

# 鞍山某铁矿区土壤重金属污染评价<sup>\*</sup>

贾莲<sup>\*</sup>, 刘盼盼, 吕琳琳, 英迪, 陈旭, 代芳芳

(鞍山师范学院 化学与生命科学学院, 辽宁 鞍山 114007)

**摘要:**为研究铁矿周边土壤的重金属污染状况,测定了鞍山某典型铁矿区土壤 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Ni 的含量,运用单项污染指数、内梅罗综合污染指数及潜在生态风险指数对其污染程度进行评价,并通过相关性分析探索污染来源。结果表明:与环境质量二级标准相比,土壤中 Cd 和 Ni 均有超标,Pb、Cu 和 Zn 未超限,但在土壤中也有累积;研究区域土壤基本处于轻度污染水平,单项污染指数依次为 Cd > Ni > Zn > Cu > Pb, Cd 处于轻度污染,Ni 为尚清洁,其他元素无污染;Cd 的地累积指数为 2.85,为中度污染;研究区具有极强潜在生态风险,生态危害指数为 381.74,Cd 是主要贡献因子。相关性分析结果表明,5 种重金属元素的来源均与矿业活动有关,其中 Cd 受影响明显。

**关键词:**矿区土壤;重金属污染;污染指数;潜在生态风险;铁矿;鞍山

**中图分类号:**X825   **文献标识码:**B   **文章编号:**1001-0076(2018)04-0118-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.03.036

## Pollutions Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding an Iron Mine Region in Anshan

JIA Lian<sup>\*</sup>, LIU Panpan, LV Linlin, YING Di, CHEN Xu, DAI Fangfang

(School of Chemistry and Life Science, Anshan Normal University, Anshan 114007, China)

**Abstract:** In order to study the soil heavy metal pollution near the iron mine region, the soil samples from a typical iron mine region in Anshan had been collected to determine total content of Cd、Pb、Cu、Zn and Ni. The single pollution index, Nemerow pollution index and potential ecological risk index were adopted to evaluate the pollution degree of iron mine region, and the correlation between elements was analyzed by Pearson correlation coefficient to explore the source of pollution. The result showed that value of Cd and Ni surpassed the Chinese soil quality standard class II (GB 15618—1995) slightly, while Pb, Zn and Cu not surpass the standard. Pb, Zn and Cu accumulation took place in mining region. According to the standard, the soil heavy metal content of research region was in light pollution status and the single factor pollution index for each heavy metal followed the order of Cd > Ni > Zn > Cu > Pb, which demonstrated alert degree of Cd, Ni and non-polluting of others. Additionally, an Igeo value of 2.85 for Cd reflected a moderated pollution. The potential ecological risk index showed the studied area showed higher ecological risk of heavy metals, RI value was 381.74 and the major contribution factor was Cd. Correlation analysis showed that the five heavy metals were all related to the mining activities. Cd was obviously affected by iron mining.

\* 收稿日期:2018-03-05

基金项目:辽宁省博士启动研究基金项目(20141124);鞍山师范学院博士科研启动基金课题(2014b01);鞍山师范学院大学生创新创业训练计划项目(201610169031)

作者简介:贾莲(1984-),女,辽宁沈阳人,博士,讲师,主要从事环境污染治理和污染生态研究,E-mail:jl\_58@163.com。

**Key words:** mine soil; heavy metal pollution; pollution index; potential ecological risk; iron ore;  
Anshan

矿山开发所引起的重金属污染问题日益突出,并通过水、固废、大气等传输途径,造成了明显的区域土壤环境问题。重金属一旦进入土壤中不易被微生物降解,导致其在土壤中大量积累,进而通过食物链对人类健康造成威胁<sup>[1]</sup>。由矿冶活动造成土壤重金属污染的事件屡屡发生,矿冶活动引发的重金属中毒事件也时有发生<sup>[2]</sup>。因此,加强对矿区周边土壤的重金属污染调查与生态风险评估具有十分重要的现实意义。

国内外有关矿区土壤重金属污染的研究大多集中在有色金属矿区(如铜矿、铅锌矿等),而对非有色金属矿(如铁矿)的研究报道较少。秦飞等<sup>[3]</sup>研究发现北京密云水库上游铁矿区土壤中 Cd、Hg 污染主要与矿山活动有直接关系;陕永杰和张磊<sup>[4]</sup>分析了山西省塔儿山铁矿区土壤重金属污染程度;张奥博等<sup>[5]</sup>发现浙江龙游硫铁矿区农田土壤中 Ni、Cd 异常积累,存在健康风险。毛香菊等<sup>[6]</sup>、马亚梦等<sup>[7]</sup>发现南京某铁矿区、尾矿库土壤中较强的潜在生态风险主要来自于元素 Cd 和 Pb。由此可见,越来越多的研究结果表明铁矿的开采对周围土壤环境已经产生了重要影响。

鞍山是中国最大的钢铁工业基地,铁矿资源丰富,开采历史悠久<sup>[8]</sup>。长期的矿业活动已导致该地区环境承载力减弱,容易发生累积性的水土环境污染问题。矿石采选及冶炼过程中排放大量的废石、废水、弃渣等对周围土壤与水体可能产生较大生态环境风险。但目前对该矿区周围土壤环境污染及潜在的生态危害问题尚未进行过系统的研究和评价。因此,本研究以鞍山某矿区为研究对象,查明周边土壤中重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Ni 的含量,并应用单因子指数法、内梅罗综合指数、地累积指数和潜在生态危害指数法对其污染状况进行评价,以期为当地的土壤环境治理和重金属污染防治提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况与样品采集

研究区域位于鞍山千山山脉西北脚下,有丰富的矿产资源,是全国较为典型的深凹露天铁矿,已有百年的开采历史。铁矿区周围交通便利,路网基础

设施较好。矿区周围 1/3 接壤千山山脉,2/3 与周边民居农田相连。由于常年矿业活动,对周边环境造成了巨大影响。根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)的规定及国家标准分析方法的要求,2017 年 6 月按照矿山和选矿厂位置,依地形围绕矿区在毗邻城区方向 5 km<sup>2</sup> 范围内,设置 11 个样点,分别标记为 S1 ~ S11,共采土样 33 个,位置见图 1。采样点的布置以查明矿区土壤重金属元素污染现状为目的。采用五点取样法,用土钻取 0 ~ 20 cm 表层土壤,将同一样地的样品混匀,用四分法选取 1 kg 左右,剔除杂物,密封在塑料封口袋中,编号保存。为防止土壤样品之间、采集工具的污染,一律采用塑料工具操作。

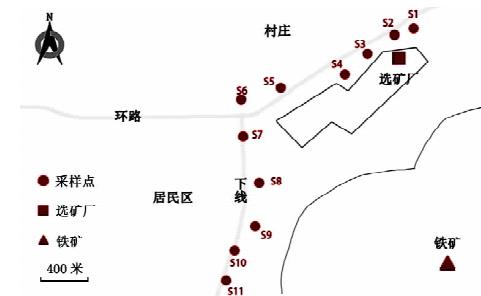


图 1 研究区及采样点位置  
Fig. 1 Location of research area and sample sites

### 1.2 样品处理及测试分析

将采回的土样平铺,放置在阴凉、干燥、通风的实验室内自然风干,粉碎,过 100 目土壤筛保存备用。土壤重金属(Cd、Pb、Cu、Zn 和 Ni)采用 HNO<sub>3</sub> - HClO<sub>4</sub> - HF 混酸法消解,电感耦合等离子体发射光谱法(ICP - OES)测定,分析过程中试剂均为优级纯。土壤样品测试过程中采用加标和平行样进行质量控制,测定结果均在误差允许范围内。

### 1.3 土壤重金属污染评价

采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积指数法和潜在生态风险评价法对土壤中重金属的污染状况进行评价。评价方法中采用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的二级标准(研究区土壤 pH 平均值为 7.7,偏碱性土壤,故采取 pH > 7.5 情况下的值)和辽宁省土壤元素背景值见表 1<sup>[9]</sup>。

表 1 土壤环境质量二级标准和辽宁省  
土壤元素背景值 /( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Table 1 The grade ii standard for soil environmental quality and the background value of soil in Liaoning Province

元素	土壤环境质量二级标准	辽宁省土壤元素背景值
Cd	$\leq 0.6$	0.11
Pb	$\leq 350$	21.4
Cu	$\leq 100$	19.8
Zn	$\leq 300$	63.5
Ni	$\leq 60$	25.6

### 1.3.1 单因子污染指数与内梅罗综合指数法

单因子污染指数法是国内外普遍采用的评价方法之一,只针对土壤中的单一污染物的污染程度进行评价<sup>[10-11]</sup>。内梅罗指数法可以全面反映各重金属对土壤的不同作用,突出高浓度重金属对环境质量的影响。其计算公式为<sup>[12]</sup>:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

$$P_n = \sqrt{\frac{P_{i \max}^2 + P_{i \text{ ave}}^2}{2}} \quad (2)$$

式(1)中, $P_i$  为单项污染指数; $C_i$  为土壤中某污染物  $i$  的实测含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ ); $S_i$  为土壤中污染物  $i$  的参比值 ( $\text{mg}/\text{kg}$ ),本文采用上述土壤环境质量二级标准值为参比值。式(2)中, $P_n$  为综合污染指数; $P_{i \max}$  为重金属  $i$  的最大单因子污染指数; $P_{i \text{ ave}}$  为各重金属单因子污染指数的平均值。污染等级划分为 5 个等级,见表 2。

表 2 单因子污染指数和内梅罗综合污染指数分级标准<sup>[13]</sup>

Table 2 Grading standard of Single factor index and Nemerow index

$P_i$	$P_n$	污染程度
$\leq 1$	$P_n \leq 0.7$	清洁(安全)
$1 < P_i \leq 2$	$0.7 < P_n \leq 1$	尚清洁(警戒)
$2 < P_i \leq 3$	$1 < P_n \leq 2$	轻度污染
$3 < P_i \leq 5$	$2 < P_n \leq 3$	中度污染
$P_i > 5$	$P_n > 3$	重度污染

### 1.3.2 地累积指数法

地质累积指数( $I_{geo}$ )由德国科学家 Müller 于 1969 年提出的,该方法综合考虑了自然成岩作用下形成的背景值、可能引起背景值变动的原因及人为活动对重金属污染的影响因素,可用来定量评价沉积物和土壤中重金属污染累积程度<sup>[13]</sup>。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / K \cdot B_n] \quad (3)$$

式中, $C_n$  为样品中元素的实测含量 ( $\text{mg}/\text{kg}$ ); $B_n$  为相应元素的背景值; $k$  为考虑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 1.5)。污染等级划分为 7 个等级,见表 3。

表 3 地累积指数( $I_{geo}$ )分级标准<sup>[12]</sup>  
Table 3 Grading standard of Geoaccumulation index

$I_{geo}$	污染等级	污染程度
$\leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 2$	1	轻微污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	轻度污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	偏重污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	重度污染
$5 < I_{geo} \leq 6$	6	严重污染

### 1.3.3 潜在生态风险指数法(Häkanson 法)

潜在生态风险指数法由瑞典科学家 Häkanson 于 1980 年提出的,该方法根据重金属性质及其在环境中迁移转化沉积等行为特点对土壤或沉积物中的重金属进行评价<sup>[10,11,14]</sup>。相关计算公式为:

$$C_f^i = \frac{C_i}{C_n^i} \quad (4)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (5)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (6)$$

式(4)~(6) 中, $C_f^i$  为重金属  $i$  的污染系数; $C_i$  为重金属  $i$  的实测浓度 ( $\text{mg}/\text{kg}$ ); $C_n^i$  为重金属  $i$  的参比值,本文采用辽宁省土壤重金属元素背景值为参比值(表 1); $E_r^i$  为重金属  $i$  的潜在生态风险系数; $T_r^i$  为污染物  $i$  的毒性响应系数(Cd 30、Pb 5、Cu 5、Zn 1、Ni 5),它主要反映重金属毒性水平和环境对重金属污染的敏感程度<sup>[15-16]</sup>;RI 为采样点某区域多种重金属潜在生态危害指数。土壤重金属潜在生态风险分级标准见表 4。

表 4 潜在生态风险评价分级标准  
Table 4 Grading standard of Potential ecological risk assessment

$E_r^i$	$RI$	污染程度
$\leq 40$	$RI < 150$	轻度
$40 < E_r^i \leq 80$	$150 < RI < 300$	中等
$80 < E_r^i \leq 160$	$300 < RI < 600$	强
$160 < E_r^i \leq 320$	$RI \geq 600$	很强
$E_r^i \geq 320$		极强

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属含量

研究区域土壤5种重金属含量测定及描述性分析结果见表5。

表5 土壤重金属描述性统计

Table 5 Statistical characteristics of heavy metal in the soils

元素	含量范围 / (mg · kg <sup>-1</sup> )	平均值 / (mg · kg <sup>-1</sup> )	平均值 / 变异系 数 / %	样点超 标率 / %
Cd	0.68 ~ 2.01	1.07 ± 0.32	9.73	29.91
Pb	12.46 ~ 68.59	32.62 ± 17.94	1.52	54.98
Cu	17.18 ~ 45.73	30.72 ± 12.10	1.55	39.39
Zn	52.91 ~ 180.68	105.31 ± 38.75	1.66	36.79
Ni	49.21 ~ 85.04	65.08 ± 9.86	2.54	15.15
注:样品数 n = 27。				

土壤中 Cd、Pb、Cu、Zn、Ni 平均含量分别为 1.07、32.62、30.72、105.31、65.08 mg/kg, 均超过辽宁省土壤重金属元素背景值(见表1), 分别为辽宁省土壤重金属元素背景值的 9.73、1.52、1.55、1.66 和 2.54 倍。由此可以得出, 土壤中重金属 Cd 和 Ni 的积累较为明显, Cu、Pb 和 Zn 积累一般。与《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 中的二级标准相比, Pb、Cu、Zn 平均含量虽超过辽宁省土壤背景值, 但在各采样点均未超过标准值, 说明这 3 种元素在研究区域内存在一定的积累, 但是并没有超标, 可认为无土壤污染危害风险; Cd 和 Ni 的平均含量均超过标准值, 样点超标率分别为 100% 和 74.07%, 这两种元素在该区域存在污染。变异系数反映了重金属元素含量的变异程度, 变异系数 > 36% 为高度变异,

16% < 变异系数 < 36% 为中等变异, 变异系数 < 16% 为低度变异<sup>[17]</sup>。从表 5 可见, 研究区采样点各重金属变异系数中, Pb、Cu、Zn 为高度变异, 空间分异明显, 可能是采矿、选矿活动产生的特异值; 而富集程度较高的 Cd 和 Ni 为中低度变异, 表明在各样点的富集程度比较相似, 该两种元素在区域内的来源可能具有同源性。

### 2.2 单因子污染指数与内梅罗综合污染指数评价

研究区土壤重金属 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Ni 的平均值均超过背景值, 因此宜采用单因子和综合指数评价方法来评价重金属污染状况(表6)。土壤 Cd 的  $P_i$  值范围分别是 1.14 ~ 3.36, 基本处于轻度以下污染状态, 仅有个别位点达到中度污染; Ni 的  $P_i$  值范围 0.76 ~ 1.42, 处于尚清洁(警戒)状态; 其余几种金属 Pb、Cu、Zn 的  $P_i$  值均小于 1, 属无污染的清洁状态。 $P_i$  平均值分别为 Cd 2.16、Pb 0.08、Cu 0.28、Zn 0.35 和 Ni 1.08, 污染程度 Cd > Ni > Zn > Cu > Pb。整个研究区域土壤重金属内梅罗综合污染指数范围是 0.91 ~ 2.47, 除个别样点综合污染为中度污染, 大部分样点均为轻度污染。内梅罗综合指数平均值为 1.63, 表明该矿区周边土壤 Cd、Pb、Cu、Zn 和 Ni 的综合污染程度基本处于轻度污染状态。土壤中重金属的污染分担率以 Cd 为最大, 占 54.60%, 其次是 Ni, 最低是 Pb。结合采样位置, 土壤综合污染程度在 S2 处最为严重, 达到中度污染, 这可能与该样点与选矿厂的距离较近有关, 选矿过程中排放的废气、废水是土壤重金属污染的主要来源之一。

表6 单因子污染指数和内梅罗综合污染指数评价结果  
Table 6 Evaluation results of Single factor index and Nemerow index

项目	单项污染指数 $P_i$					综合污染指数 $P_n$	污染程度
	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni		
S1	2.47	0.05	0.18	0.43	1.42	1.86	轻度
S2	3.36	0.01	0.15	0.25	1.07	2.47	中度
S3	2.99	0.12	0.3	0.4	1.01	2.22	中度
S4	2.25	0.09	0.44	0.42	1.15	1.71	轻度
S5	2.47	0.03	0.14	0.18	1.16	1.84	轻度
S6	1.67	0.12	0.24	0.26	0.76	1.26	轻度
S7	2.48	0.06	0.2	0.27	1.16	1.85	轻度
S8	1.33	0.2	0.43	0.36	0.98	1.05	轻度
S9	1.14	0.07	0.4	0.35	1.04	0.91	轻度
S10	1.78	0.08	0.29	0.39	1.05	1.36	轻度
S11	1.86	0.1	0.36	0.49	1.13	1.48	轻度
均值	2.16	0.08	0.28	0.35	1.08	1.63	轻度
范围	1.14 ~ 3.36	0.01 ~ 0.12	0.14 ~ 0.44	0.18 ~ 0.43	0.76 ~ 1.42	0.91 ~ 2.47	
污染物分担率 /%	54.60	2.13	7.18	8.72	27.37		

## 2.3 地累积指数评价

地累积指数法主要分析重金属的人为源和自然背景值,反映外源重金属的富集程度。以辽宁省土壤元素背景值为参比,计算各重金属元素地累积指数,结果见表7。从 $I_{geo}$ 的范围来看,Cd为1.96~3.61,处于中度污染,甚至在个别点位上达到偏重污染;Pb为-2.86~-1.09、Cu为-1.14~0.57、Zn为-0.86~0.93,基本处于无污染或轻微污染;Ni为0.24~1.15,基本处于轻微污染状态。 $I_{geo}$ 平均值分别为Cd 2.85、Pb -0.46、Cu -0.27、Zn 0.06 和 Ni 0.74,整个区域土壤中5种重金属污染程度次序为Cd>Ni>Zn>Cu>Pb,与单因子指数评价结果一致。但对土壤重金属污染状况进行评价时,需与潜在生态风险指数法相结合,则能更加全面深入地了解研究区域的重金属污染状况。

表7 地累积指数评价结果

Table 7 Evaluation results of Geoaccumulation index

项目	$I_{geo}$				
	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
范围	1.96~3.61	-2.86~-1.09	-1.14~0.57	-0.86~0.93	0.24~1.15
均值	2.85	-0.46	-0.27	0.06	0.74
污染程度	中度污染	无污染	无污染	轻微污染	轻微污染

## 2.4 潜在生态风险评价

矿区潜在生态风险指数评价结果见表8。从表8可以得出,矿区周边土壤Cd的 $E_r^i$ 值平均为353.71,Pb为6.87,Cu为6.85,Zn为1.66,Ni为12.64。结合表4评价标准,Pb、Cu、Zn和Ni的生态风险程度为轻度生态风险,Cd为极强生态风险,各元素潜在生态危害顺序为Cd>Ni>Pb>Cu>Zn。与上述两种方法相比,潜在生态风险指数除了考虑重金属含量外,还考虑到不同重金属对环境的毒性差异。对该研究区土壤中重金属Cd的污染强度评估上,三种评价方法略有不同,但都显示Cd污染最为严重,考虑到Cd在环境中的毒性响应高,达到极强风险水平。对重金属Pb和Zn的污染风险排序上,潜在生态风险指数评价结果与单因子指数、地累积指数评价结果稍有不同,主要是由Pb在环境中的毒性响应系数高于Zn导致的。综合来看,整个研究区域的潜在生态风险指数RI值为381.74,污染程度达到了强度生态风险水平,样点生态风险值都主

要来自于Cd的生态风险值贡献。由此可见,研究区域土壤中重金属Cd的潜在生态风险很大,应引起有关部门的高度重视并采取有效措施进行控制。

表8 潜在生态风险指数评价结果

Table 8 Evaluation results of Potential ecological risk assessment

项目	单项潜在生态风险系数 $E_r^i$					潜在生态危害指数RI
	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	
均值	353.71	6.87	6.85	1.66	12.64	381.74
污染程度	极强	轻度	轻度	轻度	轻度	强度

## 2.5 相关性与成因分析

相关性分析结果表明,Cd与Ni、Cu与Pb、Zn与Pb、Zn与Cu呈极显著性正相关,由此可以推断,Cd与Ni、Pb与Cu、Zn的来源相似。从前面检测结果看,该区域土壤中Cd和Ni含量分别高于背景值9.73和2.54倍,结合该研究区域长期进行大规模采矿活动,推断这两种重金属元素的富集和污染主要是由人类采矿活动所引起的。而Pb、Cu和Zn元素略高于背景值,说明除自然界土壤母质及风化产物的累积外,其来源也较为广泛。综上所述,该区域5种重金属元素均不同程度的受到矿业活动的影响,其中Cd和Ni受铁矿开采影响明显。

表9 土壤中重金属元素间的相关性分析

Table 9 Correlation analysis among heavy metals in soil

重金属	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni
Cd	1.000				
Pb	-0.051	1.000			
Cu	-0.302	0.894 **	1.000		
Zn	-0.151	0.964 **	0.872 **	1.000	
Ni	0.990 **	-0.002	-0.207	-0.078	1.000

注:“\*\*”表示极显著相关。

## 3 结论与建议

(1)鞍山某铁矿周围土壤中Cd、Pb、Cu、Zn、Ni平均含量分别为1.07、32.62、30.72、105.31、65.08 mg/kg,均超过辽宁省土壤环境背景值,存在不同程度的积累。其中Cd和Ni两种元素含量超过了国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的二级标准,存在一定的复合污染现象。

(2)单因子指数表明,研究区域土壤Cd处于轻中度污染水平,Ni处于警戒状态,Pb、Cu、Zn均为无污染。内梅罗污染指数表明整个区域土壤中Cd、Pb、Cu、Zn和Ni的综合污染程度为轻度污染状态。

地累积指数结果表明,土壤中 Pb、Cu、Zn 和 Ni 处于无污染或轻微污染,而 Cd 达到中度甚至偏重污染程度。潜在生态风险评价表明,研究区域处于强度生态风险等级,Cd 是主要生态风险贡献因子。相关性分析结果表明,5 种重金属元素的来源均与矿产资源的开发利用有关,其中 Cd 和 Ni 受铁矿开采影响较为明显。

(3)综合上述结果,鞍山某铁矿区土壤受到了一定程度的 Cd、Ni 复合污染,应引起有关部门的高度重视。在采取污染防治措施的同时,可考虑筛选、采用该矿区土壤上自然分布的耐盐碱、耐重金属、生物量高且具有一定经济价值的植物,联合微生物技术进行土壤的修复和改良。一方面这种生物修复技术成本低,可大面积应用于矿区复垦;另一方面,在利用植物修复污染土壤的同时,若能将金属矿物从植物中进行回收再利用,这方面的研究也具有较大的经济价值和应用前景。

## 参考文献:

- [1] 庞文品,秦樊鑫,吕亚超,等.贵州兴仁煤矿区农田土壤重金属化学形态及风险评估[J].应用生态学报,2016,27(5):1468–1478.
- [2] 余璇,宋柳霆,滕彦国.湖南省某铅锌矿土壤重金属污染分析与风险评价[J].华中农业大学学报,2016,35(5):27–32.
- [3] 秦飞,李倩,季宏兵,等.密云水库上游铁矿区土壤中重金属污染评价[J].环境科学与技术,2013,36(12M):353–361.
- [4] 陕永杰,张磊.塔儿山铁矿区土壤重金属污染评价及来源分析[J].环境工程,2016,34(11):141–144.
- [5] 张奥博,褚先尧,殷汉琴,等.龙游硫铁矿区农田土壤重金属污染的空间变异及在水稻中的积累[J].土壤,2017,49(4):760–769.
- [6] 毛香菊,邹安华,马亚梦,等.南京某铁矿区土壤重金属污染潜在生态危害评价[J].矿产保护与利用,2015(3):54–59.
- [7] 马亚梦,谭秀民,毛香菊,等.典型铁尾矿库重金属污染评价及生态修复建议[J].矿产保护与利用,2016(3):49–56.
- [8] 李金.鞍山市矿区分布及污染情况调查研究[J].山东工业技术,2016,12:274.
- [9] 邢小茹,薛生国,张乃英,等.鞍山市大气尘和金属元素沉降通量及污染特征[J].中国环境监测,2010,26(2):11–15.
- [10] 贾亚琪,程志飞,刘品祯,等.煤矿区周边农田土壤重金属积累特征与生态风险评价[J].土壤通报,2016,47(2):474–479.
- [11] 李三中,徐华勤,陈建安,等.某矿区砷碱渣堆场周边土壤重金属污染评价及潜在生态风险分析[J].农业环境科学学报,2017,36(6):1141–1148.
- [12] 张永康,曹耀华,冯乃琦,等.青海某铁多金属矿区土壤重金属污染评价[J].矿产保护与利用,2017(3):94–99.
- [13] 姜素,陆华,曹瑞祥,等.某铁尾矿库及周边土壤重金属污染评价[J].环境科学与技术,2014,37(S1):274–278.
- [14] 李峰,王素芳,张丽娟.豫中平原煤矿区土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J].河南科学,2016,34(11):1910–1916.
- [15] Häkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8):975–1001.
- [16] 兰金秀,张风宝,杨明义.渭河中下游河道沉积物重金属污染生态风险评价[J].水土保持研究,2017,24(4):77–82.
- [17] 李玲,高畅,董洋洋,等.典型煤矿工业园区土壤重金属污染评价[J].土壤通报,2013,44(1):227–231.

**引用格式:**贾莲,刘盼盼,吕琳琳,等.鞍山某铁矿区土壤重金属污染评价[J].矿产保护与利用,2018(4):118–123.

JIA Lian, LIU Panpan, LV Linlin, et al. Pollutions assessment of heavy metals in soils surrounding an iron mine region in Anshan[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(4):118–123.