

关中西部某铅锌冶炼区周边耕地土壤 重金属污染特征及评价

徐玉霞¹, 薛 雷², 汪志华², 彭圉凯²

(1. 宝鸡文理学院 灾害监测与机理模拟陕西省重点实验室, 陕西 宝鸡 721013;
2. 西安市农产品质量安全检验检测中心, 陕西 西安 710077)

摘 要: 通过野外采样和实验室分析, 研究关中西部某铅锌冶炼区周边耕地土壤中重金属元素的含量, 并进行了污染评价。结果表明, 该铅锌冶炼区周边耕地土壤中 Pb、Zn、Cu、Cd、Cr、Hg、As、Ni 的平均含量分别为 47.95、128.53、26.13、1.09、91.5、0.164、12.2 mg·kg⁻¹ 和 27.1 mg·kg⁻¹, 除了 Ni 元素, 均高于陕西省土壤元素背景值。评价结果表明, 该铅锌冶炼区周边耕地土壤已经达到了中重度污染程度, 其中重金属 Pb、Hg 和 Zn 污染较严重, 耕地土壤重金属复合污染较严重。

关键词: 铅锌冶炼区; 耕地土壤; 重金属; 污染特征; 评价
中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2014)02-0251-06

Pollution characteristics of heavy metals in farmland soil around a lead-zinc smelting plant in western Guanzhong Plain

XU Yu-xia¹, XUE Lei², WANG Zhi-hua², PENG You-kai²

(1. Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Simulating of Shaanxi Province, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji, Shaanxi 721013, China;
2. Xi'an Agricultural Product Quality Safety Inspection and Detection Center, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: Through the methods of field sampling and experimental analysis, the contents of heavy metals in farmland soil around a lead-zinc smelting plant in western Guanzhong Plain were investigated and the pollution assessment was conducted. The results showed that the contents of Pb, Zn, Cu, Cd, Cr, Hg, As and Ni were 47.95, 128.53, 26.13, 1.09, 91.5, 0.164, 12.2 mg·kg⁻¹ and 27.1 mg·kg⁻¹, respectively. Except for Ni, the contents of all other elements were higher than the soil background values in Shaanxi Province. The assessment results showed that the pollution of heavy metals in the farmland soil around the lead-zinc smelting plant was moderate or serious, in which the pollution of Pb, Hg and Zn was serious, and the comprehensive pollution in the farmland soil was serious.

Keywords: lead-zinc smelting plant; farmland soil; heavy metal; pollution characteristic; evaluation

近年来随着采矿和冶炼业的不断发展, 矿区周边的生态环境特别是土壤环境中重金属的污染已成为环境污染较突出的一个问题^[1]。采矿和金属冶炼是土壤重金属污染的一个重要来源, 其生产过程中产生的尾矿、废水、冶炼烟尘及污水灌溉对周围土壤产生严重影响, 土壤重金属污染具有潜在的生态危害, 已成为影响生态系统的重要污染源^[2]。重金属在土壤中的积累, 不仅直接影响土壤理化性状、降低土壤生物活性、阻碍养分有效供给, 而且可通过植物富集吸收后经食物链进入人体, 从而直接或间接地威胁人类安全和健康^[3-6]。目前我国受重金属不同程度污染的农田面积达 $60.6 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[7], 矿山开发与冶炼引起的环境问题越来越受到人们的重视, 其中铅锌矿山开采冶炼引发的环境污染问题尤为严重, 矿区和冶炼区土壤重金属污染成为当前研究热点^[8-9]。Wei 等^[10]研究了湖南水口山 Pb/Zn 采矿区和冶炼区土壤重金属的空间分布特征和来源, 结果表明, 土壤中 As、Cd、Cu、Pb、Zn 主要来源于冶炼厂烟囱气态颗粒物的排放。郑娜等^[11]对葫芦岛锌冶炼厂周围土壤蔬菜系统重金属研究表明, 锌冶炼厂

收稿日期: 2013-11-29
基金项目: 陕西省教育厅项目“宝鸡凤县铅锌矿区土壤重金属污染评价与植物修复研究”(12JK0647); 陕西省重点学科自然地理学资助项目
作者简介: 徐玉霞(1978—), 女, 陕西榆林人, 硕士, 讲师, 研究方向为资源开发利用与生态风险评价。

周围土壤和蔬菜中 Hg、Pb、Cd、Zn、Cu 等重金属严重污染,污染元素与锌冶炼厂排放的烟气有关。许中坚、吴双桃等^[12]研究了湖南株洲铅锌冶炼厂生产区和周边土壤重金属污染情况,结果表明,冶炼烟尘的大气沉降导致土壤中 Cd、Pb、Zn 等重金属严重污染。王广林等^[13]对芜湖冶炼厂污灌区土壤和水稻中重金属含量研究表明,土壤和水稻 Cu 和 Zn 污染严重。此外,国内外学者对矿区和冶炼区土壤重金属的形态生物可利用性及有效性也进行了研究,结果表明,Pb、Zn 和 Cd 容易迁移,易被生物体利用,有较大潜在生态危害。

本研究以关中西部某铅锌冶炼区周边的耕地土壤为对象,调查研究该区耕地土壤中重金属的污染特征并对其污染状况进行评价,以期对冶炼区周边地区受到重金属污染的耕地土壤的安全利用和生态修复提供一定的参考依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集

本采样区位于关中西部,千河东岸,该冶炼区东

西地势相对较高,中间低,气候上属于半干旱半湿润季风气候,年平均温度 11.5℃,年降雨量 610 mm。该冶炼区所在的乡镇面积 48 km²,人口为 30 万,该冶炼厂年产 30 万 t 铅锌,周边均是村庄和农田。供试土壤样品采自该铅锌冶炼区周边的耕地,设置典型样区作为调查研究和评价基本单元。在距冶炼区半径约 1 km 的范围内选取耕地相对集中的三个样区,样区一设置在冶炼区的西北方向,样区二设置在冶炼区的正南方向,样区三设置在冶炼厂的正东方向,如图 1 所示。用有机玻璃铲在每个样区随机采取 7 个样本,所采土壤样品均为 0~20 cm 表层的新鲜土壤。为了保证样品的代表性,样品由采样中心点及周边 2 m×2 m 范围内的 4 个子样混合组成,将混合土壤缩分成一个约 1 kg 的样品。然后将采集好的土壤样品装入无菌聚乙烯塑料袋中并贴上标签。共采集 21 个土壤样品。

采集的土壤样品放置于通风的实验室令其自然风干,风干后的土壤样品去除其中的碎石、动植物残体等杂物,用木棍碾压,过 100 目尼龙筛,再用玛瑙碾钵研细,过 200 目尼龙筛,装入密封袋待测。

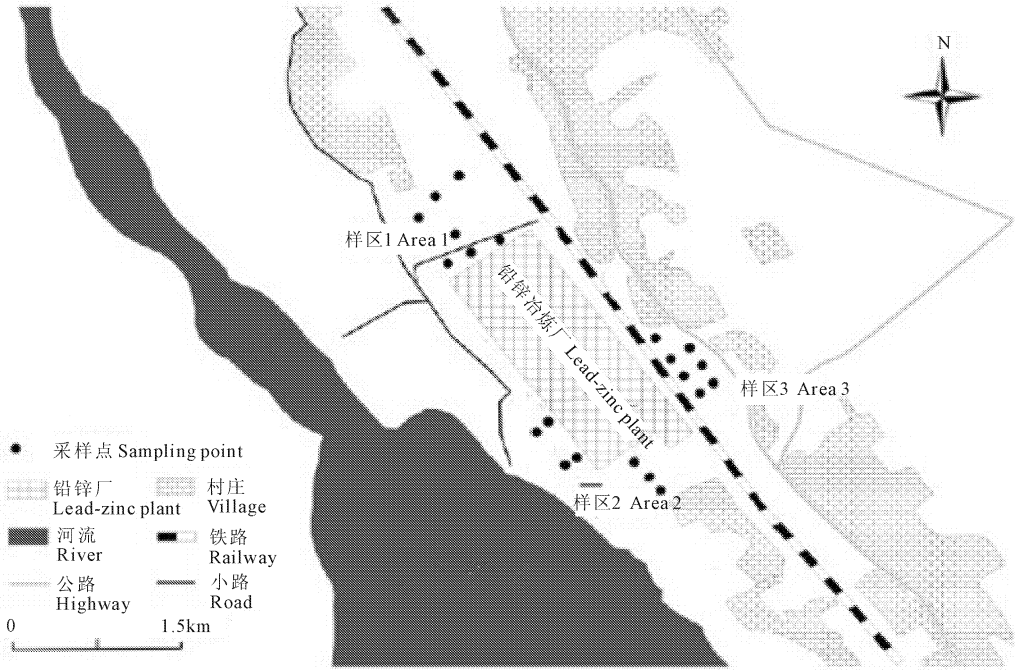


图 1 采样点示意图
Fig.1 Sketch map of sampling points

1.2 土壤样品测定

土壤样品重金属测定:首先要对样品进行消解^[14]。然后将上述经过消解后的土壤样品,利用火焰原子吸收分光光度法测定 Cu、Pb、Zn、Ni 和 Cr 的含量水平^[14],使用仪器为美国瓦里安 55-B 原子吸

收分光光度计;利用石墨炉原子吸收分光光度法测定 Cd 的含量水平,使用仪器为美国瓦里安 240Z 原子吸收分光光度计。测定过程中,所有样品均由空白样、二次平行样加标回收率进行质量控制。利用原子荧光法测定 As 和 Hg 的含量,使用仪器为北京

科创海光 AFS-3100 原子荧光光度计。

质量控制采用 ESS 系列土壤标准物质,所分析元素的误差均在 5% 以内^[15-16]。形态分析的回收率为 85%~105%。实验所用玻璃器皿均在 10% 的 HNO₃ 或 HCL 溶液中浸泡 24 h,然后分别用自来水、蒸馏水和去离子水各洗涤 3 次。实验所用酸均为优级纯,其他试剂均为分析纯。

1.3 评价方法

1) 单项污染指数法:其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中, P_i 为土壤中污染物 i 的环境质量指数; C_i 为污染物 i 的实测浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); S_i 为污染物 i 的评价标准($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。单项污染指数评价分级标准: $P_i > 3.0$ 表示重污染; $3.0 \leq P_i < 2.0$ 表示中污染; $2.0 \leq P_i < 1.0$ 表示轻污染; $P_i \leq 1$ 表示未污染。

2) 内梅罗综合污染指数法:其计算公式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{max}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中, $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为土壤污染物中污染指数最大值; $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为土壤污染物中污染指数的平均值^[17-18]。内梅罗综合污染指数评价的分级标准见表 1。

3) 地累积污染指数法:计算公式为:

$$I_{\text{Geo}} = \text{Log}_2(\frac{C_i}{k B_i})$$

式中, I_{Geo} 为地累积污染指数; C_i 为重金属 i 的实测浓度; B_i 为所测元素的环境背景值,本研究选取陕西土壤背景值(表 3); k 为常数,是对成岩作用可能引起背景值变动的修正,一般取 $k = 1.5$ 。根据 I_{Geo} 数值的大小,可以将重金属污染程度分为 7 个等级,即:0~6 级(表 2)

表 1 土壤分级标准^[8]
Table 1 Soil classification standard

等级划分 Classification	$P_{\text{综}}$ Comprehensive pollution index	污染等级 Pollution grade	污染水平 Pollution level
I	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全 Safe	清洁 Clean
II	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒级 Warning	尚清洁 Almost clean
III	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻污染 Lightly polluted	土壤作物开始受到污染 Soil and crops begin to suffer a pollution
IV	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中污染 Moderately polluted	土壤作物均受重度污染 Soil and crops suffer a moderate pollution
V	$P_{\text{综}} > 3$	重污染 Seriously polluted	土壤作物均受污染已相当严重 Soil and crops suffer a serious pollution

表 2 地累积污染指数分级

Table 2 Grade of geo-accumulation pollution index

污染程度 Pollution degree	无污染 No pollution	轻度污染 Light pollution	偏中度污染 Partial moderate pollution	中度污染 Moderate pollution	偏重污染 Partial serious pollution	重污染 Serious pollution	严重污染 Very serious pollution
级别 Level	0	1	2	3	4	5	6
I_{Geo}	≤ 0	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	≥ 5

2 结果与分析

2.1 冶炼区周边耕地土壤重金属含量分布特征

关中西部某铅锌冶炼区周边不同采样区的耕地土壤样品中的重金属含量的最大值、最小值、平均值、标准偏差以及采用的参考值如表 3 所示,不同采样区的耕地土壤样品重金属含量存在着一定的差异。

由表 3 可知,冶炼厂周边地区不同采样点耕地土壤中 Pb、Zn、Cu、Cd、Cr、Hg、As、Ni 含量的变化范围分别为 32~72.9、93.1~181、23.6~39.2、0.542~1.92、54~143、0.062~0.377、0.062~0.377、3.8~

13.7、25.1~30.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别是陕西省土壤背景值的 1.5~3.4、1.3~2.6、1.1~1.8、0.7~2.5、0.9~2.3、0.98~5.98、0.3~1.2 和 0.87~1.06 倍,Cu、Pb、Zn 元素的含量均高于陕西省土壤背景值,造成一定的污染,其他几种元素 Cd、Cr、Hg、As、Ni 的含量最小值均低于陕西省土壤背景值。

由三个样区的总体求平均值可以得出 Pb 平均含量达到 47.95 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是陕西省土壤背景值的 2.24 倍;Hg 的平均含量为 0.164 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,是陕西省土壤背景值的 2.6 倍。这 2 种元素是 8 种元素中污染超标倍数较大的两种元素。

表 3 土壤样品中的重金属含量分析/(mg·kg⁻¹)
Table 3 Contents of heavy metals in different soil samples

统计值 Statistic value		重金属含量 Contents of heavy metals							
		Pb	Zn	Cu	Cd	Cr	Hg	As	Ni
样区一 Area 1	最大值 Max	71.4	181	39.2	1.92	118	0.28	13.7	30.60
	最小值 Min	34.6	93.1	23.7	0.82	54	0.09	3.80	25.10
	平均值 Mean	52.7	137.2	27.5	1.24	87.47	0.18	11.90	27.63
	标准偏差 SD	14.4	32.35	5.44	0.40	21.18	0.07	3.62	1.79
样区二 Area 2	最大值 Max	53.6	137	26.1	1.44	106	0.14	13.1	27.9
	最小值 Min	36.7	109	23.6	0.81	68.9	0.06	10.8	25.9
	平均值 Mean	42.5	118.4	25.01	1.05	88.86	0.10	12.4	26.89
	标准偏差 SD	5.69	9.69	0.76	0.20	17.72	0.69	0.74	0.83
样区三 Area 3	最大值 Max	72.9	172	27.4	1.64	143	0.38	12.7	28.6
	最小值 Min	32	101	24.6	0.54	80.7	0.13	11.9	26
	平均值 Mean	48.6	130	25.87	0.98	98.19	0.211	12.3	26.8
	标准偏差 SD	12.29	22.03	0.89	0.34	23.32	0.09	0.36	0.91
总体平均值 Overall mean		47.95	128.53	26.13	1.09	91.50	0.16	12.2	27.1
参考标准 Reference	陕西背景值 ^[19] Background of Shaanxi	21.4	69.4	21.4	0.76	62.5	0.06	11.1	28.8

在冶炼区周边的三个土壤样品采集样区中,通过方差分析可看出三个样区土壤的重金属含量的平均值差异显著,其中样区一的土壤中 Pb、Zn、Cu、Cd、Ni 元素含量均显著高于其他两个样区。造成分布差异的原因是由于样区一处在下风向,空气中重金属污染颗粒的密度较大,随着烟尘的扩散沉降,这些有害元素在冶炼区周围形成积累,再加上土壤的吸附残留作用,所以造成样区一的污染程度高于其他两个样区。

整个耕地土壤样品中 Pb、Zn、Cu、Cd、Cr、Hg、As、Ni 含量的总体平均值分别为 47.95、128.53、26.13、

1.09、91.5、0.164、12.2、27.1 mg·kg⁻¹,最大值分别是最小值的 2.27、1.94、1.66、3.54、2.65、6.08、3.61 和 1.22 倍。由此可知,重金属含量变化幅度 Ni 元素最小,Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As 和 Hg 元素的变化幅度依次增大,Hg 最大。综合以上分析表明该铅锌冶炼区周边的耕地土壤中三个样区的重金属的含量存在显著差异,空间分布不均匀。

2.2 耕地土壤污染评价

以陕西省土壤背景值为评价标准,该铅锌冶炼区周边不同采样区的耕地土壤样品中重金属的单项污染指数和综合污染指数统计值见表 4。

表 4 土壤重金属单项污染指数和综合污染指数
Table 4 Single and comprehensive pollution index of heavy metals in different soil samples

样区 Sample area	P _{Pb}	P _{Zn}	P _{Cu}	P _{Cd}	P _{Cr}	P _{Hg}	P _{As}	P _{Ni}	P _综 Comprehensive pollution index
样区一 Area 1	2.46	1.98	1.29	1.63	1.40	2.86	1.07	0.96	2.90
样区二 Area 2	1.99	1.71	1.17	1.38	1.42	1.56	1.12	0.93	2.64
样区三 Area 1	2.27	1.87	1.21	1.29	1.57	3.35	1.11	0.93	4.39
平均值 Mean	2.24	1.85	1.22	1.43	1.46	2.59	1.10	0.94	3.31

从表 4 的评价结果可以看出,单因子污染指数衡量,耕地土壤中样区一中 Pb、Zn、Cu、Cd 元素的单项污染指数平均值均高于第二、第三样区,分别为 2.46、1.98、1.29、1.63,其中 Pb 达到了中度污染,

Zn、Cu、Cd 元素达到了轻度污染;样区三中的 Cr 和 Hg 元素的单向污染指数均高于其他两个样区,分别为 1.57 和 3.35,Hg 元素达到了重度污染,Cr 元素达到了轻度污染。这与第三样区所处的地理位置有一

定的关系,因为第三样区在公路和铁路的中间,所以会受到交通工具中的一些尾气的污染。从总体平均值来看,其污染程度从大到小的顺序为: $Hg(2.59) > Pb(2.24) > Zn(1.85) > Cr(1.46) > Cd(1.43) > As(1.10) > Ni(0.94)$,其中 Pb 和 Hg 污染最严重,均达到了中度污染水平,其他元素均为轻度污染和无污染。

从综合污染指数来看,三样区的综合污染指数分别为 2.90、2.64 和 4.39,三区的平均综合污染指数值达到 3.31,从而可以看出,样区三已经达到了重度污染,样区一和样区二均达到了中度污染,从均值来看,该冶炼区周边的耕地土壤已经达到了重污染等级。

表 5 为利用地累积污染指数法对宝鸡长青镇铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染的评价结果。由表 5 可知,该冶炼区周边土壤受到 Pb、Zn、Cu、Cd、Cr、Hg、

As 元素不同程度的污染。然而,从表 5 地累积指数的最大值来看,Pb 和 Hg 在局部到达了偏中度污染水平,而 Cu、Zn、Cr 和 Cd 均达到轻度污染水平。从各样区的结果来看,样区一和样区三,也就是西北方向和正东方向的土壤污染较严重,其中 Pb 和 Hg 在部分样点已达到了偏中度污染水平,这可能与当地的风向基本为西北风有关系,还有样区三的位置处在铁路和公路的边缘,土壤也会受到交通工具尾气的污染,所以导致 Pb 和 Hg 的含量偏高。从总体均值来看,Pb、Zn、和 Hg 元素为轻度污染水平,其他几个元素几乎没有达到污染程度。

通过评价结果的对比分析,地累积指数法能较全面和综合地反映出重金属元素的污染程度,不但考虑到了人为因素和地球化学背景值,还考虑到了自然成岩作用可能对背景值产生的变动,弥补了其他评价方法的不足。

表 5 地累积污染指数法评价结果
Table 5 Evaluation results of geo-accumulation pollution index

项目 Item		I_{Geo}							
		Pb	Zn	Cu	Cd	Cr	Hg	As	Ni
样区一 Area 1	最大值 Max	1.153	0.798	0.288	0.752	0.525	1.541	-0.281	-0.498
	最小值 Min	0.108	-0.161	-0.438	-0.475	-1.073	0.038	-2.131	-0.783
	平均值 Mean	0.716	0.398	-0.223	0.125	-0.089	0.949	-0.563	-0.645
样区二 Area 2	最大值 Max	0.739	0.396	-0.299	0.337	0.177	0.515	-0.346	-0.631
	最小值 Min	0.193	0.066	-0.444	-0.493	-0.444	-0.608	-0.624	-0.738
	平均值 Mean	0.425	0.198	-0.362	-0.100	-0.082	0.056	-0.437	-0.684
样区三 Area 3	最大值 Max	1.183	0.724	-0.228	0.525	0.609	1.996	-0.391	-0.595
	最小值 Min	-0.005	-0.044	-0.384	-1.073	-0.217	0.438	-0.484	-0.733
	平均值 Mean	0.624	0.336	-0.309	-0.171	0.111	1.219	-0.433	-0.683
总体 Total	最大值 Max	1.183	0.798	0.288	0.752	0.609	1.996	-0.281	-0.498
	最小值 Min	-0.005	-0.161	-0.444	-1.073	-0.796	-0.608	-2.131	-0.783
	平均值 Mean	0.546	0.286	-0.286	-0.122	-0.071	0.644	-0.542	-0.671

3 结 论

- 1) 含量分析表明:冶炼区周边的三个土壤样品采集样区中,样区一的土壤中 Pb、Zn、Cu、Cd、Ni 元素超标量均高于其他两个样区。整个耕地土壤样品中重金属含量变化幅度 Ni 元素最小,Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、As 和 Hg 元素的变化幅度依次增大,Hg 最大。这说明冶炼区下风向的污染较严重,三个样区的重金属污染差异显著。
- 2) 单因子污染指数分析表明:三个样区中,第一样区和第三样区污染较严重,其中 Pb 和 Hg 元素达到了中重度污染。由综合污染指数分析得出:样

- 区三已经达到了重度污染,样区一和样区二均达到了中度污染,从均值来看,该区域周边的耕地土壤已经达到了重污染等级。说明该区域耕地土壤重金属复合污染严重。利用地累积污染指数法分析得出:样区一和样区三,也就是西北方向和正东方向的土壤污染较严重,其中 Pb 和 Hg 在部分样点已达到了偏中度污染水平。
- 3) 本文采用单因子污染指数评价法、内梅罗综合污染指数和地累积指数评价法对该区的耕地土壤进行评价,三种方法评价结果(污染等级)基本一致,由此可见,不同的评价方法均可获得相似的评价结果。

参 考 文 献:

[1] 卢 瑛,龚子同,张甘霖.南京城市土壤中重金属的化学形态分布[J].环境化学,2003,(2):131-136.

[2] Tang S R, Wike B M, Huane C Y. The uptake of copper by plants dominantly growing on copper mining spoils along the Yangzi River, the People's Republic of China[J]. Plant and Soil, 1999, 209: 225-232.

[3] 张素娟,肖 玲,关帅朋,等.蓝田冶炼厂周边农田土壤重金属复合污染分析评价[J].干旱地区农业研究,2009,27(5):265-270.

[4] 沈国清,陆贻通,周 培.土壤环境中重金属和多环芳烃复合污染研究进展[J].上海交通大学学报(农业科学版),2005,23(1):102-106.

[5] 易治伍,王 灵,钱 翌,等.乌鲁木齐市农田土壤重金属含量及评价[J].干旱区资源与环境,2009,23(2):150-154.

[6] 严 莎,凌其聪,严 森,等.城市工业区周边土壤—水稻系统中重金属的迁移累积特征[J].环境化学,2008,27(2):226-230.

[7] 党 志,刘丛强,尚爱安.矿区土壤中重金属活动性评估方法的研究进展[J].地球科学进展,2001,(6):86-92.

[8] 邓超冰,李丽和,王双飞,等.典型铅锌矿区水田土壤重金属污染特征[J].农业环境科学报,2009,28(11):2297-2301.

[9] 孙 锐,舒 帆,赫 伟,等.典型 Pb/Zn 矿区土壤重金属污染特征与 Pb 同位素来源解析[J].环境科学,2011,32(4):1146-1153.

[10] Wei C Y, Wang C, Yang L S. Characterizing spatial distribution and sources of heavy metals in soils from mining-smelting activities in Shuikoushan, Hunan Province, China[J]. Journal of Environmental Science, 2009, 21: 1230-1236.

[11] 郑 娜,王起超,郑冬梅.铅冶炼厂周围重金属在土壤—蔬菜系统中迁移特征[J].环境科学,2007,28(6):1349-1354.

[12] 许中坚,吴灿辉,刘 芬,等.典型铅锌冶炼厂周边土壤重金属复合污染特征研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2007,22(1):111-114.

[13] 王广林,刘登义.冶炼厂污灌区土壤—水稻系统重金属积累特征研究[J].土壤,2005,37(3):299-303.

[14] 张 飞.土壤中重金属测定方法探讨[J].上海环境科学,2010,29(2):74-77.

[15] 张素荣,曹星星.对比不同消解方法测定土壤中重金属[J].环境科学与技术(增刊),2004,8(27):49-51.

[16] 王志强,曹福成,孔鲁裔.微博消解与传统消化方法的比较[J].科学咨询导报,2007,23:132.

[17] 顾继光,林秋奇,胡 韧,等.矿区重金属在土壤—作物系统迁移行为的研究:以辽宁省青城市铅锌矿为例[J].农业环境科学学报,2005,24(4):634-637.

[18] 夏家淇,骆永明.关于土壤污染的概念和 3 类评价指标的探讨[J].中国农业生态学报,2006,22(1):87-99.

[19] 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,1990:87-90,330-496.

(上接第 233 页)

[10] 惠洪河,蒋晓辉,黄 强,等.二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J].地理研究,2001,20(2):191-198.

[11] 张 军,张仁陟,周冬梅.基于生态足迹法的疏勒河流域水资源承载力评价[J].草业学报,2012,21(4):267-274.

[12] 肖迎迎,宋孝玉,张建龙.基于主成分分析的榆林市水资源承载力评价[J].干旱地区农业研究,2012,30(4):218-223,235.

[13] 付 强.投影寻踪模型及其在水文水资源系统分析中的应用[J].黑龙江水专学报,2008,35(4):80-85.

[14] 顾 强,程秀生.基于粒子群算法的电动汽车 DCT 升档动力协调控制[J].农业工程学报,2012,28(8):84-91.

[15] 付 强,赵小勇.投影寻踪模型原理及其应用[M].北京:科学出版社,2006.

[16] 姜秋香,付 强,王子龙.基于粒子群优化投影寻踪模型的区域土地资源承载力综合评价[J].农业工程学报,2011,27(11):319-324.

[17] 吴承祯,洪 伟,洪 滔.基于改进的投影寻踪的森林生态系统生态位分级模型[J].应用生态学报,2006,17(3):357-361.

[18] 李 智,郑 晓.粒子群算法在农业工程优化设计中的应用[J].农业工程学报,2004,20(3):15-18.

[19] 王西珍,李 言,成刚虎.柴油机主运动机构运动精度可靠性算法[J].农业工程学报,2011,27(4):184-189.

[20] 杨伟新,张晓森.粒子群优化算法综述[J].甘肃科技,2012,28(5):87-92.

[21] 张军民.干旱区生态安全问题及其评价原理—以新疆为例[J].生态环境,2007,16(4):1328-1332.

[22] 凌红波,徐海量,史 薇,等.新疆玛纳斯河流域绿洲生态安全评价[J].应用生态学报,2009,20(9):2219-2224.

[23] 黄 彧.武汉城市圈水资源承载力综合评价研究[D].湖南:华中师范大学,2012:25-32.

[24] 姜秋香,付 强,王子龙.三江平原水资源承载力评价及区域差异[J].农业工程学报,2011,27(9):184-190.

[25] 程怀文,李玉文,徐中民.水资源短缺的社会适应能力理论及实证—以黑河流域为例[J].生态学报,2011,31(5):1430-1439.

[26] 王 俭,张朝星,于英谭,等.城市水资源生态足迹核算模型及应用—以沈阳市为例[J].应用生态学报,2012,23(8):2257-2262.

[27] 胡吉敏.沿海地区水资源承载力评价研究[D].大连:大连理工大学,2008:38-66.