

浑河干流和大伙房水库沉积物中铊污染 及其潜在生态风险

苏 姣^{1,2}, 曾祥英^{1*}, 王 晨^{1,2}, 刘志阳^{1,2}, 于志强¹,
秦延文³, 郑丙辉³, 傅家谟¹

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国环境科学研究院 国家环境保护河口海岸带环境重点实验室, 北京 100012)

摘 要: 为初步了解浑河流域铊(Tl)污染现状, 以浑河干流(包括主要支流蒲河和细河)以及大伙房水库为研究对象, 共采集沉积物样品 59 份, 研究了沉积物中重金属 Tl 含量水平和分布特征, 并采用地质积累指数和潜在生态风险指数法进行了评价。研究结果显示, 浑河干流和大伙房水库表层沉积物有一定程度 Tl 污染累积, 部分区域面临较高程度生态风险。

关键词: 铊; 地质积累指数; 潜在生态风险指数法; 大伙房水库; 浑河

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2015)05-0421-06

Occurrence, distribution and risk assessment of thallium in sediments from the Hun River and Dahuofang reservoir

SU Jiao^{1,2}, ZENG Xiang-ying^{1*}, WANG Chen^{1,2}, LIU Zhi-yang^{1,2}, YU Zhi-qiang¹,
QIN Yan-wen³, ZHENG Bing-hui³ and FU Jia-mo¹

1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. State Environmental Protection Key Laboratory of Estuarine and Coastal Environment, Water Research Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

Abstract: For preliminary investigation of the levels of thallium (Tl) pollution in the Hunhe Basin, North China, 59 sediments samples were collected from the Hun River and its main tributaries (the Pu River and the Xi River), as well as the Dahuofang Reservoir, and then the occurrence and distribution of Tl in these sediments samples were analyzed. The potential ecological risks of Tl were calculated and assessed using Index of geoaccumulation (I_{geo}) as well as Lars Hakanson method based on the Tl data obtained in this study. The results indicate that the surface sediments in Hun River and Pu River generally show certain degree of Tl contamination, with some samples showing high ecological risks.

Key words: Tl; Index of geoaccumulation; potential ecological risk index; Dahuofang Reservoir; Hun River

0 引 言

由于重金属具有的毒性、持久性以及生物累积性, 长期以来, 重金属污染与防治的研究广受关注, 也一直是环境科学研究的热点之一。但是, 针对重

金属的相关研究多集中在 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、As 以及 Hg 等高关注重金属。虽然, 自然界中铊(Tl)含量水平一般较低, 但是以往的研究揭示 Tl 的毒性较 Pb、Cd、As 以及 Hg 等更强, 它不仅能抑制作物生长, 还能通过饮用水和食物链富集进入人体, 损害人体中枢神经系统和脏器, 甚至引起死亡, 美国

收稿日期(Received): 2015-01-22; 改回日期(Revised): 2015-03-16; 接受日期(Accepted): 2015-03-25

基金项目: 国家重大专项水专项(2009ZX07528-002-04)

作者简介: 苏姣(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境毒害污染物及其风险评估。E-mail: sujiao@gig.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): ZENG Xiang-ying, E-mail: zengxy@gig.ac.cn; Tel: +86-20-85292033

环保局已将Tl列为优控污染物,我国也于2011年正式将Tl列入《重金属污染综合防治“十二五”规划》^[1-3]。目前,针对环境介质中重金属的研究甚少涉及Tl的测定和评估,但环境中Tl污染与治理研究逐渐引起了环境领域研究人员和管理部门的关注^[2-7]。本课题组前期相关研究发现,受冶炼厂工业废水排放的影响,珠江水系北江支流沉积物中Tl污染严重,生态风险极高^[8];湘江流域^[4-5]以及三峡库区^[6]沉积物中,Tl污染所致的生态风险也非常显著,仅次于Cd。

浑河是我国东北部重要河流,浑河中游的大伙房水库更是周边城市(如抚顺和沈阳等)的重要饮用水源地。已有的研究表明,浑河流域内矿山开采和金属冶炼导致了流域沉积物中多种重金属(如Cu、Pb、Zn、Cd和Cr等)污染和累积,其中Cd污染最为严重,具有较强的生态风险^[9-10]。然而,关于浑河流域沉积物重金属污染的研究尚未涉及Tl污染。因此,本文拟以Tl作为研究对象,考察浑河干流及大伙房水库表层沉积物中Tl含量水平,并采用地质积累指数和潜在生态危害指数法定量评价浑河沉积物中Tl污染及其潜在生态危害。研究结果可提供和补充浑河流域重金属污染基础数据,为相关管理部门实施流域风险管理提供科学依据,也可为保障大伙房饮用水水质安全提供基础研究数据。

1 材料和方法

1.1 采样点设计

2010年7月,根据浑河干流的水动力条件、支流汇入以及污水排放等具体情况,在浑河干流上游河段(大伙房水库库前段)、大伙房水库、浑河干流下游河段(大伙房水库至入海口)以及两条重要支流(蒲河和细河)设立49个监测断面,共采集沉积物样品59个。其中,浑河干流上游设定采样断面13个;大伙房水库3条主要入库河流浑河、苏子河、社河入库口各设1个采样断面,库区内沿水流方向设立监测断面14个,抚顺取水口处设1个采样点,共采集表层沉积物样品28个;浑河干流下游采集表层沉积物样品共13个;蒲河与细河分别采集沉积物样品2个和3个。采样点示意图如图1所示。

1.2 样品采集、预处理与定量分析

样品采集后密封于塑料自封袋,全部置于-20℃冰箱中冷冻。样品分析前取出冷冻干燥,然后用玛

瑙研钵研磨达到测试要求。

所有化学处理均在中国科学院广州地球化学研究所同位素超净化学实验室(100级)进行。沉积物样品经HNO₃-HF-HNO₃消解后,以3% HNO₃稀释定容,并加入Ru作内标,用Elan 6000型电感耦合等离子体质谱仪测定Tl含量,Tl检测限为0.001 μg/L。每批样品中加入空白样品确保没有背景污染;同时,每批样品中同时分析购于国家地质实验测试中心的标准物质(GBW07129、GBW07103、GBW07104、GBW07105),目标化合物的回收率在90%~110%范围,所有样品均平行测定5次,RSD<5%。

1.3 风险评估

目前,针对沉积物重金属污染的评价方法较多,如内梅罗综合污染指数法、污染负荷指数法、沉积物质量基准法、地质积累指数(I_{geo})^[11]和生态风险指数法(E_r)^[12]等。这些评价方法各有优缺点,而且由于所采用的参数有所差异,评估结果也不完全相同。在本研究中采用地质积累指数(公式1)和生态风险指数法(公式2)评估浑河干流和大伙房沉积物中Tl污染累积程度及其潜在生态风险。

$$I_{geo} = \log_2[C_n/(K \times B_n)] \quad (1)$$

$$E_r = T_r \times C_n/B_n \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, C_n 是研究区域沉积物中Tl的实测值, B_n 是Tl的地球化学背景值;式(1)中 K 是考虑了各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数,一般取值为1.5;式(2)中 T_r 是重金属Tl的毒性响应系数。这两种评估方法中,Tl的地球化学背景值(B_n)都是关键的参数,其具体取值会显著影响评估结果。为了准确评估浑河流域Tl污染累积程度以及潜在的生态风险,本研究中采用了工业化前辽宁省泛滥平原沉积物中Tl含量作为背景值(0.65 mg/kg)^[13]。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中铊污染现状

表1中给出了浑河干流上游河段、大伙房水库、浑河干流下游河段以及两条主要支流沉积物中Tl含量范围以及高值点。

2.1.1 含量水平

从表中可以看出,研究区域沉积物中Tl含量变化较大,为0.16~0.82 mg/kg(均值0.56 mg/kg)。与国

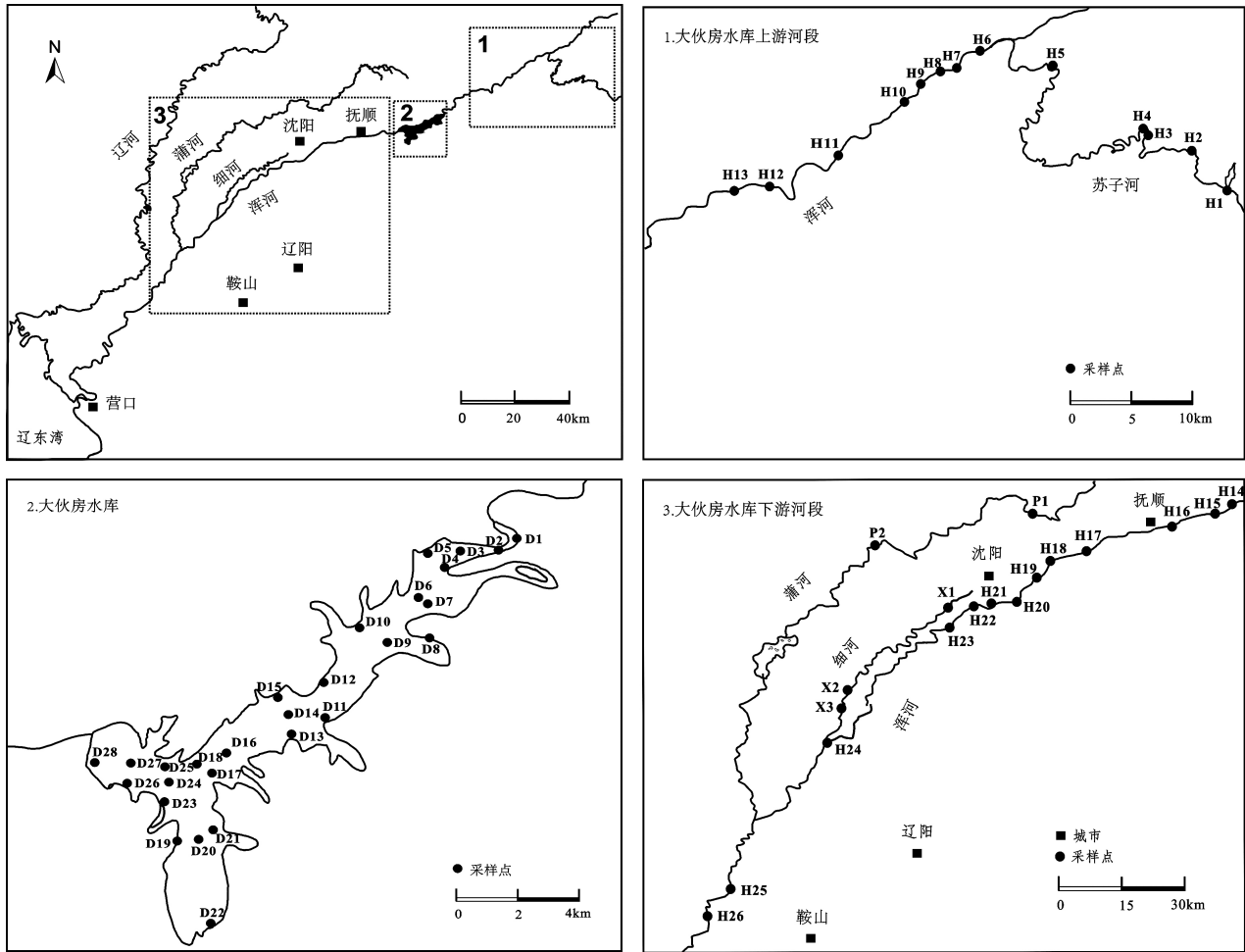


图 1 浑河干流及大伙房水库表层沉积物采样点示意图
Fig.1 Sampling sites in the Hun River and Dahuofang Reservoir

表 1 浑河干流和大伙房水库沉积物中 Tl 含量及风险等级

Table 1 Concentrations of Tl in sediments from the Hun River and Dahuofang Reservoir and related potential ecological risks

采样点	Tl 含量的平均值(范围)(mg/kg)	Tl 含量中值(mg/kg)	I_{geo}	E_r	高值点
浑河干流上游河段	0.47±0.15 (0.22~0.82)	0.45	-2.15 ~ -0.25	13.54~50.46	H11
浑河干流下游河段	0.48±0.14 (0.16~0.68)	0.46	-2.61 ~ -0.52	9.85~41.85	H16
大伙房水库	0.66±0.13 (0.16~0.74)	0.70	-2.61 ~ -0.40	9.85~45.54	D12
蒲河	0.70±0.16 (0.59~0.81)	0.70	-0.72 ~ -0.27	36.31~49.85	P1
细河	0.38±0.17 (0.27~0.58)	0.29	-1.85 ~ -0.75	16.62~35.69	X1

内主要河流沉积物相比, 本研究区域沉积物中 Tl 含量处于较低污染水平, 与三峡库区沉积物大致相当, 但明显低于珠江水系北江支流以及湘江流域^[4-6,8]。珠江水系北江支流受矿业开采以及金属冶炼废水排放的影响, 其沉积物中富集了很高浓度的 Tl (0.92~2.32 mg/kg)^[8]; 同样, 湘江流域沉积物中也有较高的 Tl 含量 (0.12~2.09 mg/kg)^[4-5]。与国外研究相比, 浑河流域沉积物中 Tl 含量高于德国 Munsterland 地区 (0.01~0.10 mg/kg)和 Sauerland 地区(0.01~0.07 mg/kg)

河流沉积物中 Tl 的含量^[14-15]。

2.1.2 空间分布特征及潜在污染源

从表 1 中可以看出, 浑河干流上游沉积物中 Tl 含量范围为 0.22~0.82 mg/kg(均值 0.47 mg/kg), 浑河干流下游沉积物中 Tl 含量范围为 0.16~0.68 mg/kg(均值 0.48 mg/kg), 大伙房沉积物中含量为 0.16~0.74 mg/kg(均值 0.66 mg/kg)。

总体而言, 浑河干流和大伙房沉积物中 Tl 含量与工业化前辽宁省泛滥平原沉积物中 Tl 含量大致相

当,也与辽宁省土壤背景值相当,表明研究区域 Tl 污染累积并不显著。但是,我们也注意到,在浑河干流上游河段 H11 采样点 Tl 含量(0.82 mg/kg)较其余采样点稍高,该采样点位于辽宁某矿业集团下游,沉积物中其余几种重金属(如 Cu、Pb、Zn 和 Cd 等)含量水平显著偏高^[16],揭示出矿业废水排放对河流沉积物中重金属含量和分布的影响;H12 采样点位于蓄水大坝之后,样品砂质,推测由于河流携带的泥沙颗粒沉淀于坝前,因此样品中 Tl 含量(0.22 mg/kg)主要为其岩石本底值。在浑河干流下游河段, H16 和 H17 沉积物中 Tl 含量分别为 0.68 和 0.64 mg/kg,推测重工业城市沈阳的工业废水以及生活污水可能是其主要输入来源。除浑河以外,大伙房水库还接纳社河、苏子河等支流入库,研究表明,仅库区中心数个采样点沉积物中 Tl 含量低于工业化前辽宁省泛滥平原沉积物中 Tl 含量,如 D2 (0.38 mg/kg)、D9 (0.16 mg/kg)、D17 (0.47 mg/kg),其余采样点 Tl 含量多高于该背景值,推测为各支流输入携带 Tl 进入大伙房水库并沉积下来。蒲河是浑河的重要支流,流经沈阳农业开发区, P1 沉积物中 Tl 为 0.81 mg/kg,表明一定程度含 Tl 工业废水的输入。细河是沈阳市工业区的工业废水和生活污水的排放渠道, X1 样品中 Cd、Ni 和 Pb 含量均为研究区域中的最高值^[16],但细河沉积物中 Tl 含量并不显著高。

2.2 生态风险评估

2.2.1 地质积累指数

采用 I_{geo} 评估重金属污染累积风险时,元素的背景值是评估关键参数,对评估结果影响显著。受地质背景和人类活动影响,我国不同区域中沉积物/土壤中 Tl 含量明显不同^[16]。此外,受矿物组成、有机质、可交换阳离子数量以及 pH 值等因素影响,同一区域内土壤/沉积物中 Tl 含量水平差异也较大^[13]。在本研究中,采用工业化前辽宁省泛滥平原沉积物 Tl 浓度作为评估参数,评估结果也列入表 1 中。依据此次地质积累指数评估结果,研究区域中 Tl 的 I_{geo} 均小于 1。参照常用的评估标准^[4],研究区域沉积物中 Tl 污染累积并不明显。

2.2.2 潜在生态风险指数法

1980 年瑞典学者 Håkanson^[12]提出了潜在生态风险评估方法。该方法基于污染物实测浓度和背景值,并综合考虑了污染物的毒性效应,从而更准确评估环境中污染物的潜在生态风险,尤其是能甄别一些环境浓度较低但毒性较大的污染物,这也是目

前较为常用的一种评估技术。本研究中也采用了工业化前辽宁省泛滥平原沉积物中 Tl 含量作为背景值, Tl 的毒性响应系数取值为 40^[8]。浑河干流上游、浑河干流下游、大伙房水库、蒲河以及细河沉积物中 Tl 的单因子生态风险指数(E_r)分别为 13.54~50.46、9.85~41.85、9.85~45.54、36.31~49.85 和 16.62~35.69。

目前,根据潜在生态风险指数划分污染等级的标准并不一致^[8,17]。依据不同标准所得到的风险等级也不相同。为了更好地保护水生生态系统安全,尤其是能更好地保护不同河流流域中可能的优势物种和敏感物种免于水体污染物的胁迫,论文参照胡朝晖等的划分标准^[17]进行初步风险评估。研究结果表明,浑河干流上游有 5 个采样点为轻度 Tl 污染($E_r < 25$), H11(E_r 为 50.46)为高度 Tl 污染($50 \leq E_r < 100$),其余 7 个采样点为中度 Tl 污染($25 \leq E_r < 50$)。浑河干流下游 3 个采样点为轻微 Tl 污染,其余采样点均面临中度污染;大伙房水库 28 个采样点中,仅 2 个采样点生态风险轻微(D2 和 D9),其余采样点均为中度生态。细河虽重要排污河,但 Tl 污染较轻。但蒲河呈现较为显著的点源排放特点,其生态风险达到中度(E_r 为 36.31 和 49.85)。

运用地质积累指数和潜在生态风险指数两种评价方法,我们获得不同的评价结果: I_{geo} 评价结果显示浑河干流和大伙房水库沉积物中 Tl 污染累积并不显著;但是潜在生态风险指数则揭示出研究区域沉积物中 Tl 呈现一定程度生态风险。两种评价结果似乎自相矛盾,这主要是因为两种评价方法所采用参数不完全相同。潜在生态风险指数方法不仅考虑了污染物浓度,还引入了污染物毒性响应系数作为关键的评估参数。我们知道,不同重金属毒性响应系数差异显著,例如,Zn 的毒性响应系数是 1,Cu 和 Pb 为 5,Cd 的毒性响应系数 30 是 Cu 和 Pb 的 6 倍,是 Zn 的 30 倍^[5]。Tl 的高毒性更为显著,目前研究多定义为 40^[8]。在本研究中, I_{geo} 评价结果显示研究区域中 Tl 污染累积并不明显,但由于其具有显著的毒性效应,潜在生态风险不容忽视。结合其他重金属生态风险评估结果^[16],浑河流域沉积物面临多种重金属复合污染,其中 Tl 污染所致的潜在生态风险仅次于 Cd。尤其值得注意的是,大伙房水库作为周边城市居民主要饮用水源地,其水体中 Tl 污染是否会导致人体健康风险,还需要开展进一步的研究;相关管理部门也需高度关注,并切实采取控制和消减措施,保护辽河流域生态系统安全和确保民众饮用水

安全。

笔者认为, 潜在生态风险指数法对低浓度、高毒性重金属的评估结果会与地质积累指数评价结果有一定差异, 但是结果也许更为准确客观。要准确评估重金属是否对研究区域水生系统造成潜在危害, 除了考察沉积物中重金属的累积程度, 重金属的分布赋存和毒理效应是不可忽视的、重要的考量因素。

3 结 论

受矿业开采和金属冶炼的影响, 浑河干流上游部分河段(如 H11)Tl 污染较显著, 具有高生态风险; 浑河干流下游城市河段受生活污水和工业废水影响, 部分沉积物中 Tl 含量增加, 生态风险也加剧; 蒲河接纳相关工业行业废水输入后, 沉积物中 Tl 也有所升高, 风险加剧; 大伙房水库沉积物中 Tl 分布广泛, 绝大部分采样点为中度生态风险。综合考虑浑河干流以及大伙房水库沉积物中多种重金属污染的现状, 多种重金属复合污染所致的潜在生态风险水平将显著升高。大伙房水库作为周边城市居民主要饮用水源地, 其水体中 Tl 污染是否会导致人体健康风险, 还需要开展深入的研究; 相关管理部门也需高度关注, 采取切实可行的管控措施, 确保辽河流域生态系统安全和民众饮用水安全。

参考文献(References):

- [1] Xiao T F, Yang F, Li S H, Zheng B S, Ning Z S. Thallium pollution in China: A geo-environmental perspective[J]. *Sci Total Environ*, 2012, 421-422: 51-58.
- [2] Jia Y L, Xiao T F, Zhou G Z, Ning Zeng-ping. Thallium at the interface of soil and green cabbage (*Brassica oleracea* L. var. *capitata* L.): Soil-plant transfer and influence factors[J]. *Sci Total Environ*, 2013, 450-451: 140-147.
- [3] 邓红梅, 陈永亨, 刘涛, 吴翠琴, 仇荣亮, 乌贵明, 曾冬媚. 铊在土壤-植物系统中的迁移积累[J]. *环境化学*, 2013, 32(9): 1749-1757.
Deng Hong-mei, Chen Yong-heng, Liu Tao, Wu Cui-qin, Qiu Rong-liang, Wu Gui-ming, Zeng Dong-mei. Study on the translocation and accumulation of thallium in soil-plant system[J]. *Environm Chem*, 2013, 32(9): 1749-1757 (in Chinese with English abstract).
- [4] 王晨, 曾祥英, 于志强, 盛国英, 傅家谟. 湘江衡阳段沉积物中铊等重金属的污染特征及其生态风险评估[J]. *生态毒理学报*, 2013, 8(1): 18-24.
Wang Chen, Zeng Xiang-ying, Yu Zhi-qiang, Sheng Guo-ying, Fu Jia-mo. Distribution and risk assessment of thallium and other metals in sediment from Xiangjiang River Hengyang

- Section[J]. *Asian J Ecotoxicol*, 2013, 8(1): 18-24 (in Chinese with English abstract).
- [5] 曾祥英, 王晨, 于志强, 秦延文, 张雷, 盛国英, 傅家谟. 湘江岳阳段沉积物重金属污染特征及其初步生态风险评估[J]. *地球化学*, 2012, 41(1): 63-69.
Zeng Xiang-ying, Wang Chen, Yu Zhi-qiang, Qin Yan-wen, Zhang Lei, Sheng Guo-ying, Fu Jia-mo. The occurrence, distribution and preliminary risk assessment of heavy metals in sediments from Xiangjiang River (Yueyang Section)[J]. *Geochimica*, 2012, 41(1): 63-69 (in Chinese with English abstract).
- [6] 贾旭威, 王晨, 曾祥英, 于志强, 盛国英, 傅家谟. 三峡沉积物中重金属污染累积及潜在生态风险评估[J]. *地球化学*, 2014, 43(2): 174-179.
Jia Xu-wei, Wang Chen, Zeng Xiang-ying, Yu Zhi-qiang, Sheng Guo-ying, Fu Jia-mo. The occurrence, accumulation and preliminary risk assessment of heavy metals in sediments from the main tributaries in the Three Gorges Reservoir[J]. *Geochimica*, 2014, 43(2): 174-179 (in Chinese with English abstract).
- [7] 万顺利, 马明海, 徐圣友, 钱丽萍, 张庆瑞. 水体中铊的污染治理技术研究进展[J]. *水处理技术*, 2014 (2): 15-19.
Wan Shun-li, Ma Ming-hai, Xu Sheng-you, Qian Li-ping, Zhang Qing-rui. Removal technology of thallium from wastewater: A review[J]. *Technol Water Treatment*, 2014 (2): 15-19 (in Chinese with English abstract).
- [8] 高博, 孙可, 任明忠, 梁细荣, 彭平安, 盛国英, 傅家谟. 北江表层沉积物中铊污染的生态风险[J]. *生态环境*, 2008, 17(2): 528-532.
Gao Bo, Sun Ke, Ren Ming-zhong, Liang Xi-rong, Peng Ping-an, Sheng Guo-ying, Fu Jia-mo. Ecological risk assessment of thallium pollution in the surface sediment of Beijiang River[J]. *Ecol Environ*, 2008, 17(2): 528-532 (in Chinese with English abstract).
- [9] 罗燕, 秦延文, 张雷, 郑丙辉, 贾静. 大伙房水库表层沉积物重金属分析与评价[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(5): 987-995.
Luo Yan, Qin Yan-wen, Zhang Lei, Zheng Bing-hui, Jia Jing. Analysis and assessment of heavy metal pollution in surface sediments of the Dahuofang reservoir[J]. *Acta Sci Circumst*, 2011, 31(5): 987-995 (in Chinese with English abstract).
- [10] 任泓泉, 胡成. 大伙房水库表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评估[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(1): 108-112.
Ren Hong-quan, Hu Cheng. Potential ecological risk assessment of heavy metal pollution in surface sediment of the Dahuofang reservoir[J]. *J Meteor Environ*, 2013, 29(1): 108-122 (in Chinese with English abstract).
- [11] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2: 108-118.
- [12] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Res*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [13] 颜文, 成杭新, 刘孝义. 辽宁省土壤中铊的时空分布、存在

- 形态及其环境意义[J]. 土壤学报, 1998, 35(4): 526-535.
- Yan Wen, Cheng Hang-xin, Liu Xiao-yi. Temporal and spatial distribution and fractions of thallium in soils of Liaoning Province and its implication to environment[J]. Acta Pedol Sinica, 1998, 35(4): 526-535 (in Chinese with English abstract).
- [14] McLaren J W, Beauchemin D, Beaman S S. Application of isotope dilution inductively coupled plasma mass spectrometry to the analysis of marine sediments[J]. Anal Chem, 1987, 59(4): 610-613.
- [15] Mathys W. Thallium in river sediments of North-West Germany: Its sources of input and its relation to other heavy metals[C]//Proceedings of the International Conference on Heavy Metals in the Environment. Luxembourg: Commission of the European Communities WHO, 1981: 347-350.
- [16] 王晨. 湘江、浑河以及三峡库区沉积物重金属污染特征及风险评估[D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2011: 84p.
- Wang Chen. The occurrence, distribution and risk assessment of heavy metals in sediments from Xiangjiang River, Hun River and the Three Gorge Reservoir Region[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2011: 84p (in Chinese with English abstract).
- [17] 胡朝晖, 张干, 丘耀文, 林田, 徐维海. 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.
- Hu Zhao-hui, Zhang Gan, Qiu Yao-wen, Lin Tian, Xu Wei-hai. Heavy metal pollution and their ecological risk assessment in surface sediments from Chinese coastal fishing harbors[J]. Geochimica, 2010, 39(4): 297-304 (in Chinese with English abstract).