

应用物元分析法评价安徽省土壤重金属污染现状<sup>①</sup>

徐笠, 常江\*, 杜艳, 梁家妮

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要:** 土壤重金属评价是土壤重金属污染研究的重要方向。本研究改进了土壤重金属污染评价的物元分析模型, 并且对评价因子权重的计算方法进行修正, 提出了基于污染物浓度和毒性的双权重因子的物元分析评价方法。通过对安徽省主要土壤中重金属的评价, 得到如下结果: 3种土壤中, 黄褐土污染最为严重, 其次为黄红壤, 污染最轻的为砂姜黑土。

**关键词:** 土壤重金属; 污染评价; 双权重因子; 物元分析

**中图分类号:** X53

土壤是人类赖以生存的最基本的自然资源之一, 土壤重金属的污染可能影响土壤的正常功能, 造成食物链的污染, 并通过在生物体内的富集对人类和环境产生威胁<sup>[1]</sup>。随着国民经济的发展, 工业“三废”排放量增加, 含重金属的化肥、杀虫剂和除草剂被大量使用, 使土壤受到不同程度的重金属污染, 严重影响了食品安全和人类健康<sup>[2-4]</sup>。对土壤重金属污染进行综合评价, 可以反映经济、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, 并为土地合理利用和农业的可持续发展提供理论依据<sup>[5]</sup>。因此, 研究土壤重金属综合污染评价具有重要意义。

目前, 土壤重金属综合污染的评价方法很多, 有指数法、模糊数学、聚类分析、层次分析、物元分析等等。物元分析是我国学者蔡文教授<sup>[6]</sup>于20世纪80年代初创立的新学科, 属数学、系统科学和思维科学的交叉学科, 其理论支柱是物元理论和可拓集合。它以物元为基本元, 建立物元模型; 以物元为依据, 应用物元变换法化矛盾问题为相容问题。以前的物元分析只考虑到了重金属污染浓度超标的情况, 并没有考虑到重金属本身的毒性作用<sup>[7]</sup>。本文综合考虑了重金属的浓度和毒性作用, 引入Hakanson<sup>[8]</sup>制定的标准重金属毒性响应系数, 不仅反映了重金属的浓度超标情况, 而且反映污染物的毒性效应在评价中的作用, 使土壤重金属污染评价更为科学、合理<sup>[9-10]</sup>; 并以安徽省3种主要土壤为研究对象进行了评价尝试。

## 1 基本模型

### 1.1 物元的概念

**1.1.1 物元的定义** 给定事物的名称 $N$ , 它关于特征 $C$ 的量值为 $V$ , 以有序三元组 $R = (N, C, V)$ 作为描述事物的基本元, 简称物元, 事物的名称 $N$ , 特征 $C$ 和量值 $V$ 称为物元的三要素,  $R$ 表示物元。

**1.1.2 物元矩阵** 如果一个事物 $N$ 需用 $n$ 个特征 $c_1, c_2, \dots, c_n$ 及其相应的量值 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 来描述, 则称它为 $n$ 维物元。并可用矩阵表示为:

$$R = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

### 1.2 节域、经典域对象物元矩阵

节域对象物元矩阵可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} N_p & c_1 & [a_{p1}, b_{p1}] \\ & c_2 & [a_{p2}, b_{p2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{pn}, b_{pn}] \end{bmatrix} \quad (2)$$

经典域对象物元矩阵可表示为:

$$R = \begin{bmatrix} N_b & c_1 & [a_{b1}, b_{b1}] \\ & c_2 & [a_{b2}, b_{b2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & [a_{bn}, b_{bn}] \end{bmatrix} \quad (3)$$

$N_p$  表示由标准事物加上可转化为标准的事物组成的节域对象;  $v_{pi} = [a_{pi}, b_{pi}]$  表示节域对象关于特征 $C$

<sup>①</sup>基金项目: 安徽省自然科学基金年度重点项目(05021010)和安徽省“十一五”攻关项目(08010302166)资助。

\* 通讯作者(thbg@ahau.edu.cn)

作者简介: 徐笠(1984—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要从事植物逆境营养及重金属污染研究。E-mail: xuliforever@163.com

的量值范围;  $N_b$  为标准对象;  $v_{bi} = [a_{bi}, b_{bi}]$  表示标准对象  $N$  关于特征  $C$  的量值范围, 显然有  $v_{bi} \subset v_{pi}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。

### 1.3 距的计算

一个点  $x_0$  到区间  $x = [a, b]$  的距离定义为:

$$\rho(x_0, x) = |x_0 - 1/2(a+b)| - 1/2(b-a) \quad (4)$$

### 1.4 关联函数公式

$$K(x) = \begin{cases} -\rho(x, x_0) / |x_0| & x \in x_0 \\ \rho(x, x_0) / (\rho(x, x_1) - \rho(x, x_0)) & x \notin x_0 \end{cases} \quad (5)$$

### 1.5 权重的计算

由于各单项评价指标对环境综合体的贡献存在差异, 因此应有不同的权重。计算权重的方法很多, 这里采用反映土壤各种重金属元素相对含量大小的加权法。该计算权重的方法在一定程度上可以反映污染超标的轻重对因子权重的影响。该方法计算权重的一般公式为:

$$W_i = C_i / S_i / \sum_{i=1}^n C_i / S_i \quad (6)$$

式中:  $W_i$  为第  $i$  个因子的权重;  $C_i$  为该指标的实测值,  $S_i$  为该指标对应的各土壤重金属环境质量级别的标准值。依照上式计算出各参评重金属因子的权重, 写成矩阵形式为  $W = \{a, b, c, d\}$ , 以矩阵中的各个值代表各个评价因子的权重形成的矩阵, 称为权重模糊矩阵。

为更客观地体现各重金属对土壤污染的贡献, 本文对上述权重公式进行了相应修正, 充分考虑不同重金属的生物毒性水平, 即毒性响应系数  $T_i$  (toxic

response factor) 不同<sup>[11]</sup>, 得如下修正权重公式:

$$W_i^f = (T_i C_i / S_i) / \sum T_i C_i / S_i \quad (7)$$

本研究中的 Zn、Cr、Cu、Pb 的  $T_i$  值分别取 1、2、5、5<sup>[8]</sup>。

### 1.6 关联度和评价等级

关联函数  $K(x)$  的数值表示评价单元符合某标准范围的隶属程度。当  $0 \leq K(x) < 1$ , 表示被评价的土壤环境质量符合土壤环境质量的某级标准的要求, 数值越大, 越接近标准上限; 当  $-1.0 \leq K(x) < 0$  时, 表示被评价的土壤环境质量不符合土壤环境质量某级标准的要求, 但具备转化为符合该级标准的条件, 数值越大, 越容易转化; 计算采样点分别对于各级土壤的综合关联隶属程度公式如下:

$$K(X) = \sum_{i=1}^4 K_i(j, i) * W(i, j) \quad (j=1, 2, 3, 4; i = 1, 2, \dots, 24) \quad (8)$$

## 2 安徽省主要土壤重金属测定结果及其评价

### 2.1 重金属测定结果

供试土壤为安徽省皖南地区的黄红壤、江淮之间的黄褐土、淮北地区的砂姜黑土, 分布于安徽省的南部、中部和北部, pH 分别为酸性、中性和碱性。采用网格法和 GPS 双重定位, 以 50~100 m 为半径, 圆周放射性采样, 每个混合样有 8~10 个样点组成, 每种土壤采集 22 个土壤样品, 应用四分法, 取土 1 kg 左右, 经风干、磨碎、过筛后用作分析样。全 Cu、Zn、Pb、Cr 采用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消化, 原子吸收分光光度法测定。测定过程按规范要求进行质量控制, 以保证数据准确可靠。黄红壤、黄褐土和砂姜黑土 3 种土壤重金属测定结果如表 1。

表 1 黄红壤、黄褐土和砂姜黑土重金属含量的实测值 (mg/kg)

Table 1 Contents of heavy metal elements in yellow-red soil, yellow-cinnamon soil and shajiang black soil

采样点	黄红壤				黄褐土				砂姜黑土			
	Cu	Pb	Cr	Zn	Cu	Pb	Cr	Zn	Cu	Pb	Cr	Zn
1	14.03	21.94	52.30	67.60	18.88	31.89	51.53	218.62	25.26	22.70	55.10	59.69
2	16.07	22.96	52.81	140.31	21.17	23.98	47.45	94.90	24.23	24.49	50.00	65.31
3	15.56	22.19	55.61	107.91	15.31	24.49	40.05	116.58	22.19	20.41	53.83	51.02
4	14.29	23.98	61.99	75.51	18.11	23.72	49.49	143.11	33.16	25.26	58.93	73.98
5	15.31	23.98	50.77	75.77	19.90	26.28	53.32	150.77	24.74	22.70	53.57	57.91
6	22.70	24.74	50.26	84.44	22.19	31.63	58.16	46.68	21.43	21.43	44.13	50.26
7	15.31	32.40	59.44	46.94	20.15	31.63	46.68	163.78	23.72	20.92	53.32	53.83
8	17.86	26.02	65.56	93.88	20.41	34.18	43.11	222.19	21.68	20.66	47.19	45.92

9	14.29	22.45	55.87	126.28	22.96	41.07	56.12	286.22	18.11	18.88	39.29	43.37
续表 1												
10	16.84	25.51	56.12	96.94	18.11	33.93	38.01	63.78	16.33	18.62	40.82	36.99
11	61.22	26.53	57.14	119.13	15.05	22.96	38.78	141.07	17.09	16.58	38.27	36.99
12	18.11	27.04	50.77	85.71	17.09	23.72	41.07	92.60	17.60	16.84	39.29	40.82
13	13.52	21.17	58.67	33.16	22.45	27.76	51.79	197.45	16.58	16.33	40.05	40.82
14	13.27	29.08	57.14	263.27	23.72	26.79	53.57	415.56	19.90	19.39	46.94	40.31
15	15.56	31.89	60.71	122.96	23.72	35.20	52.55	388.78	21.17	19.90	40.82	59.69
16	19.39	27.30	68.62	101.28	23.47	26.79	44.39	106.38	24.23	22.45	51.79	64.80
17	18.62	26.02	58.16	267.09	85.46	136.99	201.79	264.80	37.24	25.26	62.76	72.96
18	14.29	25.26	59.18	117.60	66.33	95.66	62.50	358.67	29.34	22.96	59.95	68.11
19	13.78	22.45	47.96	82.65	54.34	48.98	53.32	143.88	25.51	23.21	49.23	74.49
20	14.54	22.19	51.28	94.90	25.77	36.22	54.59	120.15	31.38	23.21	62.24	67.09
21	16.58	21.68	58.16	75.77	21.17	26.79	53.57	391.58	21.94	20.15	43.11	50.26
22	14.29	20.66	50.77	97.45	22.19	32.14	44.90	280.87	19.90	21.17	45.92	46.68

2.2 评价标准

本文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）<sup>[12]</sup>。

表 2 土壤重金属污染程度分级标准 (mg/kg)  
Table 2 Grading standards of soil heavy metal pollution

等级	Cu	Pb	Cr	Zn
I	28.37	23.35	74.88	83.68
II	40.63	36.09	99.54	116.75
III	120.00	150.00	150.00	240.00
IV	280.00	350.00	350.00	560.00
V	400.00	500.00	500.00	800.00

注：I 表示清洁，II 表示尚清洁，III 表示清污染，IV 表示中污染，V 表示重污染。

2.3 土壤环境评价物元模型的建立

2.3.1 经典域和节域 本文在建立经典域时， $C_i$

的取值范围  $v_{pi}=[a_{pi}, b_{pi}]$  为  $v_{pi}=[0, \text{各重金属的 } i \text{ 级标准}]$ ,  $i = I, II, III, IV$ , 节域则为  $[0, \text{各重金属的 } V$

级标准]。经典域和节域如下：

经典域为：

$$R = \begin{bmatrix} \text{1级} & \text{Cu} & [0, 28.37] \\ & \text{Pb} & [0, 23.35] \\ & \text{Cr} & [0, 74.88] \\ & \text{Zn} & [0, 83.68] \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \text{2级} & \text{Cu} & [0, 40.63] \\ & \text{Pb} & [0, 36.09] \\ & \text{Cr} & [0, 99.54] \\ & \text{Zn} & [0, 116.75] \end{bmatrix}$$

$$R = \begin{bmatrix} \text{3级} & \text{Cu} & [0, 120] \\ & \text{Pb} & [0, 150] \\ & \text{Cr} & [0, 150] \\ & \text{Zn} & [0, 240] \end{bmatrix}, \quad R = \begin{bmatrix} \text{4级} & \text{Cu} & [0, 280] \\ & \text{Pb} & [0, 350] \\ & \text{Cr} & [0, 350] \\ & \text{Zn} & [0, 560] \end{bmatrix}$$

节域为：

$$R = \begin{bmatrix} \text{Cu} & [0, 400] \\ \text{Pb} & [0, 500] \\ \text{Cr} & [0, 500] \\ \text{Zn} & [0, 800] \end{bmatrix}$$

2.3.2 计算关联度 根据公式 (1) ~ (8) 计算出 3 种土壤每个采样点的关联度，结果如下：

表 3 黄红壤、黄褐土和砂姜黑土的关联度

Table 3 Correlation degrees in yellow-red soil, yellow-cinnamon soil and shajiang black soil

采样点	黄红壤				黄褐土				砂姜黑土			
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
1	0.2222	0.3956	0.2169	0.0930	-0.0634	0.1552	0.1934	0.1760	0.1058	0.3921	0.2391	0.1025
2	0.1148	0.3052	0.2561	0.1253	0.1029	0.3859	0.2362	0.1012	0.0864	0.3830	0.2291	0.0982
3	0.1577	0.3527	0.2600	0.1114	0.1153	0.3002	0.2398	0.1028	0.1979	0.4459	0.2234	0.0957
4	0.1461	0.3487	0.2521	0.1080	0.0904	0.3133	0.2489	0.1243	-0.0496	0.2677	0.2795	0.1198
5	0.1618	0.3712	0.2214	0.0949	0.0274	0.2897	0.2553	0.1321	0.1156	0.3994	0.2335	0.1001
6	0.0814	0.3784	0.2375	0.1018	0.0031	0.2795	0.2482	0.1064	0.1997	0.4378	0.1989	0.0853
7	0.0256	0.2273	0.2465	0.1056	-0.0407	0.2063	0.2419	0.1370	0.1669	0.4276	0.2273	0.0974

8	0.0652	0.3254	0.2768	0.1186	-0.0872	0.1261	0.1828	0.1752	0.2112	0.4470	0.2042	0.0875
续表 3												
9	0.1388	0.3125	0.2714	0.1208	-0.1645	0.0160	0.1575	0.2208	0.3041	0.4480	0.1738	0.0745
10	0.0916	0.3341	0.2538	0.1088	0.0089	0.2202	0.2140	0.0917	0.3239	0.4353	0.1708	0.0732
11	-0.2235	-0.0340	0.4139	0.1821	0.1302	0.2805	0.2289	0.1158	0.3640	0.4258	0.1640	0.0703
12	0.0767	0.3400	0.2353	0.1009	0.1473	0.3589	0.2156	0.0924	0.3542	0.4364	0.1693	0.0726
13	0.2423	0.3846	0.2230	0.0956	-0.0311	0.1557	0.2165	0.1602	0.3763	0.4219	0.1682	0.0721
14	-0.0639	0.1101	0.1332	0.2209	-0.1141	0.0987	0.0155	0.1636	0.2610	0.4680	0.1961	0.0841
15	-0.0200	0.1944	0.2926	0.1272	-0.1597	0.0379	0.0598	0.1790	0.2324	0.4587	0.1940	0.0831
16	0.0258	0.3094	0.2923	0.1253	0.0261	0.3160	0.2486	0.1065	0.1254	0.4065	0.2307	0.0989
17	-0.0253	0.1837	0.1328	0.2197	-0.4287	-0.3865	0.0652	0.3804	-0.0867	0.2139	0.3016	0.1292
18	0.0813	0.2875	0.2813	0.1206	-0.3844	-0.3160	0.2859	0.2672	0.0310	0.3360	0.2657	0.1139
19	0.1933	0.3738	0.2172	0.0931	-0.2929	-0.1559	0.3939	0.1786	0.0883	0.3803	0.2345	0.1005
20	0.1830	0.3691	0.2363	0.1013	-0.1024	0.1559	0.2955	0.1267	-0.0012	0.3077	0.2771	0.1188
21	0.1973	0.4001	0.2397	0.1027	-0.0872	0.1227	0.0279	0.1784	0.2210	0.4471	0.1968	0.0843
22	0.2168	0.3829	0.2365	0.1013	-0.0998	0.1187	0.1145	0.2209	0.2230	0.4470	0.1975	0.0846

注: I 表示清洁, II 表示尚清洁, III 表示轻污染, IV 表示中污染。

由表 3 可以看出: 黄红壤采样点 11、14、15、17 均受到了不同程度的污染, 采样点 11 达到了轻污染水平, 这主要由于采样点 11 中 Cu 的含量高 (61.22 mg/kg), 并且 Cu 的毒性响应系数  $T_i$  为 5, 采样点 14、17 虽然 Zn 的含量很高, 但由于其毒性响应系数  $T_i$  较小, 为 1, 所以仍为尚清洁水平; 黄褐土一共有 11 个采样点受到了不同程度的污染, 占采样点总数的 50%。其中采样点 17、18、19 达到轻污染水平, 主要是这 3 个点的 Cu、Pb 的含量很高所致, 而且 Cu 和 Pb 毒性响应系数  $T_i$  都为 5, 特别是采样点 17, Cu 和 Pb 的含量在所有的采样点中最高, 而剩下的所有的污染点都是因为 Zn 的含量较高所致。原因可能是因为黄褐土的部分土样采于合肥市郊, 受城市环境、汽车尾气、工业生产以及生活垃圾影响较大; 而砂姜黑土污染较轻, 只有 4、17、20 这 3 个点是尚清洁的水平, 没有一个点达到轻污染的水平。

### 3 结论

(1) 在本文的物元模型中, 每种重金属的实测值不能超过节域的最高值, 否则评价结果没有任何意义, 也就是说对于污染特别严重的地区, 不能用本法进行土壤环境质量评价。

(2) 本文在综合考虑了重金属的浓度和毒性双重因子的基础上, 提出了一种既能反映土壤中重金属的浓度超标情况, 又能反映污染物的毒性效应的评价方法, 当然本文也是探索和尝试, 目的是为了土壤重金属污染评价更为科学和合理。

(3) 通过评价结果可以看出: 3 种土壤中, 黄褐

土污染最为严重, 其次为黄红壤, 污染最轻的为砂姜黑土。

### 参考文献:

- [1] 罗强, 任永波, 郑传刚. 土壤重金属污染及其防治措施. 世界科技研究与发展, 2004, 26(2): 42-46
- [2] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖. 六合蒋家湾蔬菜基地重金属污染评价现状与评价. 土壤, 2004, 36(5): 557-560
- [3] 孔德工, 唐其展, 田忠孝, 方东, 栗学军. 南宁市蔬菜基地土壤重金属含量及评价. 土壤, 2004, 36(1): 21-24
- [4] 黄辉, 檀满枝, 周峰, 陈杰, 潘根兴. 南通市城市边缘带土壤重金属污染现状及评价. 土壤, 2007, 39(2): 286-290
- [5] 朱青, 周生路, 孙兆金, 王国梁. 两种模糊数学模型在土壤重金属综合污染评价中的应用与比较. 环境保护科学, 2004 (6): 53-57
- [6] 李祚永, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [7] 门广辉, 梁川. 农业土壤环境综合评价物元模型的建立及其应用. 水土保持通报, 2002, 22(4): 37-39
- [8] Lars Hakanson. An ecological risk index for aquation pollution control-a sedimentological approach. Water research, 1980, 14:975-1001
- [9] 殷淑华, 段红. 基于双权重因子的水质评价模糊综合模型. 中国农村水利水电, 2005(8): 25-26
- [10] 窦磊, 周永章, 王旭日, 杨志军, 彭先芝, 李秀娟. 针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型改进与应用. 土壤通报, 2007, 38(1): 101-105
- [11] 徐鸿志, 常江. 安徽省主要土壤重金属污染评价及其评价方法研究. 土壤通报, 2008, 39(2): 411-415

- [12] 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. 化工学报, 1993, 13(4): 691-693

## Assessment on Heavy Metal Pollution in Soils of AnHui Province by Matter Element Analysis Model

XU Li, CHANG Jiang, DU Yan, LIANG Jia-ni

( *College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China* )

**Abstract:** The assessment on heavy metal pollution is an important aspect in the research of heavy metal pollution in soil. This study improved the calculating method of matter element analysis model and the weighing of assessment factors, and put forward a matter element analysis based on two weighing factors, i.e., the concentration and toxicity of the pollutants. The assessment on heavy metal pollution in soils of Anhui province showed that the most polluted soil is yellow-cinnamon soil, followed by yellow-red soil and shajiang black soil in order.

**Key words:** Soil, Assessment of heavy metal pollution, Double weighing factors, Matter element analysis