

谢团辉, 胡 聪, 陈炎辉, 等. 某炼钢厂周边农田土壤重金属污染状况的调查与评价[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 155-160.

XIE Tuan-hui, HU Cong, CHEN Yan-hui, et al. Investigation and Evaluation of Heavy Metals Pollution of Agricultural Soils Near a Steel Plant[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(2): 155-160.

某炼钢厂周边农田土壤重金属污染状况的调查与评价

谢团辉, 胡 聪, 陈炎辉, 徐芹磊, 王 果*

(福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002)

摘要:调查了闽西某炼钢厂周边农田土壤的重金属污染状况,以《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的二级标准作为评价标准,对土壤重金属 Cr、Pb、Cd、Ni、Cu、Zn、As 进行了污染指数评价、主成分分析和因子分析,以明确土壤中的主要污染重金属种类及其污染程度、重金属的主要来源和污染分布。单因子评价结果表明调查区土壤 Cd 和 Zn 的污染普遍且较严重,点位超标率分别为 100%和 95.5%;Pb、Cu 和 As 污染程度较轻,点位超标率分别为 29.6%、15.9%和 6.8%;土壤未遭受 Cr 与 Ni 的污染。主成分分析和因子分析法分析结果表明,Pb、Cd、Cu、Zn、As 之间相关性显著,具有同源性,主要受炼钢厂排放的污染物影响;而 Cr 和 Ni 之间相关性显著,亦具有同源性,主要受土壤本底含量的影响。土壤重金属的综合污染程度随距炼钢厂距离的增加而逐渐递减,炼钢厂污水进入农田的主要进水口附近的农田土壤污染较严重。

关键词:炼钢厂;农田;土壤;重金属污染;地统计分析

中图分类号:X833

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)02-0155-06

doi: 10.13254/j.jare.2018.0014

Investigation and Evaluation of Heavy Metals Pollution of Agricultural Soils Near a Steel Plant

XIE Tuan-hui, HU Cong, CHEN Yan-hui, XU Qin-lei, WANG Guo*

(College of Resources and Environmental Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: The pollution of heavy metals in farmland around a steel plant in the west of Fujian Province was investigated. The pollution index method, principal component analysis and factor analysis on the pollution of Cr, Pb, Cd, Ni, Cu, Zn and As in the soils were carried out to clarify the pollution status, the main source, the degree, and the distribution of the heavy metals pollution in the soil. The secondary standards for acidic agricultural soils of "soil environmental quality standard" (GB 15618—1995) were used as the evaluation criterion. The single factor evaluation results showed that the pollution of soil by Cd and Zn in the investigated area was widespread and serious and the points over standard rate was 100% and 95.5% respectively, while the pollution by Pb, Cu and As was slight and the points over standard rate was 29.6%, 15.9% and 6.8% respectively. The soils were not polluted by Cr and Ni. The principal component analysis and factor analysis showed that the correlation between Pb, Cd, Cu, Zn and As was significant and homologous. Therefore, the pollution of Pb, Cd, Cu, Zn and As of the soils should be mainly attributed to the pollutants emitted from the steel plant. The correlation between Cr and Ni was also significant and homologous. It was deduced that Cr and Ni in the soils were largely originated from the soils themselves. The comprehensive pollution degree of the heavy metals in the soils decreased as the distance between the steel plant and farmland increasing. The soils of the fields near the entrance of irrigation water from the waste water of the steel plant were more seriously polluted.

Keywords: steel plant; farmland; soil; heavy metal pollution; geographical statistical analysis

收稿日期:2017-11-25 录用日期:2018-01-11

基金项目:国家自然科学基金项目(U1305232)

作者简介:谢团辉(1986—),男,福建漳州人,助理实验师,从事土壤调查与评价工作。E-mail:271843874@qq.com

*通信作者:王 果 E-mail:1400619353@qq.com

随着工业化进程的加快,未达到规定排放标准的工业“三废”的随意排放进入环境,造成了土壤中重金属浓度的增加,且工矿企业周边的农田土壤多属于重金属污染比较严重的区域。开展工矿区周围农田土壤重金属污染状况的调查与评价,了解其污染的程度、分布和来源,是开展工矿企业周边农田土壤污染管控和修复的必要基础。国内外对土壤重金属污染评价、污染来源分析等方面做了大量研究,采用的主要评价方法有:污染指数法、潜在生态危害风险法、富集因子法、灰色聚类法、层次分析法、地累积指数法、健康风险评价法等^[1-3]。其中,单项污染指数法以土壤环境质量标准为基础,目标明确;内梅罗污染指数法可全面反映各污染物对土壤的不同作用^[4]。如:王成军等^[5]采用单因子和内梅罗污染指数法发现冶炼厂周边大部分土壤重金属浓度超出国家二级标准值;曹露等^[6]采用单因子和内梅罗污染指数法得出碧流河下游农田受土壤重金属污染,且处于重污染水平。随着计算机技术和地理信息系统(GIS)的广泛应用,多种模型评价方法逐步应用到土壤重金属污染评价中,实现了土壤重金属的空间变异特征分析,可以对评价结果进行可视化表达^[7]。因此将单项污染指数和内梅罗污染指数同时用于环境各要素评价中,并结合地统计分析方法,可准确、全面、直观地反应土壤重金属污染及空间分布情况,对土壤重金属的治理和防控都有着重要的意义。

福建是我国南方重要的重金属矿区之一,分布着大量铅锌矿和锰矿等重金属矿产。长期以来,由于缺乏环保意识,开采、选矿过程中对矿区周围环境造成了不同程度的污染。由于这些尾矿中含有大量重金属,在地表生物地球化学作用下,通过释放和迁移导致了土壤和作物受到严重的重金属污染,并通过食物链进入人体,对矿区周围居民的身体健康和生存环境构成了严重威胁^[8]。不同类型的重金属企业涉及的重金属污染物不同,如集中于泉州市和漳州市的皮革鞣制加工业在生产过程中使用含铬鞣剂,因此造成了严重的 Cr 污染;而金属表面加工业主要污染物为 Zn、Cr、Cu、Ni。这说明分析不同行业周边土壤重金属的污染对于治理当地土壤是非常重要的^[9]。因此本文选择福建省西部某典型炼钢厂周边农田重金属进行调查和研究,利用污染指数法和空间插值法对土壤重金属进行评价以及进一步的源解析,以期为由于炼钢活动造成的土壤污染的管理和修复提供更为可靠的科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查区概况

调查区选在福建省西部某炼钢厂附近的污染农田。炼钢厂位于河流东侧,建于 20 世纪 70 年代初期,上游还有长期开采的铁矿。当地居民长年使用炼钢厂和上游铁矿排放的废水进行农田灌溉,因此可能使得流域两侧的农田受到比较严重的重金属污染。调查区位于河流的西侧,总面积约 72.3 hm²,土壤母质以冲积物为主(图 1)。

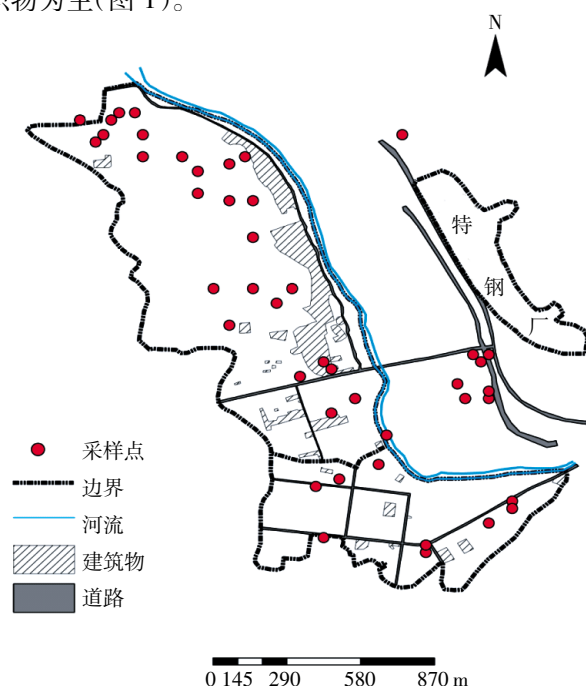


图 1 调查区采样点分布图

Figure 1 Location of the sampling sites near the steel plant

1.2 样品采集与处理

根据炼钢厂周边的灌溉渠的分布特征,在调查区内共采集 44 个表层土壤(0~20 cm)样品,如图 1 所示。土样风干后,研磨过 2 mm 尼龙筛,取适量<2 mm 土样研磨过 0.149 mm 尼龙筛,储存备用。

1.3 测定方法

土壤全量铬、铅、镉、镍、铜和锌采用(GB/T 17137—1997)HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 消解法,电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定;全量砷采用原子荧光法^[10]。

1.4 土壤污染评价方法

土壤污染评价方法采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法。单因子污染指数计算方法见公式 1:

$$P_i=C_i/S_i \tag{1}$$

式中: P_i 为土壤污染物 i 的单项污染指数, C_i 为土壤污染物 i 的实测全量 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), S_i 为土壤污染物 i 的评价标准($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。评价标准采用《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)中的二级标准值($\text{pH}<6.5$)为评价标准,当水田和旱地的标准值不同时,均选用其中较低的标准值作为评价标准,各重金属的评价标准分别为: $\text{Cd}=0.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Pb}=250\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Zn}=200\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Cu}=50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{As}=30\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Cr}=150\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, $\text{Ni}=40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。重金属污染程度分级见表 1。内梅罗综合污染指数的计算方法见公式 2:

$$P_{\text{综}}=\sqrt{\frac{(\overline{P})^2+P_{\text{max}}^2}{2}} \tag{2}$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为土壤综合污染指数; $\overline{P}$ 为土壤中各污染物指数的平均值; P_{max} 为土壤单项污染物的最大污染指数,按表 1 的指标进行污染程度分级。

表 1 土壤重金属污染指数划分标准

Table 1 Threshold values for grading the pollution index of the heavy metals in the soils

单因子污染指数		内梅罗综合污染指数	
P_i	污染等级	$P_{\text{综}}$	污染等级
$P_i<1$	清洁	$P_{\text{综}}\leq 0.7$	清洁(安全)
$1\leq P_i<2$	轻微污染	$0.7<P_{\text{综}}\leq 1$	尚清洁(警戒线)
$2\leq P_i<3$	轻度污染	$1<P_{\text{综}}\leq 2$	轻度污染
$3\leq P_i<5$	中度污染	$2<P_{\text{综}}\leq 3$	中度污染
$P_i\geq 5$	重度污染	$P_{\text{综}}>3$	重度污染

1.5 数据处理

使用 Excel 2010 进行数据处理;采用 SPSS 19.0 进行主成分分析和因子分析;采用克里格插值法并通过 ArcGIS 10.2 软件绘制污染指数综合评价图。

2 结果与分析

2.1 调查区土壤重金属含量

调查区土壤 Cd、Pb、Zn、Cu、As、Cr、Ni 的全量列于表 2。由表 2 可知,该区土壤中除 Ni 外,Cd、Zn、Pb、Cu、As、Cr 全量的平均值均超过福建省土壤背景值^[1]。调查区土壤 44 个点位中 Cd、Pb、Zn 和 As 四个元素的点位超标率(与背景值比)达到 100%,Cu 的点位超标率(与背景值比)为 81.8%,Cr 的点位超标率(与背景值比)为 56.8%,Ni 的点位超标率(与背景值比)最小为 20.5%。上述的结果表明该调查区无论流域上游和下游的土壤都受到了 Cd、Pb、Zn 和 As 的污染,超

过一半的土壤也受到了 Cu 和 Cr 污染。调查区虽只有不到 1/5 的土壤受到 Ni 的污染,然而 Ni 的最大值约是福建省土壤背景值的 4.4 倍,所以个别点位 Ni 的污染也不容忽视。

表 2 土壤各重金属含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 2 Contents of the heavy metals in the soils($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

重金属含量						
重金属	最小值	最大值	中位数	平均值	标准差	背景值 *
Cd	0.55	7.19	0.93	1.53	1.30	0.074
Pb	132.8	564.3	200.4	228.6	95.74	41.3
Zn	101.4	2 541	499.0	632.4	445.2	86.1
Cu	6.34	96.79	28.79	34.54	18.10	22.8
As	6.94	42.47	14.79	15.70	7.12	6.3
Cr	19.73	141.1	45.46	46.31	17.39	44.0
Ni	7.03	79.72	16.56	17.26	10.12	18.2

注:* 福建省土壤重金属元素背景值(算术平均值)。
Note: Background value of soil heavy metals in Fujian Province(arithmetic mean value).

2.2 土壤各重金属的污染指数

采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对调查区土壤的污染情况进行评价,计算得到的污染指数如表 3 所示。从表 3 可知,土壤 Cd 的单因子污染指数均值为 5.47,点位超标率(二级标准)为 100%,平均污染程度属于重度污染。土壤 Zn 的单因子污染指数均值为 3.31,点位超标率(二级标准)为 95.5%,平均污染程度属于中度污染。土壤 Pb 的污染指数均值为 0.94,点位超标率(二级标准)为 29.6%,且最大单因子污染指数为 2.26,这表明调查区局部土壤的 Pb 污染也比较严重。土壤 Cu 和 As 的点位超标率(二级标准)分别为 15.9%和 6.8%,最大单因子污染指数分别为 1.94 和 1.42,表明调查区土壤中有小

表 3 土壤重金属污染指数和污染程度

Table 3 The pollution index and the pollution degree of the heavy metals in the soils

元素	范围	平均值	平均污染程度	点位超标率/%
P_i -Cd	1.82~23.97	5.47	重度污染	100
P_i -Pb	0.53~2.26	0.94	清洁	29.6
P_i -Zn	0.51~12.70	3.31	中度污染	95.5
P_i -Cu	0.13~1.94	0.72	清洁	15.9
P_i -As	0.23~1.42	0.53	清洁	6.8
P_i -Cr	0.18~0.56	0.39	清洁	0
P_i -Ni	0.001~0.40	0.43	清洁	0
$P_{\text{综}}$		4.00	重度污染	

部分受到了 Cu 和 As 的污染,但污染程度相对较轻。调查区 44 个点位中 Cr 和 Ni 均未超过二级标准,这说明调查区土壤 Cr 和 Ni 的外源输入量有限,Cr 和 Ni 在土壤中处于清洁状态。土壤的内梅罗污染指数均值为 4.00,根据表 1 土壤重金属污染指数划分标准可知调查区土壤重金属整体上处于重度污染状态。

2.3 土壤重金属污染的主成分分析

同一来源的元素之间存在相关性,因此,可以利用元素之间的相关性来反映各个元素之间的同源关系或关联情况^[12]。表 4 表示了调查的 7 种重金属之间的相关系数。由表 4 可知,Cd、Pb、Cu、Zn、As 五个元素之间具有极显著的正相关关系,这可能说明 Cd、Pb、Cu、Zn、As 具有同源关系或者它们的污染源之间具有一定的关联性。Cr 与 Ni 之间相关性极显著,这也暗示这两个元素可能来自同一个污染源或者这两个元素的污染源之间有很强的关联性,这个结果与单因子污染指数法得出的结论一致。

除元素相关性判断污染源情况,因子分析法也是一种有效判别土壤重金属污染来源的方法^[13]。7 种重金属的 KMO 和 Bartlett 分析结果如表 5 所示。KMO

和 Bartlett 检验表明各重金属之间具有较强的相关性,KMO 值>0.6,Bartlett 球形度检验, $P<0.001$,这说明本研究的数据可以进行因子分析。由表 6 可知,前 2 个主成分因子可以解释总变量的 75.22%,因子 1 解释总方差的 47.70%,因子 2 解释总方差的 27.52%,符合因子分析要求。表 7 因子载荷矩阵显示,7 种重金属被分为两组,Cd、Zn、Pb、Cu 和 As 主要受因子 1 的影响,而 Ni 和 Cr 主要受因子 2 的影响。这个结果也进一步显示 Cd、Zn、As、Cu 和 Pb 这五个元素的污染源具有同源性,而 Cr 和 Ni 的污染源具有同源性。

图 2 也表明,Cd、Zn、Pb、Cu 和 As 是受同一影响因子的影响,根据调查区概况可以判断出主要是受钢铁厂排放的废水以及废气的影响;而 Cr 和 Ni 受外源添加影响较小,主要应是来自于土壤本底含量。不同钢铁厂会导致不同类型的土壤重金属污染,如 Cd-

表 5 KMO 和 Bartlett 检验

Table 5 Test of KMO and Bartlett

KMO 和 Bartlett 检验		
取样足够度 Kaiser-Meyer-Olkin 的度量		0.64
Bartlett 的球形度检验	近似卡方	222.00
	df	21
	Sig.	0.000 00

表 4 土壤重金属之间的相关系数(r)

Table 4 Correlation coefficients(r) between the contents of the heavy metals in the soils

元素	Cr	Pb	Cd	Ni	Cu	Zn	As
Cr	1						
Pb	0.006	1					
Cd	0.037	0.901**	1				
Ni	0.936**	-0.028	-0.044	1			
Cu	0.008	0.390**	0.459**	0.010	1		
Zn	0.131	0.545**	0.575**	0.283	0.548**	1	
As	0.244	0.728**	0.856**	0.072	0.409**	0.477**	1

注:** 为极显著相关($P<0.01$)。

Note:**means extremely significant correlation($P<0.01$).

表 7 因子载荷矩阵

Table 7 The factor load matrix

元素	旋转前		旋转后	
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2
Cd	0.901	-0.339	0.962	0.011
Pb	0.845	-0.325	0.905	0.003
As	0.873	-0.135	0.863	0.190
Zn	0.711	-0.146	0.716	0.121
Cu	0.653	0.147	0.556	0.373
Ni	0.367	0.871	0.026	0.945
Cr	0.486	0.796	0.165	0.918

表 6 因子分析总方差解释

Table 6 Explanation of the total variance of factor analysis

成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	合计	方差的/%	累积/%	合计	方差的/%	累积/%	合计	方差的/%	累积/%
1	3.59	51.29	51.29	3.59	51.29	51.29	3.34	47.70	47.70
2	1.68	23.92	75.21	1.68	23.92	75.21	1.93	27.52	75.22
3	0.82	11.67	86.89						
4	0.47	6.76	93.65						
5	0.32	4.56	98.21						
6	0.07	1.04	99.25						
7	0.05	0.76	100.00						

Pb-Ni-Cr-Mn-Zn 污染^[14]、Hg-Cd-Zn 污染^[15]、Ni-Cu-Cd-Cr 污染^[16]。本研究结果表明,调查区土壤以 Cd、Zn 污染为主,Pb、Cu、As 污染较轻,Cr 和 Ni 没有明显污染。综合上述结果可以推断周边农田土壤中的 Pb、Cd、Cu、Zn、As 污染主要由钢铁厂引起,而土壤中的 Ni 和 Cr 则主要来自于土壤本底,与钢铁厂排放没有明显的联系。

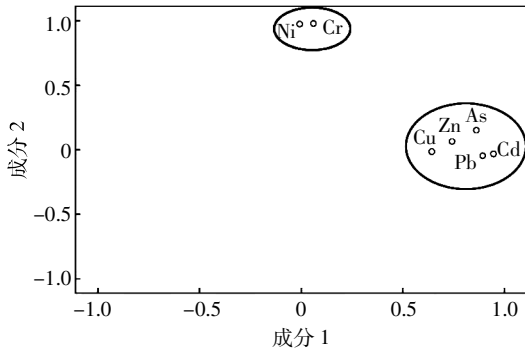


图 2 土壤重金属因子载荷分布图

Figure 2 Distribution of the factors of heavy metals in the soils

此外,来自同一污染源的重金属进入土壤后,在土壤中的迁移过程不同,如 Cd 进入土壤易于被土壤吸附,因此主要集中在土壤表层,且有机质含量越高,质地越细的土壤中表层土壤中 Cd 含量越高。而 As 则容易随着水分下渗而向下迁移而使得表层土壤中 As 的含量较低^[17]。因此在对土壤中重金属的污染程度以及污染源解析的过程中,不同重金属在土壤中的迁移形式需要考虑,采集土壤样品时不仅需要考虑表层土壤中重金属的含量,亚耕层土壤中重金属的含量也需要考虑。

2.4 空间分析

对各点位土壤的内梅罗指数进行 Kriging 插值分析得出评价图(图 3)。从图 3 中可以看出,该区域的综合污染指数总体呈现东南向西北逐渐递减的趋势。在河流西岸的农田土壤区出现 3 个污染较严重的区域,分别位于调查区西北侧以及靠近炼钢厂的西面,这种污染分布受河流流向(从东南流向西北)的影响,下游比上游更容易接受炼钢厂的污水灌溉。3 个较严重污染的土壤呈斑块状分布,而不是成片分布,这可能与污水进入农田的主要进水口的分布有关。除了排水口呈现斑块污染状况外,炼钢厂周围的土壤重金属污染最严重,总体呈从东南向西北随着距离的增加,污染逐渐减弱。

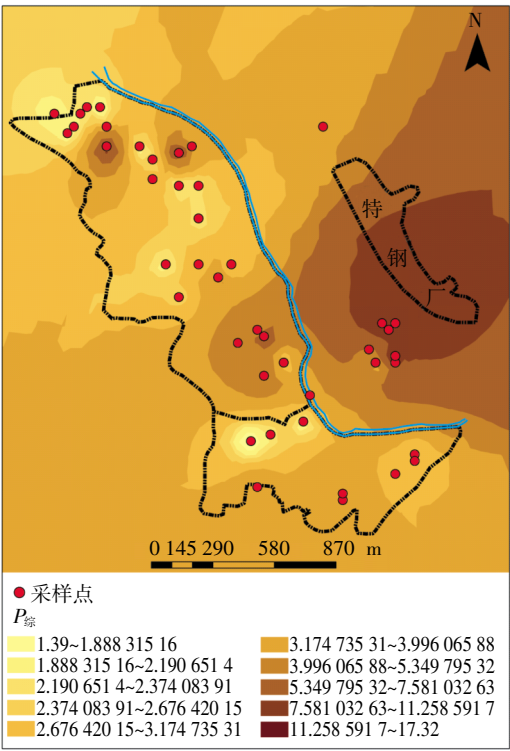


图 3 土壤重金属综合污染指数插值分布图

Figure 3 Distribution of Nemero comprehensive pollution index of the heavy metals in the soils

3 结论

(1)根据单因子污染指数分析调查区土壤 Cd 点位超标率为 100%,属于重度污染;Zn 点位超标率为 95.5%,属于中度污染;局部土壤受到了 Pb、Cu 和 As 的污染,但污染程度较轻;土壤中未见明显 Cr 与 Ni 污染。

(2)土壤 Cd、Pb、Cu、Zn 和 As 含量之间具有显著相关性,显示其具有同源关系;土壤 Cr 与 Ni 含量之间亦具有显著相关性,也具有同源关系。主成分分析和因子分析表明,土壤 Cr 和 Ni 受外来因素干扰较小,主要受土壤本底含量的影响,而 Pb、Cd、Cu、Zn 和 As 的污染主要由外源引起,可推断主要受炼钢厂污染物排放的影响,而污水灌溉是主因。

(3)调查区土壤重金属的综合污染程度空间分析表明,炼钢厂周围的土壤最严重,总体呈从东南向西北随着距离的增加,污染程度逐渐减弱;但调查区土壤出现了 3 个斑块状的比较严重的污染区,这与炼钢厂污水进入农田的入水口位置有关。

参考文献:

[1] 胡 森,吴家强,彭佩钦,等. 矿区耕地土壤重金属污染评价模型与实例研究[J]. 环境科学学报, 2014, 34(2): 423-430.

- HU Miao, WU Jia-qiang, PENG Pei-qin, et al. Evaluation model and case study on heavy metal pollution of cultivated land in mining area[J]. *Journal of Environmental Science*, 2014, 34(2):423-430. (in Chinese)
- [2] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学报, 2011, 30(5):889-896.
GUO Xiao-xiao, LIU Cong-qiang, ZHU Zhao-zhou, et al. Evaluation method of heavy metal pollution in soils[J]. *Journal of Ecology*, 2011, 30(5):889-896. (in Chinese)
- [3] 张学礼, 徐乐昌, 张 辉. 某铀尾矿库周围农田土壤重金属污染与评价[J]. 环境科学与技术, 2015(6):221-226.
ZHANG Xue-li, XU Le-chang, ZHANG Hui. Evaluation and evaluation of heavy metal pollution in farmland soil around a uranium tailings reservoir[J]. *Journal of Environmental Science and Technology*, 2015(6):221-226. (in Chinese)
- [4] 范拴喜, 甘卓亭, 李美娟, 等. 土壤重金属污染评价方法进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(17):310-315.
FAN Shuan-xi, GAN Zhuo-ting, LI Mei-juan, et al. Progress of assessment methods of heavy metal pollution in soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17):310-315. (in Chinese)
- [5] 王成军, 冯 涛, 赵舒婷, 等. 冶炼厂周边表层土壤重金属关联特征及污染评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4):2064-2070.
WANG Cheng-jun, FENG Tao, ZHAO Shu-ting, et al. Heavy metal correlation characteristics and pollution evaluation of surface soil in smelter[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(4):2064-2070. (in Chinese)
- [6] 曹 露, 张 华, 李明月, 等. 碧流河下游农田土壤重金属污染状况分析与评价[J]. 生态科学, 2017, 36(6):8-15.
CAO Lu, ZHANG Hua, LI Ming-yue, et al. Analysis and evaluation of heavy metal pollution in farmland soils in the lower reaches of Biliuhe River[J]. *Ecological Science*, 2017, 36(6):8-15. (in Chinese)
- [7] 瞿明凯. 几种地统计学方法在县域土壤空间信息处理上的应用与研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
QU Ming-kai. Application and research of several geostatistics methods in soil spatial information processing[D]. Wuhan:Huazhong Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [8] 常青山, 马祥庆, 王志勇. 南方重金属矿区重金属的污染特征及评价[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(3):395-398.
CHANG Qing-shan, MA Xiang-qing, WANG Zhi-yong. Pollution characteristics of heavy metals and their pollution evaluation in the heavy metal mining areas in South China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2007, 16(3):395-399. (in Chinese)
- [9] 马瑞丰, 周碧青, 刘金福, 等. 福建省重金属企业分布概况及行业污染问题分析[J]. 污染防治技术, 2016, 29(1):19-22.
MA Rui-feng, ZHOU Bi-qing, LIU Jin-fu, et al. Distribution of heavy metals enterprise in Fujian Province and the analysis of related pollution problems[J]. *Pollution Control Technology*, 2016, 29(1):19-22. (in Chinese)
- [10] 柴园庆. 水稻对土壤铜和砷的吸收与转移[D]. 福州:福建农林大学, 2013.
CHAI Yuan-qing. Absorption and transfer of rice to copper and arsenic in soil[D]. Fuzhou:Fujian Agriculture and Forestry University, 2013. (in Chinese)
- [11] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社. 1990.
National Environmental Protection Agency, China Environmental Monitoring Station. China soil element background value[M]. Beijing:China Environmental Science Press. 1990. (in Chinese)
- [12] Taylor M D. Accumulation of cadmium derived from fertilizers in New Zealand soil [J]. *Science of the Total Environment*, 1997, 208(1/2):123-126.
- [13] 赵秀峰, 王强盛, 石宁宁, 等. 石化园区周边农田土壤重金属污染分析与评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(1):133-141.
ZHAO Xiu-feng, WANG Qiang-sheng, SHI Ning-ning, et al. Analysis and evaluation of heavy metal pollution in farmland soils of petrochemical park[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2010, 30(1):133-141. (in Chinese)
- [14] 陈铁楠, 马建华, 张永清. 晋南某钢铁厂及周边土壤重金属污染与潜在生态风险[J]. 生态环境学报, 2015, 24(9):1540-1546.
CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, ZHANG Yong-qing. Calculation and potential ecological risk of heavy metals in a steel plant and its surrounding soil in South Shanxi Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Environmental Sciences*, 2015, 24(9):1540-1546. (in Chinese)
- [15] 张 强, 邹 华, 张 涛, 等. 无锡某钢铁厂土壤污染现状及评价[J]. 城市环境与城市生态, 2012, 25(6):25-30.
ZHANG Qiang, ZOU Hua, ZHANG Tao, et al. Status and evaluation of soil pollution in a steel plant in Wuxi City[J]. *Urban Environment and Urban Ecology*, 2012, 25(6):25-30. (in Chinese)
- [16] 滕彦国, 倪师军, 张成江, 等. 攀枝花地区不同工业区表层土壤中重金属分布的特征[J]. 物探化探计算技术, 2002, 24(3):254-256.
TENG Yan-guo, NI Shi-jun, ZHANG Cheng-jiang, et al. Characteristics of heavy metal distribution in surface soils of different industrial zones in Panzhihua area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration Technology*, 2002, 24(3):254-256. (in Chinese)
- [17] 苏年华, 张金彪, 王玉纵, 等. 福建省土壤重金属污染及其评价[J]. 福建农业大学学报:自然科学版, 1994, 23(4):434-439.
SU Nian-hua, ZHANG Jin-biao, WANG Yu-zong, et al. Pollution of soil heavy metal and its evaluation in Fujian Province[J]. *Journal of Fujian Agricultural University(Natural Sciences Edition)*, 1994, 23(4):434-439. (in Chinese)