

陈璐, 王凯荣, 王芳丽, 等. 平度市金矿区农田土壤-玉米系统重金属污染风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 161-166.

CHEN Lu, WANG Kai-rong, WANG Fang-li, et al. Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in the Agricultural Soil-Maize System of a Gold Mining Area in Pingdu City, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2): 161-166.

## 平度市金矿区农田土壤-玉米系统 重金属污染风险评价

陈璐, 王凯荣\*, 王芳丽, 宋宁宁, 刘君

(青岛农业大学青岛市农村环境工程研究中心, 山东 青岛 266109)

**摘要:**本研究以平度市典型金矿区农田土壤-玉米系统为研究对象,采用地累积指数法和内梅罗指数法评价农田土壤重金属污染生态风险,采用靶标危害系数法评价重金属人体健康风险。结果表明,研究区农田土壤中4种重金属潜在风险程度为: Cd>Zn>Pb>Cr,均表现出中等及以上污染风险,其中Cd呈极严重污染风险;采样点的农田土壤重金属综合污染均处于轻度以上污染程度,其中一半以上处于中等以上污染等级。矿区居民经玉米途径摄入的单一重金属元素对健康的损害风险不大;4种重金属叠加的总危害指数分别是  $2.99 \times 10^{-3}$  (成人)和  $7.13 \times 10^{-3}$  (儿童),摄食玉米后,矿区居民可能遭受一定的健康风险危害,其中Cd贡献率最高(60.30%),且对儿童造成的健康风险明显高于成年人。

**关键词:**金矿区;农田土壤-玉米系统;重金属污染;生态风险评价;人体健康风险评价

中图分类号:X820.4

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)02-0161-06

doi: 10.13254/j.jare.2017.0258

### Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in the Agricultural Soil-Maize System of a Gold Mining Area in Pingdu City, China

CHEN Lu, WANG Kai-rong\*, WANG Fang-li, SONG Ning-ning, LIU Jun

(Qingdao Engineering Research Center for Rural Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China)

**Abstract:** Heavy metals pollution in agricultural soils easily occur in the gold mining area and thereby negatively impact ecosystem and human health. Therefore, this study selected the soil-maize system in the typical gold mining area of Pingdu City as the case study. The ecological risk of heavy metals in farmland soil was evaluated using geo-accumulation index method and Nemerow index method. Human health risk was evaluated using target hazard quotients (THQ) method. The results showed that the potential ecological risk of the four heavy metals in agricultural soils had an order of Cd>Zn>Pb>Cr, which potentially induced mediate risk and/or above. Thereinto, the potential ecological risk of Cd was extremely heavy. The integrated pollution risk levels of the four heavy metals were all light and/or above. Thereinto, the integrated pollution risk levels of the four heavy metals in the half of the sampling sites potentially were medium and/or above. The potential health risk of a heavy metal (Cd, Zn, Pb or Cr) was low to residents in the studied area when they ate maize and their products. However, there was a certain level of the integrated potential health risk, considering the total hazard index of  $2.99 \times 10^{-3}$  for adults and  $7.13 \times 10^{-3}$  for children. Cd contributed the most to the integrated potential health risk, with a contribution of 60.30%. The integrated potential health risk of the four heavy metals was greater to children than adults.

**Keywords:** gold mining area; agricultural soil-maize system; heavy metal pollution; ecological risk assessment; human health risk assessment

矿产资源开发在推动国民经济发展的同时,也造成矿区土壤重金属富集,产生严重的污染问题<sup>[1-2]</sup>,直

接威胁到食品安全、生态安全和矿区居民的人居安全,且重金属不可降解,矿区停止开采上百年后,仍然会持续释放重金属元素,严重影响了当地经济的快速、持续、健康发展<sup>[3]</sup>。

近年来,矿山开采导致的重金属污染问题引起了国内外学者的广泛关注。Jung等<sup>[4]</sup>调查 Imcheon 矿区

收稿日期:2017-10-25 录用日期:2017-12-21

基金项目:农业部农业生态环境保护项目(091621-10402229019)

作者简介:陈璐(1992—),女,山东平度人,硕士研究生,主要从事环境  
污染风险评价研究。E-mail:284473334@qq.com

\*通信作者:王凯荣 E-mail:krwang1@163.com

土壤重金属污染情况发现污染源主要是酸性矿坑水和尾矿；山东省东部地区的局部土壤重金属污染物(Cd、Cr、Pb、Zn 等)已迁移到小麦籽实内,具有较强生态风险<sup>[5]</sup>;葫芦岛冶炼厂地区进行的健康风险评估显示,儿童受到 Pb、Cd 的健康风险高于成年人<sup>[6]</sup>。以上研究说明,矿区土壤容易遭受 Cd、Cr、Pb、Zn 等重金属污染,研究者利用地累积指数法、单因子指数法、内梅罗指数法等对矿区重金属污染生态风险进行评价,利用 Hankanson 生态风险法和靶标危害系数法对其人体健康风险进行了评价,矿区土壤重金属污染表现出较高的生态风险和人体风险<sup>[7-8]</sup>。

平度市是青岛地区金矿资源集中分布区域,探明金矿矿脉 30 多条,采冶历史最早可追溯到 1885 年(清光绪 11 年),经历了官办、民办、国有、集体和个体等不同的采矿形式。本研究区为平度市新河镇一中型集体所有制金矿生产区,1993 年开始进行露天采矿,1997 年转为井下开采,矿石含金量 2~3 g·t<sup>-1</sup>,年产黄金 170 kg 以上,选金流程主要为浮选-氰化联合流程和混汞-浮选联合流程。矿区周边农田土壤以耕型棕壤为主,pH 值 7.52(6.52~8.11)。金矿开采以来一直没有对矿区农田土壤污染影响进行过系统调查。

因此,本文以平度新河镇金矿区为典型案例区,研究金矿区农田土壤-玉米系统中的典型重金属污染特征,并用地累积指数法和内梅罗指数法进行土壤重金属污染风险评价,采用靶标危害系数法进行人体健康风险评价,为金矿区农田土壤环境质量评价及重金属污染风险管理提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2016 年 9—10 月,在矿区尾砂库、灌溉沟渠、矿坑口等潜在污染源周边的代表性农田中选取 13 个采样区域(片区),每个区域均选取 3 个样点,共 39 个样点(丘块),每个样点再按五点采样法采集耕层 0~20 cm 土样和玉米籽粒样。

### 1.2 样品测定

土壤样品风干研磨过 100 目筛后用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>(体积比 3:2:3:1)进行消解,玉米籽粒烘干粉碎后用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>(体积比 2.5:5:3)进行消解,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定土壤和玉米籽粒中 Cd、Pb、Cr、Zn 和 As 含量。用硫酸-五氧化二钒消煮-冷原子吸收法(GB/T 17136—1997)测定土壤中 Hg 含量,用硫酸-硝酸消化-冷原子吸收法

(GB 5009.17—2014)测定玉米籽粒中 Hg 含量。采用国家土壤标准物质(GBW07401)进行质量控制,回收率为 98.1%~103.8%。此外,每批次测定加入 2 个空白样、3 个平行样。

### 1.3 土壤重金属污染生态风险评价

参照《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995),采用以下两种方法对农田土壤重金属污染进行评价。

#### 1.3.1 地累积指数法

地累积指数法<sup>[9]</sup>除考虑到人为污染因素外,还能够考虑到成岩作用可能导致的背景值变动。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2(C_x / KB_x) \quad (1)$$

式中: $C_x$  为重金属元素  $x$  的含量,mg·kg<sup>-1</sup>;  $B_x$  为当地土壤中重金属元素  $x$  含量的地球化学背景值,mg·kg<sup>-1</sup>,本研究重金属背景值采用山东省棕壤重金属元素背景值<sup>[10]</sup>;  $K$  为固定系数,取值 1.5。污染分级标准见图 1<sup>[11]</sup>。

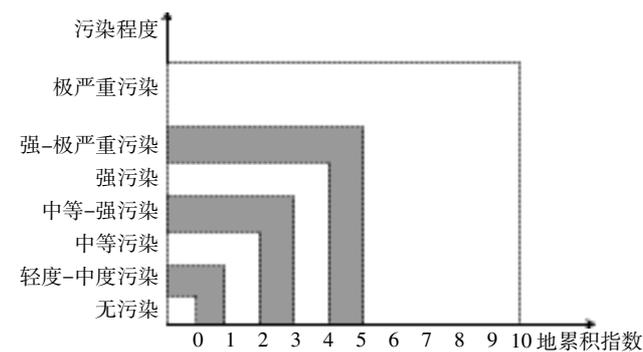


图 1 地累积指数法分级标准图

Figure 1 Metal pollution levels based on the geo-accumulation index method

#### 1.3.2 内梅罗指数法

内梅罗指数法<sup>[12-15]</sup>能够较客观全面地反映多种重金属元素的综合污染水平,公式如下:

$$P_i = C_i / S_i \quad (2)$$

$$I = [(P_{i最大} + P_{i平均}) / 2]^{1/2} \quad (3)$$

式中: $P_i$  为土壤中元素  $i$  的污染指数; $C_i$  为元素  $i$  的实测值,mg·kg<sup>-1</sup>;  $S_i$  为元素  $i$  的土壤环境标准(GB 15618—1995)中 II 类标准的临界值,mg·kg<sup>-1</sup>;  $I$  为内梅罗指数。污染分级标准见图 2。

### 1.4 人体健康风险评价

采用美国国家环保局(US EPA)提出的靶标危害系数法<sup>[16]</sup>对平度新河镇金矿区农作物的食用健康风险进行评价。靶标危害系数取值及其物理意义见表 1,计算公式如下:

$$EDI_i = (E_f \times E_d \times F_{IR} \times C_x) / (W_{AB} \times T_A \times 1000) \quad (4)$$

$$THQ_i = EDI_i / R_{FD} \quad (5)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤和玉米籽粒中重金属富集特征

从表2可知,平度新河镇金矿区农田土壤中重金属Cd、Pb、Cr、Zn、Hg和As平均含量分别为3.1、215.0、191.8、917.2、0.4 mg·kg<sup>-1</sup>和8.1 mg·kg<sup>-1</sup>,其中土壤中Cd、Pb、Cr和Zn平均含量不仅大大超过山东省棕壤背景值(Cd、Pb、Cr和Zn的背景值分别为0.04、11.5、50.8 mg·kg<sup>-1</sup>和38.1 mg·kg<sup>-1</sup>),也明显超出了《土壤环境质量标准》二级标准,样品超标率分别为100%、23.1%、7.7%和53.9%,其中Cd污染最严重,超标5.1倍。Hg和As平均含量虽然超过山东省土壤背景值(Hg和As的背景值分别为0.03 mg·kg<sup>-1</sup>和8.02 mg·kg<sup>-1</sup>),但均低于《土壤环境质量标准》二级标准。

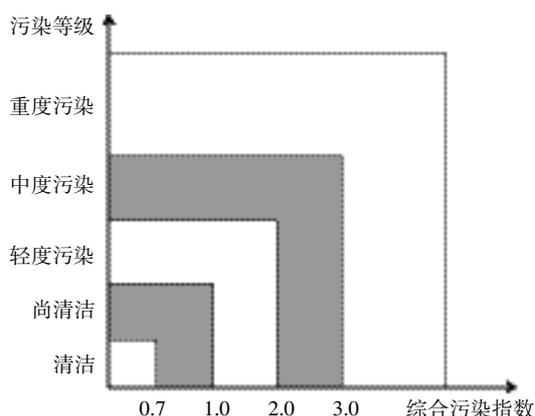


图2 内梅罗指数法分级标准图

Figure 2 Metal pollution levels based on the Nemerlo index method

玉米籽粒中Cd、Pb、Cr、Zn、Hg和As的平均含量为0.7、1.0、1.5、47.1、0.01 mg·kg<sup>-1</sup>和0.1 mg·kg<sup>-1</sup>,其中Cd、Pb、Cr和Zn的平均含量均超过粮食中重金属元素含量限量国家标准(NY 861—2004),样品超标率分别为100%、61.5%、76.9%和46.2%,同样是Cd污染最严重,超标13.6倍。Hg和As平均含量均低于粮食中重金属元素含量限量国家标准(NY 861—2004)。可见,土壤和籽粒中Hg和As含量均较低,因此未对这两种元素进行风险评价。

有调查表明,广西某铅锌矿区玉米籽粒中Cd、Pb、Cr含量分别为0.05、0.23 mg·kg<sup>-1</sup>和0.43 mg·kg<sup>-1</sup>[20],四川甘洛县铅锌矿区玉米中Cd、Pb、Cr含量分别为0.3、0.36 mg·kg<sup>-1</sup>和1.07 mg·kg<sup>-1</sup>[21],安徽宿州煤矸石场区玉米中Cd、Pb、Cr含量分别为0.05、0.65 mg·kg<sup>-1</sup>和0.53 mg·kg<sup>-1</sup>[22],与这些矿区比较,本研究区玉米重金属,尤其是Cd的污染已达到了非常严重的程度。综上所述,平度新河镇金矿区的土壤重金属含量均高于山东省棕壤重金属含量背景值,种植的玉米籽粒中重金属含量亦超出食用限量标准,会对人体健康造成威胁。

为了进一步分析玉米籽粒对重金属的富集特征,计算其富集系数,公式如下:

富集系数=籽粒中元素x的含量/土壤中元素x的含量 (6)

如表2所示,玉米籽粒对不同重金属元素的富集程度存在显著差异,富集系数大小依次为Cd>Zn>Pb>Cr,玉米籽粒Cd富集系数最高达到了96.8。

### 2.2 土壤重金属污染生态风险评价

地累积指数法评价结果(图3)表明,Cd呈现强~极严重污染和极严重污染风险的点位分别占61.5%

表1 靶标危害系数法参数表

Table 1 Parameters of the target hazard quotient method

参数	物理意义	取值	来源
THQ <sub>i</sub>	重金属元素 <i>i</i> 的靶标危害系数	THQ>1:健康风险明显 THQ≤1:健康风险较小	[16]
EDI <sub>i</sub>	重金属元素 <i>i</i> 日均摄入量/mg·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	—	—
R <sub>FD</sub>	参考暴露剂量/mg·kg <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	Zn:0.3;Cr:0.03 Pb:0.004;Cd:0.001	[17]
E <sub>f</sub>	农作物摄食暴露频率/d·a <sup>-1</sup>	350	[17]
E <sub>d</sub>	居民平均寿命/年	24(成人),6(儿童)	[17]
F <sub>IR</sub>	玉米食用摄取速率/kg·人 <sup>-1</sup> ·d <sup>-1</sup>	0.15(成人),0.1(儿童)	[18-19]
C <sub>i</sub>	玉米中重金属 <i>i</i> 含量/mg·kg <sup>-1</sup>	实验测定(平均值)	本研究
W <sub>AB</sub>	人体平均体重/kg	56.8(成人),15.9(儿童)	[17]
T <sub>A</sub>	平均接触时间/d	E <sub>f</sub> ×E <sub>f</sub>	[18]

表 2 金矿区土壤和玉米籽粒中重金属含量  
Table 2 Concentrations of heavy metals in soil and maize

样品	项目	测定范围/ mg·kg <sup>-1</sup>	平均值/ mg·kg <sup>-1</sup>	标准限值/ mg·kg <sup>-1</sup>	超标样品 数/个	超标率/%	平均超标倍数	富集系数 范围	富集系数 均值
土壤	Cd	1.1~10.6	3.1	0.60 <sup>a</sup>	39	100	5.1	—	—
	Pb	45.1~843.3	215.0	350 <sup>a</sup>	9	23.1	—	—	—
	Cr	141.9~255.5	191.8	250 <sup>a</sup>	3	7.7	—	—	—
	Zn	134.7~3 748.4	917.2	300 <sup>a</sup>	21	53.9	3.1	—	—
	Hg	0.003~0.9	0.4	1.0 <sup>a</sup>	—	—	—	—	—
	As	6.2~11.7	8.1	25 <sup>a</sup>	—	—	—	—	—
玉米	Cd	0.02~1.5	0.7	0.05 <sup>b</sup>	39	100	13.6	0.8~96.8	36.8
	Pb	0.05~5.7	1.0	0.4 <sup>b</sup>	24	61.5	4.9	0.03~11.8	1.5
	Cr	0.1~2.8	1.5	1.0 <sup>b</sup>	30	76.9	1.5	0.06~1.6	0.8
	Zn	8.7~109.8	47.1	50.0 <sup>b</sup>	18	46.2	—	0.7~42.6	15.0
	Hg	0.004~0.02	0.01	0.02 <sup>b</sup>	—	—	—	—	—
	As	0.04~0.2	0.1	0.7 <sup>b</sup>	—	—	—	—	—

注:a为《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)的二级标准;b为《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、镉、铬、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》(NY 861—2004)的限量标准。

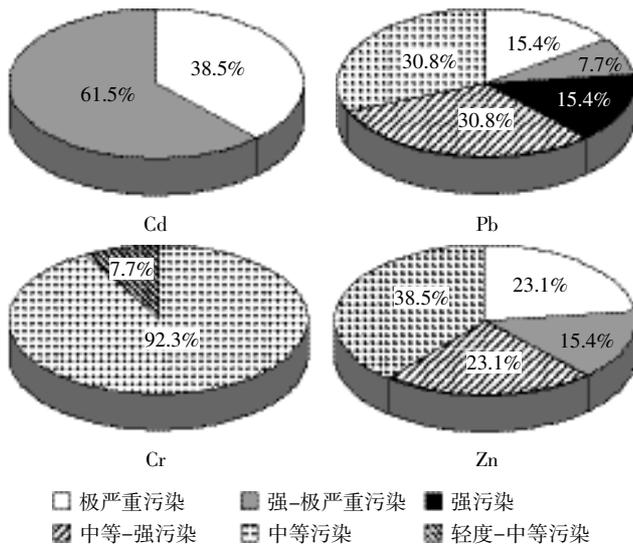


图 3 金矿区土壤重金属污染分级

Figure 3 Pollution levels of heavy metals in soils

和 38.5%;Pb 呈现中等污染、中等~强污染、强污染、强~极严重污染和极严重污染风险的点位分别占 30.8%、30.8%、15.4%、7.7%和 15.4%;Cr 呈现轻度~中等污染和中等污染风险的点位分别占 7.7%和 92.3%;Zn 呈现中等污染、中等~强污染、强~极严重污染和极严重污染风险的点位分别占 38.5%、23.1%、15.4%和 23.1%。四种重金属平均地累积指数大小顺序为: Cd>Zn>Pb>Cr, 其中 Cd 平均地累积指数为 5.19, 达到极严重污染程度,Zn 平均地累积指数为 3.08, 达到强污染程度,Pb 平均地累积指数为 2.88, 达

到中等~强污染程度,Cr 平均地累积指数为 1.31, 达到中等污染程度。

内梅罗指数法评价结果(表 3)表明,平度新河镇金矿区农田土壤重金属综合污染指数较高,总体上处于轻度以上污染程度,其中 38.5%的样点处于重污染等级,15.4%的样点处于中度污染等级,46.1%的样点处于轻度污染等级。

地累积指数法考虑自然成岩作用对背景值的影响,可以给出很直观的重金属污染级别;内梅罗指数法在评价被多种重金属污染的土壤时,兼顾单因子法

表 3 金矿区土壤重金属污染评价

Table 3 Comprehensive pollution degree of heavy metals in soil

片区号	单因子污染指数 $P_i$				综合污染 指数(I)	污染等级
	Cd	Pb	Cr	Zn		
1	8.69	0.71	0.87	7.64	6.91	重度
2	5.02	0.53	0.90	3.08	3.93	重度
3	17.68	2.41	1.02	12.49	13.84	重度
4	11.00	1.64	0.89	6.98	8.59	重度
5	3.15	0.31	0.79	1.11	2.42	中度
6	2.12	0.15	0.83	0.64	1.64	轻度
7	2.40	0.23	0.77	1.03	1.87	轻度
8	6.28	1.19	0.71	3.57	4.91	重度
9	1.82	0.14	0.57	0.59	1.40	轻度
10	1.79	0.13	0.62	0.61	1.39	轻度
11	1.87	0.14	0.62	0.45	1.43	轻度
12	2.68	0.22	0.75	0.90	2.06	中度
13	2.06	0.20	0.62	0.64	1.58	轻度

的平均值和最高值,能反映出研究区整体的污染状况。在本研究中,以上两种评价方法给出的结果非常一致,均显示平度新河镇金矿区农田土壤和玉米作物已遭受了以Cd为代表的重金属的严重污染。

### 2.3 重金属污染人体健康风险评价

平度新河镇金矿区玉米重金属污染健康风险评价结果如表4所示。与美国EPA提供的参照值( $R_{FD}$ )对比可知,玉米籽粒中Cd、Pb、Cr和Zn的EDI值均未超过 $R_{FD}$ ,玉米籽粒中Cd、Pb、Cr和Zn的THQ值均小于1,说明矿区居民经玉米途径摄入的重金属对健康的损害风险不大。但是,结合重金属土壤生态风险程度讨论如果考虑当地居民重金属暴露还包括摄食其他农产品、饮用水和大气等途径,叠加后的污染危害仍会呈现较大的隐患,需要引起高度重视。

计算所得成人和儿童的总危害指数(HI)分别是 $2.99 \times 10^{-3}$ 和 $7.13 \times 10^{-3}$ ,说明在玉米籽粒中重金属元素超标1.45~30.31倍时,摄食玉米会有一些的叠加危害风险。对比成人和儿童摄食玉米暴露途径下的健康风险可知,儿童的各项THQ值均高于成人,约为成人THQ值的2.38倍,说明摄食玉米对儿童造成的健康风险明显高于成年人。总体上看,各重金属元素的THQ值顺序为Cd>Pb>Zn>Cr(图4),其中Cd的THQ值占总危害指数(HI)的比重最大(60.30%)。可见,平度新河镇金矿区农田Cd污染对人体健康产生的危害风险最大。

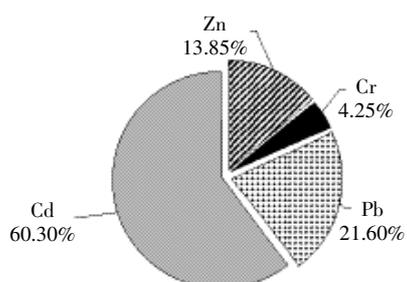


图4 金矿区各种重金属元素对HI的贡献率  
Figure 4 Composition of relative contribution of hazard index by heavy metals

### 3 结论

(1)平度新河镇金矿区农田土壤Cd、Pb、Cr和Zn 4种重金属元素平均含量均超出了《国家土壤环境质量标准》二级标准值(GB 15618—1995),其中土壤Cd含量超标5.1倍,样点超标率达到100%。玉米籽粒中Cd、Pb、Cr和Zn 4种重金属元素的平均含量亦超出《粮食(含谷物、豆类、薯类)及制品中铅、镉、铬、汞、硒、砷、铜、锌等八种元素限量》(NY 861—2004)中的限量标准,其中Cd含量超标13.6倍。

(2)农田土壤中4种重金属潜在风险程度为: Cd>Zn>Pb>Cr,均表现出中等及以上污染风险,其中Cd呈现极严重污染风险。采样点的农田土壤重金属综合污染均处于轻度以上污染程度,其中一半以上处于中等以上污染等级。

(3)玉米籽粒中Cd、Pb、Cr和Zn的THQ值均小于1,矿区居民经玉米途径摄入的单一元素对健康的损害风险不大;4种重金属叠加的总危害指数分别是 $2.99 \times 10^{-3}$ (成人)和 $7.13 \times 10^{-3}$ (儿童),摄食玉米后,矿区居民可能遭受一定的健康风险危害,其中Cd贡献率高于60.3%,且对儿童造成的健康风险明显高于成年人。

#### 参考文献:

- [1] 陈 岩,朱先芳,季宏兵,等.北京市得田沟和崎峰茶金矿周边土壤中重金属的粒径分布特征[J].环境科学学报,2014,34(1):219-228. CHEN Yan, ZHU Xian-fang, JI Hong-bing, et al. Particle size distribution of heavy metals in soils around the gold mine of Detiangou - Qifengcha, Beijing[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(1): 219-228. (in Chinese)
- [2] 李庚飞.金矿排污渠周围土壤中Mn, Cu, Zn和Pb四种重金属的污染分析[J].陕西理工学院学报(自然科学版),2012,28(4):60-63. LI Geng-fei. Analysis of the soil contamination by manganese, copper, zinc and lead along the drainage ditch around gold mine[J]. *Journal of Shanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2012, 28(4):60-63. (in Chinese)
- [3] Equeenuddin S M, Tripathy S, Sahoo P K, et al. Metal behavior in sedi-

表4 金矿区玉米重金属污染健康风险评价

Table 4 Evaluation of potential health risks of heavy metals in the studied area

元素	EDI		$R_{FD}$	THQ		HI	
	成人	儿童		成人	儿童	成人	儿童
Cd	$1.81 \times 10^{-6}$	$4.23 \times 10^{-6}$	0.001	$1.81 \times 10^{-3}$	$4.30 \times 10^{-3}$	$2.99 \times 10^{-3}$	$7.13 \times 10^{-3}$
Pb	$2.09 \times 10^{-6}$	$6.16 \times 10^{-6}$	0.004	$6.47 \times 10^{-4}$	$1.54 \times 10^{-3}$		
Cr	$3.08 \times 10^{-6}$	$9.10 \times 10^{-6}$	0.030	$1.27 \times 10^{-4}$	$3.03 \times 10^{-4}$		
Zn	$1.24 \times 10^{-4}$	$2.96 \times 10^{-4}$	0.300	$4.14 \times 10^{-4}$	$9.87 \times 10^{-4}$		

- ment associated with acid mine drainage stream; Role of pH[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 124(1):230-237.
- [4] Jung M C. Heavy metal contamination of soils and waters in and around the Imcheon Au-Ag mine, Korea[J]. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(11-12):1369-1375.
- [5] 代杰瑞, 王学, 董建, 等. 山东省东部地区土壤重金属污染及其生态环境效应[J]. *地球科学与环境学报*, 2012, 34(4):74-79.  
DAI Jie-rui, WANG Xue, DONG Jian, et al. Soil heavy metal pollution and its eco-environmental effect in eastern Shandong Province[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2012, 34(4):74-79. (in Chinese)
- [6] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 基于 THQ 的锌冶炼厂周围人群食用蔬菜的健康风险分析[J]. *环境科学学报*, 2007, 27(4):672-678.  
ZHENG Na, WANG Qi-chao, ZHENG Dong-mei. Health risk assessment of heavy metals to residents by consuming vegetable irrigated around zinc smelting plant based THQ[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(4):672-678. (in Chinese)
- [7] 范拴喜. 宝鸡市长青镇冶炼厂周围土壤重金属分布特征与污染评价[J]. *环境化学*, 2014, 33(5):861-862.  
FAN Shuan-xi. Distribution characteristics and pollution evaluation of heavy metals in soils around the smelter of Changqing Town, Baoji[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(5):861-862. (in Chinese)
- [8] Fernández-Caliani J C, Barba-Brioso C, González I, et al. Heavy metal pollution in soils around the abandoned mine sites of the Iberian pyrite belt(southwest Spain)[J]. *Water Air & Soil Pollution*, 2009, 200(1-4):211-226.
- [9] Yang G, Shao C, Ju M. Heavy metal contamination assessment and partition for industrial and mining gathering areas[J]. *International Journal of Environmental Research & Public Health*, 2014, 11(7):7286.
- [10] 刘苹, 赵海军, 刘兆辉, 等. 山东省露地蔬菜产地土壤重金属含量的环境质量分析与评价[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(6):1130-1136.  
LIU Ping, ZHAO Hai-jun, LIU Zhao-hui, et al. Analysis and evaluation of soil heavy metal environmental quality in farmlands of vegetables cultivated in open field of Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6):1130-1136. (in Chinese)
- [11] Förstner U, Müller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments; Geochemical background, man's influence and environmental impact[J]. *Geojournal*, 1981, 5(5):417.
- [12] Förstner U, Ahlf W, Calmano W, et al. Sediment criteria development [M]/Heling D, et al. Sediments and environmental geochemistry, Springer Berlin Heidelberg, 1990:311-338.
- [13] 夏敏, 赵炳梓, 张佳宝. 基于 GIS 的淮黄淮海平原典型潮土区土壤重金属积累研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(4):684-692.  
XIA Min, ZHAO Bing-zi, ZHANG Jia-bao. GIS-based research on soil heavy accumulation in a fluvo-aquic soil area typical of the Huang-huai-hai Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(4):684-692. (in Chinese)
- [14] 方晓波, 史坚, 廖欣峰, 等. 临安市雷竹林土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6):1883-1891.  
FANG Xiao-bo, SHI Jian, LIAO Xin-feng, et al. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk analysis for soil in *Phullostachys praecox* stands of Lin'an[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6):1883-1891. (in Chinese)
- [15] 李琦, 韩亚芬, 黄淑玲. 煤矿区玉米作物重金属污染状况及健康风险评估[J]. *阴山学刊*, 2015, 29(2):26-30.  
LI Qi, HAN Ya-fen, HUANG Shu-ling. Heavy metals contents of maize in coal mining area and their health risk assessment[J]. *Yinshan Academic Journal*, 2015, 29(2):26-30. (in Chinese)
- [16] US EPA. Integrated risk information system[EB/OL]. <http://www.epa.gov/iris/subst2007>.
- [17] 环境保护部. HJ 25.3—2014 污染场地风险评估技术导则(发布稿)[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2014.
- [18] 纪小凤, 郑娜, 王洋, 等. 有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险[J]. *环境科学*, 2015, 36(10):3845-3851.  
JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, et al. Accumulation of mercury in soil-maize system of non-ferrous metals smelting area and its related risk assessment[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(10):3845-3851. (in Chinese)
- [19] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(9):2014-2021.  
YANG Gang, SHEN Fei, ZHONG Gui-jiang, et al. Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in zinc-lead mining area in southwest mountainous regions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9):2014-2021. (in Chinese)
- [20] 黄楚珊, 胡国成, 陈棉彪, 等. 矿区家庭谷物和豆类重金属含量特征及风险评估[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(3):1171-1178.  
HUANG Chu-shan, HU Guo-cheng, CHEN Mian-biao, et al. Heavy metal content characteristics and risk assessment of household cereal and beans from mining areas [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(3):1171-1178. (in Chinese)
- [21] 叶宏萌, 袁旭音, 赵静. 铜陵矿区河流沉积物重金属的迁移及环境效应[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(10):1853-1859.  
YE Hong-meng, YUAN Xu-yin, ZHAO Jing. Spatial migration and environmental effects of heavy metals in river sediments from in the Tongling mining area, Anhui Province[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(10):1853-1859. (in Chinese)
- [22] 李琦, 韩亚芬, 许东升, 等. 煤矸石场附近 3 种粮食作物的重金属富集特征及污染评价[J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(5):321-326.  
LI Qi, HAN Ya-fen, XU Dong-sheng, et al. Enrichment characteristics and contaminant assessment of heavy metals in three food crops around the gangue dumps[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2014, 14(5):321-326. (in Chinese)