

针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型的改进及应用

窦磊^{1a, 1b}, 周永章^{1a, 1b}, 王旭日², 杨志军^{1a, 1b}, 彭先芝³, 李秀娟³

(1. 中山大学 a. 地球科学系, b. 地球环境与地球资源研究中心, 广东 广州 510275;

2. 大连自然博物馆, 辽宁 大连 116023; 3. 中国科学院 广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 土壤重金属污染评价是土壤重金属污染研究的重要课题。本文改进了针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型和评价因子权重的计算方法, 提出了基于污染物浓度和毒性的双权重因子的模糊综合评价法。该法慎重考虑了各级标准界限的模糊性, 较好继承了模糊数学方法用于土壤重金属评价的优点。它从定性和定量两方面, 比较客观地反映污染因子对土壤环境质量的影响。采用双权重系数法确定各指标的权重, 综合考虑评价因子的浓度和毒性, 不但在大多数情形下与对比的其它方法结果相一致, 而且可以克服其它几种方法出现的误判, 提高了评价结果的分辨性, 使评价结果更全面、更能真实地反映土壤重金属污染实际状况。

关键词: 土壤; 重金属污染评价; 双权重因子; 模糊数学模型; 模糊综合评价模型

中图分类号: X825; X113. 3

文献标识码: A

文章编号: 0564-3945 (2007) 01-0101-05

土壤是人类赖以生存的最基本的自然资源之一, 也是生物可利用重金属的一个重要蓄积库, 其所含的重金属通过食物链被植物、动物数十倍的富集^[1], 通过多种途径直接或间接地威胁人类安全和健康^[2, 3]。随着工业、城市污染的加剧和农用化学物质种类、数量的增加, 土壤重金属污染日益严重^[4, 5]。这种形势下迫切需要对所处的土壤环境质量做出客观、切实的综合评价, 以此反映经济、技术发展对土壤质量、农业生产、生态环境乃至人类健康的影响, 并为土地的可持续利用提供理论依据。

在我国当前大规模农业地质环境调查活动中, 有关土壤重金属污染状况评价工作业已列入议事日程, 相关学科学者正在积极探索简便有效实用的评价方法。目前, 关于土壤重金属污染评价的方法较多, 如综合污染指数法、聚类分析法、层次分析法和模糊数学等^[6-12]。模糊数学自 1965 年由 Zadeh 提出以来, 已得到较充分的发展, 同时被广泛用于生产实践中, 而且在土壤环境质量评价中其分辨率明显高于其它评价方法^[13]。定义土壤重金属污染级别是一些模糊的概念, 而模糊综合评价对于解决这些具有模糊边界的问题最为有效, 并且能控制评价结果的误差^[14, 15], 现今模糊数学在环境评价中已得到很大发展, 产生了各种不同的模糊评价方法^[16]。不同的评价方法各有其特点, 但在评价结果的精确性方面, 仍有进一步研究的必要。

其中突出的一点是这些评价方法仅仅考虑了重金属污染物浓度超标的情况, 未考虑重金属本身的毒性作用, 这就有可能掩盖有些浓度低但毒性大的有毒物的污染作用。本文采用基于双权重因子的模糊数学模型综合考虑重金属浓度和毒性作用^[17], 既反映污染物的浓度超标状况, 又反映污染物的毒性作用, 因而评价更为全面、合理。

1 模糊综合评价模型与方法

模糊数学方法可以通过隶属度描述土壤重金属污染状况的渐变性和模糊性, 使评价结果更加准确可靠^[11, 12]。应用模糊数学方法进行污染评价的关键问题是如何确定各指标的权重。双权重因子通过超标浓度和毒性相结合来寻找各指标的最佳权重。采用此方法可以增加评价结果的分辨性和指示意义。以下将进行详细分析。

1.1 评价模型的确定

模糊综合法用隶属度描述模糊的污染分级界线, 各评价等级的隶属度再以各评价因子的权重修正, 则得到评价样品对评价等级的隶属度^[18-20]。

设 A 为各评价因子对评价等级的隶属度, R 为各评价因子的权重构成的向量, B 为评价样品对评价等级的隶属度, 则得到如下数学模型:

收稿日期: 2006-05-28; 修订日期: 2006-08-17

基金项目: 广东省科技厅重大专项攻关项目 (2004A3030800, 2005A30402006, 2002C3201) 及国家教育部支持中山大学 985 工程产业与区域发展研究创新基地 (105203200400010) 资助

作者简介: 窦磊 (1979 -), 男, 宁夏吴忠人, 博士研究生, 主要研究生态环境地球化学。E-mail: doulei326@126.com

$$B = R \cdot A \quad (1)$$

1.2 评价因子的隶属度函数及模糊关系矩阵的建立

为了进行模糊运算,需要确定隶属度函数,并以隶属度来描述土壤污染状况的模糊界线。设土壤环境质量分为 m 个级别,则:

$$V = (\quad , \quad , \dots, m)$$

这里用降半梯形分布来刻画隶属度:

$$X_{ij} = \begin{cases} 1 & (X \leq S_{ij}) \\ (S_{ij+1} - X) / (S_{ij+1} - S_{ij}) & (S_{ij} < X \leq S_{ij+1}) \\ 0 & (X \geq S_{ij+1}) \end{cases} \quad (2)$$

式中 X_{ij} —污染因子的隶属度;

S_{ij} —某一样品各污染因子 i 在 j 级指标 ($i = 1,$

$2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m$);

X —各污染因子的实测浓度。

由此可得表示评价因子即指标 i 对级别 (状态) j 的隶属度矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} X_{11} & \dots & X_{1m} \\ \dots & & \dots \\ X_{n1} & \dots & X_{nm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

同样可求得其它样品对各污染等级的隶属度矩阵。

1.3 各评价因子权重向量 R 的确定

现行重金属污染评价方法一般采用污染物浓度超标赋权法。对于不同重金属,因污染物个体的毒性级别不同,污染物浓度超标赋权法有可能掩盖某些低浓度有机组分的毒性作用,因此,有必要将有重金属的毒性级别纳入权重考虑,以反映重金属浓度和毒性的综合作用。将污染物浓度和毒性级别指数加权叠加,并作归一化处理,得到某污染组分的权重公式:

$$r_i = \frac{C_i / f_i}{\sum_{i=1}^n C_i / f_i} \quad (4)$$

$$C_i = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m S_{ij}} / \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m S_{ij}}$$

式中 x_i —某样品第 i 个污染因子的实测浓度, mg kg^{-1} ;

f_i —第 i 个污染因子的毒性级别指数;

R_i —某样品第 i 个污染因子的权重值,且

$$\sum_{i=1}^n C_i = 1, \sum_{i=1}^n r_i = 1.$$

将各污染因子的实测浓度值、毒性系数和选定的评价标准分别代入公式 (4),可得到各污染因子的权重值,由此组成某个样品各参评因子的权重向量:

$$R = [r_1, r_2, \dots, r_n] \quad (5)$$

同样,可以得到其它样品的各参评因子的权重向量。

1.4 模糊综合评价模型的确立和综合评价

将权重向量 R 和隶属度向量 A 代入所建立的数学模型式 (1),即可得到各评价样品对评价等级的隶属度 B ,根据最大隶属度原则确定样品所属的污染等级。

2 模型的验证

为便于计算结果与其它评价方法进行对比,本文引用文献^[21]中的的实测数据 (表 1) 进行分析。同时评价基准的选择也是区域土壤环境质量评价的关键,采用不同的评价基准得到的评价结果存在明显差异,有时甚至会得出与实际不符的错误判断^[22]。研究表明不加考虑的选用国家《土壤环境质量标准》(GB15618 - 1995)进行土壤环境评价往往会出现偏差^[23,24],鉴于此,本次评价仍采用土壤重金属元素背景值和临界含量确定的评价标准 (表 2)^[21]。另外根据 Hakanson 制定的标准化重金属毒性响应系数,分别对各重金属对生物的毒性指数赋值 (表 2),指数越小,代表毒性越大。

2.1 隶属度函数的确定

根据表 1、表 2 的数据,利用公式 (2) 计算各重金属元素对应于各土壤重金属环境质量等级的隶属函数,得到关系模糊矩阵。如样品 1 为经计算后得到的关系模糊矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0.3978 & 0.6022 & 0 & 0 \\ 0.485 & 0.515 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.966 & 0.034 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.974 & 0.026 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.2 计算参评因子权重

按照公式 (4),将表 (1)表 (2)数据代入计算,得到各采样点各个重金属参评因子的权重值 R_i (表 3)。

2.3 模糊矩阵复合运算及模型评价

依照模型 (1)中确立的映射关系,将各样品的模糊关系矩阵和对应的权重系数 (表 3)分别代入,可得出各评价样品对评价等级的隶属度,又根据最大隶属度原则,确定各样品的的污染程度,此即为土壤环境质量分级 (表 4)。

表 1 评价区土壤环境中重金属含量的实测值 (mg kg⁻¹)

采样点	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Zn
1	0.4617	0.178	22.87	75.72	26.35	119.95
2	0.304	0.225	24.62	75.71	28.76	118.53
3	0.2200	0.2300	24.2000	61.0000	28.9000	86.6000
4	0.1000	0.1600	14.7700	73.5900	22.8900	76.9600
5	0.8700	0.3000	37.1500	92.5900	50.6600	148.2800
6	0.4840	0.1900	20.7300	88.1100	44.2600	98.6300
7	8.2000	0.6000	50.0000	-	40.6000	838.4600
8	-	0.0300	26.3600	71.6200	22.7800	76.8100
9	0.1200	0.1100	21.4500	68.1700	28.2400	82.5500
10	0.1200	0.0600	16.9000	59.8000	21.8000	70.0000

表 2 土壤重金属污染程度分级标准及生物毒性指数 (mg kg⁻¹)

污染因子	清洁	尚清洁	轻污染	中污染	重污染	毒性指数
Cd	0.1204	0.2523	0.6	1.4	2	2
Hg	0.092	0.2592	0.45	1.05	1.5	1
Pb	23.35	36.09	150	350	500	4
Cr	74.88	99.54	150	350	500	5
Cu	28.37	40.63	120	280	400	4
Zn	83.68	116.75	240	560	800	6

表 3 采样点各参评因子的权重值

采样点	Cd	Hg	Pb	Cr	Cu	Zn
1	0.3694	0.3717	0.0378	0.0902	0.0530	0.0777
2	0.2485	0.4801	0.0415	0.0922	0.0592	0.0785
3	0.1993	0.5438	0.0452	0.0823	0.0659	0.0635
4	0.1286	0.5371	0.0392	0.1410	0.0741	0.0801
5	0.4113	0.3701	0.0362	0.0652	0.0603	0.0568
6	0.3598	0.3686	0.0318	0.0976	0.0828	0.0594
7	0.7699	0.1470	0.0097	0.0000	0.0096	0.0637
8	0.0000	0.2181	0.1516	0.2972	0.1597	0.1733
9	0.1737	0.4156	0.0641	0.1470	0.1029	0.0968
10	0.2344	0.3058	0.0681	0.1739	0.1071	0.1107

3 结果分析与对比

用改进的模糊综合分析法评判结果同其它七种评价结果相比(表 5),除分级贴近度法外的其它 7 种评价方法的评价结果在多数情况下是一致的,表明该方法用于土壤重金属污染评价是可行的。评价结果不一致的主要有样品 1、样品 3、样品 5 和样品 7。其中对于样品 1,有四种方法的评价结果为 Ⅱ级污染,但由表 1 可以看出,样品 1 中 6 个评价因子中有 4 个因子的实测浓度超过了 Ⅱ级标准,超标率为 67%,而且毒性最

强(毒性系数最小)的 Hg 和 Cd 超标最严重,因此将其划分为 Ⅲ级污染显然是不合理的,所以只有灰色聚类法、非线性可拓综合法和改进模糊数学法的评价结果最合理。但对于位于一炼锌厂附近的样品 7, Cd、Zn 都已严重超标,而且毒性最强且植物利用率较高的 Cd 含量分别达到 Ⅱ级标准的 13.7 倍, Ⅲ级标准的 4 倍之多,所以样点 7 划分为 Ⅲ级污染是合理的,从评价结果对比中可以看出灰色聚类法出现了明显的误判。同样对于样品 5 各评价因子的实测浓度值超过 Ⅱ级标准的超标率也为 67%,而非线性可拓综合法将其划分为 Ⅲ级污染也是不合理的。

由此可见,本文所采用的双权重模糊综合评价法应用土壤重金属污染评价,最终结果更为可信,更能真实的反映出土壤本身受重金属污染的程度。

表 4 模糊综合评价结果

采样点	评价等级				
1	0.3582	0.4171	0.2246	0	0
2	0.2819	0.5054	0.2127	0	0
3	0.3861	0.6139	0	0	0
4	0.7817	0.2183	0	0	0
5	0.0184	0.4686	0.3741	0.1389	0
6	0.2621	0.4943	0.2436	0	0
7	0	0.0181	0.0501	0.0981	0.8336
8	0.746	0.2073	0.0466	0	0
9	0.9552	0.0448	0	0	0
10	1	0	0	0	0

表 5 8 种方法评价结果比较

评价方法	各采样点评价结果									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
层次分析法 ^[18]										
模糊综合评价法 ^[21]										
改进层次分析法 ^[25]										
灰色聚类 ^[26]										
非线性可拓综合法 ^[27]										
分级贴近度法 ^[28]										
物元分析法 ^[29]										
改进模糊数学法										

4 结论

1) 本文提出的方法改进了模糊综合评价模型中评价因子权重的计算方法。它考虑到了各级标准界限的模糊性,继承了模糊数学方法用于土壤重金属评价的优点。从定性和定量两方面进行分析,比较客观反映出各污染因子对土壤环境质量的影响。经过验证,模糊综合评价模型是正确的。

2) 采用双权重系数法确定各指标的权重,综合考虑了评价因子的浓度和毒性,不但在大多数情形下与对比的其它方法结果相一致,而且还能克服其它几种方法出现的误判,使评价结果更全面、更能真实地反映土壤重金属污染的实际状况,提高了评价结果的分辨性。

3) 该模型层次清楚,物理意义明确,适用于土壤重金属污染的评价,也适用于其它环境污染评价。

参考文献:

- [1] M RELES A, SOLS C, ANDRADE E, et al Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2004, 219 - 220(6): 187 - 190.
- [2] 张乃明. 土壤 - 植物系统重金属污染研究现状与展望 [J]. 环境科学进展, 1999, 7(4): 30 - 33.
- [3] 唐翔宇, 朱永官. 土壤中重金属对人体生物有效性的体外试验评估 [J]. 环境与健康杂志, 2004, 21(3): 183 - 185.
- [4] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展 [J]. 土壤通报, 2004, 35(3): 366 - 370.
- [5] LEE C S L, Li X D, SHIW Z, et al Metal contamination in urban, suburban, and country park soils of Hong Kong: A study based on GIS and multivariate statistics [J]. Science of the Total Environment, 2006, 356: 45 - 61.
- [6] 林建伟, 王里奥, 赵建夫, 等. 三峡库区生活垃圾的重金属污染程度评价 [J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(1): 104 - 108.
- [7] 石晓翠, 钱 翌, 熊建新, 等. 模糊数学模型在土壤重金属污染评价中的应用 [J]. 土壤通报, 2006, 37(2): 334 - 336.
- [8] 李德豪, 钟华文. 层次分析模糊决策法评价土壤重金属污染 [J]. 石油化工高等学校学报, 1997, 10(3): 51 - 54.
- [9] 武 伟, 唐明华, 刘洪斌. 土壤养分的模糊综合评价 [J]. 西南农业大学学报, 2002, 22(3): 270 - 272.
- [10] 朱 青, 周生路, 孙兆金, 等. 两种模糊数学模型在土壤重金属综合评价中的应用与比较 [J]. 环境保护科学, 2004, 30(123): 53 - 57.
- [11] 张超兰, 白厚义. 用模糊综合评判法评价土壤重金属污染程度 [J]. 广西农业生物科学, 2003, 22(1): 54 - 57.
- [12] 王建国, 杨林章, 单艳红, 等. 模糊数学在土壤质量评价中的应用 [J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 176 - 183.
- [13] ONKAL-ENGN G, DEMR I, HIZ H. Assessment of urban air quality using fuzzy synthetic evaluation [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38: 3809 - 3815.
- [14] WANG H Y. Assessment and prediction of overall environmental quality of Zhuzhou City, Hunan Province, China [J]. Journal of Environmental Management, 2002, 66: 329 - 340.
- [15] SHEN G Q, LU Y T, WANG M N, et al Status and fuzzy comprehensive assessment of combined heavy metal and organo-chlorine pesticide pollution in the Taihu Lake region of China [J]. Journal of Environmental Management, 2005, 76: 355 - 362.
- [16] FISHER B. Fuzzy environmental decision - making: applications to air pollution [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 1865 - 1877.
- [17] 殷淑华, 段 虹. 基于双权重因子的水质评价模糊综合模型 [J]. 中国农村水利水电, 2005(8): 25 - 26.
- [18] 劳青团. 环境管理实用技术方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994: 38 - 51.
- [19] 彭祖赠, 孙毓玉著. 模糊 (Fuzzy) 数学及其应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. 122 - 131.
- [20] 李洪兴, 汪培庄. 模糊数学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1993, 116 - 128.
- [21] 彭再德. 模糊综合评价法在区域土壤环境重金属污染评价中的应用 [J]. 化工环保, 1993, 13(4): 235 - 238.
- [22] 高怀友, 赵玉杰, 师容光, 等. 区域土壤环境质量评价基准研究 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 342 - 345.
- [23] 高怀友, 刘凤枝, 赵玉杰. 我国农产品产地环境标准中存在的问题与对策研究 [J]. 生态环境, 2004, 13(4): 691 - 693.
- [24] 张文具, 范华义. 天津市土壤中 Cd, Hg, As, Cu, Zn, Ni 环境标准制定 [J]. 城市环境与城市生态, 2002, 15(3): 47 - 48.
- [25] 孟宪林, 郭 威. 改进层次分析法在土壤重金属污染评价中的应用 [J]. 环境保护科学, 2001, 27(103): 34 - 36.
- [26] 王作雷, 蔡国梁, 李玉秀. 土壤重金属污染的非线性可拓综合研究 [J]. 土壤, 2004, 36(2): 151 - 156.
- [27] 谢贤平, 赵 玉. 用改进灰色聚类法综合评价土壤重金属污染 [J]. 矿冶, 1996, 5(3): 100 - 104.
- [28] 张松滨, 李万海, 王 红. 分级贴近度法与环境质量评价 [J]. 环境工程, 2000, 18(5): 50 - 52.
- [29] 门宝辉, 梁 川. 农业土壤环境综合评价物元模型的建立及其应用 [J]. 水土保持通报, 2002, 22(4): 37 - 39.

Improvement and Application of a Fuzzy Mathematical Model for Assessment of Heavy Metal Pollution in Soil

DOU Lei^{1a, 1b}, ZHOU Yong-zhang^{1a, 1b}, WANG Xu-ri², YANG Zhi-jun^{1a, 1b}, PENG Xian-zhi³, LI Xiu-juan³

(1. Zhongshan University a. Department of Earth Sciences, b. Center for Earth Environment and Resources, Guangzhou 510275, China;

2. Dalian Natural History Museum, Dalian 116023, China;

3. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The assessment of heavy metal pollution is an important issue in the research of heavy metal pollution in soil. This study improves on the calculating method of fuzzy mathematical model and the weighing of assessment factors, and brings forward the fuzzy assessment based on two weighing factors. The method considers with discretion the fuzziness on the line of distinction of the every criterion, and succeeds to the advantage of the fuzzy mathematical method used in the assessment of heavy metal pollution in soil. It makes a quantitative and qualitative analysis on the objective influence, which the polluting factors engender for the quality of the soil environment. In most situations, the result, which educes by using the method of two weighing factors to determine the weighing of different indexes and consider synthetically the concentration and toxicity of the assessment factors, is accordant with the results elicited by using other methods. And also, this method will raise the resolving performance of the assessment result via overcoming the error of other methods, and make the result to reflect the actual status of the heavy metal pollution in soil more comprehensively and factually.

Key words: Soil environment; Assessment of heavy metal pollution; Double weighing factors; Fuzzy mathematical model; Fuzzy comprehensive model