

赵华荣, 王 迪, 朱槟桐, 等. 基于信息扩散理论的广东大宝山地区土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 79-86.

ZHAO Hua-rong, WANG Di, ZHU Bin-tong, et al. Evaluation of heavy metal pollution of soil in the Dabaoshan mining area based on the information diffusion theory[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(1): 79-86.

基于信息扩散理论的广东大宝山地区 土壤重金属污染评价

赵华荣^{1,2}, 王 迪¹, 朱槟桐¹, 金 鑫^{3*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学, 广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 桂林理工大学, 岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 广西 桂林 541004)

摘 要:为探讨信息扩散理论在土壤重金属污染评价中的可行性,通过广东大宝山地区24个土壤样品重金属数据,采用信息扩散理论结合地累积指数,评价了该地区土壤Pb、Zn、Cu和Cd的污染现状及发生概率。结果表明:大宝山地区土壤受Cd污染最为严重,其次为Cu污染,Pb和Zn污染较轻。通过信息扩散理论计算的地累积指数发生概率表明:大宝山地区土壤受Cd污染发生轻度-中等污染以上的概率为71.65%,中等污染以上的概率为56.76%,中等-强污染以上的概率为39.76%,强污染以上的概率为25.38%,强-极严重污染以上的概率为15.05%,极严重污染以上的概率为0.02%;Cu污染发生轻度-中等污染以上的概率为55.61%,中等污染以上的概率为38.65%,中等-强污染以上的概率为25.09%,强污染以上的概率为15.88%,强-极严重污染以上的概率为9.27%。综上,信息扩散理论可用于土壤重金属污染评价,评价结果可为土壤重金属污染的管理和治理提供参考。

关键词:信息扩散;重金属;污染评价;土壤;大宝山矿区

中图分类号:X825 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)01-0079-08 doi:10.11654/jaes.2018-0370

Evaluation of heavy metal pollution of soil in the Dabaoshan mining area based on the information diffusion theory

ZHAO Hua-rong^{1,2}, WANG Di¹, ZHU Bin-tong¹, JIN Xin^{3*}

(1.School of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2.Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3.Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract:To explore the feasibility of the information diffusion theory in heavy metal pollution evaluations of soil, 24 soil samples from the vicinity of the Dabaoshan mine were analyzed. Using a combination of the information diffusion theory and index of geo-accumulation, we evaluated the heavy metal pollution status and discussed probabilities of pollution risks at different levels. The results indicated that cadmium(Cd) was the most serious soil pollutant, followed by copper(Cu), and lead(Pb) and zinc(Zn) were the lowest in the study area. Cd pollution probabilities calculated using the information diffusion theory showed 71.65% of the soils had light-medium, 56.76% had medium, 39.76% had medium-serious, 25.38% had serious, 15.05% had serious-extremely serious, and 0.02% had extremely serious level pollution. Cu pollution probabilities showed 55.61% of soils had light-medium, 38.65% had medium, 25.09% had medium-serious, 15.88% had serious, and 9.27% had serious-extremely serious level pollution. The information diffusion theory could be used to evaluate soil heavy metal pollution. The results could be referenced by management and government of soil heavy metal pollution.

Keywords: information diffusion; heavy metals; pollution evaluation; soil; Dabaoshan mine

收稿日期:2018-03-20 录用日期:2018-06-20

作者简介:赵华荣(1971—),男,四川荣县人,博士,副教授,硕士生导师,从事重金属污染及风险评估研究。E-mail:gutzhr@163.com

*通信作者:金 鑫 E-mail:jinxin1390@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(51369009);广西自然科学基金项目(2016GXNSFAA380116)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51369009);The Natural Science Foundation of Guangxi Province, China(2016GXNSFAA380116)

近年来我国重金属污染事件频发,重金属污染问题已成为社会关注的热点问题^[1]。环境中的重金属来源十分广泛。总体上可以将它们分为自然来源和人为来源。自然来源包括岩石风化和火山爆发等自然过程;人为来源主要是由人类活动所产生的重金属,如矿山开采、工业生产和农业活动等^[2]。根据重金属所处的环境要素可以分为大气中的重金属、水体中的重金属和土壤中的重金属等。不论重金属从何而来,土壤是重金属主要的汇。因此,各种环境介质的重金属污染最后主要都表现为土壤重金属污染^[3]。

土壤重金属污染评价有多种方法,根据国内外近20年的研究趋势分析,土壤重金属污染评价的方法应用较多的有内梅罗综合污染指数法、富集因子法、地累积指数法和潜在生态危害指数法等^[4]。这些方法都是根据采样分析结果,计算每一个采样点的指标,可以准确地判断每个点位的重金属污染情况。由于受采样数量和土壤重金属的空间变异性的影响,单个采样点并不能代表区域的环境状况。因此,对一定范围内土壤重金属污染状况进行合理的评价,是土壤重金属污染评价的基本要求。基于模糊数学的信息扩散理论,将单个采样点的信息进行集值化处理,提高总体分布的精度,可用于小样本地区土壤重金属污染评价。

信息扩散理论最先由黄崇福提出^[5-6],该理论提出以来,在农业灾害风险评估^[7-8]、森林病虫害风险^[9]、尘肺病风险^[10]、天然气发电风险^[11]、酸雨风险^[12]、雷暴灾害^[13]、旅游气象指数^[14]、台风^[15]和洪水风险评估^[16]等方面得到了广泛的应用。以“重金属”“土壤”和“信息扩散理论”为关键词,在中国知网CNKI、万方、维普和Web of Science 等数据库进行检索,信息扩散理论在土壤重金属污染评价方面的研究还未见报道。本文以广东大宝山地区土壤重金属污染为例,将信息扩散理论应用到该地区的土壤重金属污染风险评价。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

大宝山位于广东省韶关市翁源县与曲江县交界处。矿区属于亚热带季风气候区,年平均气温20.3℃,多年平均降雨量为1782.7mm。大宝山是一座大型多金属伴生矿床,上部为褐铁矿,中部为硫铜矿,下部为铅锌矿。该矿床同时还伴生有钨、铋、钼、金和银等多种有色金属^[17]。

自20世纪70年代开始,大宝山矿开始大规模开采。矿山产生的大量酸性矿山废水经横石河对周边

的土壤造成污染。据报道,受大宝山采矿废水污染40余年,横石河水受到严重污染,水体酸性强,河床呈黄褐色,河流内生物很难长时间生存。由于长期食用横石河灌溉的农作物,横石河流域的上坝村已有400余人死于癌症^[18]。

1.2 数据来源

在广东大宝山矿区附近采集土壤样品24个,采样点的分布见图1。样品包括矿山土壤及横石河流域内的土壤。有些采样点受到大宝山矿排放的废水污染,有些则没有受到污染。为了取得代表性土样,先用GPS确定采样点,在每个采样点附近5m范围内随机选取3个位置,每个位置取0~20cm表层土约1.5kg混合后组成一个样品,装入塑料袋。样品带回实验室风干,去除石块、植物根茎等杂质,采用四分法取适量土样,研磨过100目筛备用。土壤样品采用HF-HClO₄-HNO₃进行高温消解,定容。样品Cu和Zn采用ICP-OES进行测定,Pb和Cd采用原子吸收分光光度法测定^[17]。同时测定土壤空白样和污染农田土壤成分分析标准物质(GBW08303)进行质量控制。标

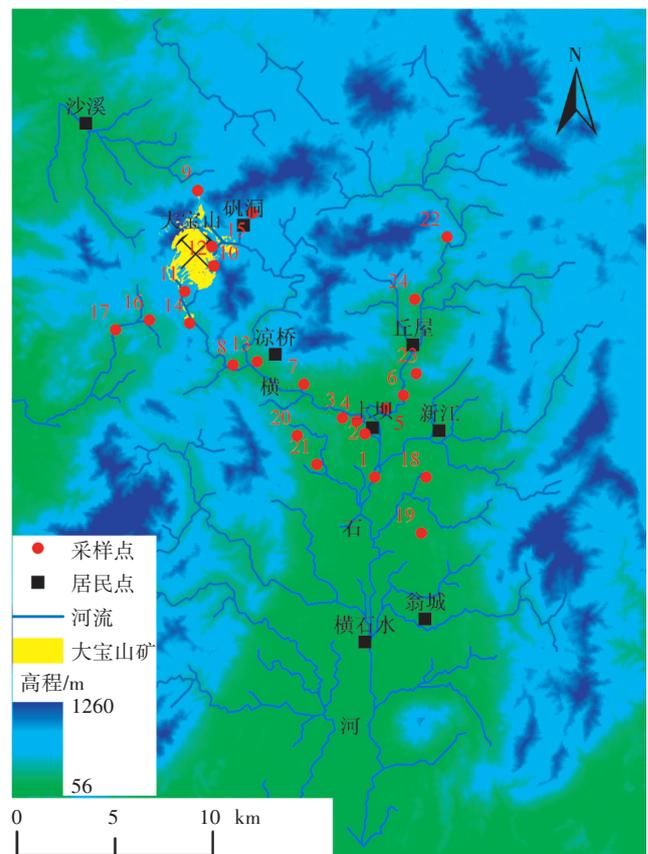


图1 研究区及土壤采样点分布图

Figure 1 Study area and sample sites of soil

准污染土壤物质从国家标准物质中心购买,其Cd、Cu、Pb和Zn的回收率分别为95%、105%、81%和74%。

土壤背景值选取《中国土壤元素背景值》^[19]中广东土壤Pb、Zn、Cu和Cd的背景值,分别为36.0、47.3、17.0 mg·kg⁻¹和0.056 mg·kg⁻¹。

1.3 研究方法

1.3.1 信息扩散理论

研究一个地区土壤重金属污染时,样品的采取是有限的。由于土壤是不均匀的,具有空间变异性,单个点位采集的土样不能代表整个区域的土壤^[20]。对于小样本序列可采用信息扩散理论计算污染等级对应的概率^[21]。信息扩散是一种为了弥补信息不足,通过优化利用小样本信息,对样本进行集值化模糊处理的方法。该方法可以将单值样本转化为集值样本,提高总体分布精度的目的^[9-10]。

信息扩散理论模型中,令 X 为实际观测值样本集合:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_m\} \quad (1)$$

式中: x_i 为观测样本点, m 为观测样本数。

设 U 为 X 集合中 x_i 的信息扩散范围集合:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_n\} \quad (2)$$

式中: u_j 代表区间 $[u_l, u_n]$ 内以固定间隔离散后得到的离散实数值; n 为离散总数。

通常可将样本集合 X 中的每一个单值观测样本 x_i 所携带的信息按正态分布扩散到指标论域 U 中的所有点:

$$f_i(u_j) = \frac{1}{h\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_i - u_j)^2}{2h^2}\right) \quad (3)$$

式中: $f_i(u_j)$ 为正态分布信息扩散函数; h 为信息扩散系数。

因观测样本总体数不同, h 取不同的值,其算式如下:

$$h = \begin{cases} 0.8146 \times (b - a) & m = 5 \\ 0.5690 \times (b - a) & m = 6 \\ 0.4560 \times (b - a) & m = 7 \\ 0.3860 \times (b - a) & m = 8 \\ 0.3362 \times (b - a) & m = 9 \\ 0.2986 \times (b - a) & m = 10 \\ 2.6851 \times \frac{(b - a)}{(n - 1)} & m = 11 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $a = \min x_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$; $b = \max x_i (i=1, 2, 3, \dots, m)$ 。

标记

$$C_i = \sum_{j=1}^n f_i(u_j), i=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中: C_i 为观测样本 x_i 的正态扩散信息和。

则样本 x_i 的归一化信息分布可表示为:

$$\mu_{xi}(u_j) = \frac{f_i(u_j)}{C_i}, i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

式中: $\mu_{xi}(u_j)$ 为样本点 x_i 的归一化信息分布函数。

$$\text{假设:} \begin{cases} q(u_j) = \sum_{i=1}^m \mu_{xi}(u_j), j=1, 2, \dots, n \\ Q = \sum_{j=1}^n q(u_j) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $q(u_j)$ 为观测值为 u_j 的样本点数; Q 为各 u_j 点上样本点数的总和。

$$\text{可以得到: } p(u_j) = \frac{q(u_j)}{Q} \quad (8)$$

式中: $p(u_j)$ 为样本点落在 u_j 处的频率值。

公式(8)为概率的估计值。其超越概率可表示为:

$$p(u \geq u_j) = \sum_{k=j}^n p(u_k), j=1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: $p(u \geq u_j)$ 为超越 u_j 的概率值。

1.3.2 地累积指数

天然土壤中存在重金属元素,某种重金属元素是否出现污染要根据土壤重金属元素是否超过背景值。地累积指数(I_{geo})又称为Muller指数,既考虑了自然地质过程造成的背景值的影响,又充分注意了人类活动对重金属污染的影响^[20]。该指数不仅反映了重金属分布的自然变化特征,而且可以用于判别人类活动对环境的影响,是区分人类活动影响的重要参数。其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2[C_n / (1.5B_n)] \quad (10)$$

式中: C_n 为样品中元素 n 的浓度,mg·kg⁻¹; B_n 为元素 n 的背景浓度,mg·kg⁻¹; 1.5为修正系数。

根据地累积指数计算结果可将土壤重金属污染划分成不同等级,其分级标准见表1。

1.3.3 重金属污染信息扩散理论模型

根据上述信息扩散理论和地累积指数,结合土壤重金属含量分布特征,可构建广东大宝山地区土壤重金属污染的扩散信息模型。观测值样本的集合是研究区采样点重金属的地累积指数。虽然地累积指数主要对大于0的值进行了分类,但考虑到该系数会出现小于0的情况,我们将地累积指数的范围设定在 $[-10, 10]$,因此信息扩散集合可在 $[-10, 10]$ 内按一定的间隔取值。这样便可计算所研究区域重金属污染

表1 土壤重金属污染地累积指数划分标准^[20]Table 1 Standards of soil heavy metal pollution based on index of geo-accumulation^[20]

项目 Items	分级 Classification	污染程度 Pollution degree
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度-中等污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中等污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中等-强污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	强污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	强-极严重污染
$5 < I_{geo} \leq 10$	6	极严重污染

的分布概率。

采用R语言根据信息扩散理论编写信息扩散模型计算程序,分别将Pb、Zn、Cu和Cd的样品集合和信息扩散集合输入信息扩散模型程序进行计算,便可算出Pb、Zn、Cu和Cd污染的概率和超越概率分布。

2 结果与分析

2.1 大宝山地区土壤Cu、Zn、Pb和Cd含量及特征

在大宝山地区采取的24个样品分析结果见表2。从表2可以看出大宝山地区部分土壤重金属含量较高,土壤的Cu、Zn、Pb和Cd的含量均不同程度地超过了广东省土壤背景值、中国土壤背景值和中国土壤环境质量的二级标准值。重金属Cd的最大值超过了广东土壤背景值和中国土壤背景值。Cu的最大值和平均值超过了广东土壤背景值、中国土壤背景值和中国土壤环境质量标准二级值。Pb和Zn的平均值均超过了广东土壤背景值和中国土壤背景值,Pb和Zn的最大值也都超过了中国土壤环境质量标准二级值。Cd和Cu的平均值均超过了广东土壤背景值、中国土壤背景值和中国土壤环境质量标准二级值。4种重金属在各采样土壤中的含量均有较大的差异。

表2 大宝山地区土壤重金属含量特征(mg·kg⁻¹)Table 2 Heavy metal characteristics of soil vicinity to Dabaoshan mine(mg·kg⁻¹)

项目 Items	Cd	Cu	Pb	Zn
最大值	11.5	1624	1650	1848
最小值	0.01	2.01	1.48	1.49
平均值	1.23	206	177	201
方差	2.42	381	372	393
广东土壤背景值	0.056	17.0	36.0	47.3
中国土壤背景值	0.097	22.6	26	74.2
中国土壤二级标准值	0.3	100	300	250

2.2 大宝山地区Cu、Zn、Pb和Cd污染评价

各采样点Cu、Zn、Pb和Cd的地累积指数见图2。从图2a可以看出大宝山地区Zn污染并不是十分严重,Zn污染为强-极严重污染的点出现在11号和7号点,11号点位于矿山附近,7号点位于横石河流域,中等-强污染点出现在3号点,该点位于横石河流域的上坝村附近。图2b为Cu的地累积指数分布图,从图可知,Cu极严重污染点出现在7号和6号点,强-极严重污染点出现11号点,强污染出现在1号点。Pb的地累积指数分布见图2c,强-极严重污染点出现在11号和7号点。从图2d可以看出,Cd极严重污染点出现在7号和13号点,11、8号和3号点为强-极严重污染。从地累积指数分布情况可以看出,该地区Zn和Pb的污染情势较相似,Cu和Cd的污染情势较一致,且Cu和Cd污染比Zn和Pb更为严重。大宝山周边地区土壤重金属污染情势与河流受污染的情势基本一致。根据杨振等^[22]研究,大宝山周边河流重金属的潜在生态风险表现为Cd和Cu最为严重,Pb次之,Zn最小。

根据上述分析可以看出,大宝山地区重金属污染主要出现在横石河流域。横石河接纳了大宝山矿产生的酸性矿山废水,同时横石河又是该地区主要的农业灌溉水源。因此,重金属在农业灌溉过程中被带入土壤中,造成横石河流域土壤出现不同程度的污染。从图2可知,在横石河流域和大宝山支流沿岸的土壤均不同程度出现污染。

在横石河流域Cu、Zn、Pb和Cd呈现不同的污染趋势,这可能和4种元素在水环境中的迁移转化规律有关。横石河从上游接纳大宝山酸性矿山废水到下游,由于旁边地表水和地下水的汇入会对河流水体的理化性质产生影响,如河水的pH值、氧化还原性和水体的有机质都会出现较大的变化^[23]。这种变化会影响水体中重金属的溶解-沉淀、吸附-解吸附、氧化-还原和络合等过程,从而使水体中溶解的重金属不断减少。然而不同的重金属减少的速率不一致,使得不同的重金属迁移距离出现差异^[24]。

2.3 大宝山地区Cu、Zn、Pb和Cd污染发生概率分析

根据信息扩散理论计算的广东大宝山地区重金属污染概率和污染发生的超越概率见图3。从图3a中可以看出4种重金属在该区域内对应地累积指数出现的概率。Zn在 $I_{geo}=0.2$ 时概率最大,为4.54%;Pb在 $I_{geo}=0$ 时概率最大,为4.07%;Cu在 $I_{geo}=0.8$ 时概率最大,为3.55%;Cd在 $I_{geo}=2.6$ 时出现最大概率,为

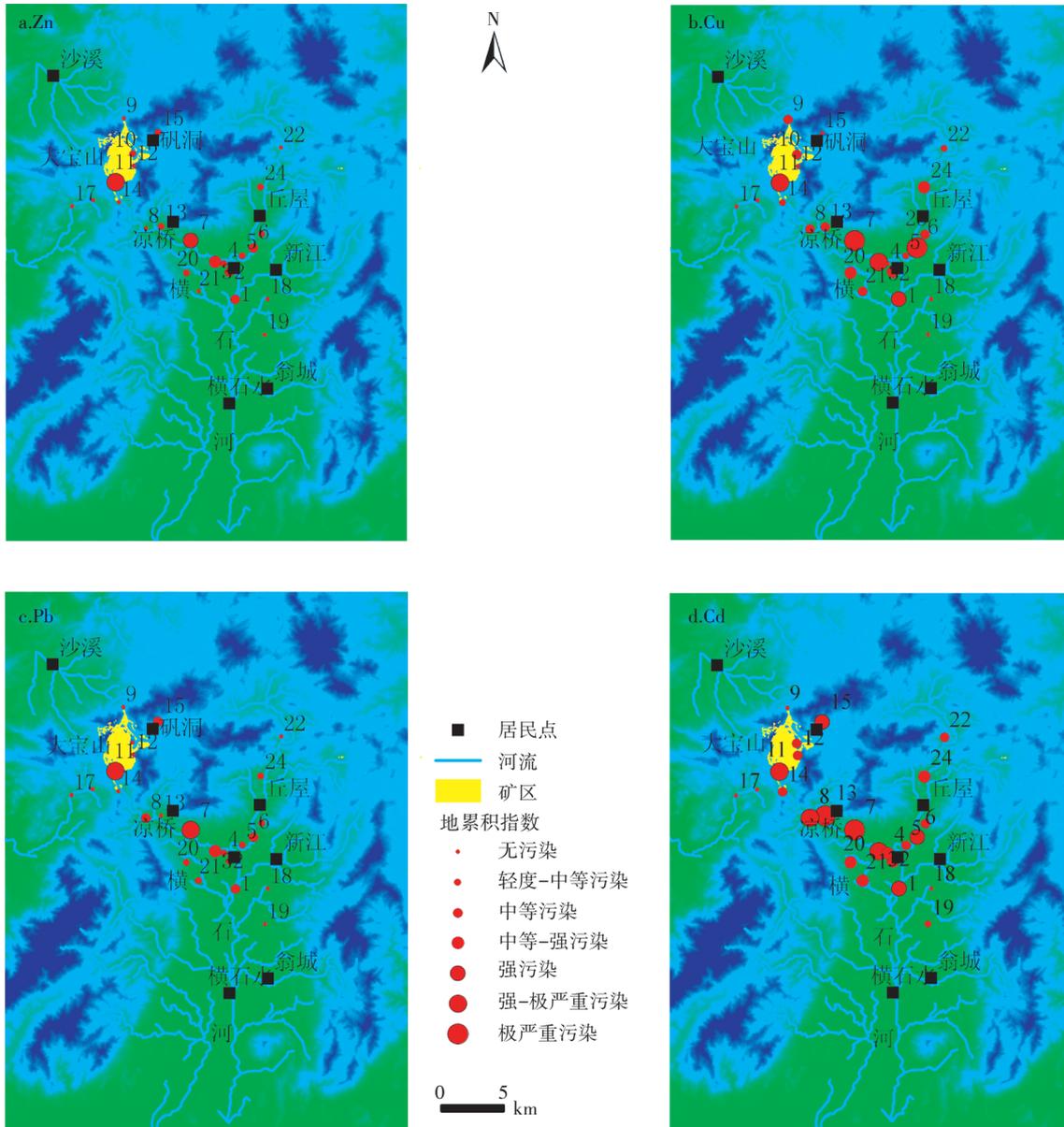


图2 大宝山地区土壤采样点重金属地累积指数分布图

Figure 2 Spatial distribution of index of geo-accumulation vicinity to Dabaoshan mine

3.39%。

图3b为4种金属地累积指数的超越概率,可以认为在大宝山地区4种金属超过某一污染程度(地累积指数)的概率。从超越概率曲线看,Zn和Pb的超越概率曲线 $I_{geo}=0$ 大致位于中间,可认为该地区有大约一半的土壤受到Zn和Pb的污染。Cu和Cd超越概率曲线主要分布于 $I_{geo}>0$ 的一侧,可认为该区域大部分土壤受到Cu和Cd污染。超越概率曲线越偏向于大于零的一侧,则该重金属出现污染的概率越大。

表3为根据信息扩散理论计算的大宝山地区不

同污染等级下土壤受污染的概率和超越概率。大宝山地区土壤发生Zn、Pb、Cu和Cd污染的概率分别为57.98%、55.09%、72.91%和81.19%。根据计算结果可知,Zn和Pb各污染等级发生的概率相差不大。Cd污染最为严重,轻度-中等污染、中等污染、中等-强污染、强污染、强-极严重污染和极严重污染的超越概率分别为71.65%、56.76%、39.76%、25.38%、15.05%和0.02%。Cu的污染仅次于Cd污染,72.91%以上的地区出现了Cu污染,发生轻度-中等污染以上的概率为55.61%,中等污染以上的概率为38.65%,中等-强污染以上的概率为25.09%,强污染以上的概率为

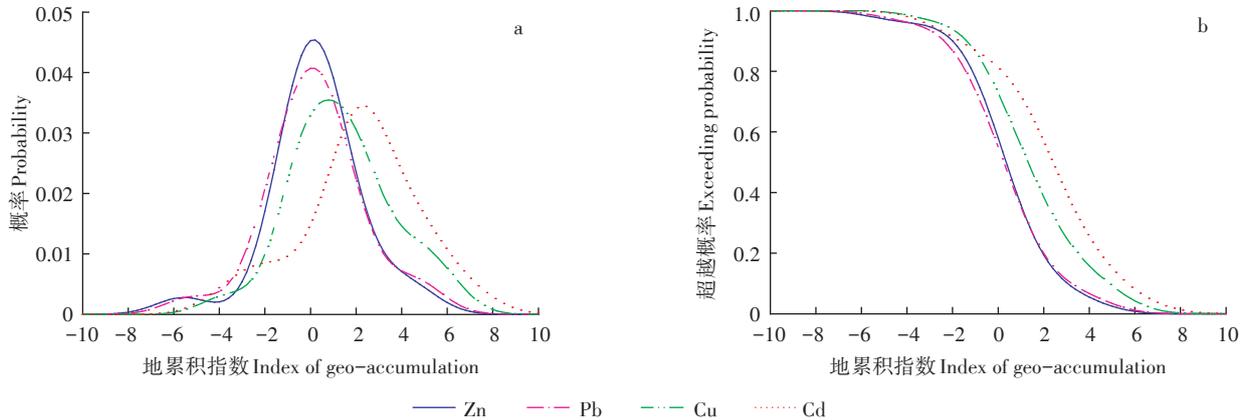


图3 大宝山地区土壤重金属污染分布概率图

Figure 3 Probability distribution of heavy metal pollution of soil vicinity to Dabaoshan mine

表3 大宝山地区土壤重金属污染发生概率及超越概率(%)

Table 3 Probability and exceeding probability of heavy metal pollution of soil vicinity to Dabaoshan mine (%)

污染程度 Pollution degree	Zn		Pb		Cu		Cd	
	概率 Probability	超越概率 Exceeding probability						
无污染	4.53	57.98	4.07	55.09	3.31	72.91	1.50	81.19
轻度-中等污染	3.91	35.93	3.55	35.30	3.53	55.61	2.58	71.65
中等污染	2.35	19.41	2.24	20.05	3.06	38.65	3.40	56.76
中等-强污染	1.19	10.30	1.15	11.29	2.16	25.09	3.19	39.76
强污染	0.71	5.51	0.72	6.63	1.47	15.88	2.37	25.38
强-极严重污染	0.45	2.50	0.54	3.38	1.14	9.27	1.65	15.05
极严重污染	0	0	0	0	0	0	0.02	0.02

15.88%,强-极严重污染以上的概率为9.27%;Zn和Pb污染相对较低,但研究区内土壤仍有超过50%的概率会出现Zn和Pb的污染。

3 讨论

土壤重金属污染评价方法是土壤环境质量保护的重要内容,评价方法的科学性关系到被评价土壤的污染程度和土壤修复的必要性。合理的评价方法可以防止土壤重金属污染危害的过低或过高预估,有助于对被污染土壤采取适宜的管理和治理措施。

广东大宝山地区土壤重金属污染始于1970年大宝山矿的大规模开采^[18]。大宝山地区土壤重金属污染的研究也比较多,大多采用前述评价方法。陈三雄等^[25]采用单因子污染指数和内梅罗指数法对该地区的27个土壤样品进行了分析,结果表明Cd和Cu全部超标,Zn和Pb的超标率为77.8%。郑佳佳等^[26]将该地区划分为4个区域,采集了土壤样品52个,结果表明

Cd和Cu污染最为严重。许超等^[17]对大宝山下游水稻土壤重金属污染进行了研究,发现该地区水稻土壤以Cd和Cu复合污染为主。付善明等^[27]研究表明横石河沿岸土壤均不同程度受到Pb、Zn、Cd和Cu污染,其中Cd污染最为严重,Pb和Zn达到中度污染至强污染。蔡美芳等^[28]对大宝山周边地区稻田土壤研究后发现Pb、Zn、Cd和Cu均超过土壤环境质量二级标准,其中Cu和Cd分别超标14.01倍和4.17倍。上述研究表明,广东大宝山地区土壤主要受Cd和Cu污染,其次为Zn和Pb污染。

采用传统方法对广东大宝山地区土壤重金属污染评价时,采样点的选择对评价结果会产生一定的影响。土壤具有不均匀性和空间变异性等特点,不同采样点取得的土壤重金属含量不同,说明土壤重金属污染具有不均匀性。传统的评价方法将每个采样点的数据进行分析计算,所得结果通常只能代表采样点的污染状况。信息扩散理论由于对样本值进行

了模糊化集值处理,可以将每个采样点的土壤重金属污染水平转化为集值样本,提高了研究区土壤重金属污染分布的精度。虽然本文的评价结果和以前的评价结果基本一致,但本研究提供了每种重金属污染发生概率的分布规律,这更符合土壤重金属污染发生的规律。

本文对大宝山地区土壤重金属污染评价时,在不同点位采取了24个土壤样品。然而,根据公式(4)计算信息扩散系数 h 时,最少只需要5个样品就可以进行计算。因此,在进行大宝山地区土壤重金属污染评价时,理论上只要有5个以上代表性点位的土壤重金属污染数据,就可以计算出该区域的土壤重金属污染分布曲线。根据分布曲线可以计算出任何污染水平的发生概率。

区域土壤重金属污染评价是土壤质量管理和治理的基础工作。准确地确定区域土壤重金属污染水平存在一定的难度。本文尝试采用信息扩散理论对区域土壤重金属污染进行评价,还有许多问题需要进行探讨。例如:采用信息扩散理论方法进行土壤重金属污染评价时,单位面积内土壤样品取多少个较为合理?土壤重金属污染信息扩散函数除了正态分布函数外,是否还有更合适的分布函数?这些问题有待进一步研究。

4 结论

(1)大宝山地区土壤重金属Cd污染最严重,超过81.19%的土壤发生了Cd污染。其次为Cu污染,超过72.91%的土壤出现了污染。研究区内超过57.98%和55.09%的土壤出现Zn和Pb污染。

(2)本文采用24个土壤重金属样品数据,根据信息扩散理论结合地累积指数,计算了大宝山地区土壤重金属污染状况。表明通过信息扩散理论,可以用较少的采样数量对区域内的重金属污染进行评价。

(3)采用信息扩散理论对土壤重金属污染评价,评价结果可以用重金属污染发生概率的形式表达,符合土壤重金属污染发生的规律。采用该方法对大宝山地区土壤重金属污染评价的结果,基本符合该地区土壤重金属污染的实际情况。

参考文献:

[1] Zhao H R, Xia B C, Qin J Q, et al. Hydrogeochemical and mineralogical characteristics related to heavy metal attenuation in a stream polluted by acid mine drainage: A case study in Dabaoshan mine, China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(6):979-989.

[2] Zhao H R, Xia B C, Fan C, et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan mine, southern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 417/418:45-54.

[3] 新华网. 陈同斌:大地的守护者[EB/OL]. (2016-06-17). http://www.xinhuanet.com/science/2016-06/17/c_135438069.htm

Xinhuanet. CHEN Tong-bin: Guardian of soils[EB/OL]. (2016-06-17). http://www.xinhuanet.com/science/2016-06/17/c_135438069.htm

[4] 王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(12):2365-2378.

WANG Yu-jun, WU Tong-liang, ZHOU Dong-mei, et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12):2365-2378.

[5] Huang C F. Principle of information diffusion[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 91(1):69-90.

[6] Huang C F. Fuzzy risk assessment of urban natural hazards[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 83(2):271-282.

[7] 李孟刚, 周长生, 连 莲. 基于熵信息扩散理论的中国农业水旱灾害风险评估[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(4):620-631.

LI Meng-gang, ZHOU Chang-sheng, LIAN Lian. Agricultural flood and drought risk assessment in China based on entropy information diffusion theory[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4):620-631.

[8] 陈建杰, 余锦华. 基于信息扩散理论的四川盆地农业旱灾风险评估[J]. *大气科学学报*, 2016, 39(5):712-720.

CHEN Jian-jie, YU Jin-hua. Risk assessment of drought on agricultural land in the Sichuan Basin based on information diffusion theory[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2016, 39(5):712-720.

[9] 吴柳萍, 纪志荣, 连素兰, 等. 福建省森林病虫害发生风险的概率分析[J]. *森林与环境学报*, 2017, 37(1):95-101.

WU Liu-ping, JI Zhi-rong, LIAN Su-lan, et al. Probability analysis of forest pests occurring risk in Fujian Province[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2017, 37(1):95-101.

[10] 束尧宸, 邵 辉, 李 展, 等. 基于信息扩散理论的尘肺病风险评估研究[J]. *安全与环境工程*, 2016, 23(3):30-35.

SHU Yao-chen, SHAO Hui, LI Zhan, et al. Pneumoconiosis risk assessment based on information diffusion theory[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(3):30-35.

[11] 李 展, 邵 辉, 束尧宸. 基于信息扩散理论的天然气发电风险预警技术研究[J]. *安全与环境工程*, 2016, 23(4):144-147.

LI Zhan, SHAO Hui, SHU Yao-chen. Risk early-warning technology of natural gas power generation based on information diffusion theory [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2016, 23(4):144-147.

[12] 王伟丽, 吴洪颜, 贺金芳, 等. 基于信息扩散理论的江苏省酸雨风险评估[J]. *灾害学*, 2015, 30(1):92-95.

WANG Wei-li, WU Hong-yan, HE Jin-fang, et al. The disaster risk assessment of acid rain in Jiangsu Province based on information diffusion theory[J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(1):92-95.

[13] 陈 红, 张丽娟, 李文亮, 等. 黑龙江省雷暴发生规律及区划研究[J]. *灾害学*, 2009, 24(4):58-62.

CHEN Hong, ZHANG Li-juan, LI Wen-liang, et al. Law and regionalization of thunderstorms in Heilongjiang Province[J]. *Journal of*

- Catastrophology*, 2009, 24(4):58-62.
- [14] Olya H G T, Alipour H. Risk assessment of precipitation and the tourism climate index[J]. *Tourism Management*, 2015, 50:73-80.
- [15] Zhang J X, Huang C F, Liu X L, et al. Risk assessment of land-falling tropical cyclones in Guangdong Province, China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2011, 17(3):732-744.
- [16] 雷晓云, 何春梅. 基于信息扩散理论的洪水风险评估模型的研究及应用:以阿克苏河流域新大河暴雨融雪型洪水为例[J]. 水文, 2004, 24(4):5-8.
LEI Xiao-yun, HE Chun-mei. Study and application of evaluation model of flood risk based on information diffusion theory: Take storm-snowmelt flood in the Xindahe River of Akshu River basin as an example[J]. *Hydrology*, 2004, 24(4):5-8.
- [17] 许超, 夏北成, 秦建桥, 等. 广东大宝山矿下游地区稻田土壤的重金属污染状况的分析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(增刊2):549-553.
XU Chao, XIA Bei-cheng, QIN Jian-qiao, et al. Analysis and evaluation on heavy metal contamination in paddy soils in the lower stream of Dabaoshan area, Guangdong Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(Suppl2):549-553.
- [18] 蓝楠. 矿区村民饮水安全亟待关注:广东大宝山矿区废水污染40余年致沿河400余人患癌案引发的思考[J]. 环境保护, 2014, 42(13):49-51.
LAN Nan. Urgent attention needs to be paid to the drinking water safety in mining area: Reflection on the cancer cases of Guangdong Dabaoshan[J]. *Environmental Protection*, 2014, 42(13):49-51.
- [19] 国家环境保护局. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
The National Environmental Protection Agency. Background value of soil element of China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.
- [20] 宋波, 杨子杰, 张云霞, 等. 广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估[J]. 环境科学, 2018, 38(4):1-18.
SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, et al. Accumulation of Cd and its risk in soils in the Xijiang River draining of Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2018, 38(4):1-18.
- [21] 黄崇福. 自然灾害风险评价:理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2005.
HUANG Chong-fu. Risk assessment of natural disaster: Theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [22] 杨振, 胡明安, 黄松. 大宝山矿区河流表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 桂林工学院学报, 2007, 27(1):44-48.
YANG Zhen, HU Ming-an, HUANG Song. Heavy metals pollution in stream sediments and potential ecological risk assessment in Dabaoshan mining area[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2007, 27(1):44-48.
- [23] Bao Y P, Guo C L, Lu G N, et al. Role of microbial activity in Fe(III) hydroxysulfate mineral transformations in an acid mine drainage-impacted site from the Dabaoshan mine[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616/617:647-657.
- [24] Xie Y Y, Lu G N, Yang C F, et al. Mineralogical characteristics of sediments and heavy metal mobilization along a river watershed affected by acid mine drainage[J]. *PLoS ONE*, 2018, 13(1):1-17.
- [25] 陈三雄, 张金池. 广东大宝山矿区土壤重金属污染状况评价[J]. 珠江现代建设, 2014, 30(5):31-36.
CHEN San-xiong, ZHANG Jin-chi. Assessment of heavy metal pollution in soil of Dabaoshan mine, Guangdong Province[J]. *Pearl River Modern Construction*, 2014, 30(5):31-36.
- [26] 郑佳佳, 姜晓, 张晓军. 广东大宝山矿区周围土壤重金属污染状况评价[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(11):137-139.
ZHENG Jia-jia, JIANG Xiao, ZHANG Xiao-jun. Pollution assessment of heavy metals in soil around Dabaoshan polymetallic ore deposit[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(11):137-139.
- [27] 付善明, 周永章, 赵宇鸪, 等. 广东大宝山铁多金属矿废水对河流沿岸土壤的重金属污染[J]. 环境科学, 2007, 28(4):805-812.
FU Shan-ming, ZHOU Yong-zhang, ZHAO Yu-yu, et al. Study on heavy metals in soils contaminated by acid mine drainage from Dabaoshan mine, Guangdong[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4):805-812.
- [28] 蔡美芳, 党志, 文震, 等. 矿区周围土壤中重金属危害性评估研究[J]. 生态环境, 2004, 13(1):6-8.
CAI Mei-fang, DANG Zhi, WEN Zhen, et al. Risk assessment of heavy metals contamination of soils around mining area[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1):6-8.