环境保护

国内外矿山土壤重金属污染风险评价方法综述

王显炜[1]，徐友宁[1]，杨 敏[2]，乔严军[2]
(1. 中国地质调查局西安地质调查中心，陕西 西安 710054；2. 长安大学，陕西 西安 710054)

摘 要：环境风险评价是风险论与生态学、生物学、环境科学、地学等多种学科相互交叉的边缘学科。本文以矿山土壤环境系统为对象，介绍了目前国内外矿山土壤重金属污染风险评价方法，包括指数法、体外模拟法、数学模型法等，旨在为土壤风险评价提供参考。依据研究对象、目的以及实地获取的数据，选择适当的评价方法，为矿山土壤污染风险评价、管理和污染修复提供科学依据。

关键词：矿山；土壤污染；重金属；风险评价；国内外
中图分类号：X171 **文献标识码**：A **文章编号**：1004－4051 (2009) 10－0054－03

Review on risk assessment methods for soil heavy metal contamination in mines at home and abroad

WANG Xian-wei[1], XU You-ning[1], YANG min[2], QIAO Yan-jun[2]
(1. Xi'an Center of China Geological Survey, Xi'an 710054, China; 2. Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Environmental risk assessment is a cross-cutting discipline about risk theory and ecology, biology, environmental science, geology as well as other subjects. Taking the soil environmental systems in mines as the object, this paper introduced several risk assessment methods for heavy metal contamination of soil in mines at home and abroad, including test, index method, vitro gastrointestinal method, mathematics model method and so on. The suitable assessment method according to the goal of study and the pollution characteristic can provide the scientific information for the risk management and assessment of soil in mines.

Key words: mines; soil contamination; heavy mental; risk assessment; home and abroad

随着工业发展和城市化进程的加剧，通过交通运输、工业排放和大气沉降等，造成土壤重金属污染的现象越来越严重。矿产资源开发，尤其是金属矿产资源开发活动过程中，废石尾渣、选矿废水、废气浮尘中的重金属元素成为矿区环境的主要污染源，通过污染灌溉、大气降尘会导致矿区土壤中重金属元素含量增加，以至土壤受到污染。土壤重金属污染，一方面影响土壤微生物区系、生态物种和微生物过程，进而影响生态系统的结构与功能；另一方面，矿山土壤重金属污染，会通过粮食、蔬菜等人体食物链，造成人体健康风险。最典型的例子，如镉污染造成的“疼痛病”和汞污染造成的“水俣病”。受污土壤中重金属多为致癌或致突变性的毒重金属，如汞、铅、镉、砷、铬等，土壤一旦遭受重金属元素的污染很难去除，则长期危害人群健康。因此，土壤重金属污染的风险评价，则是管理、控制、修复污染土壤的科学前提。而目前国内外尚未形成公认的土壤重金属污染风险评估的方法。本文试图通过土壤重金属污染风险评价介绍，为正在兴起的矿区土壤重金属污染风险评价提供借鉴意义。

1 土壤重金属风险评估研究现状

生态风险评价的主要对象是环境介质、生物种群和生态系统，通过科学的、可靠的对人类活动产生的生态效应评估，而达到保护和科学管理生态系统的目的。生态风险评价技术是从 20 世纪 80 年代末、90 年代初才开始发展起来的。目前，大部分研究还停留在理论框架和技术路线的探讨阶段，而且多是针对水生生态系统提出的，涉及陆生生态系统的很少。而少数有关生态风险评价的应用研究案例，也多集中在生态环境中污染物

收稿日期：2009－02－01
作者简介：王显炜 (1984－)，女，汉族，内蒙赤峰人，在读硕士，从事环境地球化学研究。

万方数据

浓度的测定或简单的风险指数的计算上，并不能真正解决污染的生态风险评估。健康风险评价主要侧重于人体的健康风险，通过选择与人类类似的动物进行试验，以达到保护人类自身的目的。土壤健康风险评价是 80 年代以后兴起的狭义环境风险评价的重点，目前在世界上得到一定的应用。

我国近年利用风险概念和分析方法对环境健康风险的应用研究也取得较大进展。Liao 等(2005) 对湖南郴州市某工业区污染土壤进行了健康风险评价。但由于健康风险评价本身不完善，目前的应用受到很大限制。Steinemann 的研究表明，美国绝大部分环境影响评价报告书中没有提及健康风险，极少部分涉及健康风险的环境影响报告书，也只是关注有毒化学物质或放射性引发癌症的风险，而忽略了其他重要的因素，如发病率、致死风险、累积影响和更大范围内决定健康因素。

2　风险评价方法

矿山开采、选冶和冶炼过程中，矿石中的重金属元素会随废石尾沙、矿尘、废气进人矿区及其周边土壤中，造成严重的土壤重金属污染，污染农作物进而危害人体健康。法国北部已废弃的老矿山分布区，人群中癌症和畸形等疾病的发病率是法国平均水平的 10 倍。居住于铅冶炼厂附近 10%的儿童中，血铅含量高于 100g/L 的水平。韩国一个已废弃近 30 年的矿山，土壤中的重金属污染导致农作物中 As 的含量最高达 33mg/kg（洋葱）、Cd 0.87mg/kg，水系中 As、Cd、Zn 浓度分别达 0.71mg/L、0.19mg/L 和 5.4mg/L。陕西潼关金矿区农田土壤中汞超标倍数均值达 4.71，受 Hg 污染的面积占研究区面积的 51.76%。下面分别简述矿山土壤重金属污染的生态风险评价和健康风险评价。

2.1　生态风险评价方法

熵值法（HQ）是最常见的风险定量评价方法。该法确定了风险的“是”与“否”，并简单高效地回答了风险的高低，可用于筛选水平的评价。HQ 由生物可利用部分的暴露量（ADD）除以效应浓度（RfD－美国环保署提供的标准值）获得。将所得结果与“1”比较，超过参照浓度的环境浓度，就被认为其有潜在影响。其中，ADD 可以通过化学试剂提取法、酸性挥发硫化物法、薄层梯度扩散法等方法确定。

潜在生态危害指数法是 1980 年瑞典科学家 Hakanson 根据重金属性质及环境行为特点，从沉积学角度提出的对土壤或沉积物中重金属污染程度及其潜在生态危害评价的一种相对简便的方法。其评价方法如下。

评价区土壤中第 i 种重金属元素的潜在生态危害系数（E_r^i）及土壤中多种重金属的综合潜在生态危害指数（RI），可分别表示为

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \qquad RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i$$

式中：C_f^i—重金属的富集系数（$C_f^i = C_s^i / C_n^i$）；C_s^i—重金属 i 的实测含量；C_n^i—计算所需的参比值，Hakanson 提出以现代工业化前沉积物中相应重金属元素含量的最高背景值作为参比值，也有的学者在评价中以国家土壤环境标准值作为参比值；T_r^i 为重金属 i 的毒性系数。

潜在生态风险程度等级划分见表 1。

表 1　水系沉积物重金属元素潜在生态风险程度划分

指标	潜在生态风险程度				
E_r^i	<40	≥40，<80	≥80，<160	≥160，<320	≥320
	低	中级	较重	重	严重
RI	<150	≥150，<300	≥300，<600		≥600
	低度	中度	重度		严重

风险评估编码法。目前国内外利用重金属形态分析工具研究风险，一般从分析几大化学相的可能生物利用的部分所占比例，然后判定所具有的环境风险性。根据形态分析方法对应的风险限值，认为沉积物中重金属有不同的结合相，这些结合相对应着不同的结合紧密程度，可以用 RAC (Risk Assessment Code) 来表征和规范。当可交换态和碳酸盐结合态少于整体的 1%时，可以看作环境是安全的；当大于整体的 50%时，认为高度危险和极易进人食物链。即，RAC<1 为无风险；1<RAC<10 为低风险；11<RAC<30 为中风险；30<RAC<50 为高风险；RAC>50 为极高风险。

对于沉积物中的无机物，众多学者认为，酸挥发性硫化物（AVS）与同步提取金属（SEM）

万方数据

二者摩尔浓度的比值与“1”比较，来反应对生物的有无毒害作用，一般认为 SEM/AVS<1，即有足够的铁硫化物可以沉淀金属，不产生毒害作用。美国环保署建议，根据沉积物中 SEM-AVS 的分布分成三类：SEM-AVS>5 为一类，对水生生物和人类很有可能造成不良影响；0<SEM-AVS<5 为二类，可能造成不良影响；SEM-AVS<0 为三类，没有迹象表明有不良影响。

2.2 健康风险评价方法

重金属污染对人类健康造成的损害已有大量的研究报道，有关土壤重金属污染的健康风险研究，目前广泛应用的评价方法是暴露评价。通过土壤-植物系统和土壤-人途径对土壤中重金属污染风险进行评价，应用的评价方法主要是体外模拟法。体外模拟法是利用体外模拟装置模拟人体消化系统进行的，分别取胃和小肠阶段反应液样本，经离心过滤后检测其重金属含量并计算其生物可给性，根据重金属生物可给量进行健康风险评价。唐翔宇对 RubyMV 的体外模拟法进行了改进。体外模拟法的计算方法介绍如下。

(1) 计算重金属元素在胃或小肠阶段的生物可给性

$$BA(\%) = C_{IV}V_{IV}/C_S M_S \times 100$$

式中：BA—特定重金属的生物可给性（%）；C_{IV}—体外模拟实验的胃或小肠阶段反应液中特定重金属的可溶态总量（mg/L）；V_{IV}—各反应器中反应液的体积（L）；C_S—土壤样品中特定重金属的总量（mg/kg）；M_S—加入反应器中的土样的重量（kg）。

(2) 估算重金属摄入量（日均通过土壤-人的途径摄入的重金属量）

$$W_m = C_m \times W_{soil}$$

式中：W_m—金属元素的摄入量（μg/d）；C_m—土壤中重金属的含量（μg/g）；W_{soil}—日均土壤摄入量，成人为 0.05g/d，儿童为 0.2g/d。

(3) 重金属生物可给量的计算，每日摄入体内重金属中可被吸收的金属量

$$W_A = W_m \times BA$$

式中：W_A—日可吸收的重金属量（μg/d）；W_m—重金属元素的日摄入量（μg/d）；BA—特定重金属的生物可给性（%）。

此外，Hope 提出了一系列相对简单的定量计算方法。这些计算方法也可用于评估矿山土壤重金属污染带来的健康风险。李静等对东关镇铅锌矿区土壤中 Ph、Zn、Cd、Cu 的含量进行健康风险评价，通过不同的暴露途径，给出经验公式计算在不同途径下人体的日摄入量（CDI）。健康风险评价中，对风险结果进行定量表达有两种方式：一是无阈效应（如癌）情况下，利用低剂量外推模式评价人群暴露水平上所致危险概率。常用的致癌物低剂量－反应外推模型有：对数－正态模型、威尔布模型、单击模型、多阶段模型、线性多阶段模型。二是有阈效应（如非致癌）情况下，通常计算参考剂量 RfD（即低于此剂量时，期望不会发生有害效应）。

2.3 不同方法的评述

不同的风险评估方法均具有其各自的适宜性，例如商值法适于建立优先权和建立标准，其局限性是不能预测风险等级或某一特定污染水平产生某种效应的定量数据。“模型化的商值法”试图解决这方面的不足，根据估测的环境浓度与参照浓度的比例为<0.1、= 0.1～10、>10，分别表示为“无关”、“可能有关”、“高度相关”。估测的环境浓度还可与最大可接受毒性浓度（MATC）和 LC50（某毒性物质使受试生物死亡一半所需的浓度）两项指标比较，从而对污染效应定量化。潜在生态风险指数法以重金属总量进行计算，存在一定的缺陷。这是因为残渣晶格态的金属，一般情况下是不被生物利用的。近年来的研究表明，虽然土壤中重金属浓度总量是必不可少的评价因素，但仅以总量评价将会过高地估计其潜在风险的程度，从而降低生态风险评价结果的可靠性。于是不少作者引入生物可利用性，对该方法作了有益改进，如采用逐级提取 BCR 方法的前三步，包括水溶态、碳酸盐结合态、可氧化和可还原态所得的暴露量代替污染物的实测浓度进行计算。暴露评价的优点是适用于多种目的，而缺点在于难以获得详尽的化学品和受体结合的暴露-效应数据资料。

3 结论

环境风险评价能够灵活地组织和运用各种数据、信息、假设和不确定性，对产生不利的环境效应进行评价。土壤环境风险评价，可为土壤环境风险管理提供可能引起不良环境效应的信息，为环境决策提供依据。到目前为止，在土壤重金属环境风险评价方面，还没有一种公认的可广泛接受的模型或方法，因而在实际运用中，应结合评价矿区土壤重金属含量、生物中重金属含量、评价目的以及可参照值，选择适当的评价方法。

（参考文献本刊略）

万方数据