

矿区土壤重金属污染安全风险计量与可视化表达

熊立新^{1,2}, 秦亚光², 汪伟², 张朝波²

1. 中南林业科技大学商学院, 长沙 410004
2. 中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

摘要 多年高强度的金属矿产开采使得矿区土壤重金属富集。本文精确构建矿区三维地表模型, 合理布置 367 个采样点; 调查分析矿区土壤中重金属 Cd、As、Cu、Zn 和 Pb 的生态安全风险。结果表明: 土壤中重金属平均含量顺序为: Zn>Pb>Cu>As>Cd, 重金属含量实际值远超背景值, 且变异系数差异较大, Cd、As、Cu、Zn 和 Pb 在土壤中含量的对数值成正态分布; 污染指数均为重度污染, 污染指数大小顺序为: Cd>Pb>Zn>As>Cu; 土壤中重金属的潜在生态风险指数 RI 达 787.29, 潜在危害程度很大; Cu、Zn、Pb 总非致癌风险 HQ 小于 1, 但 Cd、As 仍存在很高健康风险, 且 As 为主要风险源。本文实现了重金属污染风险状况在三维模型上的可视化表达, 为矿区的安全生产管理提供直观的决策依据。

关键词 矿区; 地学模型; 土壤; 重金属污染; 风险计量

高强度的金属矿产开采使得矿区饱受重金属污染困扰^[1-2], 金属矿山开采中产生的废石、废渣、废水、废气等通过尾矿堆积、污水灌溉和大气尘降等方式影响矿区环境。金属矿产开采周期长、民采泛滥、尾矿库规模庞大而难以有效管理导致矿区河流、土壤、大气浮尘中重金属含量超标, 且种植在区域内的农作物也富集大量重金属, 严重影响居民的生理健康^[3-4]。

国内许多学者对重金属在环境介质中的迁移累积规律进行了大量研究, 如黄顺红等^[5]对铅锌矿的土壤重金属分布形态进行分析, 李宝磊等^[6]研究提出了一种新的集成 RBF 插值算法的土壤重金属评估方法; 隋建等^[7]研究总结了土壤重金属迁移规律模拟情况; 陈惠芳等^[8]对不同类型土壤重金属变异情况进行分析; 雷凌明等^[9]分析了灌区的土壤重金属空间分布特征; 文雯等^[10]对垦区的土壤重金属污染状况进行了研究; 柯海玲等^[11]对金矿带农田的土壤重金属进行了调查分析。但结合精确三维地学建模的矿区环境介质中重金属污染风险计量与评价研究较少。

三维地学建模是获取矿区空间物理分布的重要手段^[12]。准确的三维模型数据是开采设计、环境保护、安全监管的基础。国内许多矿山, 如冬瓜山铜矿, 广东凡口矿, 新田岭钨矿

等, 普遍使用激光遥感技术对矿区的地表状况进行探测, 为后续的安全与环保控制等提供精确的基础性资料。

某多金属矿山经过高强度开采产生大量的废石、废水及粉尘, 本文基于遥感和激光探测技术构建大范围内矿区生产布置、居民区、道路河流分布的精确地表模型, 合理设置土壤样品采集点, 采用美国 TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) 提取重金属, 综合运用内梅罗综合污染指数评价方法对该区域进行健康风险计量和生态安全风险计量^[13-14], 并将风险计量结果在三维模型中可视化表达, 为矿区生产生活的安全与环保工作提供决策参考。

1 矿区地表模型构建

湖南是有色金属之乡, 湘南某多金属矿常年开采, 核心区面积 21.74 km², 紧邻京广铁路, 京珠高速和武广高铁, 交通方便, 且周边分布大量的工农业区和居民区, 矿区正在使用的大型尾矿库 3 个, 废弃尾矿库 2 个, 核心区遥感数据见图 1。

核心区周围居民约 7300 人, 周边水系、铁路、公路、居民区分布线模型见图 2 (用 1:2000 的地形地质图构建)。

根据矿区实测数据布置合理的采样点 (用 1:2000 的地形地质图构建), 见图 3, 为下一步数据采集和数据分析做准备。

收稿日期: 2016-07-15; 修回日期: 2016-10-19

基金项目: 2015 年湖南省哲学社会科学基金项目 (15YBA405); 湖南省教育厅科研优秀青年项目 (15B259); 中南林业科技大学高层次人才引进科研启动基金项目 (2014YJ048); 中南林业科技大学青年基金项目 (2016QZ001)

作者简介: 熊立新, 讲师, 研究方向为安全管理理论与技术, 电子邮箱: k2001133@163.com

引用格式: 熊立新, 秦亚光, 汪伟, 等. 矿区土壤重金属污染安全风险计量与可视化表达[J]. 科技导报, 2017, 35(8): 75-80; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.08.009



图1 矿区遥感图
Fig. 1 Remote sensing map of mining area

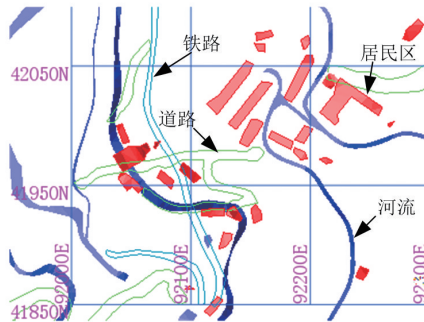


图2 矿区内水系、道路、居民区分布
Fig. 2 Distribution charts of rivers, roads and residential areas

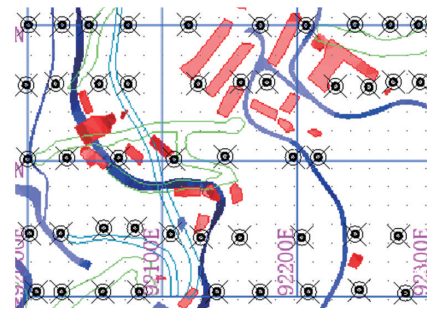


图3 核心矿区采样点分布
Fig. 3 Distribution map of sampling points in core mining area

2 样品采集与数据处理

2.1 样品采集

布点采样和样品测试按照《全国土壤污染状况调查技术规范》的要求,核心矿区及周边土壤属于调查重点区域。由于矿区污染物分布空间异质性强,因此采样点以主矿区为中心由密到疏向周围放射状布置:地势平坦区域,以矿区为中心沿4个方向每个方向距离250 m布置一个点,在尾矿区区域适当加密布点,原则上使得布点均匀分布在图2所示网格中,样品共计367个,采样时间为2015年9月,取矿区内0~20 cm表层土壤混合样,现场剔除其中的沙石、草根等杂物,河流底泥采样选择沉积物易沉淀的区域,不能混有河沙,所有采集好的样品保存在透气性良好的样品袋中^[15]。

样品送至实验室后处理步骤如下:土壤(底泥)样品风干、压碎、除杂物、破碎至160目;按照地质调查技术标准《生态地球化学评价样品分析技术要求》,土壤样品重金属(Zn、As、Pb、Cu、Cd)采用(硝酸:高氯酸=4:1)消煮,采用原子荧光光谱仪(AFS-2202)测定As含量,采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-MS)测定Pb、Cu、Zn的含量,采用原子吸收分光光度计-石墨炉法(AA-630)测定Cd含量^[16-17]。

2.2 数据分析方法

1) 重金属单因子评价,土壤单一元素污染评价选用单因子指数法,公式为

$$P_i = \frac{C_i}{C_0} \quad (1)$$

式中, C_i 为污染物实测平均含量(mg/kg); C_0 为某污染物参比值(mg/kg,为土壤元素平均值与其2倍标准差之和); P_i 为单向污染指数,角标*i*代表某种污染物。污染物等级5级:I清洁级,表示实测值<背景值;II较清洁级, $P_i < 1$;III轻度污染级, $1 \leq P_i < 2$;IV中度污染级, $2 \leq P_i < 3$;V重度污染级, $P_i \geq 3$ 。矿区土壤元素平均背景值及其标准差如表1所示。

2) 潜在生态风险计量与评价,依据潜在生态危害指数法定量划分潜在生态危害的程度,反映土壤中每种污染物的影响和多种污染物的综合影响,土壤重金属污染物的潜在风险参数和潜在生态危害指数法如式(2)~式(4)所示:

$$F_i = \frac{C_i}{C_e} \quad (2)$$

$$E_i = T_i \cdot F_i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^5 E_i \quad (4)$$

式中, C_i 为污染物实测平均含量,mg/kg; C_e 为污染物参比值,mg/kg; F_i 为污染因子; E_i 为潜在风险参数; T_i 为单个污染物毒性响应参数,Pb、Cd、Cu、Zn、As的毒性响应参数分别为5、30、5、1、10^[16-17];RI为潜在生态风险指数; E_i 和RI等级划分见表2。

表1 矿区土壤重金属平均背景值及其标准差
Table 1 Average background values and standard deviations of heavy metals in soils (mg·kg⁻¹)

元素	平均背景值	标准差
Cd	0.098	0.065
As	14	6.9
Cu	26	17.4
Zn	94	29.3
Pb	27	15

表2 矿区土壤重金属生态风险等级
Table 2 Ecological risk levels of heavy metals in soils

等级	E_i 范围	RI范围
低潜在生态风险	$E_i < 40$	$RI < 150$
中潜在生态风险	$40 \leq E_i < 80$	$150 \leq RI < 300$
较高潜在生态风险	$80 \leq E_i < 160$	$300 \leq RI < 600$
高潜在生态风险	$160 \leq E_i < 320$	$RI \geq 600$
很高潜在生态风险	$E_i \geq 320$	—

3) 健康风险计量方法

土壤中重金属污染物主要暴露途径有3种途径(经口摄入、人体皮肤接触,人体吸入空气中的浮尘),经口摄入计算式为

$$ADD = (C \cdot IR \cdot CF \cdot EF \cdot ED) / (BW \cdot AT) \quad (5)$$

经皮肤摄入计算式为

$$ADD = (C \cdot CF \cdot SA \cdot AF \cdot ABS \cdot EF \cdot ED) / (BW \cdot AT) \quad (6)$$

经空气摄入计算式为

$$ADD = \left(C \cdot \frac{1}{PEF} \cdot HR \cdot EF \cdot ED \right) / (BW \cdot AT) \quad (7)$$

风险表征模型计算式为

$$CR_i = \sum_{i=1}^3 (CSF_i \cdot ADD_i) \quad (8)$$

$$CR = \sum_{i=1}^3 CR_i \quad (9)$$

$$HQ_i = \sum_{i=1}^3 (ADD_i / RfD_i) \quad (10)$$

$$HQ = \sum_{i=1}^3 HQ_i \quad (11)$$

式中, ADD 为日平均摄入量, $mg/(kg \cdot d)$; C 为土壤中化学污染物浓度, 取值 50 mg/kg ; IR 为经口摄入率, mg/d ; SA 为暴露皮肤面积, cm^2 , 取值 1690 ; AF 为皮肤表面土壤黏附系数, mg/cm , 取值 0.2 ; ABS 为皮肤吸收效率系数, 无量纲, 取 0.0001 ; HR 为呼吸摄入量, 取值 $20 \text{ m}^3/d$; PEF 为土壤尘产生因子, m^3/kg , 取值 1.36×10^9 ; EF 为暴露频率, d/a , 取值 250 ; ED 为暴露持

续时间, 取值 24 a ; BW 为体重, 取值 55 kg ; CF 为转换系数, 取值 10^{-6} kg/mg ; AT 为平均作用时间, d ; CR_i 为某种致癌物 i 在 3 种途径暴露下的健康风险; CSF_i 为重金属 i 的致癌斜率, $(kg \cdot d)/mg$, 根据国际辐射防护委员会制定的 CR 最大可接受风险为 $5.0 \times 10^{-5} \cdot a^{-1}$; HQ_i 为非致癌物 i 在 3 种暴露途径下的健康风险; RfD 为单位时间单位体重摄入的不会引起人体不良反应的污染物最大量, $mg/(kg \cdot d)$, 当 $HQ < 1$ 时, 风险较小, $HQ > 1$ 时, 存在非致癌风险。

3 含量特征

所获 367 个样品中 Cd 、 As 、 Cu 、 Zn 、 Pb 含量及其变异系数如表 3 所示, 平均含量排序为: $Zn > Pb > Cu > As > Cd$, 含量远超背景值, 表明多年高强度矿产资源回采和冶炼导致大量重金属在其周围土壤中累积, 同时, 土壤中 Cd 、 As 、 Cu 、 Zn 和 Pb 之间的变异系数差异较大, 区域内 Cd 、 As 、 Cu 、 Zn 和 Pb 分布不均。

矿区土壤重金属含量经对数转换后符合正态分布, 如图 4 所示。

表 3 矿区土壤重金属含量统计
Table 3 Total concentrations of heavy metals in the soil around mine area

pH*	M±SD/(mg·kg ⁻¹)				
	Cd	As	Cu	Zn	Pb
6.14	9.23±8.28 (0.63)**	113.16±107.34 (1.03)	301.41±288.41 (1.09)	478.84±436.49 (0.94)	395.55±276.38 (1.53)

注: *, 平均值; **, 括号内为变异系数; 测量误差范围 ($\pm 2\%$)

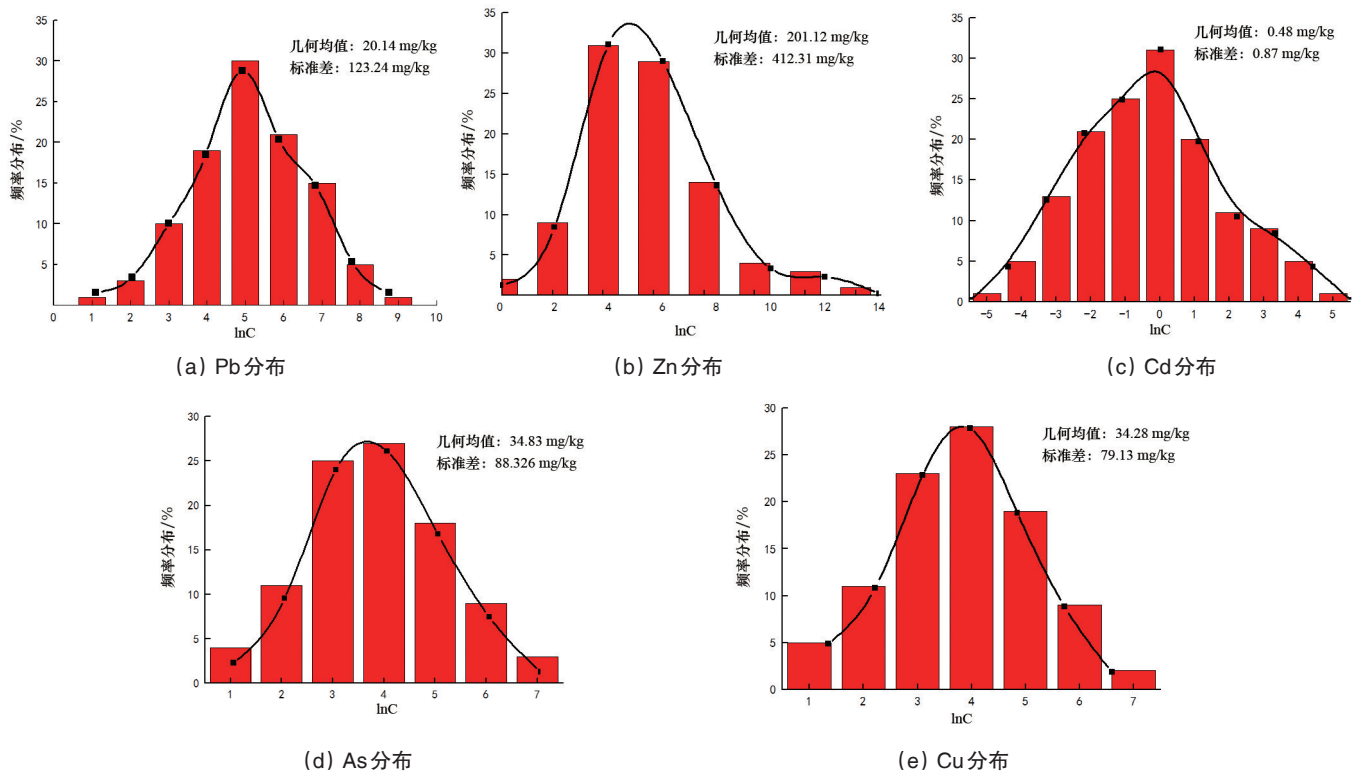


图 4 矿区土壤重金属含量对数转换后分布情况
Fig. 4 $\ln C$ distributions of heavy metals in soils

4 单因子风险计量

根据重金属含量、污染物参比值和式(1),可以计算出土壤中各重金属元素的污染指数值,如表4所示,可见各重金属元素的污染较为突出,污染指数大小顺序为: Cd>Pb>Zn>As>Cu。

表4 矿区土壤重金属污染指数计算

Table 4 Results of pollution index of heavy metals in the soils around mine area

重金属	污染指数	污染程度
Cd	31.6	重污染
As	7.73	重污染
Cu	3.79	重污染
Zn	11.8	重污染
Pb	20.9	重污染

5 生态安全风险计量

根据式(2)~式(4),土壤中各重金属潜在风险参数和潜在生态风险指数的计算结果见表5,其中,Cd的潜在风险参数最高:716.34,与其毒性响应参数较高有关,其次是Pb和As的潜在风险参数,分别为215.21和155.30,处于高生态风险,高于Cu和Zn的值,面临非常严峻的污染风险,重金属的潜在生态风险指数(RI)为787.29,潜在生态风险程度很高。

表5 土壤中重金属的潜在生态风险评价结果

Table 5 Assessment of potential ecological risk of heavy metals in the soil

潜在生态风险参数 E_i					潜在生态 风险指数 RI	潜在生态 风险程度
Cd	As	Cu	Zn	Pb		
71.6	155.3	60.45	47.22	215.21	787.29	很高

6 健康风险计量

根据式(5)~式(11)计算可知,总非致癌重金属Cu、Zn、Pb健康风险值HQ小于1,健康风险较小,不会对矿区的工人产生明显不利的健康影响;但各采样点的致癌重金属Cd、As健康风险值CR的数量级为 10^{-4} ~ 10^{-3} ,比最大可接受风险(5.0×10^{-5})高出1~2个数量级,存在很高的健康风险,且其主要来源于As,应引起高度重视,统计值见表6。

表6 矿区土壤重金属健康风险值

Table 6 Health risk values of heavy metals in Hunan soils

CR		HQ		
Cd	As	Cu	Zn	Pb
4.42×10^{-4}	0.103×10^{-3}	0.156×10^{-4}	0.224×10^{-3}	0.767×10^{-3}

7 风险状况可视化表达

基于地学数据,构建精确的矿区三维地表模型,准确反映矿区内居民区、河流、道路、铁路的相互位置关系如图5所示。

将安全风险计量结果在三维模型中显示如图6所示,红色为高和很高潜在生态风险,黄色较高潜在生态风险,蓝色中潜在生态风险,绿色为低潜在生态安全风险,由图可见,居民区和河流附件是高潜在生态风险区。



图5 核心矿区三维地表模型

Fig. 5 3D surface model of core mining area

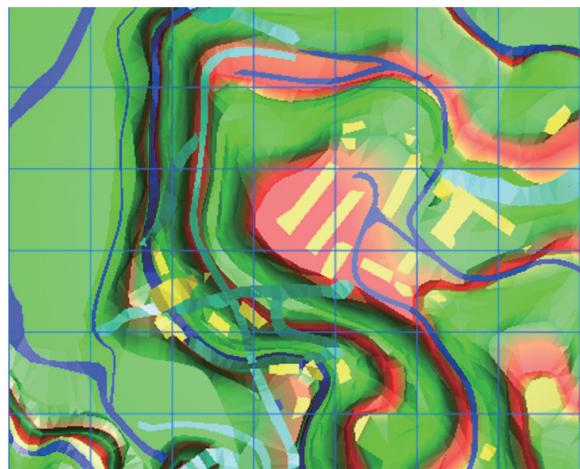


图6 核心矿区污染风险可视化表达

Fig. 6 Visualization of pollution risk in core mining area

8 结论

综合运用理化实验、风险评价等方法研究了该区域的生态安全风险,在三维模型中实现了计量结果可视化表达。

1) 重金属含量平均浓度顺序为: Zn>Pb>Cu>As>Cd,含量远超背景值,依次为: 478.84、395.55、301.41、113.16、9.23 mg/kg,矿区土壤受到不同程度的重金属污染。

2) 单因子指数法的评价结果表明,各重金属元素的污染较为突出,影响因子顺序为 Cd>Pb>Zn>As>Cu。

3) 土壤中Cd的潜在风险参数最高,其次是Pb和As,矿区5种重金属的潜在风险参数都在中等潜在生态风险之上;土壤中重金属的潜在生态风险指数很高,为787.29。

4) 土壤中总非致癌重金属Cu、Zn、Pb健康风险HQ小于

1,健康风险较小,但各采样点的致癌重金属Cd、As健康风险值CR的数量级为 10^{-4} ~ 10^{-3} ,存在很高的健康风险。

5) 构建精确的三维地学模型,并将重金属污染风险状况在三维模型上可视化表达,为矿区的安全生产管理提供直观的决策依据,也为下一步研究重金属污染物的来源及迁移规律而控制污染扩散奠定基础。

参考文献(References)

- [1] Yang G, Pei Z, Liang M, et al. Effects of plant species coexistence on soil enzyme activities and soil microbial community structure under Cd and Pb combined pollution[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, 22(7):1040-1048.
- [2] Han D C, Zhang X K, Tomar V V S, et al. Effects of heavy metal pollution of highway origin on soil nematode guilds in North Shenyang, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(2): 193-198.
- [3] Wu Y G, Xu Y N, Zhang J H, et al. Evaluation of ecological risk and primary empirical research on heavy metals in polluted soil over Xiaqingling gold mining region, Shaanxi, China[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(4): 688-694.
- [4] Yuan Y N, Chai L Y, Yang Z H, et al. Application of polymeric aluminum salts in remediation of soil contaminated by Pb, Cd, Cu, and Zn [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2013, 20(6): 1638-1644.
- [5] 黄顺红. 某铅锌矿区土壤重金属形态分布及污染风险评价[J]. *中国有色金属学报(英文版)*, 2014, (10): 3324-3331.
Huang Shunhong. Fractional distribution and risk assessment of heavy metal contaminated soil in vicinity of a lead/zinc mine[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2014, (10): 3324-3331.
- [6] 李宝磊, 张榆锋, 施心陵, 等. 一种用于山区土壤重金属评估的集成RBF空间插值算法[J]. *东南大学学报(英文版)*, 2015, 31(1): 38-45.
Li Baolei, Zhang Yufeng, Shi Xinling, et al. Spatial interpolation method based on integrated RBF neural networks for estimating heavy metals in soil of a mountain region [J]. *Journal of Southeast University(English Edition)*, 2015, 31(1): 38-45.
- [7] 隋红建, 吴璇, 崔岩山, 等. 土壤重金属迁移模拟研究的现状与展望[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(6): 197-200.
Sui Hongjian, Wu Xuan, Cui Yanshan, et al. Modeling heavy metal movement in soil: review and further study directions [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(6): 197-200.
- [8] 陈惠芳, 李艳, 吴豪翔, 等. 富阳市不同类型农田土壤重金属变异特征及风险评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(2): 164-169.
Chen Huifang, Li Yan, Wu Haoxiang, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metals pollution of farmland soils relative to type of land use [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(2): 164-169.
- [9] 雷凌明, 喻大松, 陈玉鹏, 等. 陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 88-96.
Lei Lingming, Yu Dasong, Chen Yupeng, et al. Spatial distribution and sources of heavy metals in soils of Jinghui Irrigated Area of Shanxi [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (6): 88-96.
- [10] 文雯, 侯振安, 闵伟, 等. 石河子垦区耕地土壤重金属调查及评价研究[J]. *新疆农业科学*, 2015, 52(1): 137-144.
Wen Wen, Hou Zhenan, Min Wei, et al. Investigation and evaluation of heavy metals in farmland soil in Shihezi reclamation area [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2015, 52(1): 137-144.
- [11] 柯海玲, 李贤, 徐友宁, 等. 小秦岭金矿带农田土壤重金属的时空变异趋势及其意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(8): 1196-1204.
Ke Hailing, Li Xian, Xu Youning, et al. Temporal and spatial variation of heavy metal contamination of farmland soil along the Xiaqingling gold ore belt and its significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014,33 (8): 1196-1204.
- [12] 熊立新, 罗周全. 基于VRML的采空区信息管理系统的开发[J]. *科技导报*, 2012, 30(1): 48-52.
Xiong Lixin, Luo Zhouquan. Research on management system of Goaf information based on VRML [J]. *Science & Technology Review*, 2012, 30(1): 48-52.
- [13] 马俊杰, 杨琦, 王业耀, 等. 土壤重金属快速监测技术研究与应用进展[J]. *中国环境监测*, 2015, 31(3): 132-138.
Ma Junjie, Yang Qi, Wang Yeyao, et al. Research progress of rapid monitoring technology for heavy metals in soils [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2015, 31(3): 132-138.
- [14] 路璐, 赵元艺, 柳建平, 等. 江西德兴铜矿区大坞河流域环境介质中Cu含量变化趋势[J]. *地质通报*, 2014, 33(8): 1205-1212
Lu Lu, Zhao Yuanyi, Liu Jianping, et al. Trend analysis of Cu contamination in environmental media of the Dawu River in the Dexing copper mine [J]. *Geological Bulletin of China*, 2014,33 (8): 1205-1212
- [15] 钱春香, 王明明, 许燕波, 等. 土壤重金属污染现状及微生物修复技术研究进展[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(3): 669-674.
Qian Chunxiang, Wang Mingming, Xu Yanbo, et al. Current situation of soil contamination by heavy metals and research progress in bio-remediation technique [J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2013, 43(3): 669-674.
- [16] 潘琼, 潘峰. 湖南省冶矿城市土壤重金属污染现状及评估[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(10): 405-410.
Pan Qiong, Pan Feng. Present situation and evaluation of heavy metal pollution in Hunan mining city [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2015, 43 (10): 405-410.
- [17] 雷鸣, 曾敏, 郑袁明, 等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(6): 1212-1220.
Lei Ming, Zeng Min, Zheng Yuanming, et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in paddy soils around mine areas and smelting areas in Hunan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(6): 1212-1220.

Safety risk measures and visualization for heavy metal pollution in mining area soil

XIONG Lixin^{1,2}, QIN Yaguang², WANG Wei², ZHANG Chaobo²

1. Business School, Central South University of Forestry And Technology, Changsha 410004, China

2. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract Years of high intensity metal mining would lead to a heavy metal enrichment in soil in the mining area. Combining the remotely sensed data and the 3D laser detection data, a 3D geo-model is generated. 367 sampling points are reasonably arranged, the safety risks of Cd, As, Cu, Zn and Pb are analyzed. The experimental results indicate that with the heavy metal serious enrichment in soil in mining area, the contents of Zn and Pb are very high. The coefficient of variation sees a large difference, the Cs of Cd, As, Cu, Zn and Pb are in the normal distribution. The indexes of the pollution are all in V category. The influence factors are in the following order: Cd>Pb>Zn>As>Cu. The potential ecological risk index *RI* is 787.29, the *HQ* of Cu, Zn and Pb are less than 1, but Cd and As may have a high health risk (especially As). The visual expression of the risk in the 3D model is realized, providing an intuitive decision-making basis for the safe production management in the mine area .

Keywords mining area; geo-model; soil; heavy metal pollution; risk measure

(责任编辑 祝叶华)