内梅罗指数和地质累积指数在土壤重金属评价中的差异探讨
——以小秦岭金矿带为例

张江华[1], 赵阿宁[1], 王仲复[2], 柯海玲[1], 陈华清[1]
(1.中国地质调查局西安地质调查中心; 2.青海省水文地质工程地质环境地质勘查院)

摘要: 内梅罗指数和地质累积指数广泛应用于土壤、沉积物等环境介质中的重金属污染评价, 选择金矿开发区土壤中 Hg、Pb、Cu、Cd、Zn 5种重金属, 对比了两种方法的评价结果, 统计分析各个样品的综合污染程度, 区分不同方法评价的差异, 并提出了形成差异的主要原因。

关键词: 重金属污染; 内梅罗指数; 地质累积指数; 小秦岭金矿带
中图分类号: X 825　　文献标志码: B　　文章编号: 1001-1277(2010)08-0043-04

0 引　言

矿产资源开发利用过程, 既是矿山企业获取经济效益的过程, 又是可能给地质环境带来影响和破坏的过程。随着人类对矿产资源需求的不断增加, 矿产资源开发的力度、强度、广度越来越大。在形成众多矿山地质灾害的同时, 矿区各种环境污染问题日渐突出, 尤以土壤中重金属污染最为严重。土壤中的重金属能从土壤迁移到其他生态系统组分中, 如地下水、植物等, 并通过饮用水和食物链影响人类健康[1]。因此, 在矿山地质环境调查中, 对土壤中重金属污染程度、危害性进行合理的评价显得十分必要。

重金属污染评价方法种类繁多, 从矿山地质环境角度看, 应用于土壤重金属污染评价的方法主要有富集因子分析法、单元素污染指数法、综合污染指数法、内梅罗(Nemerow)指数法、地质累积指数法(Geoaccumulation Index)、潜在生态危害指数法(Potential Ecological Risk Index)等。同时, 在确定环境地球化学基线中还有标准化方法、相关分析法、模糊综合评价法和改性灰色聚类法等。这些方法评价重点各异, 适用条件不同, 目前尚未系统地对这些评价方法进行分类。笔者在小秦岭金矿带地质环境调查基础上, 选择本区特征污染元素 Hg、Pb、Cu、Cd、Zn, 对重金属评价中普遍使用的内梅罗指数和地质累积指数评价结果的差异进行了探讨, 并提出判定重金属污染程度的优选方式。

1 内梅罗指数法

内梅罗指数法是当前国内外进行综合污染指数计算最常用的方法之一, 是一种兼顾极值或突出最大值的计权型多因子环境质量指数。一批监测数据来自 m 个监测点(或 m 个样品), 每个监测点有 k 种参数, 当给定环境标准和监测点(或样品)的加权系数, 则由内梅罗指数可计算出相应污染指数。计算公式为:

$$P_i = C_i / C_0 \quad (i = 1, \cdots, k,\ k\text{种参数};\ P = 1, \cdots, m,\ m\text{个监测点}) \qquad (1)$$

式中: P_i——第 i种参数的单项污染指数;
C_i——第 P 监测点的实测值(mg/kg);
C_0——第 i种污染物的标准值(mg/kg)。

$$P = \frac{\sqrt{P_{ijmax}^2 + P_{ijave}^2}}{2} \qquad (2)$$

式中: P——内梅罗综合污染指数;
P_{ijmax}——最大单项污染指数;
P_{ijave}——单项污染指数平均值。

内梅罗指数不仅考虑到各种影响参数的平均污染状况, 而且特别强调了污染最严重的因子, 同时在加权过程中避免了权系数中主观因素的影响, 克服了平均值法各种污染物分担的缺陷, 是应用较多的一种环境质量指数[2]。

按照内梅罗综合污染指数, 划定污染等级。内梅罗指数土壤污染评价等级见表 1。

内梅罗指数是一种环境质量指数, 评价中所采用的环境质量标准是根据土壤环境质量标准(GB 15618—1995, 1995-12-06实施)和评价区相应的环境功能确定。用环境质量指数评价法可以判断环境质量与评价标准之间的关系。一般说来, $I>1$, 说明环境质量已不能满足评价标准的要求; $I=1$,

收稿日期: 2010-05-25
资助项目: 国土资源部公益性行业科研专项经费项目《金矿区农田土壤重金属污染风险评估及阻断研究》(200811061); 中国地质调查局项目《小秦岭金矿带矿山环境地质问题调查与评价》(1212010741003)
作者简介: 张江华(1979—), 男, 陕西渭南人, 硕士, 工程师, 从事矿山地质环境调查、研究工作; 西安市友谊东路 438号, 中国地质调查局西安地质调查中心, 710054
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

说明环境质量处于临界状态; $I<1$, 说明与评价标准对比, 环境质量较好。

表 1 内梅罗指数土壤污染评价等级

等级	内梅罗污染指数	污染等级
Ⅰ	$P \leqslant 0.7$	清洁 (安全)
Ⅱ	$0.7 < P \leqslant 1.0$	尚清洁 (警戒限)
Ⅲ	$1.0 < P \leqslant 2.0$	轻度污染
Ⅳ	$2.0 < P \leqslant 3.0$	中度污染
Ⅳ	$P > 3.0$	重污染

注: 数据来自国家土壤质量评价技术规范。

2 地质累积指数

地质累积指数通常称为 Muller指数, 是 20世纪 70年代晚期在欧洲发展起来的, 广泛应用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标, 尤其用于研究现代沉积物中重金属污染的评价[3]。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2\left(\frac{C_n}{1.5BE_n}\right) \quad (3)$$

式中: I_{geo}——地质累积指数;

C_n——样品中元素 n的实测值 (mg/kg);

BE_n——地球化学背景值 (mg/kg);

1.5——修正指数, 是考虑到由于成岩作用可能会引起背景值的变动。

公式 (3)表明, 地质累积指数除取决于样品的测定值外, 还与地球化学背景值的选择有关。由于不同的地球化学背景值具有很大的差异, 因此, 评价获得重金属的污染程度也有所不同。重金属污染评价常用的几种地球化学背景值见表 2。

表 2 重金属污染评价常用的地球化学背景值 mg/kg

元素	页岩	砂岩	黏土	中国陆壳	整个陆壳
Hg	0.35	0.07	0.40		
Pb	20	7	80	15	8
Cu	45	*n*	250	38	75
Cr	90	35	90	63	185
Cd	0.3	0.0*n*	0.42	0.055	0.098
As	13	1	13	1.9	1.0
Zn	95	15	165	86	80

注: 数据来源于文献 [3-7]。

评价重金属的污染, 除必须考虑人为污染因素、环境地质化学背景值外, 还应考虑到由于自然成岩作用可能引起背景值的变动因素。地质累积指数法考虑到了此因素, 弥补了其他评价方法的不足。一般在计算地质累积指数时, 选择普通页岩的平均值作为重金属元素的地球化学背景值。

地质累积指数可以分为几个级别, 用来表示污染程度从无污染到极强污染。主要有两类不同的划分级别。地质累积指数分级标准与污染程度之间的相互关系见表 3。

表 3 地质累积指数的两类划分级别

I_{geo}	级别	污染程度	I_{geo}	级别	污染程度
< 0	1	无污染	< 0	1	无污染或轻度污染
0~1	2	无污染到中度污染	0~1	2	中度污染
1~2	3	中度污染	1~3	3	中度污染或强污染
2~3	4	中度污染到强污染	3~5	4	强污染
3~4	5	强污染	> 5	5	极强污染
4~5	6	强污染到极强污染			
> 5	7	极强污染			

3 小秦岭金矿带土壤重金属污染评价

小秦岭金矿带矿产资源丰富, 以金矿为主, 伴生银、铅、铁等金属元素, 其次有花岗岩、大理石、石墨、石英石等矿产。区内矿业开采集中于秦岭山区, 山前冲洪积扇区和黄土沟壑塬区分布了大量选矿厂、冶炼厂, 历史上用混汞法提金普遍。土壤类型有褐土和黄土, 以黄土为主。样品采集以表层土 (0~20 cm)为主, 采集密度 1点 /4 km^2, 于污染源密布地段加密采样, 共计 133件样品。

选择研究区特征污染元素 Hg、Pb、Cu、Cd和 Zn, 对其在土壤样品中的质量分数进行测定。

Cu、Pb、Zn的测定: 称取 1~2 g样品于光滑瓷坩埚中, 灼烧 1~2 h后, 用氢氟酸、高氯酸分解, 制备成 5%的盐酸介质溶液, 利用原子吸收分光光度计测定。Cu、Pb用原子吸收背景校正测定, 将溶液稀释 5倍, 再测定 Zn。Cd的测定: 称取 0.25 g样品, 用盐酸、硝酸分解, 制备成 2%的硝酸介质溶液, 用石墨炉原子吸收法直接测定。分析采用 Z-5000型原子吸收分光光度计, 用 HGA-500程序控制石墨炉。

Hg的测定: 准确称取适量的样品用稀王水在水浴上加热分解, 在 1+1王水介质中, 以空气作载气, 产生的汞原子蒸气经无水氯化钙干燥管导入测汞仪吸收管中, 在波长 253.7 nm处进行冷原子吸收测定, 记录峰值吸光度。采用仪器为 AFS-230E原子荧光仪。

室内分析测定按标准方法操作, 以全程序空白值、平行样、内控样、加标回收等进行控制; 允许偏差限度为内控样或国家标准样品、平行样最大相对偏差 15%以内。测试数据见表 4。

3.1 内梅罗指数法评价

根据土壤环境功能分区, 确定研究区土壤环境质量采用二类环境质量标准。将重金属质量分数带入

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

公式 (1)、(2)中, 得到计算结果见表 5和表 6。

表 4　小秦岭金矿带矿业区土壤样品重金属质量分数测试结果　mg/kg

特征参数	最小值	最大值	平均值
Hg	0.04	61.2	2.75
Pb	22.0	3 470	216.9
Cu	13.0	600	53.9
Cd	0.001	45.2	0.56
Zn	46.0	781	118.06
pH	7.18	8.47	7.88

注: 数据引自文献 [8]。

表 5　小秦岭金矿带土壤重金属内梅罗单项污染指数

元素	单项污染指数
Hg	2.75
Pb	0.62
Cu	0.54
Cd	0.56
Zn	0.39

表 6　小秦岭金矿带土壤重金属内梅罗综合污染指数评价分级

分级	样品个数	百分比 /%
清洁 (安全)	68	51.1
尚清洁 (警戒线)	16	12.0
轻度污染	23	17.3
中度污染	7	5.3
重污染	19	14.3

根据各重金属单项污染指数平均值评价, 研究区土壤中仅 Hg污染。而内梅罗综合指数显示 36.9%的样品受到了重金属污染, 其中 14.3%的样品受到了重污染。

3.2　地质累积指数

一般在计算地质累积指数时, 通常选择普通页岩的平均值作为重金属元素的地球化学背景值。根据表 2数据和表 3的 5级划分级别, 将研究区 5种特征污染重金属元素平均质量分数带入公式 (3), 得到计算结果见表 7。

表 7　小秦岭金矿带土壤重金属 Muller污染指数

元素	I_{geo}	污染程度
Hg	2.39	强度污染
Pb	2.85	强度污染
Cu	-0.32	无污染
Cd	0.32	中度污染
Zn	-0.27	无污染

按照木桶原理, 对 133件样品的 Hg、Pb、Cu、Cd和 Zn运用地质累积指数进行评价, 取各种元素污染的最高级别表示该样品的污染程度。通过统计分析, 得到计算结果见表 8。

表 8　小秦岭金矿带土壤重金属 Muller指数评价分级

分级	样品个数	百分比 /%
无污染	6	5
轻度污染	47	35
中度污染	51	38
强度污染	22	17
极强污染	7	5

Muller污染指数评价结果显示, 矿区土壤中 Hg和 Pb达到了强度污染级别, Cd为中度污染级别, 而 Cu和 Zn则未对土壤环境造成影响。通过统计分析 133件样品的污染程度发现, 95%的样品受到了污染, 其中 22%达到了强度 -极强污染级别。

4　结　语

在两种评价方式中, 小秦岭金矿带土壤中 Hg污染严重, Cu和 Zn均未产生污染。Pb和 Cd的污染级别存在差异, 在内梅罗单项污染指数评价中, 二者未对土壤造成污染, 而在地质累积指数中, Pb达到了强度污染级别, 是研究区 5种特征污染物中污染最严重的元素, Cd达到了中度污染。由此可见, 这两种方法对自然原生高背景含量和人为活动产生污染物的评价结果表现不同。对于人为矿业活动引起的 Hg质量分数增高现象, 两种评价方法结果一致, 而对于金矿区主要伴生元素 Pb, 两种方法的评价结果趋于两个极端, 内梅罗指数评价为无污染, 地质累积指数评价为达到了严重污染。笔者认为地质累积指数评价更具有实际性, 因为在研究区除金矿外, 还分布有数个铅矿企业, 造成 Pb累积是必然的。而内梅罗指数评价的保守结果, 主要原因是其描述的环境质量是非连续的, 分级标准是建立在二值逻辑基础上的, 同时用于计算的环境质量标准未进行修正, 难以代表研究区的背景值。

两种评价结果的统计分析表明, 133件土壤样品中 5种重金属元素的综合污染程度出入较大。内梅罗综合污染指数评价出大部分 (63.1%)样品未受到污染, 污染比较严重的样品不足 1/5; 而 Muller指数认为几乎所有 (95%)样品受到了不同程度的污染, 其中, 达到中度以上污染的占 60%。从各个样品的评价结果看, 两种评价方式依然存在较大的差异。笔者认为, 这主要缘于地质累积指数法不仅考虑了沉积、成岩、风化作用等自然地质过程造成的背景值的影响, 而且充分注意了人为活动对重金属污染的影响, 因此, Muller指数不仅反映了元素的自然变化特

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

征,而且可以判别人为活动对环境影响,是区分人为活动的重要参数。而内梅罗指数法以环境质量标准为参照值,属于环境质量的评估范畴,难以反映污染的质变特征,对污染程度的界定有其不足之处。研究区属于金矿开发地带,人为活动是土壤中重金属累积和污染的主要因素,显然 Muller指数更适合用于本区的污染程度的判定。

[参 考 文 献]

[1] C Micó, L Recatal, M Peris, et al. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of European Mediterranean area by multivariate analysis[J]. Chemosphere, 2006, 65: 863-872.

[2] 周国华,刘占元. 区域土壤环境地球化学研究[J]. 物探与化探, 2003, 27(3): 223-226.

[3] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2: 108-118.

[4] Taylor S R, M Leannan S. The continental crust: composition and evolution[M]. London: Blackwell Science Publications, 1985: 209-230.

[5] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1986: 336-342.

[6] 张家诚. 地学基本数据手册[M]. 北京: 海洋出版社, 1986: 211-212.

[7] 黎彤. 中国陆壳及其沉积层和上陆壳的化学元素丰度[J]. 地球化学, 1994, 23(2): 140-145.

[8] 徐友宁,李育敬,张江华,等. 陕西潼关金矿区环境地质问题专题调查成果报告[R]. 西安: 西安地质矿产研究所, 2006: 131-134.

Discussion on the differences of heavy metals contamination in soil assessment with Nemerou index and geo-accumulation index —with Xiaoqinling gold belt as example

Zhang Jianghua[1], Zhao Aning[1], Wang Zhongfu[2], Ke Hailing[1], Chen Huaqing[1]

(1. *Xi'an Center of China Geological Survey*;
2. *Institute of Hydrological, Engineering and Environmental Geology Exploration, Qinghai*)

Abstract: Nemerou index and geo-accumulation index are widely used on the assessment of heavy metals contamination in soil and sediment. The authors selected Hg, Pb, Cu, Cd, Zn index from the soil of gold mining area, and contrasted the results of the two methods. The composite contamination extent of every samples was statistically analyzed and the differences between the two methods were pointed out. Finally, the primary causes of the differences were put forward.

Keywords: heavy metals contamination; Nemerou index; geo-accumulation index; Xiaoqinling

(编辑: 赵玉娥)

(上接第 42页)

可得到以下结论:

1)在金精矿边磨边浸过程中,铁质球磨机会产生大量的新鲜铁粉,消耗大量的氰化钠,导致边磨边浸过程中氰化钠的耗量增大。

2)边磨边浸过程中,由于铁球相互磨擦导致局部温度较高,加上氧气量充足,可能会导致部分氰化物水解挥发或被氧化,也消耗部分氰化物。

3)针对边磨边浸过程氰化物耗量大的不利情况,可从工艺和设备上进行优化,从而减小氰化物的耗量。工艺上,应尽量缩短边磨边浸时间。设备上,球磨机尽量安装非金属内衬(如橡胶内衬),并使用非金属材质(如陶瓷)的球。

[参 考 文 献]

[1] 吕谦,张佩璜. 边磨边浸氰化提金新工艺 10 t/d级扩大试验研究[J]. 黄金科技动态, 1992(10~11): 1.

[2] 吕谦,张佩璜. 边磨边浸氰化提金新工艺的研究[J]. 黄金科技动态, 1992(7): 1.

Mechanism of high consumption of cyanide in the simultaneous grinding and leaching process

Lan Bibo

(*Zijin Institute of Mining and Metallurgy*)

Abstract: The causes of high consumption of cyanide in the simultaneous grinding and leaching process are studied. It is revealed that the iron powder formed in the grinding process will consume a lot of cyanide. Meanwhile, cyanide will hydrolyze and volatilize or be oxidized in the simultaneous grinding and leaching process.

Keywords: simultaneous grinding and leaching; iron; consumption of cyanide; gold leaching rate

(编辑: 李玉敏)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net