

松花江上游金矿开采区河流水体和沉积物中汞的污染特征及风险评估

李雅芬¹, 王景², 王宁^{1*}

(1.东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024; 2.中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102)

摘要:通过采集松花江上游夹皮沟金矿开采区附近河流的水和沉积物样品,研究了因金矿开采带来的汞和甲基汞污染的分布特征和规律。结果表明:该区域河流水中总汞含量的分布规律表现为河流上游高于下游,尤其是有金矿的河流,随距金矿距离加大而汞含量降低;沉积物却相反,距开采区距离较远的采样点呈现较高的总汞含量。水中汞和甲基汞含量的最高值均出现在夹皮沟河段,分别为 $0.86 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;沉积物中汞和甲基汞含量的最高值出现在老金厂和二道沟河段,分别为 $9.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.02 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。应用单因子指数法对水中汞和甲基汞污染进行评估可知:22.22%的河段呈现汞的重度污染,其余为中度污染,甲基汞均为重度污染;地累积指数法与潜在生态风险系数评价方法显示沉积物中的汞污染非常严重,存在很高的环境风险和生态风险,应引起人们的高度重视。

关键词:金矿开采区;总汞;甲基汞;水;沉积物;风险评估

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)03-0622-07 doi:10.11654/jaes.2013.03.031

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Mercury Pollution in the River Water and Sediment of the Songhua River Upstream Gold Mining Area

LI Ya-fen¹, WANG Jing², WANG Ning^{1*}

(1.School of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China; 2.Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China)

Abstract: The distribution characteristic of mercury pollution caused by gold mining and transformation rules of mercury and methylmercury were studied through collecting water and sediment samples of the river near the Jiapigou goldfield located in the upper reaches of the Songhua River. The results show that total mercury content of the upstream river water is higher than the downstream river water, in particular, the mercury content reduces with increasing distance from the mining area when the river is near gold mine. However, in the sediment, the higher total mercury content is found in the lower reaches of the river and upper stream samples show lower total mercury content. Both of the highest total mercury content and methylmercury content of water samples are detected in the jiapigou river section, which is $0.86 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ and $4.14 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively. The highest total mercury content of sediment samples is detected in the laojinchang river section, and the highest methylmercury content of sediment samples is detected in the erdaogou river section, which is $9.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $4.02 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively. The results of mercury and methylmercury assessment show that severe mercury pollution is found in 22.22% of the river water and moderate mercury pollution is found in the else river section, and methylmercury pollution is severe in whole river water based on single factor index method. It can be found that the mercury pollution in the river sediment is very serious based on the geo-accumulation pollution index method and the potential ecological risk assessment method. The pollution situation is high environmental risk and ecological risk, it should be paid high attention by people.

Keywords: gold mining area; total mercury; methylmercury; surface water; sediment; risk assessment

重金属元素具有不可降解、易积累、毒性大的特征,且存在通过食物链危害人类健康的潜在危险,一

直备受国内外学者的高度关注,重金属污染已经成为水环境污染评价的重要内容^[1]。水体中的重金属易与有机高分子生成配合物或螯合物,吸附在黏土矿物等表面,进入沉积物中并积累,吸附重金属的沉积物在一定条件下,又会重新释放出重金属,造成二次污染^[2-3]。因此,河流沉积物是水环境安全的指示剂,沉积

收稿日期:2013-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(40673059)

作者简介:李雅芬(1987—),女,天津市人,硕士研究生,研究方向为环境物质地表过程及生态效应。E-mail:liyf990@nenu.edu.cn

*通信作者:王宁 E-mail:nwang@nenu.edu.cn

物中的重金属是水环境污染的指示者,能够准确反映水体被污染的程度^[4-6]。

重金属汞在水体中的污染特征非常明显,易于沉积在沉积物中,并在一定条件下,转化成甲基汞而通过水生生物的食物链作用对生物产生危害。甲基汞是一种具有很强神经毒性的污染物,在生物体内的靶器官是神经细胞和脑细胞,均会造成极大的损伤^[7-8]。河水及沉积物中的汞分布变化具有相关性,沉积物因悬浮作用向水中释放汞又导致河水中较高的汞含量维持较长时间^[9-10]。因此,研究河流及沉积物中重金属汞及甲基汞的分布,对了解重金属汞对水环境的影响具有重要意义^[11-12]。

本文以东北地区夹皮沟金矿开采区内主要河流为研究对象,采用单因子指数法(Single factor index)、地累积指数法(The geo-accumulation pollution index)和潜在生态危害指数法(The potential ecological risk index)等方法评价河流和沉积物中汞和甲基汞的污染状况,并进行了环境和生态风险的评估,为控制该地区河流水体的污染提供依据^[13-16]。

1 研究区概况

松花江上游以夹皮沟金矿为代表的金矿区,1820 年发现,1845 年确定为岩金大矿脉,有组织有规模地开始了黄金的开采。夹皮沟金矿位于吉林省桦甸市东部,是一个典型的山区,地势东南高、西北低,境内由北向南分布有老牛沟河、夹皮沟河和山麻河,均从东向西汇入苇沙河,再经红石汇入第二松花江^[17]。夹皮沟地区为一个北西-南东向深大断裂带,分布有夹皮沟、老牛沟、老金厂和板庙子等大小众多的金矿,除板庙子金矿在区域西北侧以外,老牛沟金矿位于老牛

沟河上,夹皮沟和老金厂金矿分布在夹皮沟河上,开采历史悠久,目前,老金厂金矿已枯竭废弃,其他金矿仍在开采,并在五道岔附近有尾矿库分布。该区内除了黄金开采和少量铁矿外,无其他采矿业和工业生产^[22]。该矿山一直使用混汞法提金^[18-19]。生产过程中汞通过汞膏由于加热挥发形成汞蒸气、尾矿和废液以及剩余粗金等形式进入环境,对大气、水体、沉积物和当地生物造成一定的影响和危害。虽然我国自 2000 年以后已全面停止使用混汞法炼金,夹皮沟等金矿在 2006 年到 2008 年也逐步以全泥氰化法替代了该工艺。但长期应用混汞法,每年因提金使用的汞多达 20 kg 左右,其中 50%~60%通过点源和非点源途径进入各种环境介质中,也造成了当地河流的严重污染^[18,20-21]。

本课题组从 2006 年至 2010 年在夹皮沟金矿开采区进行了全面的重金属汞的污染调查,多次对当地河流和沉积物进行了采样分析,得出了大量的数据和资料。河水和沉积物的采样时间一般在每年 4 月末和 9 月末,均为平水期。本论文中取多次测定结果的平均值。

2 材料与方法

2.1 样品采集及保存

以夹皮沟金矿开采区内主要河流老牛沟河、夹皮沟河、山麻河为调查对象,并以 3 条河流汇入的第二松花江红石作为控制断面,由于河流蜿蜒,并沿山谷分布,采样比较困难。因此根据每条河流的具体情况设置 2~4 个采样断面,在每年 4 月和 9 月的平水期取样。采样断面见图 1 所示。使用聚乙烯塑料桶采集 2 L 水样,同时使用自制沉积物采样器采集不少于 100

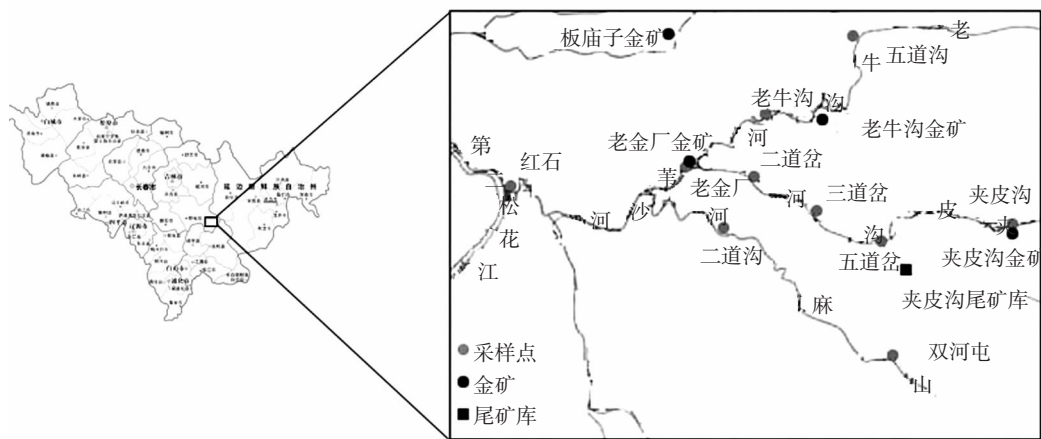


图 1 河流、沉积物采样点位置示意图

Figure 1 The sampling sites of river water and sediment in study area

g 的沉积物,为了反映近期污染状况,仅采集河流表层沉积物(0~10 cm)的样品,分别装入自封袋中,封口保存,以防止污染^[23]。

水样保存按照 GB 7468—1987 中水样的处理方法。沉积物样品自然风干,去除杂质,在陶瓷研钵中研磨,过 80 目筛待测。

2.2 样品前处理和分析测定

2.2.1 总汞的前处理和测定

水样:根据《水质 总汞的测定 冷原子吸收分光光度法》(GB 7468—1987)中“高锰酸钾-过硫酸钾消解法”对水样进行处理。沉积物:沉积物样品采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$ 湿法消解。立即用 AFS-2202 型冷原子荧光光度计进行测定样品中的总汞含量^[24]。

2.2.2 甲基汞的前处理和测定

水样和沉积物样品根据《环境 甲基汞的测定 气相色谱法》(GB/T 17132—1997)进行处理。

水样预处理:样品过滤到 1000 mL 的分液漏斗中,调节 pH=3,巯基棉富集提取后用 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸清洗两次,每次 0.4 mL,把甲基汞洗到微型萃取器中,然后加入 0.4 mL 的苯,充分振荡萃取、静止分层,用 5 mL 医用注射器向微型萃取器底部注入水样,直到使苯相上升到萃取器的细口部分。

沉积物预处理:取 2.0 g 沉积物放入 100 mL 刻度烧杯中,缓慢倒入 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐酸,边加边搅拌,直到不再产生气泡为止,再加入 1 mL 硫酸铜,搅拌 2 min,静止提取 10 min 左右。用漏斗过滤到 1000 mL 的分液漏斗中,加入 500 mL 蒸馏水,调节 pH 到 3,以下操作同水样。

用带电子捕获检测器(ECD)的气相色谱仪进行测定。实验条件为汽化室温度:250 ℃,色谱柱温度:250 ℃,柱温:80 ℃,进样温度:35 ℃,测定时间:4 min,检测器:ECD。

2.3 评价方法

采用单项污染指数法对河水总汞和甲基汞进行评价;用地累积指数法和潜在生态风险指数法评价沉积物中的汞污染情况。

2.3.1 单因子污染指数法

单项污染指数法计算公式如下:

$$P_i = C_i / C_{i0}$$

式中: P_i 为污染物质 i 的污染指数; C_i 为样品中污染物 i 的含量, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; C_{i0} 为污染物 i 的环境标准值, $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

水中汞和甲基汞的评价采用刘永懋等在松花江

长期工作时应用的评价标准^[15]:总汞评价标准: $P_i > 1$ 轻污染; $P_i > 3.3$ 中度污染; $P_i > 17$ 重度污染; $P_i > 33$ 严重污染。甲基汞评价标准: $P_i \leq 1$ 未污染; $1 < P_i < 10$ 轻度污染; $10 < P_i < 100$ 重度污染; $P_i > 100$ 严重污染。

2.3.2 地累积指数法

地累积指数法是德国学者 Muller 于 1969 年提出,广泛应用于沉积物中重金属的风险评估^[25]。地累积指数的计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)]$$

式中: C_n 为元素 n 在沉积物中的浓度; B_n 为沉积物中该元素的地球化学背景值; k 为考虑各地沉积物差异可能会引起背景值变动而取的系数(一般取值为 1.5)。地累积指数法风险指数及风险分级见表 1。

表 1 地累积指数法风险指数与环境风险分级

Table 1 The grade of the geo-accumulation pollution index

指数	分级	环境风险程度
<0	0	无环境风险
(0,1]	1	低环境风险
(1,2]	2	中等环境风险
(2,3]	3	中-高环境风险
(3,4]	4	高环境风险
(4,5]	5	高-极高环境风险
>5	6	极高环境风险

2.3.3 潜在生态危害指数(RI)

潜在生态危害指数法是瑞典科学家 Hakanson 根据重金属性质及环境行为特点提出的对沉积物中重金属污染进行评价的方法^[26-28]。

潜在生态危害指数(RI)的计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i}$$

式中:RI 为潜在生态危害指数; E_i^i 为某一污染物潜在生态危害系数; T_r^i 为污染物毒性响应系数; C_f^i 为某一污染物的污染指数; C_i 为沉积物中某一污染物的实测浓度; C_n^i 为沉积物中相应污染物的背景值。

论文采用 Hakanson 提出的工业化前全球沉积物中汞的最高背景值 $0.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为参考值,金属的毒性系数(T_r^i)取 40^[28-29],评价标准见表 2。

3 结果与讨论

3.1 汞与甲基汞的测定结果

3.1.1 汞含量测定结果

研究区内老牛沟河、夹皮沟河、山麻河以及第二松花江河水与沉积物中汞的含量见表 3。

表 2 潜在生态风险指数分级
Table 2 The grade of the potential ecological risk index

指数类型	所处范围	污染程度	指数类型	所处范围	污染程度
潜在生态风险因子(E_i^j)	$E_i^j < 40$	轻微	潜在生态风险指数(RI)	RI < 150	轻微
	$40 \leq E_i^j < 80$	中等		$150 \leq \text{RI} < 300$	中等
	$80 \leq E_i^j < 160$	强		$300 \leq \text{RI} < 600$	强
	$160 \leq E_i^j < 320$	很强		RI ≥ 600	很强
	$E_i^j \geq 320$	极强			

表 3 河流水体与沉积物总汞的含量
Table 3 The average content of total mercury in river water and sediment

河流	采样断面	水/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$			沉积物/ $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$		
		含量范围	均值	标准差	含量范围	均值	标准差
老牛沟河	五道沟	0.15~0.52	0.28	0.12	3.61~3.7	3.50	0.13
	老牛沟	0.12~0.26	0.17	0.04	3.51~4.25	4.10	0.25
夹皮沟河	夹皮沟	0.17~1.23	0.86	0.48	3.90~5.25	4.20	0.50
	五道岔	0.25~0.68	0.74	0.53	5.20~7.60	6.40	0.57
	三道岔	0.15~0.38	0.26	0.06	—	—	—
	二道岔	0.12~0.23	0.21	0.07	2.10~7.20	4.30	1.24
	老金厂	0.11~0.26	0.13	0.09	8.95~11.1	9.00	0.97
山麻河	双河屯	0.17~0.66	0.31	0.19	2.18~4.4	3.10	0.54
	二道沟	0.19~0.35	0.21	0.10	2.6~4.77	4.30	0.70
第二松花江	红石	0.11~0.17	0.13	0.02	2.22~5.90	3.70	0.95

注:—表示未采样。

河流水体总汞含量表现为各河流上游河段高于下游河段:老牛沟河的五道沟>老牛沟;夹皮沟河的夹皮沟>五道岔>三道岔>二道岔>老金厂;山麻河的双河屯>二道沟;老牛沟河、夹皮沟河、山麻河的含量高于第二松花江的红石河段。河流 Hg 含量最高出现在夹皮沟,为 $0.86 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,这与夹皮沟金矿是区域内最大的金矿开采点的关系较大,最低出现在老金厂,为 $0.13 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,老金厂是一个废弃的采矿点,且在夹皮沟河下游,经过河流的自净能力,到达老金厂的汞浓度已与第二松花江的红石河段相近。

河流沉积物中汞含量特征表现为沿河流的流向,汞的含量有逐渐升高的趋势。研究区域的 9 个采样点中,有 6 个采样点高于第二松花江的红石采样点。河流沉积物 Hg 含量的最高值出现在老金厂,为 $9.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,考虑到此处是老牛沟河与夹皮沟河的交汇处,河面比较宽阔,水流相对缓慢,沉积物易于在此积聚;并且这两条河上分布有老牛沟金矿和夹皮沟金矿的采矿点;最低点出现在山麻河上游的双河屯,为 $3.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。老牛沟河、夹皮沟河和山麻河沉积物的平均值分别为 $3.80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $5.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $3.70 \text{ mg} \cdot$

kg^{-1} ,其中夹皮沟河的老金厂采样点沉积物汞含量约为第二松花江红石采样点的 2.5 倍。

对比水和沉积物 Hg 含量,可以发现该地区明显地呈现河水含量高的采样点,对应的沉积物含量较低。这可能是由于沉积物也会随水向下游推移。沉积物中的含量与重金属的迁移相关。

3.1.2 甲基汞的分布

老牛沟河、夹皮沟河、山麻河以及第二松花江的河水与沉积物中的甲基汞积累情况见表 4。

水中甲基汞含量最高值出现在夹皮沟,为 $4.14 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,最低值出现在老牛沟,为 $1.64 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。河流沉积物中甲基汞含量的最高值出现在二道沟,为 $4.02 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,最低值出现在老牛沟,为 $2.61 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。水和沉积物中甲基汞含量并无明显的分布规律。这与汞在环境中的甲基化特征有关。汞的甲基化要受到诸多因素的影响,包括河水类型、沉积物中微生物类型以及环境条件的变化等。夹皮沟地区属于东部山区,河流上下游差距比较大,上游河水温度低,沉积物比较少,而下游河水温度相对较高,沉积物较多,比较有利于汞的甲基化作用。

表 4 河流水体与沉积物甲基汞含量

Table 4 The average content of methylmercury in river water and sediment

河流	采样断面	水/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$			沉积物/ $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$		
		含量范围	均值	标准差	含量范围	均值	标准差
老牛沟河	五道沟	0.88~3.67	1.67	0.82	2.60~6.20	3.06	1.38
	老牛沟	1.41~1.92	1.64	0.12	2.50~3.12	2.61	0.22
夹皮沟河	夹皮沟	2.70~6.50	4.14	0.98	2.59~5.25	3.38	0.77
	老金厂	2.10~7.10	3.30	1.58	2.58~5.44	3.46	0.81
山麻河	双河屯	2.20~4.10	2.57	0.65	1.58~5.99	2.63	1.40
	二道沟	2.60~5.70	3.45	0.93	3.40~5.55	4.02	0.63
第二松花江	红石	2.90~6.70	3.69	1.27	2.22~4.09	2.72	0.57

3.2 重金属汞的环境风险评价

3.2.1 河水中汞和甲基汞的污染状况

利用单因子指数法评价水体重金属污染状况,本文采用刘永懋编写的《中国松花江甲基汞污染防治与标准研究》一书中,河水中总汞含量以 $0.03\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,甲基汞含量以 $0.1\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 为背景值^[15]。河流评价污染系数与评价结果见表 5。

研究区的老牛沟河、夹皮沟河、山麻河三条河流沿岸由于均有金矿分布,因此,河水均受到汞和甲基汞不同程度的污染。其中,夹皮沟和五道岔断面总汞为重度污染,占研究区域的 22.22%,其他断面为中度污染,占 77.78%。甲基汞评价中全部为重度污染,这应该引起人们的重视。

3.2.2 沉积物中汞的污染状况

以工业化前全球沉积物中汞的平均含量 $0.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为背景值^[24],应用地累积指数法和潜在生态危害指数法评价沉积物中汞的环境风险等级,评价结果见表 6。

表 6 可见,矿区内老牛沟河、山麻河和区外的第二松花江中沉积物汞污染的风险等级均为 4 级,为高风险;夹皮沟河 5 个采样点有 2 个采样点的汞污染的风险等级为 5 级,为高-极高环境风险;其余采样点的汞污染风险等级为 4 级,为高风险。汞污染为高-极高环境风险的采样点占 20%,高风险的采样点占 80%;采样点 I_{geo} 的平均值为 3.58,为高风险。可见该区域河流沉积物的汞污染已经具有较程度的环境风险,尤其是五道岔和老金厂,环境风险很大,这与五道岔有尾矿库分布以及老金厂是河流汇合处沉积物易于累积有关。

研究区域的所有采样点汞污染的潜在生态风险系数在 496~1440 之间,3 条河流的潜在生态风险系数(E_i)由大到小的次序为:夹皮沟河>老牛沟河>山麻河。夹皮沟金矿区汞污染的潜在生态风险均为极强等级。可见,区内河流沉积物具有很高的汞污染的生态风险,对河流水生生态系统和河流周围环境具有很大威胁。

表 5 夹皮沟地区河流水体中汞与甲基汞污染状况评价

Table 5 The assessment of total mercury and methylmercury pollution in river water

河流	采样断面	总汞		甲基汞	
		污染系数(P_i)	污染等级	污染系数(P_i)	污染等级
老牛沟河	五道沟	9.33	中度	16.7	重度
	老牛沟	5.67	中度	16.4	重度
夹皮沟河	夹皮沟	28.67	重度	41	重度
	五道岔	24.67	重度	—	—
	三道岔	8.67	中度	—	—
	二道岔	7.00	中度	—	—
	老金厂	4.33	中度	33	重度
山麻河	双河屯	10.33	中度	25.7	重度
	二道沟	7.00	中度	34.5	重度
第二松花江	红石	4.33	中度	36.9	重度

注:—表示未采样。

表 6 不同采样点河流沉积物环境风险指数及潜在生态风险程度

Table 6 The geo-accumulation pollution index and the potential ecological risk index in water sediment

河流	采样断面	地累积指数法			潜在生态危害指数法	
		I_{geo}	风险等级	风险程度	E_i^r	风险等级
老牛沟河	五道沟	3.22	4	高环境风险	560	极强
	老牛沟	3.45	4	高环境风险	656	极强
夹皮沟河	夹皮沟	3.48	4	高环境风险	672	极强
	五道岔	4.09	5	高-极高	1024	极强
	二道岔	3.52	4	高环境风险	688	极强
	老金厂	4.58	5	高-极高	1440	极强
山麻河	双河屯	3.05	4	高环境风险	496	极强
	二道沟	3.52	4	高环境风险	688	极强
第二松花江	红石	3.30	4	高环境风险	592	极强

4 结论

(1)研究区内老牛沟河、夹皮沟河和山麻河水体中总汞含量的分布表现为各河流上游河段高于下游河段,研究区内河流水体中总汞含量高于研究区外河流;沉积物中的总汞含量分布规律表现为沿河流流向逐渐升高的趋势。河流水体和沉积物中甲基汞含量的分布无明显的规律性。

(2)河流均有不同程度的汞和甲基汞污染。单因子指数法评价结果显示,22.22%的河段呈现总汞的重度污染,其余为中度污染;甲基汞评价全部为重度污染。水和沉积物中汞污染最严重的河流是夹皮沟河,也证实了金矿开采带来的长期汞污染严重。

(3)地累积指数法和潜在生态风险系数的评价显示,研究区内河流沉积物中总汞污染极为严重,并具有很高的环境风险和潜在的生态风险。尤其是夹皮沟河沉积物的环境风险最大,应当引起人们的重视。

参考文献:

[1] 刘伟,陈振楼,许世远,等.上海市小城镇河流沉积物重金属污染特征研究[J].环境科学,2006,27(3):538-543.
LIU Wei, CHEN Zhen-lou, XU Shi-yuan, et al. Pollution character of heavy metals in river sediments from small towns, Shanghai[J]. *Environmental Science*, 2006,27(3):538-543.

[2] 郑志侠,潘成荣,丁凡.巢湖表层沉积物中重金属的分布及污染评价[J].农业环境科学学报,2011,30(1):161-165.
ZHENG Zhi-xia, PAN Cheng-rong, DING Fan. Distribution and environmental pollution assessment of heavy metals in surface sediments of Chaohu Lake, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(1):161-165.

[3] 魏俊峰,吴大清,彭金莲,等.污染沉积物中重金属的释放及其动力[J].生态环境,2003,12(2):127-130.

WEI Jun-feng, WU Da-qing, PENG Jin-lian, et al. Release and kinetics of heavy metals from the contaminated sediments[J]. *Ecology and Environment*, 2003,12(2):127-130.

[4] 陈静生.水环境化学[M].北京:高等教育出版社,1987:176-178.
CHEN Jing-sheng. Water environmental chemistry[M]. Beijing: Higher education press, 1987:176-178.

[5] 范成新,朱育新,吉志军,等.太湖宜溧河水系沉积物的重金属污染特征[J].湖泊科学,2002,14(3):235-241.
FAN Cheng-xin, ZHU Yu-xin, JI Zhi-jun, et al. Characteristics of the pollution of heavy metals in the sediments of Yilihe River, Taihu Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3):235-241.

[6] Sinclair K A, Xie Q, Mitchell C P J. Methylmercury in water, sediment, and invertebrates in created wetlands of Rouge Park, Toronto, Canada [J]. *Environmental Pollution*, 2012, 171:207-215.

[7] Cordy P, Veiga M M, Salih I, et al. Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 410:154-160.

[8] 田文娟,陈来国,莫测辉,等.广州市典型食用鱼类甲基汞含量及风险评估[J].农业环境科学学报,2011,30(3):416-421.
TIAN Wen-juan, CHEN Lai-guo, MO Ce-hui, et al. Concentration and exposure risk assessment of methylmercury in regularly consumed fishes from Guangzhou markets, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011,30(3):416-421.

[9] 孙晓静,王起超,邵志国.第二松花江中下游沉积物汞的时空变化规律[J].环境科学,2007,28(5):1062-1066.
SUN Xiao-jing, WANG Qi-chao, SHAO Zhi-guo. Temporal and spatial variation rule of mercury in sediments in middle and lower reaches of the Second Songhua River[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5):1062-1066.

[10] 李宏伟,阎百兴,徐治国,等.松花江水中总汞的时空分布研究[J].环境科学学报,2006,26(5):840-845.
LI Hong-wei, YAN Bai-xing, XU Zhi-guo, et al. Spatial and temporal distribution of total mercury (T-Hg) in water of Songhua River[J]. *Acta Scientiae Circumstantne*, 2006, 26(5): 840-845.

[11] SUN Xiao-jing, WANG Qi-chao, ZHANG Shao-qing, et al. Temporal

- and spatial variation of methylmercury in sediments in the Second Songhua River, China[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2009, 18(3):284-293.
- [12] 吴攀, 刘丛强, 张国平. 黔西北炼锌地区河流重金属污染特征[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5):443-446.
- WU Pan, LIU Cong-qiang, ZHANG Guo-ping, et al. Characteristics of heavy metal pollution in stream of zinc smelting area, Northwest of Guizhou[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(5):443-446.
- [13] Zhang Wei-guo, Feng Huan, Chang Jin-na, et al. Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(5):1533-1543.
- [14] 林春野, 周豫湘, 呼丽娟, 等. 松花江水体沉积物汞污染的生态风险[J]. 环境科学学报, 2007, 27(3):466-473.
- LIN Chun-ye, ZHOU Yu-xiang, HU Li-juan, et al. Ecological risk assessment of mercury pollution in the sediment of Songhua River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(3):466-473.
- [15] 刘永懋, 王稔华, 翟平阳, 等. 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.
- LIU Yong-mao, WANG Nian-hua, ZHAI Ping-yang, et al. Controls and standards on methylmercury pollution of Songhua River in China [M]. Beijing: Science Press.
- [16] 程永前, 蒋大和, 马红梅, 等. 常州市河流重金属污染评价[J]. 环境保护科学, 2007, 33(2):76-78.
- CHENG Yong-qian, JIANG Da-he, MA Hong-mei, et al. Evaluation of heavy metals pollution in Changzhou's Rivers [J]. *Environmental Protection Science*, 2007, 33(2):76-78.
- [17] 朱世界, 刘晓刚, 万从礼. 吉林桦甸市地质灾害现状及防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15(2):117-121.
- ZHU Shi-jie, LIU Xiao-gang, WANG Cong-li. The present situation of geological hazard and control measures in Huadian City, Jilin Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2004, 15(2):117-121.
- [18] 谢宏远, 沈远超, 焦旭东, 等. 吉林省夹皮沟金矿带几个重要地质问题的讨论[J]. 地质科学, 2000(1):111-120.
- XIE Hong-yuan, SHEN Yuan-chao, JIAO Xun-dong, et al. Discussion on some important geological problems of Jiapigou gold belt, Jilin Province[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2000(1):111-120.
- [19] 吕衍明, 谭国, 韩庆华. 吉林省砂金采掘史研究及其找矿意义[J]. 吉林地质, 1989(2):16-23.
- LÜ Yan-ming, TAN Guo, HAN Qing-hua. A study on mining history of placer gold and its significance in searching for ore deposits[J]. *Jilin Geology*, 1989(2):16-23.
- [20] 王宁, 朱颜明. 松花湖水源地重金属非点源污染调查[J]. 中国环境科学, 2000, 20(5):419-421.
- WANG Ning, ZHU Yan-ming. The survey on non-point source pollution of heavy metals in Songhua River[J]. *China Environmental Science*, 2000, 20(5):419-421.
- [21] 陈涛, 赵铁英, 钱秀珍, 等. 吉林桦甸市矿产资源利用现状与保护规划[J]. 吉林地质, 2008, 27(1):96-100.
- CHEN Tao, ZHAO Tie-ying, QIAN Xiu-zhen, et al. The present utilizing situation and protective planning of mineral resources in Huadian County, Jilin Province[J]. *Jilin Geology*, 2008, 27(1):96-100.
- [22] 邹婷婷, 王宁, 张刚, 等. 松花江上游金矿开采区环境中汞污染的空间分布特征[J]. 环境科学, 2010, 31(9):2228-2233.
- ZOU Ting-ting, WANG Ning, ZHANG Gang, et al. Songhua River upstream gold mining areas, the environment spatial distribution of mercury pollution[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(9):2228-2233.
- [23] 宁建凤, 邹献中, 杨少海, 等. 广东大中型水库底泥重金属含量及潜在生态风险评价[J]. 生态学报, 2009, 29(11):6059-6067.
- NING Jian-feng, ZOU Xian-zhong, YANG Shao-hai, et al. Heavy metal contents analysis and potential ecological risk appraisal to sediments of large and medium-scaled reservoirs in Guangdong Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(11):6059-6067.
- [24] 刘汝海, 王起超, 吕宪国, 等. 小兴安岭泥炭藓沼泽生态系统中的汞[J]. 环境科学, 2002, 23(4):102-106.
- LIU Ru-hai, WANG Qi-chao, LÜ Xian-guo, et al. Mercury in the peat bog ecosystem in Xiaoxing'an mountain in China [J]. *Environmental Science*, 2002, 23(4):102-106.
- [25] 霍文毅, 黄凤茹, 陈静生. 河流颗粒重金属污染评价方法比较研究[J]. 地理科学, 1997, 19(1):81-86.
- HUO Wen-yi, HUANG Feng-ru, CHENG Jing-sheng, et al. comparative study of assessment method for river particulate heavy metal pollution[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1997, 19(1):81-86.
- [26] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14:975-1001.
- [27] 蒋增杰, 方建光, 张继红, 等. 桑沟湾沉积物重金属含量分布及潜在生态危害评价[J]. 农业环境科学学报, 2008(1):301-305.
- JIANG Zeng-jie, FANG Jian-guang, ZHANG Ji-hong, et al. Distribution features and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Sungo Bay[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008(1):301-305.
- [28] KWON Y T, LEE C W. Ecological risk assessment of sediment in wastewater discharging area by means of metal speciation[J]. *Microchemical Journal*, 2001, 70:255-264.
- [29] 杨立平, 张学超, 李晓敏, 等. 威海湾沉积物重金属含量分布及其潜在生态危害评价[J]. 海洋科学, 2010, 34(6):39-43.
- YANG Li-ping, ZHANG Xue-chao, LI Xiao-min, Distribution features and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Weihai Bay[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(6):39-43.