农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

基于Monte Carlo-Hakanson模型的土壤重金属生态风险评价研究

熊鸿斌， 陈神剑

引用本文:
熊鸿斌, 陈神剑. 基于Monte Carlo-Hakanson模型的土壤重金属生态风险评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1706-1712.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0054

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于改进物元可拓模型的鄱阳湖区耕地土壤重金属污染评价
赵杰, 罗志军, 赵弯弯, 赵越, 宋聚
农业环境科学学报. 2019, 38(3): 521-533 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0732

安庆沿江湖泊及长江安庆段沉积物重金属污染特征及生态风险评价
李法松, 韩铖, 林大松, 周葆华, 徐志兵, 余光明, 钮志远, 赵亿, 王淑媛
农业环境科学学报. 2017, 36(3): 574-582 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1325

湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价
刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 安毅, 霍莉莉
农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1523-1530 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1491

规模化猪场灌区土壤重金属污染特征及风险评价——以重庆市某种猪场为例
杨潞, 张玉, 张智, 李余杰, 翁张帆, 孙磊, 孔媛
农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2166-2174 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1775

三峡库区库尾典型农用地土壤重金属污染特征及潜在风险
王金霞, 罗乐, 陈玉成, 何清明, 詹玲玲
农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2711-2717 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0844

关注微信公众号，获得更多资讯信息

熊鸿斌, 陈神剑. 基于Monte Carlo-Hakanson模型的土壤重金属生态风险评价研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1706-1712.
XIONG Hong-bin, CHEN Shen-jian. Reducing uncertainty in ecological risk assessment for heavy metal contamination based on Monte Carlo-Hakanson model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(8): 1706-1712.

开放科学OSID

基于Monte Carlo-Hakanson模型的土壤重金属生态风险评价研究

熊鸿斌, 陈神剑

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘　要: 为了降低土壤重金属生态风险评价中的不确定性,以某实际搬迁后铅蓄电池场地的土壤中重金属Cr、As、Pb、Cu、Zn含量实测值为基础数据,将Monte Carlo模拟引入Hakanson生态危害指数法中,构建Monte Carlo-Hakanson模型,主要通过对重金属含量这一随机变量进行抽样,将得到的大量可靠预测值代入Hakanson指数模型,重复计算模型中的函数值,得到场地生态风险等级及处于各生态风险等级的概率,以此来降低生态风险评价中的不确定性。案例结果如下:研究区生态风险隶属于较高等级,概率为49.44%,Pb的敏感度最高,达到了99.7%,对场地的污染起主导作用。Monte Carlo-Hakanson模型的应用有效降低了类似场地的土壤重金属生态风险评估的不确定性,为获得土壤重金属生态风险评估结果的准确性提供了一个新的思路和方法。

关键词: Monte Carlo-Hakanson模型;生态风险评价;不确定性;重金属

中图分类号: X53;X826　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1672-2043(2020)08-1706-07　　doi:10.11654/jaes.2020-0054

Reducing uncertainty in ecological risk assessment for heavy metal contamination based on Monte Carlo-Hakanson model

XIONG Hong-bin, CHEN Shen-jian

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A new analysis model is required to reduce the uncertainty in ecological risk assessment of heavy metals in soil. Based on the content data of heavy metals such as Cr, As, Pb, Cu, and Zn in the soil of the lead storage battery site after relocation, Monte Carlo simulation was introduced into the Hakanson ecological hazard index method to develop Monte Carlo - Hakanson model. The model primarily samples the random variable of heavy metal content, substitutes a large number of reliable prediction values in the Hakanson index model, and repeatedly calculates the function value in the model to obtain the ecological risk level of the site and the probability of being in different ecological risk levels, which reduce the uncertainty in ecological risk assessment. The results of the study are as follows: the ecological risk of the study area is at a higher level with the probability reaching 49.44%. The sensitivity of Pb is the highest, reaching 99.3%, which plays a major role in polluting the site. The application of this method can effectively reduce the uncertainty in heavy metal ecological risk assessment of soil in similar sites and provide a new stratagem to obtain accurate results.

Keywords: Monte Carlo-Hakanson model; assessment of ecological risk; uncertainty; heavy metal

工业化和城镇化的兴起造成大量污染物进入土壤,使得土壤性质发生改变,土壤污染不断加重。累积在土壤中的重金属污染物难降解、易迁移,对生态环境存在较大危害,受到人们的日益关注[1]。

收稿日期: 2020-01-11　　**录用日期:** 2020-04-03

作者简介: 熊鸿斌(1963—),男,安徽合肥人,博士,教授,博士生导师,主要从事水污染处理技术和生态与可持续发展研究。E-mail:xhb6324@sina.com

基金项目: 安徽省重大科技攻关项目(08010302114)

Project supported: Project for Major Science and Technology of Anhui Province(08010302114)

生态风险评价是指对生态系统暴露于一种或多种胁迫因子时,不利效应发生的可能性的评价[2]。欧美等国家对生态风险评价研究较早,先后建立了自己的生态风险评价体系[3],我国水利部也于2009年发布了《生态风险评价导则》。当前对重金属生态风险进行评价的方法主要有内梅罗指数法、复合指数法和Hakanson生态危害指数法等[4-5]。Niu等[6]将3种复合指数应用于贵州某茶叶产区土壤重金属的污染风险评估中,并分析比较了3种指数的评价结果。Zhao等[7]应用富集指数法、内梅罗指数法评价了广东贵屿镇电子垃圾堆放引起的土壤重金属污染问题,结果表明其场地污染严重,且Hg、Ni为其场地主要重金属污染源。Hakanson生态危害指数法在评价重金属的生态风险时,既考虑到了重金属含量,又考虑到了重金属的毒理性,因此其应用最为广泛。王雄[8]利用Hakanson生态危害指数法评价某铝矿区复垦土壤重金属的生态风险,研究表明Hakanson指数法可以有效地突出比较严重的污染物。

Hakanson生态危害指数法由于具备特殊的优势而被广泛应用,但生物毒性响应系数选取的主观性和监测数据的随机性使评价结果具有较大的不确定性,严重制约了后续决策的科学性[9]。Monte Carlo模拟建立在数理统计、概率论等知识的基础上,通过对假设变量在已知的分布内进行随机抽样,由计算机模拟运行得到可靠的系统预测值来表征和评估风险[10]。Monte Carlo模拟在解决不确定性问题上被证明具备很强的实用性。Jia等[11]将Monte Carlo模拟应用于挥发性有机物暴露的风险评估中,旨在有效解决风险评估中的不确定性问题。目前国内外很少有人将Monte Carlo模拟用于重金属的生态风险评价。鉴于此,本文将Monte Carlo模拟引入Hakanson生态危害指数法,构建Monte Carlo-Hakanson模型,用于评估土壤中重金属的生态风险,有效降低土壤中重金属生态风险评价的不确定性,并以某典型的搬迁铅蓄电池场地作为研究对象进行生态风险评估,确定场地风险等级并分析重金属污染特征,以期为解决类似场地土壤重金属生态风险评估结果的不确定性提供一个新的思路和方法。铅蓄电池企业作为传统的高污染类企业,其搬迁后遗留的场地是重要的重金属暴露源,需要严格管控[12]。因此对该类场地进行生态风险评价,了解场地的污染状况,为土壤的修复治理等后续行为提供科学指导具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 试验区域概况

试验区占地面积20 000 m^2,厂区主营铅蓄电池和开关面板,基本生产工艺流程包括制粉、和膏、配合金、板栅铸造、固化干燥、极耳打磨、极群配重焊接、电池装配、端子焊接、气密性检查、注酸化成等环节。其中制粉、板栅制造、固化干燥、注酸化成、装配等过程都会有铅烟、铅尘的产生,从而给场地土壤带来污染。

1.2 试验方法

2018年3月研究小组在试验区根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004),采用网格布点法(20 m×20 m),大致均匀地设置45个采样点,采集网格中心土样(采样深度0~20 cm)作为本次研究所使用的土样,每个采样点取样300 g左右,装入密封袋中,在实验室风干、研磨,剔除杂物,过100目尼龙筛后保存于密封袋中备用。

采用$HCl-HF-HNO_3-HClO_4$作为土壤样品的消解试剂,用微波消解仪对土壤样品进行消解,消解结束后,土壤中5种重金属Cr、As、Pb、Cu、Zn的含量均使用电感耦合等离子体质谱法测定,每个样品的5种重金属含量均测3次,取其平均值作为研究数据。测定过程中,每种重金属都采用相应的国家标准物质进行质量控制。

1.3 基于Monte Carlo-Hakanson模型的重金属生态风险评价方法

1.3.1 Monte Carlo模拟原理

Monte Carlo模拟是根据所求随机问题的变化规律,或者构造合适的概率分布模型并根据构造的模型对某一随机变量进行大量随机试验,使模型中的某些参数正是所求问题的答案[13]。由于计算简单、操作方便,该模型在一些空间变异性较大且相关参数不易获得的工程中被广泛应用[14]。随着计算机技术的发展,大量的重复随机试验变成了可能,通过计算机技术,利用Crystal Ball软件进行多次Monte Carlo模拟试验得到统计结果,并对统计结果进行研究分析,从而解决所研究的问题。Monte Carlo模拟步骤包括:①确定评价模型随机变量;②构建随机变量的分布模型;③设置模拟参数,运行模型;④对模拟结果进行分析[15-16]。

1.3.2 Hakanson生态危害指数法

Hakanson生态危害指数法是由瑞典科学家

Hakanson在以沉积学的方法研究重金属对环境污染效应的过程中提出的一种生态风险评价方法，该方法在考虑环境中重金属含量的同时，将重金属的生态效应、环境效应以及重金属本身的毒理性紧密结合起来[17]。计算公式为：

$$C_f^i=\frac{C^i}{C_n^i} \tag{1}$$

$$E_r^i=C_f^i\cdot T_r^i \tag{2}$$

$$RI=\sum_{i=1}^{m}E_r^i \tag{3}$$

式中：C_f^i为重金属i的单项污染指数；C^i为重金属含量实测值，mg·kg^{-1}；C_n^i为重金属含量参比值，mg·kg^{-1}；E_r^i为重金属i的生态风险系数；T_r^i为重金属毒性响应系数；RI为生态危害指数。

对于生态风险评估标准的选取，国内外学者做了很多研究，本文参考国内外学者对生态风险评估标准的研究[18-20]，采用的风险评估标准如表1所示。

表1 生态危害指数分级标准

Table 1 Grading standard of ecological hazard index

C_f^i	污染程度 Pollution level	E_r^i	RI	风险程度 Risk level
C_f^i<1	轻度	E_r^i<40	RI<150	低危害
1≤C_f^i<3	中度	40≤E_r^i<80	150≤RI<300	中等危害
3≤C_f^i<6	重度	80≤E_r^i<160	300≤RI<600	较高危害
6≤C_f^i	非常重	160≤E_r^i<320	600≤RI	高危害
		320≤E_r^i	—	极高危害

1.3.3 Monte Carlo-Hakanson模型构建方法

对公式(1)进行编辑，以RI为目标变量，设置5个随机变量，分别为5种重金属的含量；从随机变量的概率分布中进行抽样(置信度95%，抽样方式为Monte Carlo抽样，抽样次数为50 000次)，将每次抽样得到的随机变量结果依次代入公式(1)~公式(3)，得到的50 000组RI模拟结果，代表了不确定性条件下的生态风险指数所可能的结果；在此基础上，为表征各重金属生态风险系数对生态风险的影响，利用Crystal Ball中的敏感度分析功能计算各重金属生态风险系数对生态风险指数的敏感度。

1.4 数据分析方法

采用Excel软件对测定的土壤重金属含量数据进行统计分析，利用Crystal Ball软件对数据进行Monte Carlo模拟和分析。其中Crystal Ball是搭载在Excel上运行的软件，运用Monte Carlo模拟预测某个特定情况下的所有可能结果，通过图表对数据进行分析总结并显示每个结果的概率。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量

运用Excel软件对实际测试的重金属含量基础数据进行统计分析，得到频数分布情况，并通过Crystal Ball软件中的函数拟合模块得到重金属含量的分布模型，具体见表2。

由表2看出，研究区土壤5种重金属含量平均值均超过安徽省土壤重金属背景值[21]，超标程度Pb>Cu>As>Cr>Zn；As含量均高于安徽省土壤重金属背景值，Cr、Pb、Cu、Zn 4种重金属含量有低于背景值的点位；5种元素的变异系数比较大，表明试验区土壤重金属含量空间差异性显著，即均匀程度较低。Cr、As、Pb、Cu、Zn的分布函数分别为Beta分布、Beta分布、最大极值分布、逻辑分布、最大极值分布，没有明显地呈现出正态分布的形式。

2.2 不确定性生态风险评估

参比值和毒性响应系数都是不确定性变量，但由于缺乏相应的历史统计数据，给这两个随机变量分布函数的确定带来了困难。国内外对此多有研究，如Hakanson制定的重金属毒性响应系数的标准化参数就被广泛应用。周开胜等[22]在用Hakanson生态危害

表2 土壤重金属含量统计结果

Table 2 Statistical results of soil heavy metal mass fraction

项目 Items	Cr	As	Pb	Cu	Zn
最大值/(mg·kg^{-1})	322.5	69.8	3 150.6	286.4	325.7
最小值/(mg·kg^{-1})	37.2	13.7	20.9	14.1	20.3
中值/(mg·kg^{-1})	134.0	42.2	763.8	104.5	106.5
平均值/(mg·kg^{-1})	145.7	40.8	906.9	110.5	119.5
背景值[21]/(mg·kg^{-1})	66.5	9.0	26.6	20.4	62.0
变异系数/%	46.9	37.4	66.3	58.0	49.7
概率分布模型	Beta分布	Beta分布	最大极值分布	逻辑分布	最大极值分布

指数法评价蚌埠市重金属的生态风险时,采用了Hakanson标准化参数,并使用土壤背景值作为参比值。综合考虑,本研究参比值选取安徽省土壤重金属背景值,Cr、As、Pb、Cu、Zn的毒性响应系数采用Hakanson标准化参数,分别为2、10、5、5、1。

研究采用Crystal Ball软件,利用Monte Carlo抽样,重金属含量为抽样对象,在模拟抽样次数(随机迭代计算次数)为50 000次,K-S检验、置信度为95%的条件下,对C_f^i进行模拟分析,获得相应的频数分布如图1所示。由模拟得到的重金属含量数据,经计算得到模拟后Cr、As、Pb、Cu、Zn含量的变异系数分别为47.00%、37.25%、59.12%、51.46%、50.00%,与实测数据的变异系数进行对比可以看出结果差异不大,这也反映了模拟后的重金属含量空间分布情况与实测数据的情况具有一致性,说明模拟结果可信。由模拟结果得到的统计值视图可知,Cr、As、Pb、Cu、Zn等5种重金属单项污染指数模拟的平均值分别为2.20、4.54、33.81、5.12、1.93。由重金属单项污染指数分布图并结合表1的分级标准,利用Crystal Ball软件可直接得到重金属处于不同污染等级的概率,具体见表3。由重金属单项污染指数模拟的平均值结合表1可以得到Pb处于非常重污染等级,Cu、As隶属重度污染等级,Cr、Zn呈中

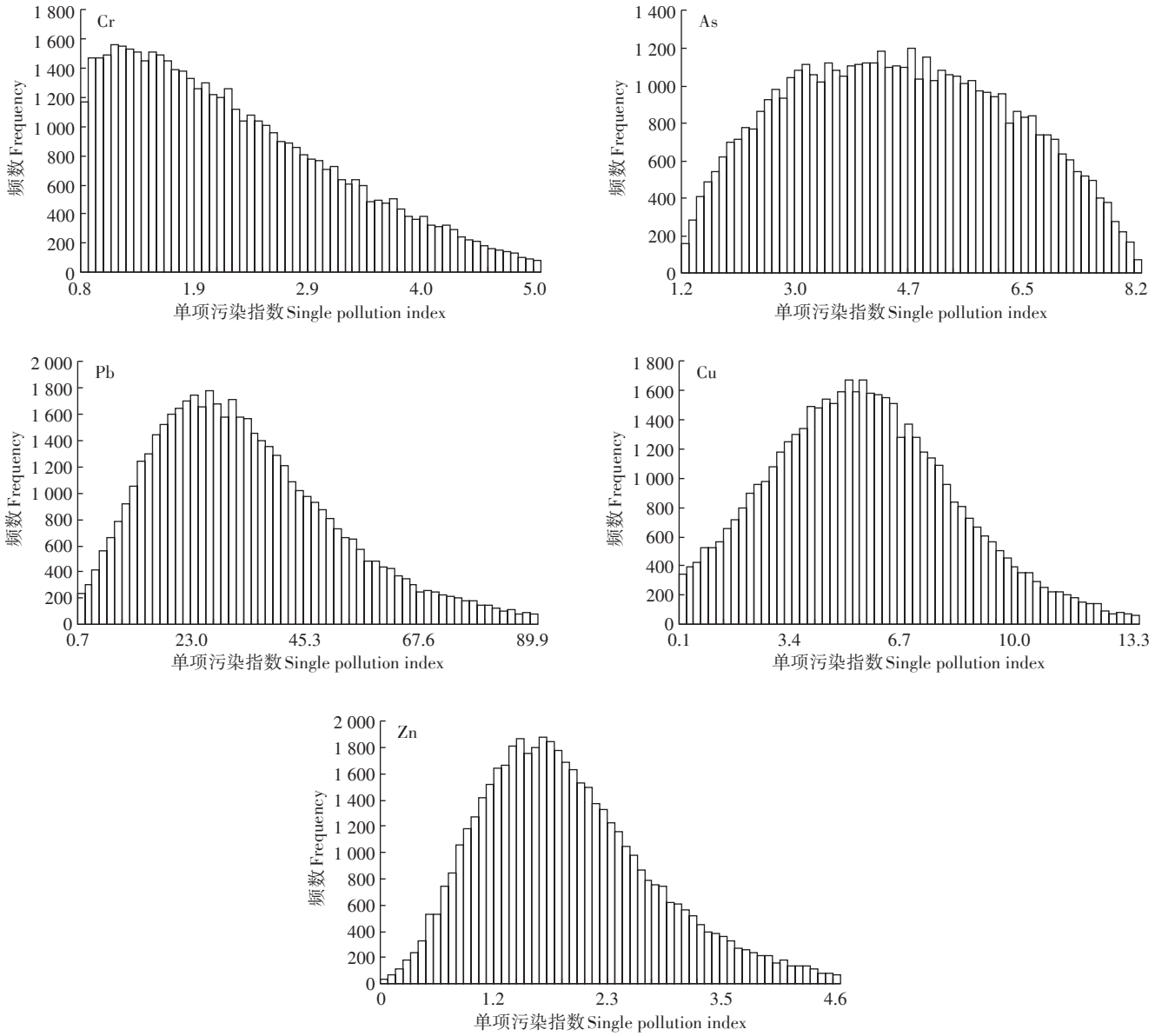

图1 各重金属单项污染指数模拟结果

Figure 1 Probability distribution of single pollution index of each metal

表3 土壤重金属处于不同污染程度等级的概率(%)

Table 3 Different probability distribution of heavy metal contamination degree(%)

污染程度 Pollution level	Cr	As	Pb	Cu	Zn
轻度	9.76	0	0.28	3.66	14.61
中度	68.28	21.79	0.81	14.49	72.83
重度	21.96	55.43	1.99	38.61	12.56
非常重	0	22.78	96.92	43.24	0

度污染,且污染状况排序为Pb(33.81)>Cu(5.12)>As(4.54)>Cr(2.20)>Zn(1.93);由表3得到各重金属的污染程度及处于该污染程度下的概率,可以看出5种重金属的污染情况排序和按照平均值评价得到的结果一致。

由式(2)计算各重金属的生态风险系数E_r^i,将毒性响应系数按照确定值处理,由Crystal Ball软件对重金属含量进行Monte Carlo抽样,将抽样产生的可靠预测值代入式(2),由E_r^i模拟结果得到的统计值视图可知,Cr、As、Pb、Cu、Zn 5种重金属的生态风险系数

表4 各重金属生态风险系数处于不同风险等级的概率(%)

Table 4 The probability distribution of ecological risk index factor at different risk levels for each metals(%)

风险等级 Risk level	Cr	As	Pb	Cu	Zn
轻微	100.00	99.32	1.66	78.07	100.00
中等	0	0.68	3.18	21.93	0
较高	0	0	12.20	0	0
高	0	0	35.29	0	0
极高	0	0	47.67	0	0

表5 各重金属在不同概率条件下的生态风险系数分布

Table 5 Distribution of ecological risk factor under different probabilities

概率 Probability/%	E_r^i				
	Cr	As	Pb	Cu	Zn
10	2.0	11.3	114.5	6.0	0.9
20	2.5	14.4	170.3	13.2	1.1
30	2.9	17.2	216.6	18.0	1.4
40	3.4	19.8	260.3	22.0	1.6
50	4.0	22.4	305.4	25.6	1.8
60	4.6	25.0	353.0	29.2	2.0
70	5.3	27.8	409.1	33.2	2.3
80	6.2	30.9	482.8	37.9	2.6
90	7.4	34.5	602.6	45.3	3.2
100	11.9	41.4	2 131.9	119.0	9.3

平均值分别为4.39、45.42、169.03、25.61、1.93。利用E_r^i平均值并结合表1的风险等级分级标准得到以上5种重金属的生态风险等级分别为低、中、高、低、低。由Crystal Ball软件计算分析得到各重金属在不同生态风险等级下的概率分布以及不同概率条件下重金属的生态风险系数,具体见表4和表5。

由表4可知各重金属隶属于各风险等级的可信度,其中Cr、As、Zn 3种重金属生态风险等级集中隶属于轻微风险等级,说明这3种重金属对厂区土壤产生的生态风险很小,且空间分布相对集中;Cu的风险等级隶属于轻微和中等两个等级,且隶属轻微风险等级的概率达到了78.07%,说明Cu为轻微污染,且存在一定的空间分布特征;Pb的风险等级跨越了5个等级,存在明显的空间分布特征,并且隶属高风险和极高风险两个风险等级的概率分别为35.29%和47.67%,故很难判定Pb隶属哪个风险等级,但也说明Pb风险等级处于高风险等级以上。该结果与用平均值分析风险等级的情况基本一致。

由模拟结果得到生态危害指数*RI*呈对数正态分布(图2),其预测平均值为239.3,参照表1中的分级标准得到*RI*在低、中、较高、高生态风险等级的概率分别为7.56%、28.97%、49.44%、14.03%,较高风险的概率占优势,根据最大隶属度原则可以判定为场地土壤处于较高生态风险,并且有向高生态风险过渡的趋势,应该引起有关部门的关注。

2.3 污染特征分析

生态危害指数是反映重金属生态风险的指标,但每种重金属对生态危害指数的贡献值不一样,利用Crystal Ball软件中的敏感性分析模块对生态危害指数进行分析,直观地反映了不同重金属对污染情况的贡献,得到敏感性分析图如图3。由图3可知,

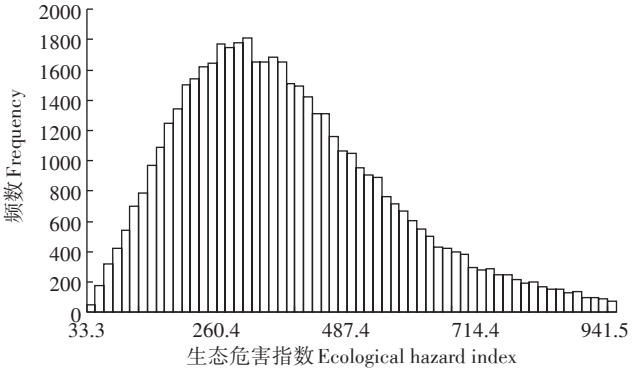

图2 生态危害指数分布

Figure 2 Distribution of ecological hazard index

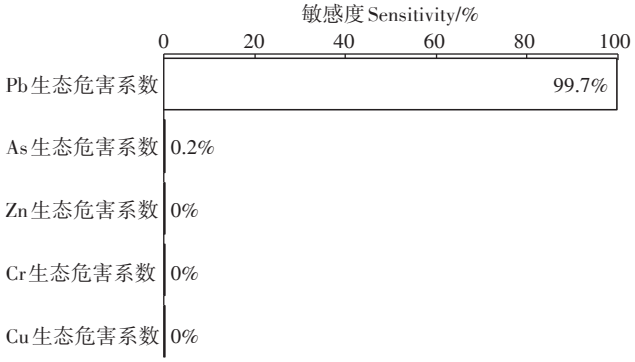

图3 重金属生态危害指数敏感性分析

Figure 3 Sensitivity analysis of heavy metal ecological hazard index

Pb对于生态危害指数的方差贡献值占绝对优势,这反映出Pb是该场地重金属污染的主要因子。Pb是主要污染因子与该场区的性质密不可分,该场地为搬迁铅蓄电池厂,电池加工生产的铅烟、铅尘造成了场地Pb污染,场地的后续修复治理要特别关注Pb的污染问题。

3 讨论

目前Hakanson生态危害指数法是以确定性模型定量刻画风险水平,对风险评价系统具有的不确定性重视不够,对不确定性未能做出有效表征。本文将Monte Carlo模拟引入Hakanson生态危害指数法中,并利用构建的Monte Carlo-Hakanson模型对实测的离散数据进行模拟仿真,使得离散数据向连续数据空间扩展,充分地挖掘了数据背后的内涵信息,由此使得后续基于风险评估基础上的决策行为更加科学化。研究所构建的模型基础还是Hakanson生态危害指数法,其存在的固有缺陷无法完全克服,重金属的毒性效应没有考虑重金属之间的拮抗作用和协同作用,而仅是将各种重金属的毒性效应进行简单加合,这也是以后需要研究的重点。

铅蓄电池行业作为传统的高污染行业,在我国数量众多,由其引发的环境污染事件屡有发生。本研究区选择的是某典型的搬迁铅蓄电池场地,该类场地涉及Pb、Cr、As等有毒有害重金属污染问题,如若对该类场地的重视不够,很可能引发巨大的生态风险,因此对于该类场地的重金属生态风险评估也显得尤为重要。本研究构建的Monte Carlo-Hakanson模型,为该类场地的风险评估,探明风险等级以及污染的不确定性提供了良好的思路。

4 结论

(1)将Monte Carlo模拟引入到Hakanson生态危害指数法中,构建了Monte Carlo-Hakanson模型,运用计算机对重金属含量在已知的分布内进行随机抽样,产生大量的重金属含量可靠预测值,代入Hakanson指数重复计算得到大量函数值,并根据这些函数值绘制分布图,结合生态风险评级标准确定生态风险等级及各生态风险等级可能出现的概率,以此来降低生态风险评估系统中的不确定性,整个操作程序简单、可行性强。

(2)将构建的模型用于某搬迁铅蓄电池场地土壤的重金属生态风险评估中,模型不仅提供了研究区土壤重金属污染程度和生态风险等级,还提供了处于各风险等级相应的概率,这有效降低了生态风险评估中的不确定性,因此使风险决策更具科学性和合理性。

(3)研究场地属较高生态风险等级且相应概率为49.44%,而高生态风险等级的概率也达到了14.03%,因此该场地的重金属污染应给予重视。重金属Pb是场地土壤的主要污染因子,对生态危害指数的敏感度达到了99.7%,应该重点关注该铅蓄电池场地土壤Pb污染的问题。

参考文献:

[1] Chu W L, Dang N L, Kok Y Y, et al. Heavy metal pollution in Antarctica and its potential impacts on algae[J]. *Polar Science*, 2019, 20(1): 75-83.

[2] 中华人民共和国水利部. 生态风险评价导则SL/Z 467—2009[S]. 北京:中华人民共和国水利部, 2010.
Ministry of Water Resources of PRC. Ecological risk assessment guidelines SL/Z 467—2009[S]. Beijing: Ministry of Water Resources of PRC, 2010.

[3] 阳文锐, 王如松, 黄锦楼, 等. 生态风险评价及研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8): 1869-1876.
YANG Wen-rui, WANG Ru-song, HUANG Jin-lou, et al. Ecological risk assessment and its research progress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(8): 1869-1876.

[4] Sundararajan S, Khadanga M K, Raghumaran S, et al. Ecological risk assessment of trace metal accumulation in sediments of Veraval Harbor, Gujarat, Arabian Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 114(1): 592-601.

[5] El Azhari A, Rhoujjati A, El Hachimi M L, et al. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in the soil-plant system and the sediment-water column around a former Pb/Zn-mining area in NE Morocco[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 144(2): 464-

474.

[6] Niu Y, Zhou Z, Huang D, et al. Application of different composite index methods in the evaluation of soil heavy metal pollution[J]. *Geo-Spatial Knowledge and Intelligence*, 2016, 699(2):43-50.

[7] Zhao W, Ding L, Gu X, et al. Levels and ecological risk assessment of metals in soils from a typical e-waste recycling region in southeast China[J]. *Ecotoxicology*, 2015, 24(9):1947-1960.

[8] 王雄. 铝矿区复垦土地重金属质量分数特征及潜在生态风险评价[J]. 中国水土保持科学, 2019, 17(2):94-102.
WANG Xiong. Characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in reclaimed land of a bauxite mine[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(2):94-102.

[9] 史明易, 王祖伟, 王嘉宝. Hakanson指数法在评价土壤重金属生态风险上的应用进展[J]. 土壤通报, 2019, 50(4):1002-1008.
SHI Ming-yi, WANG Zu-wei, WANG Jia-bao. Assessment for ecological risk of soil heavy metals with Hakanson index method: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science* 2019, 50(4):1002-1008.

[10] Kamarehie B, Jafar A, Zarei A, et al. Non-carcinogenic health risk assessment of nitrate in bottled drinking waters sold in Iranian markets: A Monte Carlo simulation[J]. *Accreditation and Quality Assurance*, 2019, 24(6):417-426.

[11] Jia S L, Sankaran G, Wang B, et al. Exposure and risk assessment of volatile organic compounds and airborne phthalates in Singapore′s Child care centers[J]. *Chemosphere*, 2019, 224(3):85-92.

[12] Schneider J, Bundschuh J, do Nascimento C W A. Arbuscular mycorrhizal fungi-assisted phytoremediation of a lead-contaminated site[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 572(1):86-97.

[13] Noutsopoulos C, Koumaki E, Vasileios S, et al. Analytical and mathematical assessment of emerging pollutants fate in a river system[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364(1):48-58.

[14] Gonzaga C S B, de Oliveira Arinelli L, de Medeiros J L, et al. Automatized Monte-Carlo analysis of offshore processing of CO_2-rich natural gas: Conventional versus supersonic separator routes[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 69(2):1029-1035.

[15] El Safadi A E, Adrot O, Flaus J M. Advanced Monte Carlo method for model uncertainty propagation in risk assessment[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2015, 48(3):529-534.

[16] 杨思言, 段宁, 魏婉婷. 基于蒙特卡罗方法的铅酸蓄电池厂土壤健康风险评价[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(12):98-102.
YANG Si-yan, DUAN Ning, WEI Wan-ting. Health risk assessment of the soil from a lead-acid battery factory based on Monte Carlo method[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, 42(12):98-102.

[17] 王清泉, 何要来, 汪新亮, 等. 水源涵养和生态保育清洁小流域河流沉积物重金属的特征及潜在风险:以董铺-大房郢水库为例[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1):98-103.
WANG Qing-quan, HE Yao-lai, WANG Xin-liang, et al. Characteristics and potential risks of heavy metals in sediments in water conservation and ecological clean watershed: A case study at Dongpu Dafangying reservoir[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1):98-103.

[18] Saha P, Paul B. Assessment of heavy metal toxicity related with human health risk in the surface water of an industrialized area by a novel technique[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2019, 25(4):67-73.

[19] Mohammad G, Rahman P. Ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments from the Gorgan Bay, Caspian Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 137(1):662-667.

[20] 郭泌汐, 刘勇勤, 张凡, 等. 西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估[J]. 环境科学, 2016, 37(2):490-498.
GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, et al. Characteristics and risk assessment of heavy metals in core sediments from lakes of Tibet[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2):490-498.

[21] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990.
China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.

[22] 周开胜, 朱兰保, 贺冉冉. 蚌埠市土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 长春师范大学学报, 2018, 37(12):97-103.
ZHOU Kai-sheng, ZHU Lan-bao, HE Ran-ran. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risk of urban soils in Bengbu City of China[J]. *Journal of Changchun Normal University*, 2018, 37(12):97-103.