## 金矿污染河流的水体和沉积物中重金属分布 特征及生态风险评价\*

于 靖<sup>1,2</sup> 张 华<sup>1#</sup> 蔡永兵<sup>1,2</sup> 周世伟<sup>1</sup>
 (1.中国科学院烟台海岸带研究所,海岸带环境过程与生态修复重点实验室,山东 烟台 264003;
 2.中国科学院大学资源与环境学院,北京 100049)

摘要 金矿开采导致严重的水体和沉积物重金属污染。采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP/MS)分析了金矿开采区河道 32 个采样点的水体和表层沉积物样品,研究了水样的溶解态及颗粒态重金属(As、Pb、Cd、Cr、Cu、Zn)组成;通过分步化学提取法研究 了各重金属在沉积物中的地球化学形态组成,利用地累积指数法和潜在生态风险指数法评价了河流沉积物中重金属污染状况。结 果表明:水体中 Cu、Zn、As 主要以溶解态存在,Pb、Cr、Cd 以颗粒态为主。水体中重金属元素形态分布主要受点源污染排放影响。 沉积物中,Cd 浓度较低;As、Zn 主要以氧化物结合态、有机物结合态和残渣态存在;Pb、Cr、Cu 以有机物结合态和残渣态为主。结合 地累积指数和潜在生态风险指数分析表明,Cd 和 Cu 为主要的风险元素。

关键词 金矿开采 沉积物 重金属形态 地累积指数 潜在生态风险 DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2015.12.001

**Distribution and ecological risk of heavy metals in water and sediments of a river polluted by gold mining** YU Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Hua<sup>1</sup>, CAI Yongbing<sup>1,2</sup>, ZHOU Shiwei<sup>1</sup>. (1.Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai Shandong 264003; 2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** Wastewater from gold mining can cause serious heavy metal pollution of water and sediments in rivers. In the present study, water and surface sediments were sampled at 32 points along the river in a gold mining area. The samples were analyzed by inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP/MS) for the particulate and dissolved concentration of As, Pb, Cd, Cr, Cu, Zn. Sequential chemical extractions were conducted to examine the chemical speciation of heavy metals in sediments. Results showed that, in water samples, Cu, Zn, As mainly existed in the dissolved form while Pb, Cr, Cd distributed in the particulate form. The speciation of heavy metals in water was mainly controlled by wastewater discharges. As and Zn in sediments mainly existed in the oxides-bounded, organic-bounded or residual form, while a large fraction of Pb, Cr, and Cu was in the organic-bounded or residual form. The concentrations of Cd were in low level. Using geoaccumulation index and potential ecological risk index to assess the heavy metals, Cd and Cu were the priority risk elements.

Keywords: gold mining; sediments; speciation of heavy metals; geoaccumulation index; potential ecological risk

矿山开采产生的矿坑水和尾矿渣以及矿石冶炼 过程中的废水都会对周边水体产生污染<sup>[1]</sup>,特别是 废石和矿渣中有毒重金属淋溶释放导致的水体和沉 积物污染,严重威胁生态环境和人体健康<sup>[2]</sup>;频繁发 生的河流重金属污染,甚至会造成公众恐慌,影响社 会稳定和经济发展。由于重金属不可降解,其毒性 效应会长期存在<sup>[3-4]</sup>。已有研究表明,矿山停采上百 年后,仍然会持续释放重金属元素<sup>[5]</sup>。

重金属在水体和沉积物中往往具有不同的物理 或化学形态。水体中的重金属通常分为溶解态和颗 粒态<sup>[6-7]</sup>。沉积物中的重金属常分为可交换态、碳酸 盐结合态、铁氧化物结合态、锰氧化物结合态、有机 物结合态和残渣态等6种形态,不同形态之间存在 明显的生物毒性和环境效应差异<sup>[8-10]</sup>。水体和沉积 物中的重金属存在动态交换<sup>[11]</sup>,水体中的重金属可 以通过吸附、沉降等过程进入沉积物<sup>[12-13]</sup>,沉积物中 的重金属又可通过解吸、溶解、悬浮等过程进入水体 引起二次污染<sup>[14-16]</sup>。环境化学条件如pH、离子组成 和强度、有机质含量以及氧化还原状态的改变都会 影响重金属元素的形态和分布。正确认识河流中重

第一作者:于 靖,女,1989年生,博士研究生,研究方向为环境水文过程与模拟。#通讯作者。

<sup>\*</sup>国家自然科学基金资助项目(No.41271506)。

金属的行为和归趋,需要深入研究其在水体和沉积 物中的形态组成和分布特征。

有中国金都之称的山东招远市,是我国重要的 黄金生产基地之一,有上千年开采历史。探明黄金 储量 750 t,2013 年自产黄金总量达 105.8 万两,居 全国首位。现有大小金矿 120 多个,其中规模较大 的金矿有 20 多个<sup>[17]</sup>。界河上游玲珑镇和张星镇一 带,是主要的黄金生产基地。长期大范围金矿开采 产生的矿坑水、洗矿废水、冶炼废水以及尾矿库渗水 等,已经造成了界河(特别是其上游的罗山河)的严 重重金属污染。因此,本研究以界河流域为研究对 象,系统研究了水体和沉积物中 As、Pb、Cd、Cr、Cu、 Zn 6 种重金属的分布特征和形态组成,以期为界河 流域的环境风险评价和污染治理提供科学指导。

1 材料与方法

## 1.1 样品采集与处理

2012 年 3 月,沿上游支流罗山河至界河下游入 海口进行样品采样,采样点分布见图 1。采样断面 主要设置在重要支流和点源汇入位置,全程共设 32 个采样点,从河流上游至入海口分别标记为S1~



**图 1 采样点分布** Fig.1 Locations of sampling sites

• 2 •

S32。每个采样点采集水样和沉积物样,同时现场测 定水样的 pH 和电导率(EC),结果见表 1。

表 1 采样点水体 pH 与 EC Table 1 pH and EC of water samples in sampling sites

采样点	pН	$\frac{\text{EC}}{/(\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1})}$	采样点	pН	$\frac{\text{EC}}{/(\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1})}$	
S1	7.5	0.2	S17	6.8	2.6	
S2	7.6	2.7	S18	6.6	6.7	
S3	7.5	3.0	S19	7.0	3.2	
S4	7.4	2.8	S20	7.1	3.8	
<b>S</b> 5	7.4	2.8	S21	5.1	6.2	
S6	4.7	4.3	S22	7.3	4.2	
S7	4.9	4.2	S23	7.3	3.6	
S8	5.2	4.5	S24	7.5	4.1	
S9	5.5	4.3	S25	7.4	4.4	
S10	5.1	4.4	S26	7.4	4.4	
S11	4.0	4.2	S27	7.5	3.3	
S12	6.3	7.2	S28	7.5	3.2	
S13	5.8	5.8	S29	7.5	3.1	
S14	7.4	2.2	S30	7.8	2.5	
S15	7.4	2.2	S31	7.9	2.6	
S16	7.3	2.0	S32	7.2	3.6	

用塑料桶采集 0.65 m 以上的表层水样,置于洁 净的聚乙烯瓶中,冷藏保存;表层沉积物的采集按照 美国环境保护署(USEPA)的方法,在每个采样点 30 m 范围内采集多个沉积物(0~10 cm)样品,混合后 除去杂物,用塑料工具取未与铁铲接触的沉积物样 品装于聚乙烯袋中冷冻保存。

1.2 样品分析

取两份水样,一份水样经 0.45 μm 的 Millipore 纤维滤膜过滤;一份不作处理,用超纯水作为空白对 照。过滤前后水样分别加入总体积 1%的浓硝酸酸 化,重金属浓度通过美国 PerkinElmer 的电感耦合 等离子体质谱仪(ICP/MS)测定。

沉积物样品分析前冷冻干燥,经研钵研磨后过 100 目尼龙网筛,采用改进的 6 步提取法<sup>[18-19]</sup>提取 重金属的形态,用 ICP/MS 测定。采用国家标准土 壤样品以相同的分析程序和测定步骤进行分析方 法的质量控制,每个沉积物样品设置 3 个平行样进 行实验。

1.3 地累积指数法

应用 MULLER<sup>[20]</sup>提出的地累积指数法对沉积 物的重金属污染进行评价,其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(c_n / (K \times B_n)) \tag{1}$$

式中: $I_{geo}$ 为地累积指数; $c_n$ 为重金属n在沉积物中的质量浓度,mg/kg;K为考虑各地岩石差异可能引起背景值变化的系数,通常取 1.5; $B_n$ 为重金属n在普通页岩中的地球化学背景值,本研究采用山东省

东部地区土壤重金属地球化学背景值<sup>[21]</sup>,As、Cd、 Cr、Cu、Pb、Zn 的背景值分别为 6.3、0.108、56.2、 19.6、25.4、56.1 mg/kg。

国外研究者 FORSTNER 等<sup>[22]</sup> 将地累积指数 分为7个等级,当 $I_{geo} < 0$ 、 $0 \le I_{geo} < 1$ 、 $1 \le I_{geo} < 2$ 、  $2 \le I_{geo} < 3$ 、 $3 \le I_{geo} < 4$ 、 $4 \le I_{geo} < 5$ 、 $I_{geo} \ge 5$ 时,污染 程度分别为无污染、无污染到中度污染、中度污染、 中度污染到强污染、强污染、强污染到极强污染、极 强污染。

1.4 潜在生态风险指数法

瑞典学者 HAKANSON<sup>[23]</sup>提出的潜在生态风险 指数法综合考虑了沉积物中各种重金属的浓度效应、 不同重金属的毒性效应以及多种重金属复合污染的 协同效应,既能反映单一重金属的污染风险,也能反 映多种重金属污染的综合影响,其计算公式如下:

$$RI = \sum E_n = \sum T_n \times c_n / B_n \tag{2}$$

式中:RI为多种重金属的潜在生态风险指数; $E_n$ 为 重金属 n的潜在生态风险指数; $T_n$ 为重金属 n的毒 性响应系数,As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn的毒性响应系数 分别为 10,30,2,5,5,1。当  $E_n < 40,40 \le E_n < 80$ 、  $80 \le E_n < 160,160 \le E_n < 320, E_n \ge 320$ 时,重金属 n的潜在生态风险分别为轻微、中等、强、很强、极 强。RI反映了沉积物在综合污染条件下的潜在生 态风险指数,当 $RI < 150,150 \le RI < 300,300 \le RI$  $< 600,RI \ge 600$ 时,多种重金属的潜在生态风险分 别为低度、中等、强、极强。

2 结果与讨论

2.1 河流水体的重金属浓度分布和组成形态

由图 2 可见,总 As 质量浓度为 1.9 ~1 004.0  $\mu$ g/L,其中 S6 由于受到化工厂酸性矿山废水的影 响,质量浓度达到1 004.0  $\mu$ g/L;S22 受到金翅岭金 矿排水沟的影响,质量浓度为 460.0  $\mu$ g/L。溶解态 As 质量浓度为 1.6~833.1  $\mu$ g/L,S21 及其上游水体 中 As 主要以溶解态形式存在,而 S22 主要以颗粒 态存在。Zn 的空间分布和组成特征与 As 相似,总 Zn 质量浓度为 105~11 336  $\mu$ g/L,S6、S22 分别达 到 9 585、11 336  $\mu$ g/L。溶解态 Zn 质量浓度为 23~ 9 646  $\mu$ g/L。河流水体中总 Pb 质量浓度为 7.9~ 9 528.0  $\mu$ g/L,溶解态 Pb 质量浓度为 0.3~237.0  $\mu$ g/L,Pb 主要以颗粒态的形式存在。S22 的总 Pb 质量浓度最大,为 9 528.0  $\mu$ g/L。Cd 的浓度分布同 Pb 基本一致,总 Cd 质量浓度为 2.0~855.2  $\mu$ g/L, 溶解态 Cd 质量浓度为 0.1~37.5  $\mu$ g/L,主要以颗粒 态的 形式存在,S22 的总 Cd 质量浓度为 855.2  $\mu$ g/L。总 Cu 和溶解态 Cu 质量浓度分别为 52.0~8 494.0、0.4~7 673.0  $\mu$ g/L,Cu 以溶解态为主。总 Cr 和溶解态 Cr 质量浓度分别为 4.2~210.0、1.1~ 24.8  $\mu$ g/L。S10 和 S22 的总 Cr 质量浓度最高,分别 为 182.0、210.0  $\mu$ g/L,Cr 主要以颗粒态存在。可见, 金翅岭金矿排水沟是 6 种重金属的重要污染来源。

河流水体中多处重金属浓度超过了《地表水环 境质量标准》(GB 3838—2002)的 V 类水标准,表明 水体存在严重的重金属污染。除 S22 外,As、Zn、 Pb、Cd 的主要超标点位集中在 S6~S13,这些采样 点的 pH 普遍较低(见表 1),主要是因为该河段位于 罗山河上游,受酸性矿山废水影响较大。除 S11 外, Cu 超标的采样点集中在 S22~S28,说明 Cu 的污染 主要来源于金翅岭金矿排水沟。Cr 污染相对较轻, 只有 S10 和 S22 超标。

2.2 沉积物中重金属浓度分布和组成形态

由图 3 可见,沉积物中总 As、总 Zn、总 Pb、总 Cd、总Cu、总Cr的质量浓度分别为9~182、53~ 5 484,  $10 \sim 1$  100,  $0 \sim 52$ ,  $22 \sim 1$  525,  $24 \sim 726$ mg/kg。总As浓度较高的点主要在S6、S7、S12、 S14 和 S22 周边,这些点附近分布着化工厂、轮胎厂 和金翅岭金矿等污染源。总 Zn 浓度总体较低,但在 轮胎厂附近的 S14 和金翅岭金矿附近的 S22,  $\therefore$  Zn 质量浓度明显高于其他采样点,分别达到 5 484、 2.759 mg/kg。总 Pb 质量浓度的最大值出现在 S6 (1 042 mg/kg)和 S22(1 100 mg/kg)。总Cd浓度 除 S22 外普遍较低。总 Cu 质量浓度除 S14、S22 分 别达到1525、1366 mg/kg外, $S1 \sim S4$ 的浓度也较 高,可能来自周边分布的尾矿库。总 Cr 的浓度普遍 较高。重金属能通过物理过程和化学反应在河流沉 积物中产生累积现象[24]。在适当的环境条件下,累 积在沉积物中的重金属元素又会通过解吸、颗粒再 悬浮和矿物溶解等过程释放到水体中。在雨季河水 流量增大的情况下,沉积物中携带重金属元素颗粒 的再悬浮作用明显,但本研究在枯水期进行,水体和 沉积物中的重金属主要来源于点源污染的废水排 放。进一步分析发现,沉积物重金属含量呈现随距 离递减的规律,但不同元素递减程度不同。其中 Pb 和 Cd 的迁移性较弱,主要集中在污染源下游 3 km 以内,但Cr 有很强的迁移能力。



• 4 •





• 5 •



• 6 •



• 7 •

沉积物重金属不同形态之间存在明显的生物 毒性和环境效应差异,因此,总量分析不能全面反 映重金属的污染特征<sup>[25]</sup>。由于沉积物中 Cd 除 S22 外浓度较低,没有对 Cd 进行形态分析。As、 Zn、Pb、Cu、Cr 5 种重金属的形态分析如图 4 所示。 As 主要以残渣态、有机物结合态、铁氧化物结合态 为主,碳酸盐结合态所占比例较低。Zn 的可交换 态所占比例较小,为 0~37.51%;由于碳酸盐结合 态在酸性条件下容易释放,因此 S6~S13 中,Zn 的 碳酸盐结合态比例较低。Cu 以有机物结合态为 主,约占总量的一半,这是因为 Cu 与有机颗粒及 其覆盖层有较强的亲和力。Pb 和 Cr 的形态组成 类似,均以有机物结合态和残渣态为主,可交换态 比例极低。 2.3 沉积物重金属污染评价

界河各采样点的  $I_{geo}$  如图 5 所示, As 的  $I_{geo}$  为 -0.301~4.265,大多数采样点处于中度污染到强 污染。Zn 的  $I_{geo}$  为-0.655~6.026,大多数采样点 处于或超过中度污染。Pb 的  $I_{geo}$  为-1.950~ 4.851,总体污染较轻,有 31% 的采样点属于无污 染,仅有 4 个采样点属于强污染或强污染到极强污 染。Cd 的  $I_{geo}$  为-0.703~8.322,62% 的采样点处 于或超过强污染。Cu 的  $I_{geo}$  为-0.410~5.697,仅 在 S30 处无污染,50% 的采样点污染程度为中度污 染到强污染、强污染。Cr 的  $I_{geo}$  为-1.808~3.107, 总体污染程度为中度污染、中度污染到强污染。

如表2所示。

项目 -	$E_n$						
	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	- RI
S1	81.0	555.6	3.1	325.5	38.4	17.5	1 021.1
S2	60.3	833.3	6.1	270.7	41.5	23.1	1 235.1
S3	38.1	555.6	3.9	179.1	30.5	16.5	823.6
S4	44.4	555.6	3.5	227.6	38.8	18.2	888.0
<b>S</b> 5	14.3	0	25.8	78.1	12.6	4.5	135.3
S6	185.7	555.6	5.8	90.6	205.1	13.3	1 056.0
S7	185.7	0	19.3	19.6	31.3	2.2	258.2
S8	152.4	277.8	7.9	50.5	41.5	3.5	533.7
S9	123.8	0	13.8	28.6	21.5	1.7	189.4
S10	87.3	0	23.5	29.3	21.1	1.6	162.8
S11	139.7	0	14.2	80.6	53.3	2.0	289.9
S12	192.1	0	21.9	54.6	20.9	1.6	291.0
S13	119.0	277.8	20.6	54.3	15.9	1.9	489.7
S14	190.5	833.3	8.8	389.0	48.6	97.8	1 568.0
S15	98.4	1 388.9	17.9	83.4	17.1	8.6	1 614.3
S16	71.4	277.8	14.7	54.6	9.6	2.6	430.7
S17	52.4	277.8	16.5	33.7	7.3	3.4	391.1
S18	12.7	555.6	0.9	14.5	4.3	3.4	591.4
S19	30.2	833.3	11.0	53.8	21.5	6.2	956.0
S20	30.2	1 111.1	6.8	37.2	9.8	7.2	1 202.4
S21	84.1	1 666.7	4.2	73.7	11.6	13.1	1 853.4
S22	288.9	4 444.4	1.9	348.5	216.5	49.2	5 349.4
S23	136.5	5 000.0	7.8	254.3	67.3	24.8	5 490.7
S24	152.4	1 666.7	22.2	278.1	115.4	13.2	2 247.8
S25	76.2	833.3	25.4	44.1	3.9	4.7	987.7
S26	46.0	833.3	25.4	79.1	3.3	4.5	991.7
S27	20.6	277.8	4.2	65.8	3.1	2.6	374.2
S28	23.8	277.8	15.2	50.3	2.0	2.8	371.8
S29	27.0	555.6	1.7	37.0	7.3	4.2	632.7
S30	17.5	0	3.8	5.6	2.8	0.9	30.6
S31	42.9	555.6	10.4	78.8	4.5	4.4	696.6
S32	33.3	277.8	18.1	17.1	4.1	3.3	353.7
均值	89.3	1 102.4	12.1	109.0	35.4	11.4	1 359.6

表 2 界河沉积物重金属潜在生态风险指数 Table 2 Potential ecological risk index of heavy metals in sediments from Jie River

• 8 •

从单个重金属潜在生态风险指数均值分析,6 种重金属的潜在生态风险大小为 Cd>Cu>As> Pb>Cr>Zn。尽管 Cd 在沉积物中的浓度较低,但 由于其毒性响应系数最大导致 Cd 的潜在生态风险 最强( $E_{cd}$ 均值为 1 102.4),其中 56%的采样点生态 风险处于极强以上。从多种重金属潜在生态风险指 数来看,除 S5 和 S30 的 RI<150 外,其余采样点都 呈现中等及中等以上风险。

从两种评价方法来看,评价结果具有一定的一 致性, *I*<sub>seo</sub>和 *RI* 均显示 Cd 和 Cu 为主要的风险 元素。

## 3 结 论

(1) 总 As、总 Zn、总 Pb、总 Cd、总 Cu、总 Cr在水体中的质量浓度分别为 1.9 ~1 004.0、105~
11 336、7.9~9 528.0、2.0~855.2、52.0~8 494.0、
4.2~210.0 μg/L,在沉积物中的质量浓度分别为
9~182、53~5 484、10~1 100、0~52、22~1 525、
24~726 mg/kg。

(2)水体中 Cu、Zn、As 主要以溶解态存在,Pb、 Cr、Cd 以颗粒态存在。沉积物中,As、Zn 主要以氧 化物结合态、有机物结合态和残渣态存在,Pb、Cr、 Cu 以有机物结合态和残渣态存在。

(3) 地累积指数法和潜在生态风险指数法一致 表明 Cd 和 Cu 为主要的风险元素。

## 参考文献:

- [1] 李如忠,姜艳敏,潘成荣,等.典型有色金属矿山城市小河流沉
   积物重金属形态分布及风险评估[J].环境科学,2013,34(3):
   1067-1075.
- [2] 杨歌,周跃,贝荣塔,等.滇东南矿区河流底泥重金属污染潜在 生态风险评价[J].环境科学导刊,2007,26(1):80-82.
- [3] 朱程,马陶武,周科,等.湘西河流表层沉积物重金属污染特征 及其潜在生态毒性风险[J].生态学报,2010,30(15):3982-3993.
- [4] 吉芳英,王图锦,胡学斌,等.三峡库区消落区水体-沉积物重金 属迁移转化特征[J].环境科学,2009,30(12):3481-3487.
- [5] EQUEENUDDIN S M, TRIPATHY S, SAHOO P K, et al. Metal behavior in sediment associated with acid mine drainage stream; role of pH[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013,124(1):230-237.
- [6] JACKSON B P,RANVILLE J F,BERTSCH P M, et al. Characterization of colloidal and humic-bound Ni and U in the "dissolved" fraction of contaminated sediment extracts[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 9(8): 2478-2485.
- [7] POKROVSKY O S, SCHOTT J, DUPRE B. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and porewaters of permafrost-dominated basaltic terrain in Central Siberia [J].

Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(13): 3239-3260.

- [8] TESSIER A, CAMPBELL P, BISSON M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7):844-851.
- [9] 杜晓丽,曲久辉,刘会娟,等.温榆河水体中重金属含量分布及 赋存状态解析[J].环境科学学报,2012,32(1):37-42.
- [10] 刘恩峰,沈吉,杨丽原,等.南四湖及主要入湖河流表层沉积物 重金属形态组成及污染研究[J].环境科学,2007,28(6): 1377-1383.
- [11] 王海,王春霞,王子健.太湖表层沉积物中重金属的形态分析 [J].环境化学,2002,21(5):430-435.
- [12] ALTINDAG A, YIGIT S.Assessment of heavy metal concentrations in the food web of Lake Beysehir, Turkey [J].Chemosphere, 2005, 60(4): 552-556.
- [13] 胡朝晖,张干,邱耀文,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.
- [14] 王鸣宇,张雷,秦延文,等.湘江表层沉积物重金属的赋存形态 及其环境影响因子分析[J].环境科学学报,2011,31(11): 2447-2458.
- [15] 余辉,张文斌,余建平.洪泽湖表层沉积物重金属分布特征及 其风险评价[J].环境科学,2011,32(2):437-444.
- [16] KAPLAN D I, POWELL B A, DUFF M C, et al. Influence of sources on plutonium mobility and oxidation state transformations in vadose zone sediments[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(21):7417-7423.
- [17] 侯新文,尹明泉,尹志轩,等.招远玲珑金矿废石模拟淋滤试验 分析[J].北京工业大学学报,2010,36(11):1541-1547.
- [18] WELTE B, BLES N, MONTIEL A. Study of the different methods of speciation of heavy metals in the sediments: []. applications[J]. Science & Technology Letters, 1983, 4(5): 223-238.
- [19] HOWARD J L, VANDENBRINK W J. Sequential extraction analysis of heavy metals in sediments of variable composition using nitrilotriacetic acid to counteract resorption[J].Environmental Pollution, 1999, 106(3):285-292.
- [20] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J].GeoJournal, 1969, 2(3):108-118.
- [21] 代杰瑞,庞绪贵,喻超,等.山东省东部地区土壤地球化学基准 值与背景值及元素富集特征研究[J].地球化学,2011,40(6): 577-587.
- [22] FORSTNER U, MULLER G.Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hycarbons in river sediments; geochemical background, man's influence and environmental impact[J].GeoJournal, 1981, 5(1): 417-432.
- [23] HAKANSON L.An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment logical approach [J]. Water Research, 1980,14(8):975-1001.
- [24] CARUSO B S, DAWSON H E.Impacts of groundwater metal loads from bedrock fractures on water quality of a mountain stream[J].Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 153(1):405-425.
- [25] 张凤英,阎百兴,朱立禄.松花江沉积物重金属形态赋存特征 研究[J].农业环境科学学报,2010,29(1):163-167.

编辑:陈锡超 (收稿日期:2015-03-28)