垃圾拆解地的采样点(B14、B15、B16、B17)无明显汞污染。

总体上,北江干流 MeHg 均值($1.301 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)与支流($1.306 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)相当,干流上游 MeHg 均值($1.092 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)低于下游($1.363 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)。与 THg 空间变化规律不同,MeHg 含量变化趋势没有明显的规律(图 2),可能表明汞在转化为 MeHg 过程中受多种因素影响或受控制性因素影响的程度不同。目前有关汞的甲基化机理和影响因素已有很多报道,汞的甲基化受温度、pH、DO、氧

化还原电位、有机质、微生物等多种因素影响^[21-22]。

2.3 甲基化率

由表 1 可见,总体上 THg 含量越高,MeHg 含量也较高,但各采样点的甲基化率差异较大(图 3),最小为 0.024%,最大为 1.452%,干流(0.51%)低于支流(0.72%)。有研究报道无机汞是沉积物中汞的主要形态,有机汞约占总汞的 1%^[21]。上游和下游 THg 含量较低的采样点甲基化率较高,总汞含量高的 B4、B5、B6 等采样点甲基化率较低,同时发现在电子垃圾拆解地有相对较高的汞甲基化率(1.08%),因而进一步研究

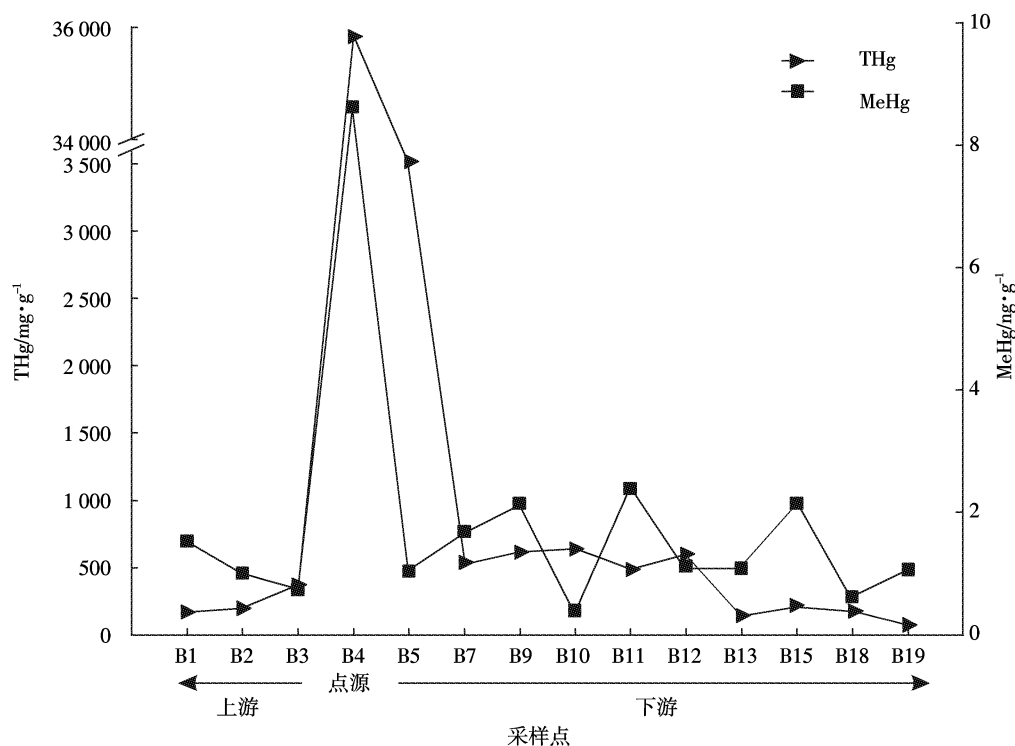


图 2 北江干流沉积物中 THg 和 MeHg 的空间分布

Figure 2 Spacial distribution of THg and MeHg in sediments from the main stream of the Beijiang River

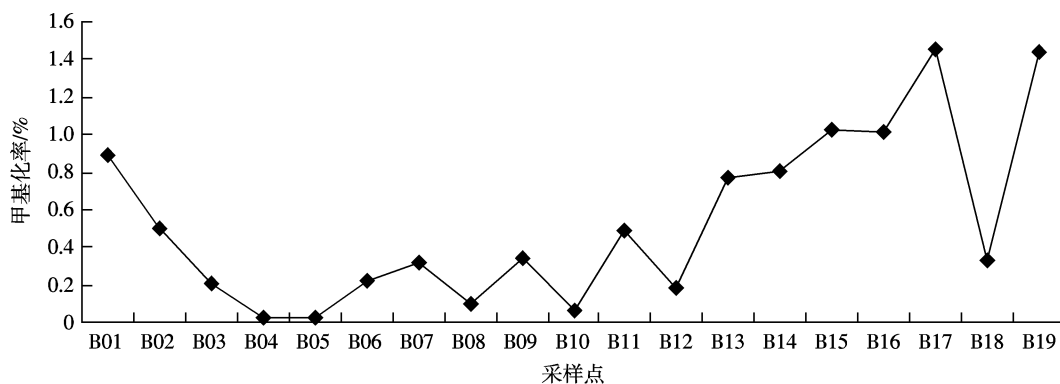


图 3 北江各采样点沉积物甲基化率

Figure 3 Methylation rates of sediments from the Beijiang River

汞的甲基化机理与影响因素是十分必要的。

2.4 汞的污染评价

2.4.1 THg 的污染评价

本研究采用污染指数法评价北江沉积物中 THg 污染程度。即

$$F=C/C_0$$

式中: F 为污染指数; C 为实测值, $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; C_0 为背景含量。THg 背景值采用全国海岸带背景值 $200\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 评价标准采用李学杰^[22]通过半集均方差模式计算出的评价方法: $F<1.0$ 为良好; $1.0\leq F\leq 2.0$ 为轻度污染; $2.0<F\leq 5.0$ 为中度污染; $F>5.0$ 为重度污染。评价结果见表 3, 19 个样品中, THg 含量有 3 个重度污染、6 个中度污染、3 个轻度污染、7 个良好, 不计排污口 B4, 平均污染指数为 3.04, 属于中度污染水平。

2.4.2 MeHg 的污染评价

MeHg 的污染程度也采用污染指数法进行评价, 背景含量及其评价标准采用刘永懋等^[23]对松花江的研究结果, 即取沉积物中 MeHg 的安全浓度 $0.05\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$ 作为背景含量, 评价标准为: $1.0<F\leq 5$ 为轻度污染; $5<F\leq 50$ 为中度污染; $50<F\leq 6\ 000$ 为重度污染; $F>6\ 000$ 为严重污染。评价结果见表 3, 19 个样品中, MeHg 含量有

1 个重度污染、18 个中度污染, 不计排污口 B4, 平均污染指数为 26.04, 属于中度污染水平。

3 结论

(1) 北江干流与支流沉积物 THg 含量范围为 $73.7\sim 3\ 517\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均浓度为 $607.6\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 干流的 THg 空间分布与距离排污口远近有关, 总体上距离越远含量越低。韶关冶炼厂和大宝山矿区为北江 THg 重要污染源。

(2) 北江干流与支流沉积物 MeHg 含量范围为 $0.392\sim 2.384\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 平均浓度为 $1.302\text{ ng}\cdot\text{g}^{-1}$, 空间变化趋势与 THg 含量的变化趋势不一致。

(3) 各采样点汞的甲基化率差异较大, 干流低于支流, 在电子垃圾拆解地有相对较高的甲基化率, 进一步研究汞甲基化的影响因素十分必要。

(4) 根据污染指数法的评价结果, 北江沉积物中 THg、MeHg 总体均属中度污染, 但在部分靠近排放点源的区域则污染严重。

参考文献:

- [1] 费斯特纳, 维特曼编. 王忠玉, 姚重华译. 水环境的金属污染[M]. 北京: 海洋出版社, 1988: 68.
- [2] 陈静生, 周家义. 中国水环境重金属研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 586.
CHEN Jing-sheng, ZHOU Jia-yi. Study on Heavy Metal in Aquatic environment in China[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1992: 586.
- [3] Hansen J C, Danscher G. Organic mercury, an environmental threat to the health of dietary-exposed societies[J]. *Rev Environ Health*, 1997, 12 (2): 107-116.
- [4] Lindqvist O, Jernelov A, Johansson k, et al. Mercury in the Swedish Environment[R]. Global and local source, National Swedish Environmental Protection Board, SNV Report PM 1816, 1984.
- [5] Kang W J, Trefry J H, Nelsen T A, et al. Direct atmospheric inputs versus runoff fluxes of mercury in Everglades and Florida Bay[J]. *Science of the Total Environment*, 327: 215-237.
- [6] 郑习健. 珠江广州河段底泥的污染分析[J]. 长江建设, 1996, 5: 17-18.
ZHENG Xi-jian. Analysis of pollution of sediment in Pearl River in Guangzhou[J]. *Construction of Yangtze*, 1996, 5: 17-18.
- [7] 李仲根, 冯新斌, 何天容, 等. 王水水浴消解-冷原子荧光法测定土壤和沉积物中的总汞[J]. 矿物岩石学报, 2005, 24(2): 140-143.
LI Zhong-gen, FENG Xin-bin, HE Tian-rong, et al. Determination of total mercury in soil and sediment by aquaregia digestion in the water bath coupled with cold vapor atom fluorescence spectrometry[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24(2): 140-143.
- [8] 何天容, 冯新斌, 戴前进, 等. 萃取-乙基化结合 GC-CVAFS 测定土壤和沉积物中的甲基汞[J]. 地球与环境, 2004, 32(2): 83-86.

表 3 北江沉积物总汞和甲基汞污染评价

Table 3 Assessment of THg and MeHg pollution in sediments from the Beijiang River

采样点 编号	采样点名称	THg		MeHg	
		污染指数	评价等级	污染指数	评价等级
B1	浈江腊石坝	0.86	良好	30.68	中度
B2	武江十里亭	1.01	轻度	20.08	中度
B3	韶冶排口上游	1.81	轻度	14.74	中度
B4	韶冶排放口	179.25	重度	172.06	重度
B5	韶冶排口下游	17.59	重度	20.54	中度
B6	马坝河	3.4	中度	29.26	中度
B7	孟洲坝下游	2.67	中度	33.34	中度
B8	南水北江入河口	11.38	重度	44.3	中度
B9	白沙镇下	3.1	中度	42.86	中度
B10	大坑口下	3.18	中度	7.86	中度
B11	南华水厂	2.44	中度	47.68	中度
B12	英德大桥下	2.94	中度	22.28	中度
B13	山塘船厂对面	0.71	良好	21.78	中度
B14	龙塘河黄布村	0.39	良好	12.56	中度
B15	石角镇	1.04	轻度	42.72	中度
B16	龙塘河北丫	0.4	良好	16.18	中度
B17	龙塘河 105 国道	0.49	良好	28.3	中度
B18	大塘	0.92	良好	12.28	中度
B19	马房	0.37	良好	21.32	中度

- HE Tian-rong, FENG Xin-bin, DAI Qian-jin, et al. Determination of methyl mercury in sediments and soils by GC-CVAFS after aqueous phase ethylation[J]. *Earth and Environment*, 2004, 32(2):83-86.
- [9] 张丰松, 阎百兴, 何 岩, 等. 松花江冰封期江水和沉积物中汞形态研究[J]. *湿地科学*, 2007, 5(1):59-62.
- ZHANG Feng-Song, YAN Bai-Xing, HE Yan, et al. Speciation of mercury in water and sediments from the Songhua River during the Ice-bound season[J]. *Wetland Science*, 2007, 5(1):59-62.
- [10] 张少庆, 王起超, 赵明宪, 等. 葫芦岛市不同污染源河流汞污染特征研究[J]. *地球与环境*, 2008, 36(3):225-229.
- ZHANG Shao-qing, WANG Qi-chao, ZHAO Ming-Xian, et al. Study on the characteristics of mercury pollution in rivers of Huludao City contaminated by different sources[J]. *Earth and Environment*, 2008, 36(3):225-229.
- [11] 张 翠, 陈振楼, 毕春娟, 等. 黄浦江上游饮用水源地水及沉积物中汞、砷的分布特征[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(7):1455-1462.
- ZHANG Cui, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, et al. The distribution of Hg and As in water and sediment of the drinking water source area of the Huangpu River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(7):1455-1462.
- [12] 孙剑辉, 刘 群, 冯精兰, 等. 黄河中下游表层沉积物中汞和砷的污染研究[J]. *人民黄河*, 2009, 31(2):55-57.
- SUN Jian-hui, LIU Qun, FENG Jing-lan, et al. Study on pollution of Hg and As in surface sediment of lower reach of Yellow River[J]. *Yellow River*, 2009, 31(2):55-57.
- [13] Kanna k, Smith J R G, Lee R F, et al. Distribution of total mercury and methyl mercury in water, sediment and fish from South Florida Estuaries[J]. *Archives of Environment Contamination and Toxicology*, 1998, 34:109-118.
- [14] Kannan K, Falandysz J. Speciation and concentrations of mercury in certain coastal marine sediment[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1998, 103:129-136.
- [15] Mikac N, Niessen S, Ouddane B, et al. Speciation of mercury in sediments of the Seine Estuary (France)[J]. *Applid Organomrsllic Chemistry*, 1999, 13:715-725.
- [16] 白薇扬, 冯新斌, 金志升, 等. 河流对阿哈水库汞迁移转化过程的影响[J]. *矿物学报*, 2007, 27(2):218-224.
- BAI Wei-yang, FENG Xin-bin, JIN Zhi-sheng, et al. The influence of rivers on the transport and fate of mercury species in the AHA Reservoir[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2007, 27(2):218-224.
- [17] 冉祥滨, 于志刚, 陈洪涛, 等. 三峡水库蓄水至 135 m 后坝前及香溪河水域溶解无机汞分布特征研究[J]. *环境科学*, 2008, 29(7):1775-1779.
- RAN Xiang-bin, YU Zhi-gang, CHEN Hong-tao, et al. Distributions of dissolved inorganic mercury in the Lower Part of the Three Gorges Reservoir[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(7):1775-1779.
- [18] Heaven S, Ilyushchenko M A, Tanton T W, et al. Mercury in the river Nura and its floodplain, Central Kazakhstan: I. River sediments and water[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 260:35-44.
- [19] 高 博, 孙 可, 任明忠, 等. 北江表层沉积物中汞污染的生态风险[J]. *生态环境*, 2008, 17(2):528-532.
- GAO Bo, SUN Ke, REN Ming-zhong, et al. Ecological risk assessment of thallium pollution in the surface sediment of Beijiang River[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2):528-532.
- [20] Wong C S C, Duzgoren-Aydin N S, Aydin A, et al. Evidence of excessive releases of metals from primitive e-waste processing in Guiyu, China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148:62-72.
- [21] Ebinghaus R, Wilken R D, Gisder P. Investigations on the formation of monomethyl mercury(II) in the Elbe[J]. *Vom Wasser*, 1994, 82:19.
- [22] Falter R, wilken R-D. Isotope experiments for the determination of the abiotic mercury methylation potential of a River Rhine sediment[J]. *Vom Wasser*, 1998, 90:217-231.
- [23] Fu J J, Zhou Q F, Liu J M, et al. High levels of heavy metals in rice (*Oryza sativa* L.) from a typical e-waste recycling area in southeast China and its potential risk to human health[J]. *Chemosphere*, 2008, 71:1269-1275.
- [24] Tomiyasu T, Nagano A, Yonehara N, et al. Mercury contamination in the Yatsushiro Sea, South-western Japan: Spatial variations of mercury in sediment[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 257:121-132.
- [25] 李学杰. 广东大亚湾底质重金属分布特征与环境质量评价[J]. *中国地质*, 2003, 30(4):429-434.
- LI Xu-jie. Distribution of heavy metals in substrate of the Daya Bay, Guangdong and assessment of the quality of the seafloor environment[J]. *Geology in China*, 2003, 30(4):429-434.
- [26] 刘永懋, 王稔华, 翟平阳. 中国松花江甲基汞污染防治与标准研究[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- LIU Yong-fan, WANG Nian-hua, ZHAI Ping-yang. Study on prevention and criterion of methyl mercury of Songhua River in China[M]. Beijing:Science Press, 1998.

致谢:感谢中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室在汞与甲基汞分析中提供的帮助。