

文章编号:1673-0062(2015)01-0022-06

基于事故树分析的我国某铀矿山土壤重金属污染评价

方 耀^{1,2}, 简小磊³, 夏良树^{2*}

(1. 浙江杭州电化集团有限公司, 浙江 杭州 311228; 2. 南华大学 核科学技术学院, 湖南 衡阳 421001;
3. 南华大学 核资源工程学院, 湖南 衡阳 421001)

摘 要:在运用事故树对我国某铀矿山土壤重金属污染的来源进行定性分析的基础上,采用地累积指数法和潜在生态风险评价方法对矿山周边土壤中 U、Cd、Cr、Cu、Mn、Ni、Pb、Zn 八种重金属进行定量评价. 结果表明,各种金属对土壤的污染程度随着离铀矿山距离的增加而呈现减弱的趋势,整个区域的重金属污染处于极强的水平. 地累积指数法的评价结果为:元素 Cd 为极重污染,元素 U 为重污染至极重污染,其次为 Cr、Pb、Zn、Mn、Cu,元素 Ni 为无污染;潜在生态风险指数法的评价结果为:元素 Cd 为极强污染,其次为 Cr、Pb、Zn、Mn、Cu、Ni,均为轻微污染.

关键词:事故树;铀矿山;土壤;重金属;污染评价

中图分类号:X825

文献标识码:B

Contamination Assessment to a Uranium Mine in China Based on the Fault Tree Analysis

FANG Yao^{1,2}, JIAN Xiao-lei³, XIA Liang-shu^{2*}

(1. Hangzhou Electrochemical Group Co. Ltd., Hangzhou, Zhejiang 311228, China; 2. School of Nuclear Science and Technology, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China; 3. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: On the basis of using the fault tree analysis method to analyse the sources of heavy metal pollution to a uranium mine, the cumulative index method and the potential ecological risk assessment methods were used to quantitatively evaluate pollution of the eight metal (U, Cd, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn) in the study area soil. The result shows that the heavy metal contamination degree to soil decreased with distance from the uranium mines. The evaluation results of the cumulative index method were that the Cd is the highly polluting element, U is medium-heavy polluting element, followed by the Cr, Pb, Zn, Mn, Cu,

收稿日期:2014-07-23

基金项目:湖南省自然科学基金与衡阳市联合基金重点基金资助项目(14JJ5019);湖南省高等学校科学研究重点基金资助项目(12A120)

作者简介:方 耀(1980-),男,浙江杭州人,南华大学核科学技术学院硕士研究生,工程师. 主要研究方向:环境污染治理. * 通讯作者.

and Ni element is pollution-free. The evaluation results of the potential ecological risk assessment methods showed that Cd is extremely strong element, followed by the Cr, Pb, Zn, Mn, Cu and Ni, which are slightly polluted elements.

key words: fault tree; uranium mine; soil; contamination; evaluation

0 引言

土壤是动植物赖以生存的基础,并与空气、水一起构成了地球上一切生物维持生命所必需的三大基本环境要素. 基于铀矿山资源开发而引起的包括铀在内的土壤重金属污染,开展铀矿山土壤重金属污染评价的现实意义非常重大. 重金属污染评价能够在定性和定量的层面对研究区域内的土壤做出全面的风险分析,并与相应的土壤环境背景值比较的基础上,得出各种重金属的污染程度或者污染等级,为相关部门或企业了解矿区的土壤重金属污染概况提供依据,进而为铀矿山的环境治理做出必要的决策.

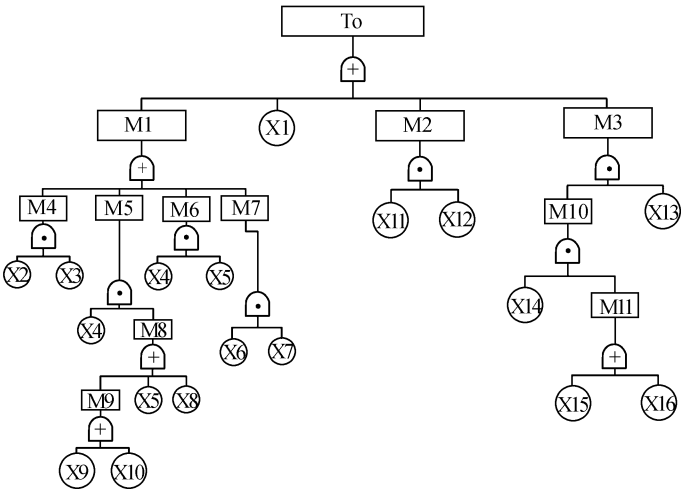
1 研究区概况

某铀矿山是一个近年来开始开采的新型矿山,地处温带大陆性高原盆地地区,冬夏温差大,寒暑变化剧烈(冬季漫长寒冷,夏季短暂炎热),最大气温温差可达 60 ℃,年无霜期 100 d,降水集中在夏季,降水量小,年降水量不足 400 mm,地下水匮乏,土壤主要为黑钙土和荒漠土.

2 事故树分析

溶浸采铀(矿)是融地质(包括水文地质)、采矿、选矿、冶金于一体的采矿新领域、新方法. 可从矿床中回收铀,能回收传统方法难以回收的矿体、难处理的矿体、表外矿和废石中的铀和其他有用组分^[1]. 尽管溶浸采矿不经过传统的采矿步骤,也大大简化了诸如矿石运输等工艺,但溶浸采矿作为集地、采、选、冶相互渗透、相互结合的一种采矿新工艺依然包括从地质勘探取得矿产地质资料到矿田的开拓和矿石的选矿一系列的活动. 矿石在添加溶浸液之前,采矿包括开拓、采准两个主要工艺,而在得到浸出液以后又包括回采和充填等几个步骤,每个步骤基本上又由凿岩、爆破和运输等活动组成,同时,采矿活动必须有通风、供水、供电、排水、运输、充填和提升系统加以保证. 因此,采矿活动是一个由多个系统组成的复杂的大系统.

为了分析金属矿山重金属污染的来源,将土壤重金属污染作为顶上事件,对其进行重金属污染来源的事故树分析. 经分析土壤重金属污染事故树如图 1.



(To:土壤重金属污染;M1:废水排灌;M2:扬尘使尾砂进入土壤;M3:污风中重金属沉降;M4:地下水排灌;M5:井下废水排灌;M6:选矿废水排灌;M7:尾砂废水排灌;M8:废水含重金属;M9:采矿污风沉降;M10:大气重金属污染;M11:采矿污风;X1:地面运输矿石洒落;X2:地下水未经处理;X3:地下水含重金属;X4:废水未经处理;X5:细颗粒矿物进入废水;X6:尾砂水渗漏;X7:尾砂水溢流;X8:运输粉尘洒落进水沟;X9:凿岩粉尘沉降;X10:爆破粉尘沉降;X11:刮大风;X12:尾砂坝无覆盖措施;X13:污染物沉降;X14:污风排放;X15:凿岩粉尘;X16:爆破粉尘)

图 1 土壤重金属污染事故树

Fig. 1 The fault tree of heavy metal pollution

To = M1 + X1 + M2 + M3

用布尔代数法简化,求得最小割集 10 个:
K1 = { X2、X3 }、K2 = { X4、X9 }、K3 = { X4、X10 }、
K4 = { X4、X5 }、K5 = { X4、X8 }、K6 = { X6、X7 }、
K7 = { X1 }、K8 = { X11、X12 }、K9 = { X13、X14、
X15 }、K10 = { X13、X14、X16 };

最小径集 24 个: P1 = { X1、X2、X4、X11、
X13 }、P2 = { X1、X2、X4、X12、X13 }、

P3 = { X1、X2、X5、X8、X9、X10、X11、X13 }、
P4 = { X1、X2、X5、X8、X9、X10、X12、X13 }、P5 =
{ X1、X3、X4、X11、X13 }、P6 = { X1、X3、X4、X12、
X13 }、P7 = { X1、X3、X5、X8、X9、X10、X11、X13 }、
P8 = { X1、X3、X5、X8、X9、X10、X12、X13 }、P9 =
{ X1、X2、X4、X11、X14 }、P10 = { X1、X2、X4、X12、
X14 }、P11 = { X1、X2、X5、X8、X9、X10、X11、
X14 }、P12 = { X1、X2、X5、X8、X9、X10、X12、
X14 }、P13 = { X1、X3、X4、X11、X14 }、P14 = { X1、
X3、X4、X12、X14 }、P15 = { X1、X3、X5、X8、X9、
X10、X11、X14 }、P16 = { X1、X3、X5、X8、X9、X10、
X12、X14 }、P17 = { X1、X2、X4、X11、X15、X16 }、
P18 = { X1、X2、X4、X12、X15、X16 }、P19 = { X1、
X2、X5、X8、X9、X10、X11、X15、X16 }、P20 = { X1、
X2、X5、X8、X9、X10、X12、X15、X16 }、P21 = { X1、
X3、X4、X11、X15、X16 }、P22 = { X1、X3、X4、X12、
X15、X16 }、P23 = { X1、X3、X5、X8、X9、X10、X11、
X15、X16 }、P24 = { X1、X3、X5、X8、X9、X10、X12、
X15、X16 }、

事故树的结构重要度求解用一次近似计算判
别式,即:

$$I_{(i)} = \sum_{X_i \in K_j} \frac{1}{2^{n_{i-1}}}$$

(1)

其中: $I_{(i)}$ ——基本事件 X_i 结构重要度的近似判
断值;

$X_i \in K_j$ ——基本事件 X_i 属于 K_j 最小割
(径)集;

n_i ——基本事件 X_i 所在最小割(径)集中包含
基本事件的个数.

按照以上公式,通过 AFUTLTREE 软件计算,
得此事故树的结构重要度如下: $I_{(4)} = 1.5 >$
 $I_{(1)} = 1 > I_{(2)} = I_{(3)} = I_{(5)} = I_{(6)} = I_{(7)} = I_{(8)} =$
 $I_{(9)} = I_{(10)} = I_{(11)} = I_{(12)} = I_{(13)} = I_{(14)} = 0.5 >$
 $I_{(15)} = I_{(16)} = 0.25$

通过对各基本事件结构重要度的比较可知:
废水直接外排(X_4)导致顶上事件发生的可能性
最大;地面运输矿石洒落(X_1)和地下水未经处理
(X_2)导致顶上事件发生的可能性次之. 因此,矿
山在治理重金属污染时,最基本和最重要的就是
对外排废水进行处理.

3 污染风险评价

3.1 样品采集

在“2 事故树分析”中,利用事故树分析了导
致铀矿山土壤重金属污染的主要来源问题,得出
的结果是:废水外排对铀矿山重金属污染的危害
最大. 因此,在取样时应该充分考虑废水外排过程
中重金属的富集问题.

沿研究区域地表径流方向,距离铀矿山 0 m、
50 m、100 m、150 m、200 m、250 m、300 m、350 m、
400 m、450 m 设 10 个(编号依次为 X0 ~ X9)采集
点,多点采集深度为 0 ~ 20 cm 的表层土壤,等量
混合均匀后制样;另取等量 X0 ~ X9 样品混合均
匀成混合样(编号为 X10). 将土壤样品置于实验
室条件下自然风干,研磨,过孔径 0.149 mm 筛,
过筛后将土壤贮存于广口瓶中,以备. 用 HNO_3 -
 HF-HClO_4 混合酸消解,定容. 用原子吸收光谱仪
测定各组土壤重金属含量. 所用试剂均为优级纯,
所用的水均为超纯水. 分析过程均加入国家标准
土壤参比物质(GSS—1)进行质量控制,其结果符
合质控要求. 各组测量结果见表 1.

表 1 八种重金属在各组中的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 1 The content of eight heavy metal in each group($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

	U	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
X0	79.30	7.66	323.45	83.76	756.35	37.64	118.00	310.65
X1	79.05	7.45	313.00	82.44	770.55	36.99	118.09	307.01
X1	78.69	7.31	301.56	82.56	754.64	36.37	117.45	305.37
X3	78.55	7.22	287.44	81.67	751.34	36.53	116.42	303.67
X4	78.21	6.98	275.32	81.12	756.88	37.05	114.37	301.00
X5	77.66	6.76	268.88	80.54	743.32	34.48	110.57	298.56

续上表

	U	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
X6	77.05	6.54	257.08	80.00	731.66	33.89	105.79	294.37
X7	76.57	6.31	243.52	78.33	729.54	31.27	100.28	290.24
X8	75.23	6.11	233.89	77.53	714.83	31.88	99.39	285.44
X9	73.65	5.74	223.56	78.17	700.07	31.30	93.46	276.46
X10	74.78	6.23	270.65	79.00	745.89	34.96	110.30	297.65

3.2 评价方法

3.2.1 地积累指数法

地积累指数法^[2-4]是德国科学家 Muller 于 1969 年提出的,计算公式为:

$$I_{\text{geo}}(i) = \log_2(w(i)/1.5 w_b(i)) \quad (2)$$

式中: $I_{\text{geo}}(i)$ 为土壤中元素*i*的地质累积指数; $w(i)$ 为样品中元素*i*的实测平均质量分数,mg/kg; $w_b(i)$ 为元素*i*质量分数的地球化学背景值(见表 3),mg/kg;1.5 用于校正区域背景值差异.

地质累积指数可分为 7 个级别. $I_{\text{geo}}(i)$ 与重金属污染水平如表 2.

表 2 地积累指数与污染程度分级

Table 2 Index of geoaccumulation and classification of pollution degree

$I_{\text{geo}}(i)$	污染等级	污染程度
≥ 5	6	极重度污染
$\geq 4 \sim < 5$	5	重度至极重度污染
$\geq 3 \sim < 4$	4	重度污染
$\geq 2 \sim < 3$	3	中度至重度污染
$\geq 1 \sim < 2$	2	中度污染
$\geq 0 \sim < 1$	1	无污染至中度污染
< 0	0	无污染

表 3 土壤中各种元素背景值及毒素加权系数

Table 3 The background values and toxicity weighting coefficient of the various elements in soil

元素	质量分数/(mg · kg ⁻¹) 背景值 ^[5]	毒性加权系数 ^[6]
U	2.72	
Cd	0.074	30
Cr	53.1	2
Cu	20	5
Mn	430	1
Ni	23.4	5
Pb	23.6	5
Zn	67.7	1

3.2.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法^[7-8]是瑞典科学家 Hakanson 在 1980 年根据重金属性质及其环境行为特点,从沉积学角度出发,提出来的对土壤或沉积物中重金属污染进行评价的方法^[9].该方法不仅考虑了土壤重金属含量,而且将重金属的生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,采用具有可比性、等价属性指数分级法进行评价^[10].

潜在生态风险指数法以 4 项条件为基础^[11-12]: 1)含量条件:生态风险指数随污染程度的加重而增加;2)数量条件:受多种污染物污染的土壤的风险值高于受少数几种污染物污染的风险值;3)毒性条件:毒性高的污染物应比毒性低的污染物对风险值有较大的贡献;4)敏感条件:表明不同的区域对不同的有毒污染物具有不同的敏感性.

Hakanson 生态风险指数的计算公式为:

$$P(i) = w(i)/w_b(i) \quad (3)$$

$$E_r(i) = T(i) \cdot P(i) \quad (4)$$

$$P_{\text{RI}} = \sum E(i) \quad (5)$$

式中: $P(i)$ 为重金属*i*的单项污染指数; $w(i)$ 为土壤样品中重金属*i*的实际质量分数,mg/kg; $w_b(i)$ 为重金属*i*质量分数的地球化学背景值(见表 3),mg/kg; $T(i)$ 为重金属*i*的毒性系数(见表 3); $E_r(i)$ 为重金属*i*的潜在风险系数; n 为评价元素的数量,个; P_{RI} 为多种重金属的潜在生态风险指数.

潜在生态风险评价指标与分级如表 4.

表 4 潜在生态风险评价指标与分级

Table 4 The index and classification of potential ecological risk assessment

$E_r(i)$	P_{RI}	污染程度
< 40	< 150	轻微污染
$\geq 40 \sim < 80$	$\geq 150 \sim < 300$	中等污染
$\geq 80 \sim < 160$	$\geq 300 \sim < 600$	强污染
$\geq 160 \sim < 320$	$\geq 600 \sim < 1200$	很强污染
≥ 320	≥ 1200	极强污染

3.3 评价结果

将表 1 中各元素的实测值(X10)代入地累积指数法和潜在生态风险指数法的公式中,样品

X0~X9 取他们之中的最大值和最小值,所得结果见表 5.

表 5 地累积指数法和潜在生态风险指数法评价结果

Table 5 The evaluation results of the index of geoaccumulation and the potential ecological risk assessment					
		U	Cd	Cr	Cu
I_{geo}	X0~X9	4.17~4.28	5.69~6.11	1.49~2.02	1.37~1.48
	X10	4.20	5.81	1.77	1.40
E_r	X0~X9		2327.03~3105.41	8.42~12.18	19.38~20.94
	X10		2525.68	10.19	19.75
		Mn	Ni	Pb	Zn
I_{geo}	X0~X9	0.12~0.25	-0.17~0.10	1.40~1.74	1.44~1.61
	X10	0.21	0.00	1.66	1.55
E_r	X0~X9	1.63~1.79	6.68~8.04	19.80~25.02	4.08~4.59
	X10	1.73	7.47	23.37	4.40

3.4 结果分析

1)各种金属对土壤的污染程度随着距离铀矿山的增加而呈现减弱的趋势,这充分说明了酸性或者碱性的铀矿山开采工艺导致了铀矿山周边环境重金属的富集.

2)地累积指数法的评价结果为:元素 Cd 为极重污染;元素 U 为重污染至极重污染;其次为 Cr,Pb,Zn,Mn,Cu;元素 Ni 为无污染.潜在生态风险指数法的评价结果为:元素 Cd 为极强污染;其次为 Cr,Pb,Zn,Mn,Cu,Ni,均为轻微污染.这也告诉我们每种评价方法对同一环境的评价结果存在一定的区别,所以用这些评价方法在进行污染评价时,应该采取两种或者多种评价方法相结合的方式.

3)如果用公式(5)计算多种重金属的生态风险指数,结果表明整个区域的污染处于极强的水平.

4 结 论

1)运用事故树分析方法能够很好的辨识风险的来源,这能够为随后的污染评价以及防控提供很好的管理支撑;但是,由于个人能力及经验有限,在分析导致顶上事件发生的基本事件或者中间事件的过程中必然存在某些方面的误差,这也会导致污染评价结果的不准确.

2)由于实验条件的限制,取样区域范围较小,不能很好的体现出距离和污染程度之间的对应关系.忽略了重金属在土壤里的迁移转化、空间分布以及生物有效性,这些都会造成评价结果的

误差.

3)U 元素毒性加权系数的缺失,导致了潜在生态风险指数法不能够给出 U 元素的污染指数.研究 U 元素相对于其他重金属的毒性加权系数应该成为今后学者研究的重点.

4)由于各种元素对于整个区域的污染程度贡献不同,在对整个区域进行综合评价的过程中,往往只是突出了最强金属的贡献值,这样虽然对于最终的评价结果没有太大的影响,但不能给出污染程度较弱的贡献值,会忽略“毒性”在评价过程中的作用.

5)采取有效的方法对铀矿山进行污染评价可以为矿山污染的治理提供可靠的依据.在核能受到越来越高重视的今天,铀矿山的环境污染问题也必将受到越来越多的关注,而切实可行的风险评价方法能够为环境保护发挥巨大的作用.

参考文献:

[1] 王昌汉,李开文.溶浸采铀(矿)[M].北京:原子能出版社,1998.

[2] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the rhine river[J]. Journal of Geology,1969,2:108-118.

[3] 刘勇,岳玲玲,李晋昌.太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J].环境科学学报,2011,31(6):1285-1293.

[4] 秦普丰,刘丽,侯红,等.工业城市不同功能区土壤和蔬菜中重金属污染及其健康风险评价[J].生态环境学报,2010,19(7):1668-1674.

2)应用研究表明,基于 HF-RBF 的地应力预测方法考虑了埋深、岩石物理力学参数对地应力分布的影响,预测精度较高,满足工程设计要求。

3)基于 HF-RBF 的地应力预测方法未来需进一步研究地应力在水平方向分布差异性问题。

参考文献:

[1] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2000.

[2] 蔡美峰,刘卫东,李远. 玲珑金矿深部地应力测量及矿区地应力场分布规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(2):227-233.

[3] 张延新,宋常胜,蔡美峰,等. 深孔水压致裂地应力测量及应力场反演分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(4):779-786.

[4] Fairhurst C. Stress estimation in rock;a brief history and review[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2003,40(7/8):957-973.

[5] 蔡美峰. 岩石力学与工程[M]. 北京:科学出版社,2006.

[6] Hudson J A, Cornet F H, Christiansson R. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation-Part 1:Strategy for rock stress estimation[J]. International Journal of Rock

Mechanics and Mining Sciences,2003,40(7):991-998.

[7] 谢红强,何江达,肖明砾. 大型水电站厂区三维地应力场回归反演分析[J]. 岩土力学,2009,30(8):2471-2476.

[8] 张勇慧,魏倩,盛谦,等. 大岗山水电站地下厂房区三维地应力场反演分析[J]. 岩土力学,2011,32(5):1523-1530.

[9] Stephansson O, Zang A. ISRM suggested methods for rock stress estimation—Part 5: Establishing a model for the in situ stress at a given site[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2012,45(6):955-969.

[10] Zhang C Q, Feng X T, Zhou H. Estimation of in situ stress along deep tunnels buried in complex geological conditions[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2012,52(4):139-162.

[11] 石敦敦,傅永华,朱曦,等. 人工神经网络结合遗传算法反演岩体初始地应力的研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2005,38(5):73-76.

[12] 张乐文,张德永,邱道宏. 径向基函数神经网络在地应力场反演中的应用[J]. 岩土力学,2012,33(3):799-784.

[13] 金长宇,马震岳,张运良,等. 神经网络在岩体力学参数和地应力场反演中的应用[J]. 岩土力学,2006,27(8):1263-1266.

(上接第 26 页)

[5] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学,1991,12(4):12-19.

[6] 徐争启,倪师军,庾先国,等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学技术,2008,31(2):112-115.

[7] 付川,郭劲松,方芳. 小江消落区土壤中重金属背景调查与潜在生态风险评价[J]. 安徽农业科学,2010,38(4):1943-1944.

[8] 常芳,郭翠华,张红. 汾河太原段土壤重金属污染的潜在风险评价[J]. 山西大学学报,2009,32(2):304-307.

[9] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollu-

tion control: a sediment logical approach [J]. Water Research,1980,14(8):975-1001.

[10] 陈翠翠,梁锦陶,韩玉兰,等. 太原市敦化污灌区重金属污染的潜在生态风险评价及垂直分布特征[J]. 中国农学通报,2010,26(10):314-318.

[11] 宣昊,滕彦国,倪师军,等. 基于地球化学基线的土壤重金属污染潜在生态风险评价[J]. 矿物岩石,2005,25(4):69-72.

[12] 方晓明,刘哲哲,刘中志,等. 沈阳市丁香地区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 环境与生态,2005,130(31):45-47.