

# 城市表层土壤重金属污染模型建立与评价

刘自山<sup>1,2</sup>,肖 晴<sup>1</sup>,岳智慧<sup>1</sup>,张勇卫<sup>1</sup>

(1. 四川理工学院,四川 自贡 643000; 2. 电子科技大学计算机科学与工程学院,成都 610054)

**摘 要:**首先利用 matlab 绘出八种重金属元素在某城区的分布图,并运用模糊数学知识分别建立隶属函数,层次分析法得到各金属元素的权重,并用权重修正后的内梅罗污染指数法加以修正,经归一化、加权得到整个体系污染程度的综合评价,并指出污染的主要原因,最后对模型进行了检验与分析。

**关键词:**重金属污染;模糊数学;隶属函数;综合评价

**中图分类号:**F224.9

**文献标识码:**A

## 1 问题的提出

随着城市经济的快速发展和城市人口的急剧增加,人类活动对城市环境的影响日益突出。对城市土壤地质环境异常的查证,以及如何应用查证获得的海量数据资料开展城市环境质量评价,研究人类活动影响下城市地质环境的演变模式,日益成为人们关注的焦点。按照功能划分,城区一般可分为生活区、工业区、山区、主干道路区及公园绿地区(1、2、3、4、5 区)等,不同的区域环境受人类活动影响的程度不同。

## 2 模型的建立与求解

首先对表 1 中数据进行处理——将各区的有关数据集中整理。将其视作平面图形,观察某种重金属元素在该城区的平面分布,然后利用 matlab 分别画出八种重金属元素的分布图形如图 1 所示。

表 1 八种主要重金属元素的背景值

元素	平均值	标准偏差	范围
As( $\mu\text{g/g}$ )	3.6	0.9	1.8 ~ 5.4
Cd( $\text{ng/g}$ )	130	30	70 ~ 190
Cr( $\mu\text{g/g}$ )	31	9	13 ~ 49
Cu( $\mu\text{g/g}$ )	13.2	3.6	6.0 ~ 20.4
Hg( $\text{ng/g}$ )	35	8	19 ~ 51
Ni( $\mu\text{g/g}$ )	12.3	3.8	4.7 ~ 19.9
Pb( $\mu\text{g/g}$ )	31	6	19 ~ 43
Zn( $\mu\text{g/g}$ )	69	14	41 ~ 97

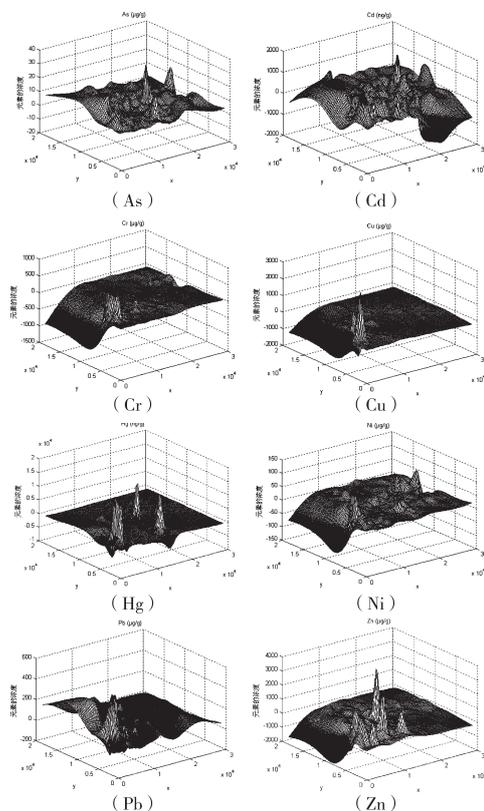


图 1 八重金属元素的空间分布

污染等级分为正常、轻度污染、中度污染、重度污染 4 类。其中,将各重金属元素背景值浓度的平均值  $\bar{A}$  作

收稿日期:2012-04-30

基金项目:四川省教育厅自然科学基金重点项目(10ZA136);四川理工学院培育项目(2011PY01);四川理工学院教改项目(JG-1226,JG-1215)

作者简介:刘自山(1981-),男,重庆垫江人,实验师,硕士,主要从事计算机数模应用方面的研究,(E-mail)liuzishan@suse.edu.cn

为正常等级的标准,  $2\bar{A}$ 、 $3\bar{A}$  分别作为轻度污染、中度污染等级的标准, 大于  $3\bar{A}$  作为重度污染等级的标准<sup>[1-2]</sup> (表2)。

表2 各种污染等级的标准(单位:ug/g)

元素	正常	轻度污染	中度污染	重度污染
As	<3.6	3.6~7.2	7.2~10.8	>10.8
Cd	<130	130~260	260~390	>390
Cr	<31	31~62	62~93	>93
Cu	<13.2	13.2~26.4	26.4~39.6	>39.6
Hg	<35	35~70	70~105	>105
Ni	<12.3	12.3~24.6	24.6~36.9	>36.9
Pb	<31	31~62	62~93	>93
Zn	<69	69~138	138~207	>207

运用模糊数学, 列出各个污染等级的隶属函数, 以As为例:

正常:

$$A(x) = \begin{cases} 1 & x < 3.6 \\ \frac{x-3.6}{3.6} & 3.6 < x < 7.2 \\ 0 & x > 7.2 \end{cases}$$

轻度污染:

$$B(x) = \begin{cases} 0 & x > 10.8 \\ \frac{10.8-x}{3.6} & 7.2 < x < 10.8 \\ 1 & 3.6 < x < 7.2 \\ \frac{x}{3.6} & x < 3.6 \end{cases}$$

中度污染:

$$C(x) = \begin{cases} \frac{10.8}{x} & x > 10.8 \\ 1 & 7.2 < x < 10.8 \\ \frac{x-3.6}{3.6} & 3.6 < x < 7.2 \\ 0 & x < 3.6 \end{cases}$$

重度污染:

$$D(x) = \begin{cases} 1 & x > 10.8 \\ \frac{10.8-x}{3.6} & 7.2 < x < 10.8 \\ 0 & x < 7.2 \end{cases}$$

根据最大隶属度原则可知各个区域各重金属元素的污染等级(表3)。

根据各种重金属元素的背景值及其正常范围区间的长度将其区间分为  $n$  个相同长度的区间, 再构建隶属函数<sup>[3-6]</sup>:

表3 各个地区各种元素的污染等级

类区	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
1	轻	中	中	重	中	轻	中	重
2	轻	中	中	重	重	轻	重	重
3	轻	轻	轻	轻	轻	轻	轻	轻
4	轻	中	轻	重	重	轻	中	重
5	轻	中	轻	中	重	轻	轻	中

$$S_n(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 1.8 \times (n-1) \\ \frac{5.4 \times (n-1) - x}{5.4 \times (n-1)} & 1.8 \times n < x < 5.4 \times (n-1) \\ 1 & x = 5.4 \times (n-1) \end{cases}$$

由八种重金属元素背景值可以知道环境对于不同的重金属元素的敏感程度的大小, 将每一种重金属元素按照区间的大小从小到大排序, 污染程度标记为8、7、6、5、4、3、2、1, 建立八种重金属元素的比较矩阵:

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
As	1	1	0	0	2	0	0	0
Cd	0	1	0	0	1	0	0	0
Cr	4	5	1	3	6	2	1	0
Cu	1	2	0	1	3	0	0	0
Hg	0	0	0	0	1	0	0	0
Ni	2	3	0	1	4	1	0	0
Pb	3	4	0	2	5	1	1	0
Zn	5	6	1	4	7	3	2	1
P	16	22	2	11	29	7	4	1

其中,  $P$  为污染相对贡献值。

$$B(i) = \frac{P(i)}{\sum p(i)} \quad (i = 1, 2, \dots, 8)$$

$p(i)$  表示第  $p$  行第  $i$  个数,  $B_i$  表示第  $i$  种重金属元素的相对权重。进行归一化处理得到各种重金属元素的近似权重(表4)。

表4 八种重金属元素的相对权重

元素	权重	元素	权重
As	0.173913	Hg	0.315217
Cd	0.23913	Ni	0.076087
Cr	0.021739	Pb	0.043478
Cu	0.119565	Zn	0.01087

这样得到权重太过粗糙, 再采用权重修正后的内梅罗污染指数法加以完善。

根据所限制的标准越高、危害越大、权重越大求权重  $W_i$ , 将各重金属的标准限制按由小到大的顺序排列为  $S_1, S_2, \dots, S_n$ , 将它们的平均值( $S_{ave}$ )与每个  $S_i$  值相除, 并令表示第  $i$  种重金属的相关重要性比值, 则  $R_i = \frac{S_{ave}}{S_i}$ , 令  $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ , 则有

$$W_i = \sum_{i=1}^n W_i \times \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i}$$

通过计算得出各种重金属在不同限定值的情况下的权重值  $W_i$  (表 5)。

表 5 各种重金属的限定值和权重

重金属	权重	限定值	权重	限定值	权重	权重
As	0.1459	3.6	0.1855	5.4	0.17541	0.1459
Cd	0.2264	130	0.2791	190	0.2687	0.2264
Cr	0.1389	31	0.1278	49	0.1346	0.1389
Cu	0.0945	13.2	0.1168	20.4	0.0872	0.0945
Hg	0.22825	35	0.1854	51	0.23879	0.22825
Ni	0.0942	12.3	0.135	19.9	0.1342	0.0942
Pb	0.0564	31	0.0732	43	0.0413	0.0564
Zn	0.03545	69	0.0372	97	0.0598	0.03545

从表 5 看出所得权重与表 4 中的权重相差无几,说明本文得到的权重比较合理。

将表 5 中最后一列权重归一化处理与表 4 中的权重求平均值,打磨处理后可以得到表 6。

表 6 综合处理后得到的权重

类区	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
权重	0.15	0.23	0.03	0.12	0.32	0.08	0.05	0.02

设  $\eta_i$  表示  $i$  地区的污染综合评定,  $w_j$  表示第  $j$  种元素所占权重,  $p_j$  该地区第  $j$  种元素的污染值。某个地区的污染综合评定:

$$\eta_i = \sum_{j=1}^8 w_j \cdot p_j \quad (i = 1, 2, \dots, 5, j = 1, 2, \dots, 8)$$

于是得到不同区域污染程度的结论(表 7)。

表 7 各区域的污染程度综合评定

区域	1	2	3	4	5
污染度	中度	重度	轻度	重度	中度

查找资料可知污染源主要来自于天然矿场、工厂排污、生活垃圾、汽车尾气,根据资料中的坐标点和对应的相对区域得出图 2 所示的分布图。

由于区域划分不明显,所以结合各个区域的每种重金属元素的平均浓度(表 8)分析<sup>[7-8]</sup>。

表 8 各区域各重金属元素的平均浓度 (单位:ug/g)

类区	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
1	6.27	289.96	69.02	49.4	93.04	18.34	69.11	237.01
2	7.25	393.11	53.41	127.54	642.36	19.81	93.04	277.93
3	4.04	152.32	38.96	17.32	40.96	15.45	36.56	73.29
4	5.71	360.01	58.05	62.21	446.82	17.62	63.53	242.85
5	6.26	280.54	43.64	30.19	114.99	15.29	60.71	154.24

综上所述:

铜(Cu)元素主要在工业区浓度较高,可以考虑为该结果是由于工业废水废物的排放所造成。

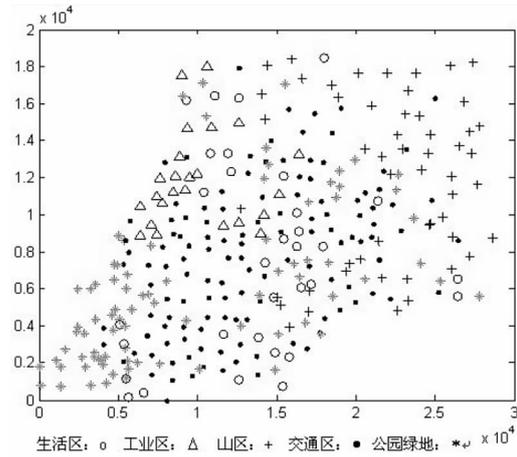


图 2 该市五个区域分布图

汞(Hg)、铅(Pb)元素主要在工业区和交通区浓度较高,可以考虑为该结果是由工业废水废物的排放和汽车尾气排放所造成。

锌(Zn)、镉(Cd)、镍(Ni)元素主要在工业区、交通区和生活区浓度较高,可以考虑为该结果是由工业废水废物的排放,汽车尾气排放,生活废水、垃圾的排放所造成。

砷(As)、铬(Cr)元素在山区的浓度较高,砷(As)、铬(Cr)污染是由天然砷(As)、铬(Cr)矿场开采所造成。

### 3 模型的检验与分析

单纯地根据 matlab 画出的分布图得出重金属浓度高的区域,可能由于视觉误差,读数误差等不可忽略的人为因素导致结果存在偏差,考虑做出高斯-克吕格投影。这样能够准确得出其最大浓度的具体坐标和范围。在利用模糊数学综合评判时为了更准确,可以加入平移极差变换:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\}}{\max\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\} - \min\{x_{ij} | 1 \leq i \leq n\}}$$

使得结果更精确。

在考虑污染程度求权重时,若多保留小数位数可以提高权重的精确度,并且文中没有加入标准偏差的影响因素,若再加入标准偏差,对权重进行适当修正,可使结果更贴近数值。

### 4 模型的评价与推广

根据模糊数学和权重修正后的内梅罗污染指数法基本原理,建立综合评价指标体系,并利用层次分析法计算指标权重,有效地减少了人为主观因素对模型的影响。且通过判断矩阵一致性检验确定合理的权重向量,

避免了因素过多而难于分配权重的弊端,污染物等同对待或单一突出某项污染物作用的片面性和人们主观认识差异所引起的决策失误,特别是在各种影响方案选择的指标出现优越性交叉时,能够做出更为科学、准确有理论依据的判断。

本文中所建立的模型不仅具有很强的实用性,而且具有很好的推广性。例如在重金属污染传播特征模型,结合空间高斯扩散方程,还适合于放射性物质的辐射衰减研究。又如拟合函数然后搜索寻优的方法普遍适用于矿藏的收索,古葬墓地群的寻找。

#### 参考文献:

- [1] 刘敏,蒋海燕,黄沈发,等.城市土壤污染研究现状与趋势[J].安全与环境学报,2004(6):73-75.
- [2] 杨琳.应用权重修正内梅罗污染指数法对陆源入海排污口临近海域水环境质量综合评价[EB/OL].  
http://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotat-FJSC201002012.htm,2011-10-16.
- [3] 刘自山,刘自川,廖翠华.产品定价的优化设计[J].四川理工学院学报:自然科学版,2006,19(5):102-105.
- [4] 叶子敏,沈晓斌.模糊下割集与模糊交割集[J].四川理工学院学报:自然科学版,2006,19(1):33-35.
- [5] 李金城,李仁湛,罗亚萍,等.广西大新锰矿区土壤重金属污染评价[J].环境科学与技术,2011(7):42-46.
- [6] 佟洪金,任春坪,钱骏.成渝经济区主要河流沉积物中重金属的生物毒性风险评价[J].西华大学学报:自然科学版,2011,30(6):56-60.
- [7] 曹外香,邹青松,张智民.偏微分方程数值方法新解[J].国际学术动态,2011(3):30-32.
- [8] 陈鲁皖.高斯1投影和兰伯特投影在GIS中的应用探讨[J].科技风,2009(14):1-2.

## Modeling and Evaluation on Heavy Metal Pollution of Surface Soil in a City

LIU Zi-shan, XIAO Qing, YUE Zhi-hui, ZHANG Yong-wei

(1. Sichuan University of Science & Engineering; Zigong 643000, China; 2. School of Computer Science & Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

**Abstract:** Firstly, a distribution map of eight heavy metal elements in a certain city region is shown by use of matlab, respectively membership functions are established by use of the the knowledge of fuzzy mathematics. The weight of the metal elements is obtained according to analytic hierarchy method. Then the weights are modified by using the Nemerow pollution index. The comprehensive evaluation of the degree of pollution is gotten in the entire system after normalized and weighted, the major causes of pollution are pointed out. Finally the model is tested and analysed.

**Key words:** heavy metal pollution; fuzzy mathematics; membership function; comprehensive evaluation