

# 黔西北某炼锌渣堆场周边土壤及农产品重金属污染研究

杜志会<sup>1</sup>,朱光旭<sup>2</sup>,周开群<sup>3</sup>,孙倩<sup>3</sup>

- (1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081;  
2. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081;  
3. 贵阳学院 食品与制药工程学院, 贵州 贵阳 550005)

**摘要:**通过在黔西北某土法炼锌废渣堆场采集废矿渣、周边耕地土壤及农作物的可食部分,分析了样品中Cd、Cu、Zn、Pb、Cr和Ni的质量分数,采用污染指数法对土壤和农作物的重金属污染进行了评价,并利用健康风险评价模型评估了废矿渣中各污染物对人体健康的危害。结果表明:污染指数显示耕地土壤主要受到Cd、Pb和Zn的污染,各重金属的污染程度为Pb>Zn>Cd>Cu>Ni>Cr;废矿渣堆中的重金属在3种暴露途径下对儿童和成人的总非致癌风险分别为28.9和16.8,均为不可接受风险,其中来自Pb污染的风险贡献率最大,高达95%以上;废渣堆的重金属的致癌危害风险为可接受范围。受污染农田土壤上种植的农作物的可食部分为重污染,以Pb和Zn污染为主,污染水平远远超过国家食品卫生限值标准。

**关键词:**冶炼渣场;土壤污染;重金属;农产品;风险评价

中图分类号:

文献标识码:A

文章编号:1674-9944(2016)20-0061-05

DOI:10.16663/j.cnki.lskj.2016.20.024

## 1 引言

土壤环境质量和植物是构成陆地生态系统食物链的主要环节,植物产生的数量和质量主要由土壤环境质量所决定<sup>[1,2]</sup>,土壤环境质量正是通过食物链来影响人们的生活与人体健康的,土壤一经污染,一方面危害农作物的正常生长发育,另一方面经农作物被摄入人体,危害人体的健康,最终还会导致土壤资源的破坏和枯竭<sup>[3~5]</sup>。贵州省铅锌矿资源丰富,黔西北铅锌矿带水城—赫章矿带是贵州铅锌的主要产地。丰富的矿产资源造就了曾经大规模的土法炼锌。由于土法炼锌资源利用率低,能源破坏严重,产生的燃烧烟气和还原烟气直接排入大气,造成了大气污染。而炼锌产生的大量废渣,经雨水和地表径流的冲刷、淋溶,废渣中的污染物释放析出,直接或间接造成周边地区土壤重金属污染。笔者以黔西北威宁县某锌冶炼厂的废渣堆场及周边农田为研究区域,通过现场采样和室内试验测定,分析了废矿渣—土壤—作物系统中重金属元素含量及富集状况,利用单项/综合污染指数法对土壤和农产品重金属的污染特征进行评价;利用健康风险评价模型,解析冶炼厂废渣堆场中重金属对成人和儿童健康产生的潜在影响,以期为该地区的农田环境治理、农产品风险防范以及防止重金属污染危害人体健康提供科学依据。

## 2 材料与方法

### 2.1 研究区域概况

研究区位于贵州省威宁县金钟镇冒水村,地处26°

46' N, 104°23' E, 海拔约2140 m,是典型喀斯特地貌地区。属亚热带季风湿润气候区,年平均气温11.1℃,无霜期178 d,全年平均日照时间1812 h,年降雨量1100 mm。炼锌矿渣堆场总占地面积10000 m<sup>2</sup>左右,平均高度约为10 m,堆置时间超过30年。紧邻着矿渣堆场,东边为当地冒水小学,有师生300余人,另有数户村民及大片农田。

### 2.2 样品采集与分析

根据废渣堆积点的分布情况,采集7个矿渣样品,并在矿渣堆周边100 m范围内的农田,根据不同地块种植的作物品种,采集土豆、萝卜、玉米、油菜、四季菜心、莲花白和青口白等7种农作物共9个样品(由于部分紧挨废渣堆的农田表层可见大量厚层的废渣,种有玉米和萝卜,此地采集的作物单独计样),以及相应的9个根系土壤样品。每个样品由4~6个子样混合,矿渣和土壤样品的采集深度为0~15 cm,共1 kg左右。植物样品先用自来水冲洗3次,再用去离子水冲洗3次,晾干。将晾干后的植物样品于恒温烘箱中105℃杀青30 min,再于60℃下烘至恒重,粉碎,放入干燥箱备用。矿渣和土壤样品自然风干,剔除样品中的石砾、动植物残体等杂物,经充分搅拌均匀,用木棒研碎后过0.25 mm筛,保存待用。

矿渣和土壤样品采用HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>三混酸消解后测定重金属含量<sup>[6]</sup>;植物样品重金属总量采用HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>法消解<sup>[7]</sup>。样品中的Cr、Cu、Ni、Pb和Zn元素含量采用电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES, Optima 5300DV)测定,而Cd则采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, ELAN-DRC-e)测定。为

收稿日期:2016-09-18

作者简介:杜志会(1980—),男,高级工程师,硕士,主要从事重金属污染修复方面的工作。

通讯作者:朱光旭(1986—),男,博士,主要从事重金属污染评价与修复的研究工作。

为了保证分析结果的准确性,在测试过程中,采用空白样和二次平行样进行质量控制,平行样间的相对偏差不高于5%。试验所用试剂均为优级纯,所用器皿使用前均经24 h 酸液浸泡及去离子水清洗。

2.3 重金属污染评价方法

本研究采用单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法对土壤和农作物中重金属污染进行评价<sup>[8]</sup>。其中:①单因子污染指数法计算公式: $P_i = C_i/S_i$ 。式中: $P_i$ 为重金属*i*的单项污染指数; $C_i$ 为重金属*i*的实测浓度; $S_i$ 为重金属*i*选择的评价标准。②内梅罗综合污染指数计算公式: $P_N = [(P_{ave}^2 + P_{max}^2)/2]^{1/2}$ ,其中  $P_{ave}$  和  $P_{max}$  分别为土壤和农作物各单项污染指数  $P_i$  的平均值和最大值。

本研究将分别以贵州省土壤背景值<sup>[9]</sup>和食品中污染物国家限量标准作为土壤和农作物重金属污染评价标准, $P_i$ 和  $P_N$  越大,表明受到的重金属污染越严重。单因子污染指数法分级标准和内梅罗综合污染指数法分级标准见表1。

表1 重金属污染等级划分标准

分级	单项污染指数		综合污染指数	
	污染指数	污染等级	污染指数	污染等级
I	$P_i < 1$	清洁	$P_N < 1$	安全
II	$1 < P_i \leq 2$	轻度污染	$0.7 < P_N \leq 1.0$	警戒线
III	$2 < P_i \leq 3$	中度污染	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
IV	$P_i > 3$	重度污染	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
V			$P_N > 3.0$	重度污染

2.4 健康风险评价模型

2.4.1 暴露模型和参数

土壤重金属主要通过以下途径进入体内:①手-口摄入;②呼吸吸入;③皮肤接触<sup>[10]</sup>。笔者研究的6种重金属均具有慢性非致癌健康风险,且Cd、Cr和Ni同时还具有致癌风险。本研究针对上述3种暴露途径,采用美国EPA土壤健康风险评价模型进行健康风险评价<sup>[11,12]</sup>。各种途径摄入重金属暴露量(mg/kg/d)计算公式如下:

$$ADD_{inh} = c \times \frac{InhR \times EF \times ED}{BW \times AT \times PEF}$$

$$ADD_{ing} = c \times \frac{IngR \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}$$

$$ADD_{derm} = c \times \frac{SA \times SL \times ABS \times EF \times ED}{BW \times AT} \times 10^{-6}$$

式中: $ADD_{inh}$ 、 $ADD_{ing}$ 和  $ADD_{derm}$  分别表示经呼吸吸入、手-口摄入和皮肤接触途径的长期日平均暴露

量。不同暴露途径的健康风险评价参数来自相关文献<sup>[13~16]</sup>,见表2。

表2 不同暴露途径的健康风险评价参数

参数	参数意义及单位	参数值	
		儿童	成人
C	重金属元素浓度,mg/kg		
IngR	经手-口摄入的灰尘频率,mg/d	200	100
InhR	呼吸频率,m <sup>3</sup> /d	5	20
PEF	颗粒物排放因子,m <sup>3</sup> /kg	$1.32 \times 10^9$	$3.2 \times 10^9$
SA	暴露皮肤表面积,cm <sup>2</sup> /d	1600	4350
SL	皮肤黏着度,mg/(cm <sup>2</sup> ·d)	0.2	0.7
ABS	皮肤吸收因子,无量纲	0.001	0.001
ED	暴露年限,a	6	24
EF	暴露频率,d/a	180	350
BW	平均体重,kg	25	55.9
AT	平均暴露时间(非致癌物),d	ED×180	ED×365
AT	平均暴露时间(致癌物),d	70×365	70×365

2.4.2 健康风险表征模型

(1)非致癌风险评价。非致癌风险值是通过平均每天摄入量(ADD)除以每一种暴露途径相对应的参考剂量(RFD)计算得出,即: $HQ = ADD/RFD$ ;  $HQ_n = \sum HQ_i$ ;  $HI = \sum HQ_n$ 。式中:HQ为非致癌风险,表征某单一重金属经某一途径的非致癌风险,无量纲;ADD为长期日摄入量,单位为mg/kg/d;RFD为非致癌污染物长期日摄入参考剂量,单位为mg/kg/d,参考取值见表3<sup>[13~16]</sup>;  $HQ_n$ 为单一污染物经所有暴露途径的总非致癌风险;HI表示多种污染物多暴露途径产生的非致癌总风险。当HQ或HI<1时,认为风险较小或可以忽略,当HQ或HI>1时认为存在非致癌风险。

(2)致癌风险评价。致癌风险指长期暴露于某种致癌物质的情况下,通过人体患癌症的可能性进行评价。常用线性低剂量致癌方程来描述: $RISK = ADD_{ing} \times SF$ ,RISK为污染物致癌风险,通常以一定数量人口出现癌症患者的个体数表示; $ADD_{ing}$ 为致癌重金属吸入途径终生日平均暴露量(mg/kg/d),呼吸吸入是其致癌暴露的唯一途径;斜率系数(SF)表示人体暴露于某种污染物下产生致癌效应的最大概率(mg/kg/d),参考值见表3。当一个污染地块有多个致癌物质时,致癌风险为各种污染物所产生的致癌风险之和。单个污染物的致癌风险指数(RISK)以及所有污染物的累计致癌风险RISK值的可接受范围为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ ,即小于 $10^{-6}$ 表示风险不明显, $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 之间表示可能有一定风险,大于 $10^{-4}$ 表示有显著风险<sup>[11,12]</sup>。

表3 各重金属健康风险评价风险参考剂量(RFD)和斜率系数(SF)

	Pb	Zn	Cu	Cr	Cd	Ni
RFD <sub>呼吸</sub>	3.52E-03	3.00E-01	4.02E-02	2.86E-05	1.00E-03	2.06E-02
RFD <sub>摄食</sub>	3.50E-03	3.00E-01	4.00E-02	3.00E-03	1.00E-03	2.00E-02
RFD <sub>皮肤</sub>	5.25E-04	6.00E-02	1.20E-02	6.00E-05	1.00E-05	5.40E-03
SF	-	-	-	42.0	6.30	0.84

### 3 结果与分析

#### 3.1 矿渣和农田土壤重金属含量统计分析

对在炼锌废矿渣堆采集的7个废渣样品和周边耕地9个土壤样品进行重金属Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Ni含量测定和统计分析,并参考贵州省土壤环境背景值和《国家土壤环境质量三级标准》(GB15618-1995),统计结

果见表4。可以看到,无论是废矿渣还是附件农田土壤,所测6种重金属的平均含量均超过贵州省土壤背景值,其中Cd、Pb和Zn污染较严重,平均含量远超于贵州省土壤背景值和国家土壤环境质量标准值。相对于废矿渣,耕地土壤的重金属元素浓度的变化范围都较大,其中Pb和Zn含量的最大值分别是最小值的18.9和24.4倍。

表4 废矿渣及周边农田土壤重金属含量

统计值		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
废矿渣 (n=7)	最小值	22.42	88.46	244.85	45.64	7656.5	10296.5
	最大值	40.92	201.60	416.88	81.47	17375.0	18082.5
	平均值	31.41	149.00	323.89	68.33	10948.8	14017.8
	标准差	6.36	47.31	69.41	12.84	3451.2	2737.9
周边农田 土壤(n=9)	最小值	6.80	83.05	35.67	36.45	444.7	629.3
	最大值	35.79	161.6	320.63	80.92	8403.6	15357.5
	平均值	18.57	111.05	149.56	53.62	3252.4	5086.7
标准差		10.67	22.6	117.96	15.35	3499.9	5844.3
贵州省土壤背景值		0.659	95.9	32.0	32.8	35.2	99.5
土壤环境质量标准(三级)		1	300	400	200	500	500

#### 3.2 耕地土壤重金属污染评价

以贵州省土壤环境背景值作为参考标准,根据废矿渣堆场周边耕地土壤重金属含量,计算得土壤各重金属元素的平均单项污染指数和内梅罗综合污染指数,结果如图1所示。各金属元素平均单项污染指数均大于1,可知,耕地土壤均受到不同程度的重金属污染。污染指数大小依次为Pb(92.4) > Zn(51.1) > Cd(28.2) > Cu(4.7) > Ni(1.6) > Cr(1.2),Pb污染最为严重,其次为Zn、Cd和Cu,这4种元素均为重度污染,Ni和Cr指示轻度污染的特征。从综合污染指数上看,Pb、Zn、Cd和Cu污染等级为严重,综合指数大小分别为179.0、114.9、43.4和7.8,Ni和Cr分别为中度污染和轻度污染。

#### 3.3 废矿渣污染人体健康风险评价

该冶炼废矿渣堆中重金属通过3种不同暴露途径的非致癌风险和致癌风险见表5。从表5中可以看出,不同暴露途径带来的非致癌风险存在显著差异,对于儿童表现为:手-口摄入途径 > 皮肤接触途径 > 呼吸摄入途径,而对于成人则表现为:皮肤接触途径 > 手-口摄入途径 > 呼吸摄入途径。非致癌风险大小排序为儿童:

Pb > Cr > Zn > Cd > Cu > Ni,成人:Pb > Cd > Cr > Zn > Cu > Ni。由此可见主要非致癌风险贡献元素为Pb,其非致癌风险值分别为27.70(儿童)和16.26(成人),分别占总风险值的95.9%和96.7%,比其他重金属高出2~3个数量级,存在很大的非致癌风险。其他元素的风险值未超过1,即非致癌风险控制在安全限内。从致癌风险指数上看,土壤中三种致癌重金属Ni、Cd和Cr致癌风险指数从大到小排序均为:Cr > Cd > Ni,3种金

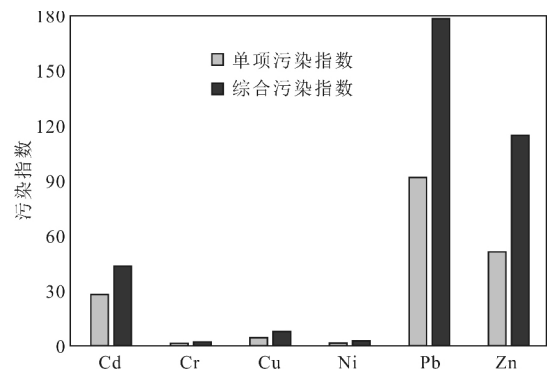


图1 耕地土壤重金属污染指数

表5 废矿渣不同暴露途径的人体健康风险指数

人群风险值	Cd	Cr	Ni	Pb	Zn	Cu	合计
儿童	HQ <sub>呼吸</sub>	4.76E-06	7.89E-04	5.03E-07	4.71E-04	7.07E-06	1.27E-03
	HQ <sub>i</sub> 摄入	2.51E-01	3.97E-01	2.73E-02	25.03	3.74E-01	26.14
	HQ <sub>皮肤</sub>	4.02E-02	3.18E-02	1.62E-04	2.67	2.99E-03	2.74
	合计	2.91E-01	4.30E-01	2.75E-02	27.70	3.77E-01	28.89
	RISK	2.57E-09	8.13E-08	7.45E-10			8.46E-08
成人	HQ <sub>呼吸</sub>	8.17E-06	1.35E-03	8.62E-07	8.09E-04	1.21E-05	2.19E-03
	HQ <sub>i</sub> 摄入	5.39E-02	8.52E-02	5.86E-03	5.36	8.01E-02	5.60
	HQ <sub>皮肤</sub>	1.64E-01	1.30E-01	6.61E-04	10.89	1.22E-02	11.2
	合计	2.18E-01	2.16E-01	6.53E-03	16.26	9.24E-02	16.81
	RISK	1.76E-08	5.58E-07	5.12E-09			5.81E-07

属元素在废矿渣中的致癌风险值和总致癌风险值小于 $10^{-6}$ ,表示这三种重金属的致癌风险较低,不会对人体造成致癌危害。

### 3.4 农作物产品安全评价

农作物产品中的重金属含量范围分别为: Cd 0.14~16.14 mg/kg, Cr 1.33~9.34 mg/kg, Cu 2.44~15.87 mg/kg, Ni 0.09~0.87 mg/kg, Pb 0.79~100.88 mg/kg, Zn 23.1~372.5 mg/kg。依据《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB-2762-2012)及《食品中锌限量卫生标准》(GB13106-91)、《食品中铜限量卫生标准》(GB15199-94)等相关农作物中重金属的极限标准,对农产品重金属污染状况进行评价,计算结果见表

表6 农作物重金属污染评价

作物种类	单项污染指数					综合污染指数
	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	
土豆	1.4	2.7	0.5	23.6	1.2	17.2
萝卜1	26.9	16.4	1.3	301.4	9.5	218.9
萝卜2	10.8	10.4	0.4	201.4	4.8	146.0
萝卜叶1	33.1	18.7	0.9	277.8	13.1	202.4
萝卜叶2	16.1	11.8	0.5	197.5	7.7	143.5
莲花白	10.8	7.0	0.3	71.2	3.9	52.0
油菜	80.7	7.6	1.4	306.1	18.6	224.2
四季菜心	35.8	8.1	1.6	336.3	14.7	244.3
青口白	51.3	8.1	1.1	200.8	9.8	147.0
玉米籽粒1	3.4	4.8	0.6	7.0	1.5	5.5
玉米籽粒2	2.0	3.8	0.2	3.9	1.1	3.2
平均值	24.7	9.0	0.8	175.2	7.8	—

## 4 结论

(1) 土法炼锌废渣中重金属含量普遍偏高,儿童和成人暴露在该区域环境下受到各污染物的非致癌风险分别是 28.9 和 16.8,均为不可接受风险,主要非致癌风险贡献元素为 Pb,而其他各元素的致癌风险在可接受范围;周边耕地土壤受多种重金属的复合污染,其中 Pb 污染尤为突出,其次为 Zn、Cd 和 Cu,均表现为重度污染。

(2) 研究区所有农作物中 Cd、Pb、Cr 和 Zn 等重金属的含量高于农作物中重金属的极限标准,不符合粮食中重金属含量限量要求,食用后对人体有潜在危害,建议政府对该地块进行合理治理和管控;相对于蔬菜、土豆等其他作物,玉米籽粒的重金属含量较低,具有相对较高的食用安全性。

### 参考文献:

- [1]杜艳,常江,徐笠.土壤环境质量评价方法研究进展[J].土壤通报,2010(3):749~756.
- [2]Abrahams P W. Soils: their implications to human health [J]. Science of the Total Environment, 2002, 291(1-3):1~32.
- [3]鲁荔,杨金燕,田丽燕,等.大邑铅锌矿区土壤和蔬菜重金属污染现状及评价[J].生态与农村环境学报,2014,30(3):374~380.
- [4]唐文杰,黄江波,余谦,等.锰矿区农作物重金属含量及健康

6. 由于所测农作物中 Ni 元素的含量普遍较低,且目前尚缺农产品或食品关于 Ni 的限量标准,因此本研究中农作物污染评价未考虑 Ni 元素。由表 6 可知,除 Cu 以外,所有农作物的其他重金属污染指数都大于 1。其中, Pb 的单项污染指数在各种农作物中均为最高,多数为 200 以上,其次为 Cd;而 Zn 在所测样品中的含量虽然较高,但对农作物造成的污染不大,远不及 Pb 和 Cd; Cu 对农作物造成的污染小,单项污染指数均小于 2。从综合污染指数来看,所有农作物的指数值都大于 3,指示为重度污染,其中四季菜心的综合污染指数值最高,为 244.3,而玉米籽粒重金属超标相对较轻。

- 风险评价[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6): 464~469.
- [5]莫福金,钱建平,王远炜,等.广西阳朔铅锌矿周边土壤和白菜汞含量及污染评价[J].生态环境学报,2016,25(1):156~161.
- [6]彭渤,唐晓燕,余昌训,等.湘江入湖河段沉积物重金属污染及其 Pb 同位素地球化学示踪[J].地质学报,2011,85(2):282~299.
- [7]Zhang H Z, Guo Q J, Yang J X, et al. Cadmium accumulation and tolerance of two castor cultivars in relation to antioxidant systems [J]. Journal of Environmental Sciences, 2014(26): 2048~2055.
- [8]李静,俞天明,周洁,等.铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评估[J].环境科学,2008,29(8):2327~2330.
- [9]刘凤枝.农业环境监测应用手册[M].北京:中国标准出版社,2001:590~596.
- [10]刘小燕,陈棉彪,李良忠,等.云南会泽铅锌冶炼厂周边土壤重金属污染特征及健康风险评估[J].农业资源与环境学报,2016,33(3):221~229.
- [11]U. S. EPA. Risk assessment guidance for superfund (volume D): Human health evaluation manual [R]. Washington DC: Office of Emergency and Remedial Response, 1989: 1~89.
- [12]U. S. EPA. Supplemental guidance for developing soil screening levels for superfund sites [R]. Washington DC: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2001: 4~24.
- [13]陈鸿汉,谏宏伟,何江涛,等.污染场地健康风险评估的理论和方法[J].地学前缘,2006,13(1):216~223.
- [14]周楠,唐东山,邓软文,等.湖南某尾矿库周边农田土壤及蔬菜重金属污染与健康风险评估[J].绿色科技,2016(6):1~5.

(下转第 69 页)

- 佛山市土地利用情景模拟分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 237~242.
- [17]曹智, 闵庆文, 刘某承, 等. 基于生态系统服务的生态承载力: 概念、内涵与评估模型及应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(1): 1~11.
- [18]胡喜生, 洪伟, 吴承祯. 土地生态系统服务功能价值动态估算模型的改进与应用: 以福州市为例[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 30~41.
- [19]欧阳志云, 朱春全, 杨广斌, 等. 生态系统生产总值核算: 概念? 核算方法与案例研究[J]. 生态学报, 2013, 33(21): 6747~6761.
- [20]俞孔坚, 王思思, 李迪华. 区域生态安全格局: 北京案例[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [21]王建英, 李江风, 张丽琴, 等. 基于生物多样性保护的土地利用结构预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 221~226.
- [22]Mitsova D, Shuster W, Wang X H. A cellular automata model of land cover change to integrate urban growth with open space conservation[J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 99(2): 141~153.

## The Land ecological security pattern simulation based on CA—Markov Model

Zheng Hongyang<sup>1</sup>, Wang Hao<sup>1</sup>, Wu Cuiyun<sup>2</sup>, Xiao Guilin<sup>3</sup>

(1. College of Resource and Environment, Hubei University, Wuhan 430062, China,

2. Institute of Land and Resources Hubei, Wuhan 430062, China

3. Yong Yehang (Hubei) Land and Real Estate Valuation Co., Ltd. Wuhan 430062, China)

**Abstract:** In recent years, the rapid development of Yunyang area economy, not only threatens the land ecological security in the region, but also the land use pattern of the area facing the fast changing situation. By calculating the value of ecosystem services, ecological security pattern to explore and optimize land use pattern not only for planning and regulation department to provide decision support, but also to protect the inevitable choice of regional ecological security. In this paper, based on Yunyang area 2015 land use data, by calculating the value of ecosystem services, by means of which the value of constructing ecological security pattern for ecological security pattern of factors use CA—Markov model different scenarios of land use pattern simulation. The results show that: Under ESP protection scenarios, woodland, arable land, construction land, the waters have been effectively protected and in turn reduce the level of protection, increased area were 46.35, 28.7, 15.44, 5.96, no ecological protection scenarios, other land and garden area higher than the area of the ESP protection scenarios. From the value of ecosystem services aspect, waters, landscape facilities, land, orchard, woodland ESV has been raised to enhance the strength in descending order, were 3.03, 1.99, 1.11, 0.8 billion, the remaining three categories of farming ESV decreased slightly, overall students look ESV made 5.394 billion yuan rose to 5.606 billion yuan, the value of ecosystem services has been improved.

**Key words:** Land use; value of ecosystem services; ecological security pattern; Yunyang area; CA—Markov

(上接第64页)

[15]陈耿, 刘军, 杨立辉, 等. 燃煤电厂周边地区积尘重金属污染特征与健康风险评[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016,

55(1): 107~113.

[16]郑冬梅, 金丹, 蔺昕, 等. 沈阳市采暖期与非采暖期的街道灰尘重金属暴露[J]. 生态学杂志, 2016, 35(4): 1047~1052.

## Heavy Metal Pollution of Soils and Crops in One Zinc Smelting Slag Field in Northwestern Guizhou Province

Du Zhihui<sup>1</sup>, Zhu Guangxu<sup>2</sup>, Zhou Kaiqun<sup>3</sup>, Sun Qian<sup>3</sup>

(1. Guiyang Engineering Corporation Ltd., Power Construction Corporation of China, Guiyang Guizhou,

550081, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry,

Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou, 550002, China;

3. Food and Pharmaceutical Engineering Institute, Guiyang University, Guiyang Guizhou, 550005, China)

**Abstract:** The pollution status and total concentration of heavy metals (Cd, Cu, Zn, Pb, Cr, Ni) were analyzed in slags, agricultural soils and crops around a zinc smelting slag field in Northwestern Guizhou Province. The pollution index of heavy metals was used to evaluate soils and crop. Using human health risk assessment model established by USEPA, we evaluated the non-carcinogenic and carcinogenic risk probability caused by the metals in the slags. The results were as follows: the pollution index indicated that the agricultural soils were mainly polluted by Cd, Pb and Zn, and the pollution degrees were Pb>Zn>Cd>Cu>Ni>Cr; the total risk of non-carcinogens that heavy metals in slags displayed was respectively 28.9 for children and 16.8 for adults in 3 exposed ways, which were both unacceptable risk, among which the risk contribution rate from Pb was the highest, over 95%; the risk of carcinogens of heavy metals in slags were within the acceptable range. The edible parts of the crops planted on the polluted soils were heavily polluted, mainly from Pb and Zn, pollution level of which was far beyond national limit standard of food sanitation.

**Key words:** smelting slag field; soil pollution; heavy metal; agricultural product; risk assessment