

夹皮沟金矿开采区土壤重金属污染潜在生态风险评价

杨 净, 王 宁*

(东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024)

摘要:以松花江上游夹皮沟金矿开采区为研究对象,采用 Hakanson 潜在生态风险指数法(The Potential Ecological Risk Index)对金矿开采区土壤中 Hg、Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni 等 7 种重金属元素进行单因子和复合生态风险评价。结果表明,研究区域内的土壤重金属含量明显高于当地土壤背景值,其中 28 个采样点的 Hg 平均潜在生态危害系数为 464.6,达到极度生态危害程度,Cd 平均潜在生态危害系数为 140.8,达强度生态危害程度,其余元素均未达到轻度生态危害的上限标准,7 种重金属平均潜在生态危害系数依次为 $Hg > Cd > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$ 。同时,28 个采样点平均潜在生态风险指数为 637.6,属于很强生态危害,为最高级别,其中,7 个采样点的潜在生态风险指数大于 600,属于很强生态危害,8 个采样点的潜在生态风险指数介于 300 和 600 之间,属于强度生态危害,其余为中度和轻度生态危害级别。在 7 种重金属元素中,Hg 元素对区域生态风险的贡献率最高,是构成潜在生态风险的最主要因子。这与金矿开采以及长达 190 年的混汞提金工艺所带来的环境污染有关。

关键词:金矿区;土壤;重金属污染;潜在生态风险评价

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)03-0595-06 doi:10.11654/jaes.2013.03.027

Assessment of Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Soils from Jia-Pi-Gou Gold Mine Area, China

YANG Jing, WANG Ning*

(Northeast Normal University, Changchun 130024, China)

Abstract: The ecological risks of seven different soil heavy metals, including Hg, Cu, Zn, Pb, Cd, Cr and Ni, in the Jia-pi-gou gold mine area, which located in the upstream area of Songhua River were discussed using single and compound factor potential ecological risk index. The results showed that the concentration of soils were higher than the local reference values and the soils had serious ecological risks of Hg and Cd with the single ecological risk index of seven elements in sample points of gold mine area, the risk index being 464.6 and 140.8, respectively, and slight risks of Cu, Zn, Pb, Cr and Ni with the index were less than Hg and Cd. The risk order of heavy metals was $Hg > Cd > Pb > Cu > Ni > Cr > Zn$. Meanwhile, the average ecological risk index of soil heavy metals of the twenty-eight sample points was 637.6. Seven of them were more than 600, which indicated that the soil ecological risk of the area was serious, and eight of them were between 300 and 600, which indicated that the soil ecological risk of the area was less serious and other points were moderate or slight serious. Among seven metals, Hg contributed most to the regional ecological risk, and was the main risk factor of the ecological risk in the gold mine area. This phenomenon was related to the environment pollution owing to use of amalgamation process to extract gold for more than 190 years.

Keywords: gold mine area; soil; heavy metal pollution; assessment of potential risk

随着工农业的发展和金属矿山的开采^[1],土壤的重金属污染问题得到了广泛的关注^[2-4],尤其是污染区的农田土壤^[5],其受到污染会直接影响土壤上作物的重金属含量,从而影响大尺度区域环境。近年来国内

对于土壤重金属污染的研究工作多集中在污灌区^[2,6]以及复垦土地^[7-8]等,而对于金属矿山开采导致的矿石内重金属再释放以及开采工艺引入的重金属污染并不多见。在金属矿山开采过程中,长期深埋地下的矿石被开采暴露于地表,各种伴生元素释放到环境介质中,开采所产生的矿渣、尾矿石被无次序的混合、堆放,形成众多矿渣堆和尾矿库,改变了自然土壤的层次分布,也扰乱了重金属元素在地壳中的自然分布,造成土壤的重金属污染^[9],从而影响到大气、水等环境介质的重金属分布情况。

收稿日期:2013-01-14

基金项目:国家自然科学基金项目(40673059)

作者简介:杨 净(1988—),女,吉林省吉林市人,硕士研究生,研究方向为环境物质地表过程及生态风险评估。

E-mail: yangj142@nenu.edu.cn

* 通信作者:王 宁 E-mail: nwang@nenu.edu.cn

重金属在土壤中累积,初期并不一定产生毒害效应,但逐步汇聚之后,不能够被生物降解,却又能被生物放大,其自净和人工修复都是非常困难的。金属开采区土壤的重金属污染问题会影响到粮食安全、生态安全以及矿区居民的人居安全,因此,对于金属开采区土壤重金属污染的生态风险分析显得尤为重要。

夹皮沟金矿开采区位于吉林省东部山区丘陵地带,松花江上游,地下贮藏着金、银、铜、铁、铝、锌、钨、硅、重晶等10多种价值非然的有色金属。早在清道光初年(1821年)就在此发现砂金并开采,至今有190年的辉煌采金史^[10]。悠久的采金历史带来了严重的重金属污染,金矿石的伴生复杂,Ag、Cu、Fe等金属都易于金矿伴生,而且夹皮沟金矿曾长期使用“混汞法”提金,每年使用于提金的Hg多达20 kg,其中50%~60%排放进入各种环境介质中^[11-12],其中土壤最易于累积,因此夹皮沟金矿是非常具有代表性的北方重金属污染矿区。与此同时,吉林省作为全国农业大省,在夹皮沟地区具有大量的玉米田地,山区丘陵的地貌特征使得夹皮沟地区多为坡田,而采矿点、尾矿库旁边即是玉米田,形成了矿-田混合的农业种植特点,充分利用土地的同时,也加重了采矿对农田及农作物的污染。

前人已在夹皮沟金矿区进行了部分污染调查与研究工作^[13-15],对大气、土壤、水、生物等环境介质之间Hg的迁移等变化特征进行了较深入的研究。本文选取Hg以及其他6种重金属元素Cu、Zn、Pb、Cd、Cr、Ni为研究对象,布设28个采样点进行土壤采集,土壤样品采用微波消解和ICP-MS检测,对夹皮沟金矿开采区的重金属污染特征进行探究,评价夹皮沟金矿区的潜在生态风险危害,旨在为金矿开采区的重金属污染修复、土壤污染评价以及农田保护和粮食安全生产提供依据。

1 样品采集与实验方法

1.1 采样点布设及样品采集

夹皮沟地区地形多山,平均海拔300 m,地面与山顶高度差在250~300 m之间,区域内多为两山夹一沟的狭长山路,可通汽车运输矿石及矿渣,山坡角度为30~50°,山脚位置多开垦为坡田,种植玉米,坡田一侧靠山,一侧临路,整个区域内土地利用类型复杂,既有公路(102省道等)、玉米坡田,还有菜地、草地,未利用的荒地等。

具体布点如图1所示,本研究选择了金矿区内4条通车公路,沿公路每隔3 km布设1点,两条公路间空白区域为高山,不宜攀爬,因此考虑到区域特征以及从前研究的经验,共在研究区域内布设28个采样点,用GPS定位,每处采样点用四分法采集土壤样品约1 kg,自封袋封好带回实验室处理。

1.2 重金属含量检测方法

土壤样品经自然风干、去杂后磨细,过100目尼龙筛备用。将样品经微波消解系统完全消解,后用ICP-MS测定其重金属含量。

1.3 潜在生态风险评价

潜在生态危害指数(RI)评价方法是瑞典学者Hakanson^[16]于1980年建立的一套应用沉积学原理评价重金属污染及生态危害的方法。Hakanson认为,某一重金属的潜在毒性与其丰度成反比,或者说与其稀少度成正比。该方法不仅反映了某一特定环境中各种污染物的影响,也反映了多重污染物的综合影响,并以定量的方法划分出潜在危害程度。

依据单因子生态危害系数计算公式结合重金属元素的毒性相应系数计算 E_i 值,单因子潜在生态危害系数公式:

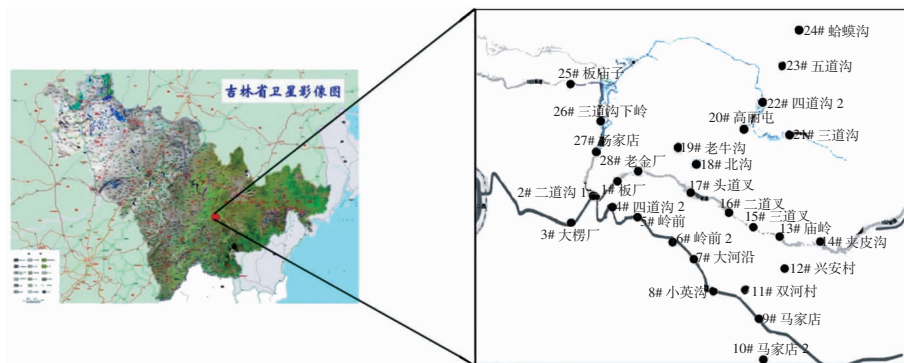


图1 采样布点图

Figure 1 Map of sampling sites

$$Ei = \frac{Ti \times Ci}{C_0}$$

式中: Ti 为毒性响应系数; Ci 为测定浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_0 为参比浓度, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

依据单因子生态危害系数的结果和复合生态风险指数计算公式, 计算研究区土壤重金属的 Ri 值公式:

$$Ri = \sum_{i=1}^m Ei$$

式中: Ei 为某一因子潜在生态危害系数。

对于参比浓度的选择, Hakanson 提出以工业化以前沉积物中重金属的最高值为参比值, 在实际应用过程中, 对于沉积物、河流底质的潜在生态风险评价均以此作为参比值, 但将风险评价对象推广至土壤时, 参比值的选择并不统一, 考虑到本研究区域以及所采集土壤样品的特点, 并参考其他文献, 本文选取第二松花江流域土壤重金属背景值^[17]为参比值进行评价, 详见表 1。

表 1 重金属毒性系数及其参比值

Table 1 Reference value and toxicity coefficients of different heavy metals

重金属	Hg	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
毒性响应系数	40	5	1	5	30	2	2
参比值/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	0.048	14.3	77.2	16.9	0.119	14.7	16.8

金属毒性系数揭示了重金属对人体的危害和对水生生态系统的危害, 反映了其毒性水平和生物对其污染的敏感程度, 以 Hakanson 制定的标准化重金属毒性系数为评价依据, 设定了 6 种重金属生物毒性系数^[18], $\text{Hg}=40$, $\text{Cd}=30$, $\text{Cr}=\text{Ni}=2$, $\text{Zn}=1$, $\text{Pb}=\text{Cu}=5$, 详见表 1。

根据 Ei 和 Ri 大小, 将土壤重金属潜在生态危害进行分级^[19], 见表 2。

因此, 本文对松花江上游夹皮沟金矿开采区的土壤重金属元素含量进行了检测, 并以当地土壤背景值、国家土壤环境质量标准为依据, 对研究区土壤重金属进行潜在生态风险评价, 为金矿区土壤重金属污

表 2 潜在生态风险指标与生态风险分级

Table 2 Indices and grades of potential ecological risk

潜在生态危害系数(Ei)	潜在生态风险指数(Ri)	潜在生态风险程度分级
<40	<150	轻度生态危害
40~80	150~300	中度生态危害
80~160	300~600	强度生态危害
160~320	≥ 600	很强生态危害
≥ 320	—	极度生态危害

染预警提供科学依据。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量特征分析

夹皮沟金矿区农田土壤重金属含量的测定结果见表 3。从表 3 中可以看出, 各元素的平均含量为: Hg 为 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 为 $13.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 为 $21.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 为 $77.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 为 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cr 为 $19.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni 为 $10.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。研究区土壤重金属污染 Hg 、 Pb 、 Cd 、 Cr 等元素的平均值均超过了土壤背景值, 表明这 4 种重金属元素在该研究区域的污染情况严重并且普遍。 Hg 超过土壤背景值的样品数为 27 个; Cu 超过土壤背景值的样品数有 8 个; Zn 超过土壤背景值的样品数为 14 个; 全部 28 个样品的 Pb 、 Cd 含量均超过土壤背景值; Cr 超过土壤背景值的样品数有 14 个; Ni 超过土壤背景值的样品数有 14 个, 而 Hg 超过了当地土壤背景值 10 倍以上, Cd 超过背景值 4 倍以上, 而其他超过背景值的重金属则最多不超过背景值的 2 倍, 说明 Hg 有明显的外源汇入。

表 3 土壤样品中重金属含量统计分析($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Statistic analysis of heavy metals concentrations in farmland soils($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

项目	Hg	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni
最大值	3.12	39.50	46.94	448.00	1.28	62.70	35.42
最小值	0.02	1.60	9.95	21.36	0.20	2.44	1.37
平均数	0.56	13.51	21.41	77.26	0.56	19.77	10.36
中位数	0.20	6.00	19.64	38.61	0.51	19.40	9.58
土壤背景值	0.05	14.30	77.20	16.90	0.12	14.70	16.80
样品数	28	19	28	28	28	28	28

2.2 土壤重金属单因子生态危害系数

经计算, 夹皮沟金矿区土壤重金属元素的潜在生态危害系数(Ei)和潜在危害综合指数(Ri)如表 4 所示。

从单因子生态危害系数可以看出, 研究区域 7 种重金属平均风险指数由大到小的排列顺序为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn}$, 其中 Hg 平均潜在生态危害系数为 464.6, 达到极度生态危害程度, Cd 平均潜在生态危害系数为 140.8, 达到强度生态危害程度, 其余元素均未达到轻度生态危害的上限标准。

根据土壤重金属潜在危害系数所对应的潜在危害程度的频数的统计(表 5), Cu 、 Zn 、 Cr 、 Ni 处于轻度的潜在生态风险, 而 17.9% 的土壤 Hg 已达到较强的生态风险水平, 21.4% 的土壤 Hg 达到极强生态风险

表 4 土壤重金属潜在生态风险指数统计分析

Table 4 Statisti canalysis of potential ecological risk coefficients and risk indices of heavy metals

编号	单个重金属潜在生态风险指数(<i>E_i</i>)							综合生态风险	污染等级
	Hg	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	指数(<i>R_i</i>)	
最大值	2 600.2	13.8	0.6	132.5	324.0	8.5	10.5	2 878.1	很强
最小值	20.6	0.6	0.1	6.3	51.7	0.3	0.4	106.3	中
平均值	464.6	4.7	0.3	22.9	140.8	2.7	3.1	637.6	很强
中位数	169.1	4.2	0.3	11.4	127.7	2.6	2.9	349.2	强
标准差	638.2	3.3	0.1	26.5	61.0	1.5	1.9	701.5	
变异系数%	137	69	33	116	43	56	62	110	
样品数	28	19	28	28	28	28	28		

水平,甚至有 32.1%达到了极强的潜在生态风险水平。而 60.7%的土壤 Cd 达到强度生态风险水平,25%的土壤 Cd 达到了很强生态风险水平,3.6%达到了极强生态风险水平。

表 5 金矿开采区农田土壤重金属元素潜在生态危害系数及潜在生态风险指数频数分布(%)
Table 5 Frequencies of potential ecological hazard coefficient and potential ecological risk index in farmland(%)

单项生态 风险程度	潜在生态危害系数 <i>E_i</i>							<i>R_i</i>
	Hg	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Ni	
轻	3.6	100	100	89.3	0	100	100	14.3
中	25	0	0	7.1	10.7	0	0	32.1
强	17.9	0	0	3.6	60.7	0	0	28.6
很强	21.4	0	0	0	25	0	0	25
极强	32.1	0	0	0	3.6	0	0	

2.3 土壤重金属复合生态风险指数

由表 4 中各样点多种重金属综合潜在风险值(*R_i*)来看,多种重金属的综合潜在生态风险指数(*R_i*)的范围为 106.3~2 878.1(表 4),其中有 7 个采样点的潜在生态风险指数大于 600,属于很强生态危害,8 个采样点的潜在生态风险指数介于 300 和 600 之间,属于强度生态危害,9 个采样点的潜在生态风险指数介于 150 和 300 之间,属于中度生态危害,只有 4 个采样点属于轻度生态危害。

从各个重金属对生态总风险的贡献来看,金矿开采区 Hg 的平均生态风险占 7 种主要重金属总风险的 73%,Hg 是该研究区域的最主要污染因子,其他重金属对生态总风险的贡献均远没有 Hg 元素大。从其频数分布(表 5)可以看出,土壤样点的潜在生态风险指数(*R_i*)处于中等生态风险程度占最大比重,为 32.1%,但分别有 28.6%和 25%的样点处于强度和很强

的潜在生态风险水平,这主要是 Hg 和 Cd 的生态危害。这说明夹皮沟金矿开采区的农田土壤遭受到 Hg 和 Cd 危害的可能性很大,进而导致了 85.7%的采样点土壤样品达到了中等及以上的潜在生态风险威胁。

在 28 个土壤样品中,潜在生态风险指数 *R_i* 超过评价标准最高值 600 的有 7 个,范围为 1 070.9~2 878.1,非常明显,这 7 个采样点不仅达到了最严重的生态风险级别,且都远远超过标准值,最大值甚至超过评价标准 4 倍,可见该区域的重金属污染的潜在生态风险较高。

2.4 土壤污染分析

夹皮沟金矿开采区曾常年使用混汞法提金,导致大量 Hg 在该过程中人为排入自然环境,且有研究表明,夹皮沟金矿开采区内的 Hg 在土壤中的分布,呈现出明显的区域性差异^[20],即集中在当地主要的金矿开采点及周围,因此夹皮沟金矿、三道沟金矿、二道甸子金矿、板庙子金矿等采样点的土壤样品,Hg 含量明显数倍高于非开采区,且呈现距离炼金点越近,土壤中 Hg 含量越高的趋势。而由于夹皮沟金矿区内,Hg 是大量人为排入大气的重金属,经过从大气到土壤的沉降作用,大部分的 Hg 汇聚于土壤中,且逐渐累积,研究表明^[15],Hg 在土壤和大气中处于动态变化过程,其对于整个区域的重金属生态风险评价起到了决定作用,这直接导致主要炼金点的复合生态风险指数急剧升高。由表 4 中可以看出,研究区域土壤中重金属元素,Hg 的变异系数最大,为 137%,大于其他全部 6 种元素,且为 28 个土壤采样点中含量变化最大的元素,表明研究区域土壤中的 Hg,受到了外来源的汇入,且受到人为活动的扰动,主要原因就是长期使用“混汞法”提金,人为将单质 Hg 和金矿石混合研磨,形成汞齐后经加热使汞蒸发,获得黄金的同时也有大量的单质 Hg 被排放入大气,后经沉降或植物吸附等

过程,汇集于土壤中。这些 Hg 来源于人为排放,而非环境中自然存在,因此其浓度与人为排放源的位置相关,具有明显的区域分布差异。虽然国家已明令禁止使用“混汞法”提金近 10 年,但由于曾经逾百年的混汞提金历史,而且一些小作坊仍然私自沿用,加之重金属易于累积,却无法被植物、微生物等分解,该金矿区内土壤中的 Hg 含量仍然很高。而对 Cd 来说,暂无明确的排放源,夹皮沟金矿区内,除金矿在开采外,兼有铁矿、锌矿等,而 Cd 与锌矿伴生,在锌矿常能检测出较高的 Cd 浓度。

3 结论

(1) 夹皮沟金矿开采区土壤重金属含量测定表明,各元素的平均含量为: Hg 为 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 为 $13.51 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Zn 为 $21.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 为 $77.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cd 为 $0.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cr 为 $19.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Ni 为 $10.36 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Hg、Pb、Cd、Cr 等元素的平均值均超过了土壤背景值,其中 Hg 超过了当地背景值的 10 倍以上。

(2) 研究区域内,金矿开采点、尾矿库、提金点附近样品的 Hg 含量明显高于其他非提金工作区的土壤样品,重金属 Hg 的土壤含量变异系数为 7 种重金属中最大,为 137%,具有非常明显的区域污染特征。

(3) 夹皮沟金矿开采区内的土壤样品中,7 种重金属元素平均潜在生态危害系数依次为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn}$, 其中 Hg 平均潜在生态危害系数为 464.6, 达到极度生态危害程度, Cd 平均潜在生态危害系数为 140.8, 达到强度生态危害程度, 其余元素均未达到轻度生态危害的上限标准。在 7 种重金属元素中, Hg 元素对生态风险的贡献率最高, 是构成潜在生态风险的主要因子。

(4) 研究区的复合生态风险指数平均值 R_i 为 637.6, 超过了评价标准中最高级别评价限值 600, 属于很强生态危害, 可以看出, 夹皮沟金矿区的整体重金属污染状况比较严重, 需引起足够重视。

参考文献:

- [1] KABATA P A, HENRYK P. Trace elements in soils and plants[M]. New YORK: CRC Press, 2000.
- [2] 刘燕玲, 刘树庆, 薛占军, 等. 保定市郊污灌区土壤重金属潜在生态风险评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10330-10333.
LIU Yan-ling, LIU Shu-qing, XUE Zhan-jun, et al. Assessment of potential ecological risk of soil heavy metals in sewage irrigated area of Baoding Suburban[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(17): 10330-10333.
- [3] 谭灵芝, 朱怀松, 王国友. 乌鲁木齐地区土壤重金属污染空间分布及污染预警研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(10): 2509-2523.
TAN Ling-zhi, ZHU Huai-song, WANG Guo-you. Spatial distribution and early warning of heavy metal pollution in Urumqi[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(10): 2509-2523.
- [4] ZHU Hui-na, YUAN Xing-zhong, ZENG Guang-ming, et al. Ecological risk assessment of heavy metals in sediments of Xiawan Port based on modified potential ecological risk index[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(6): 1470-1477.
- [5] 王其枫, 王富华, 孙芳芳, 等. 广东韶关主要矿区周边农田土壤铅、镉的形态分布及生物有效性研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1097-1103.
WANG Ji-feng, WANG Fu-hua, SUN Fang-fang, et al. Fractionation and bioavailability of Pb and Cd in agricultural soils around mining area in Shaoguan Guangdong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(6): 1097-1103.
- [6] 陈翠翠, 梁锦陶, 韩玉兰, 等. 太原市敦化污灌区重金属污染的潜在生态风险评价及垂直分布特征[J]. 中国农学通报, 2010, 26(10): 314-318.
CHEN Cui-cui, LIANG Jin-tao, HAN Yu-lan, et al. Potential ecological risk assessment and vertical pollution characteristic of heavy metals in Dunhua Sewage Irrigation Area of Taiyuan City [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(10): 314-318.
- [7] 樊文华, 白中科, 李慧峰, 等. 复垦土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 348-354.
FAN Wen-hua, BAI Zhong-ke, LI Hui-feng, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in reclaimed soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 348-354.
- [8] 陈孝杨, 刘鑫尧, 严家平. 煤研充填复垦土壤可溶性镉的分布特征与运移模拟[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9): 1734-1738.
CHEN Xiao-yang, LIU Xin-yao, YAN Gu-ping. Distribution and transportation of soluble cadmium in the reclaimed soil filled with coal wastes [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9): 1734-1738.
- [9] BERNHARD A Z, ISHAK C F, MCLAUGHLIN M J, et al. Heavy metals in soils and crops in Southeast Asia[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004, 26(4): 343-357.
- [10] 陆卫平. 夹皮沟金矿地质与采金技术简史[J]. 鞍山科技大学学报, 2004, 27(4): 298-305.
LU Wei-ping. Geology of gold ore in Jiapiyou valley and brief history of its mining technology[J]. *Journal of Anshan University of Science and Technology*, 2004, 27(4): 298-305.
- [11] 王 宁, 朱颜明, 盛连喜, 等. 松花江上游苇沙河河段中国林蛙的汞污染[J]. 科学通报, 2005, 50(15): 1589-1593.
WANG Ning, ZHU Yan-ming, SHENG Lian-xi, et al. Mercury pollution of Rana Chensinensis in Weisha Reach of upstream Songhua River[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(15): 1589-1593.
- [12] 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 Sci-*

- ence, 2000, 20(5):419-421.
- [13] 王 微. 基于稳定同位素方法的中国林蛙陆生食物链研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- WANG Wei. Study on terrestrial food chain of *Rana Chensinensis* based on stable isotope[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2011.
- [14] 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(9):2228-2233.
- ZOU Ting-ting, WANG Ning, ZHANG Gang, et al. Environment spatial distribution of mercury pollution in Songhua River Upstream Gold Mining Areas[J]. *Environmental Science*, 2010(9):2228-2233.
- [15] 张 刚, 王 宁, 王 媛, 等. 松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征[J]. 环境科学, 2012, 33(9):2953-2959.
- ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, et al. Characteristics of mercury pollution in soil and atmosphere in Songhua River upstream Jia-pi-gou gold mining area[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9):2953-2959.
- [16] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [17] 孟宪玺, 余中盛. 第二松花江流域土壤中若干元素的自然背景值[J]. 环境科学学报, 1983, 3(1):25-35.
- MENG Xian-xi, SHE Zhong-cheng. Background values of certain elements in the soils of Second Songhua River basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1983, 3(1):25-35.
- [18] 严长安, 崔小丽, 王 建, 等. 扬州市城区地表水底泥重金属污染现状与风险评价[J]. 环境污染与防治, 2009, 31(8):50-54.
- YAN Chang-an, CUI Xiao-li, WANG Jian, et al. Assessment on heavy metal pollution in bottom sediments of surface waters in Yangzhou[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2009, 31(8):50-54.
- [19] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):112-115.
- XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of Heavy Metals' Toxicity Coefficient in the Evaluation of Potential Ecological Risk Index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2):112-115.
- [20] 刘雪姣. 夹皮沟金矿区土壤中汞和甲基汞的空间分布及汞的生态风险评价[D]. 长春: 东北师范大学, 2011.
- LIU Xue-jiao. The spatial distribution of mercury and methylmercury and mercury's ERA in soil of the region of Jiapiyou gold mine [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2011.