

基于可拓物元法的土壤重金属污染程度评价^①

——以郑州黄河滩地为例

刘 蕾, 姜灵彦, 李庆召, 高军侠

(郑州航空工业管理学院环境工程研究所, 郑州 450002)

摘 要:土壤重金属污染程度具有不确定性, 本文尝试将可拓学中的物元法引入土壤重金属污染评价中, 构建了土壤环境质量评价的物元模型。以郑州黄河滩地为研究对象, 进行了土壤采样和测试, 并选用 Cd、Hg、As、Cu、Pb 和 Cr 共 6 项作为土壤重金属污染评价指标。结果表明: 黄河滩区土壤污染等级处于清洁和污染之间, 污染度较低。该评价方法可以科学、有效地处理监测数据, 评价结果较为可信; 能较科学地判定土壤重金属污染等级, 并对污染程度加以区分和量化, 可以消除评价过程中人为因素的影响, 提高评价精度, 是进行土壤重金属污染评价的理想方法。

关键词:黄河滩地; 土壤重金属污染; 物元分析; 环境质量评价

中图分类号: X142

土壤是人类赖以生存的主要自然资源之一, 也是人类生态环境的重要组成部分。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。造成土壤污染的重金属主要有 Hg、Cd、Pb、Cr 以及类金属 As, 还包括具有毒性的重金属 Zn、Cu、Co、Ni、Sn、V 等污染物。目前, 全世界平均每年排放 Hg 约 1.5 万 t、Cu 为 340 万 t、Pb 为 500 万 t、Mn 为 1 500 万 t、Ni 为 100 万 t, 造成了程度不同的土壤重金属污染。土壤重金属污染直接影响到土壤质别、水质状况、作物生长、农业产量、农产品品质等, 并通过食物链对人体健康造成危害。据我国农业部进行的全国污灌区调查, 在约 140 万 hm^2 的污水灌区中, 遭受重金属污染的土地面积占污水灌区面积的 64.8%, 其中轻度污染的占 46.7%, 中度污染的占 9.7%, 严重污染的占 8.4%。因此, 客观评价土壤重金属污染程度, 对土壤污染治理有非常重要的意义。

土壤重金属污染评价多采用单因子指数法、综合质量指数法、模糊综合评判法、灰色聚类法、改进灰色聚类法等传统评价方法。李田等人^[1]用单因子指数法对安徽省池州市植烟土壤的重金属污染程度进行评价, 但单因子污染指数法只能分别反映各个污染物的污染程度, 不能全面、综合地反映土壤的污染程度。王海邻和马莹^[2]用综合质量指数法对河南温县怀山药种植区土壤重金属污染程度进行评价, 虽该评价方

法有等价性, 便于对比, 计算简单, 但评价结果往往只是一个均值或数据累加, 会掩盖某些污染因子的跳跃性特征。朱海燕等^[3]利用模糊数学法对土壤重金属污染进行评价, 该方法考虑了土壤分级差异中的过渡性, 避免了评价结果的简单累加, 但存在丢失信息的现象; 袁媛等^[4]用灰色聚类法对土壤重金属进行评价, 该方法考虑多因子的综合影响, 也一定程度克服了模糊法中丢失信息的缺点, 但包括的污染范围不够宽, 当数据过于离散时仍会丢失信息。本文将可拓学中的物元模型应用于土壤重金属污染程度评价中, 以对上述评价方法进行优化, 使评价结果更加全面客观。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区郑州黄河滩地位于郑州市惠济区, 黄河南岸, 地理位置 $34^{\circ}45' \sim 34^{\circ}57' \text{N}$, $118^{\circ}29' \sim 118^{\circ}54' \text{E}$, 东西长 27 km, 面积大约 67 km^2 (图 1)。该区属大陆暖温带季风气候, 四季分明, 降水年际变化较大, 常年平均气温 14.2°C , 极端最低温 -17.9°C , 极端最高温度 43°C ; 由黄河水冲积而成, 地势平坦, 地质结构为疏松沉淀物, 地貌类型为微斜平地、洼地、河漫滩和人工堤; 土壤主要为潮土和褐土, 有机质含量丰富, 土壤疏松, 地下水位高, 适合多种植物的生长。该区由两类滩地组成: 已较少有洪水威胁的滩地和洪

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101473)和教育部人文社会科学研究一般项目(11yc630056)资助。

作者简介: 刘蕾(1979—), 女, 硕士, 副教授, 主要从事农业环境污染评价和生态环境研究。E-mail: liulei7913@126.com

水期被淹没、枯水季节出露的季节性淹没带。由于长期无序管理,采水挖沙、洪水泛滥加上农业耕作等行 为使滩地原有乡土植被几乎毁灭殆尽,黄河滩地的生态系统遭受严重破坏。植被减少、水土流失、生物多样性降低等威胁着黄河滩地生态系统的健康和郑州市的生态安全。黄河小浪底水利工程投入运行后,黄河滩地抵御洪水的能力大大加强,加上规划前已经开展大规模植树造林工程建设,为滩地资源开发提供了保障。黄河滩地将成为郑州市重要的滨水“绿廊”和城市文化游憩“廊道”,对郑州市的生态环境和社会环境的改善有重要意义^[5-6]。



图 1 郑州北郊黄河滩区地理位置示意图
Fig.1 Schematic diagram of Yellow River beach's location in northern suburb of Zhengzhou

1.2 取样和方法

以黄河滩地农田土壤为研究对象,采用棋盘式布点法,设 5 个采样点,每采样点取 10 个平行样,采样深度为 0~20 cm,样重 1.5 kg,共采集土壤样品 50 个。将每个采样点内的 10 份土壤分别加工,室内风干,用木锤击碎,过尼龙筛后再等重量缩分,然后组合成 1 个分析样品,得到组合分析样品 5 个。

分析方法:土壤样品在实验室内自然风干后去杂,玛瑙研钵中研磨后过 0.097 mm 尼龙筛备用。Cd: 王水-高氯酸消煮,石墨炉原子吸收法测定;Pb、Cu、Zn: 王水-高氯酸消煮,X-射线荧光光谱法测定;Cr: 高锰酸钾氧化,X-射线荧光光谱法测定;Hg: 微波消解-顺序注射氰化物发生-原子荧光光谱法测定。

主要测试仪器: M6 型原子吸收分光光度计, AFS-230E 型原子荧光光度计, ADVANT'XP 型 X 射线荧光光谱仪。

2 土壤重金属污染程度评价方法与标准

评价方法采用可拓物元法模型,标准采用中国土壤环境质量标准(GC15618-1995),各指标权重的确定采用 Haknson 归一法处理得到。

2.1 物元的基本概念

给定事物的名称 N , 该事物关于特征 C 的量值

为 V , 以有序三元组 $R=(N, C, X)$ 作为描述事物的基本元,简称物元。一个事物具有 N 个特征 C_1, C_2, \dots, C_n 和相应的特征量值 X_1, X_2, \dots, X_n 时,则用 n 维物元进行描述^[7-8]。

基于物元模型评价方法的基本思路是:首先确定各评价指标的备选集,再将待评指标物元的指标特征值代入各等级的集合中进行物元变换,计算待评物元与各评价等级集合的关联度,选取最大关联度中的最大值对应的等级作为待评物元的隶属等级。它的特点是将“是”与“非”定性描述转化为定量的描述,其核心是可拓域的确定,实现手段是可拓域中元素的物元变换。

2.2 物元评价的步骤

2.2.1 确定经典域、节域、待评物元 以单个要素综合评价为研究对象,建立其经典域、节域、待评物元模型及等级关联度函数,进行综合评价。

(1) 确定经典域:

$$R_{0j} = (N_{0j}, C_{0j}, X_{0ij}) = \begin{bmatrix} N_{0j} & C_1 & X_{01j} \\ & C_2 & X_{02j} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{0nj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{0j} & C_1 & \langle a_{01j}, b_{01j} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{02j}, b_{02j} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{0nj}, b_{0nj} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: N_{0j} 为研究对象,等级 $j=1,2,3, \dots, m$, m 为所划等级数,取 $m=3$; C_i 为研究对象的评价指标($i=1, 2, 3, \dots, n$); n 为指标个数;区间 a_{0ij}, b_{0ij} 为 N_{0j} 关于评价指标 C_i 所规定的量值范围,即各等级关于对象的评价指标所取的经典域。

(2) 确定节域:

$$R_p = (N_p, C_i, X_{pi}) = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & X_{p1} \\ & C_2 & X_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & C_2 & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: N_p 为研究对象等级的全体;区间 a_{pn}, b_{pn} 为关于评价指标 C_i 所有取值范围,即 N_p 的节域。

(3) 确定待评物元:把监测或统计得到的各分项指标值用物元表示,称为该对象的待评物元。

$$R_0 = (N_0, C_i, X_{0i}) = \begin{bmatrix} N_0 & C_1 & X_{01} \\ & C_2 & X_{02} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{0n} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N_0 为待评对象; X_{0i} 为关于指标 C_i 所取的值, 即待评对象的实际指标值。

2.2.2 计算单指标关联度 单要素综合评价对象 N_0 的第 i 个评价指标关于等级 j 的关联度为:

$$K_j(X_{0i}) = \begin{cases} \frac{\rho(X_{0i}, X_{0ij})}{\Delta\rho} \dots\dots\dots (\Delta\rho \neq 0) \\ -\rho(X_{0i}, X_{0ij}) - 1 \dots\dots\dots (\Delta\rho = 0) \end{cases} \quad (4)$$

其中,

$$\rho(X_{0i}, X_{0ij}) = \left| X_{0i} - \frac{a_{0ij} + b_{0ij}}{2} \right| - \frac{b_{0ij} - a_{0ij}}{2} \quad (5)$$

$$\rho(X_{0i}, X_{pi}) = \left| X_{0i} - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| - \frac{b_{pi} - a_{pi}}{2} \quad (6)$$

$$\Delta\rho = \rho(X_{0i}, X_{pi}) - \rho(X_{0i}, X_{0ij}) \quad (7)$$

2.2.3 计算多指标综合关联度 对于单个要素中的每个评价指标 C_i , 如取权系数为 W_i , 则单个要素待评对象 N_0 关于等级 j 的关联度为:

$$K_j(N_0) = \sum_{i=1}^n W_i K_j(X_{0i}) \quad (8)$$

2.2.4 等级评定 如果

$$K_j(N_0) = \max_j(K_j(N_0)) \quad (9)$$

则单个要素评价对象 N_0 属于等级 j_0 。令,

$$\bar{K}_j(N_0) = \frac{K_j(N_0) - \min_j(K_j(N_0))}{\max_j(K_j(N_0)) - \min_j(K_j(N_0))} \quad (10)$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j \bar{K}_j(N_0)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j(N_0)} \quad (11)$$

则称 j^* 为 N_0 所属等级的特征值, 表示待评对象属于等级 j_0 的程度。

2.3 评价标准和权重

依据国家环保局颁布的《土壤环境质量标准》(GB156182-1995), 结合黄河滩地土壤实际情况, 土壤重金属污染程度评价标准如表 1^[9-10]。I 级标准为清洁, 即保护区自然生态、维持自然背景的土壤质量的限制值; II 级标准轻度污染, 即为保障农业生产, 维护人体健康的土壤限制值; III 级标准为重度污染, 即保障农林生产和植物正常生长的土壤临界值。

考虑重金属的生态毒理特性, 按照 Haknson 的

计算方法, 将各种重金属毒性系数归一化处理得到各种重金属权重评价指标^[11], 如表 2。

表 1 黄河滩区土壤环境质量标准(mg/kg)

重金属	I 级	II 级	III 级
Cd	0.3	0.6	1
Hg	0.3	0.5	1
As	40	30	25
Cu	50	100	100
Pb	250	300	350
Cr	150	200	250

表 2 土壤中重金属毒性系数和评价权重

重金属	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Cr
毒性系数	21	25	13	10	10	8
评价权重	0.24	0.29	0.15	0.11	0.11	0.09

3 土壤重金属污染程度评价

3.1 实验结果

选用 Cd、Hg、As、Cu、Pb 和 Cr 共 6 项重金属指标作为评价因子, 采用可拓物元模型对郑州黄河滩区 5 个不同村庄典型地块的土壤重金属综合污染进行评价。土样中重金属含量检测结果见表 3。

表 3 黄河滩区土壤重金属污染实验数据(mg/kg)

项目	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Cr
采样点 1	0.059	0.021	4.38	98.6	20.6	100.2
采样点 2	0.063	0.033	5.36	65.5	30.2	69.5
采样点 3	0.067	0.035	5.11	106.3	28.5	77.3
采样点 4	0.082	0.039	6.25	96.3	41.2	82.6
采样点 5	0.052	0.054	5.89	109.6	38.5	90.6
平均值	0.065	0.036	5.40	95.3	31.8	84.0

3.2 评价过程

依据上述标准和实验结果确定土壤重金属污染评价的经典域、节域和待评物元, 计算综合关联度和评价等级。

经典域物元: 按照 3 个不同等级, 将重金属污染程度的经典域分别表示为矩阵 R_{01} 、 R_{02} 、 R_{03} :

$$R_{01} = \begin{bmatrix} N_{01} & C_1 & \langle 0, 0.3 \rangle \\ & C_2 & \langle 0, 0.3 \rangle \\ & C_3 & \langle 30, 40 \rangle \\ & C_4 & \langle 0, 50 \rangle \\ & C_5 & \langle 0, 250 \rangle \\ & C_6 & \langle 0, 150 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{02} = \begin{bmatrix} N_{02} & C_1 & \langle 0.3, 0.6 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.3, 0.5 \rangle \\ & C_3 & \langle 25, 30 \rangle \\ & C_4 & \langle 50, 100 \rangle \\ & C_5 & \langle 250, 300 \rangle \\ & C_6 & \langle 150, 200 \rangle \end{bmatrix}$$

$$R_{03} = \begin{bmatrix} N_{03} & C_1 & \langle 0.6, 1 \rangle \\ & C_2 & \langle 0.5, 1 \rangle \\ & C_3 & \langle 0, 25 \rangle \\ & C_4 & \langle 50, 100 \rangle \\ & C_5 & \langle 300, 350 \rangle \\ & C_6 & \langle 200, 250 \rangle \end{bmatrix}$$

节域物元：

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & C_1 & \langle 0, 1 \rangle \\ & C_2 & \langle 0, 1 \rangle \\ & C_3 & \langle 0, 30 \rangle \\ & C_4 & \langle 0, 100 \rangle \\ & C_5 & \langle 0, 350 \rangle \\ & C_6 & \langle 0, 250 \rangle \end{bmatrix}$$

待评物元：

$$R_n = \begin{bmatrix} \text{土壤环境}N & C_1 & 0.065 \\ & C_2 & 0.036 \\ & C_3 & 5.40 \\ & C_4 & 95.3 \\ & C_5 & 31.8 \\ & C_6 & 84.0 \end{bmatrix}$$

综合关联度和评价等级：分别用式(4)~(8)计算待评物元关于各等级的单指标关联度和多指标综合关联度，计算结果见表 4。

$$\rho(x_{01}, x_{011}) = \left| 0.065 - \frac{0+0.3}{2} \right| - \frac{0.3-0}{2} = -0.065$$

$$\rho(x_{01}, x_{p1}) = \left| 0.065 - \frac{0+1}{2} \right| - \frac{1-0}{2} = -0.065$$

$$\Delta\rho = 0$$

$$K_1(x_{01}) = -\rho(x_{0i}, x_{0ij}) - 1 = -0.935$$

表 4 土壤重金属污染指标关联度

Table 4 Indicator correlation of soil environmental quality

项目	Cd	Hg	As	Cu	Pb	Cr	综合关联度
K_{1i}	-0.935	-0.964	-0.820	-0.906	30.800	3.667	2.99
K_{2i}	-0.783	-0.880	-0.784	3.7	-0.873	-0.440	-0.29
K_{3i}	-0.892	-0.928	4.1	3.7	-0.894	-0.580	0.39

土壤环境的影响因子中，最小值是-0.29，最大值是 2.99，所以

$$\bar{K}_1 = \frac{2.99 - (-0.29)}{2.99 - (-0.29)} = \frac{3.28}{3.28} = 1$$

$$\bar{K}_2 = \frac{-0.29 - (-0.29)}{2.99 - (-0.29)} = \frac{0}{3.28} = 0$$

$$\bar{K}_3 = \frac{0.39 - (-0.29)}{2.99 - (-0.29)} = \frac{0.68}{3.28} = 0.207$$

$$j^* = \frac{\sum_{j=1}^m j\bar{K}_j(N_0)}{\sum_{j=1}^m \bar{K}_j(N_0)} = \frac{1 \times 1 + 2 \times 0 + 3 \times 0.207}{1 + 0 + 0.207} = \frac{1.621}{1.207} = 1.342$$

根据此计算结果得出，郑州市黄河滩区土壤重金属污染综合评级结果为 I 级清洁，具体等级值为 1.342，即精确的等级是介于清洁和轻度污染之间，更偏重于清洁。

4 结论

(1) 应用物元可拓法进行土壤重金属污染评价，不仅可以对土壤重金属污染状况进行整体评价，而且可对重金属因子进行单独评价，这样可以了解各污染因子对土壤重金属总体污染的贡献率，从而针对性地进行净化、治理和改良。

(2) 可拓物元法将现实问题转化为相容和不相容性问题，可拓集合的关联函数把模糊数学的逻辑值从 [0, 1] 闭区间拓展到(-1, +1)整个实数轴，可综合各种因素的全部信息。本研究结果表明，可拓物元法适合土壤多因子污染的评价。

(3) 该研究的评价结果与事实相符，比其他评价方法得出的综合结果更精确、更量化。但可拓物元法毕竟是一种比较新的方法，目前可供选择的关联函数较少，只建立了实数域上的函数、二阶关联函数和 n 阶关联函数的基本形式，以后还有待改进。

参考文献：

[1] 李田, 李德成, 曹瑗, 张婧, 张新, 祖朝龙, 唐经祥, 徐经年, 吴新德, 凌冰. 安徽省池州市植烟土壤的重金属污染程度及污染风险评价[J]. 土壤, 2011, 43(4): 674-676

[2] 王海邻, 马莹. 温县怀山药种植区土壤重金属含量及污染评价[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2011, 30(4): 485-488

[3] 朱海燕, 刘忠德, 周勇, 钟章成. 江汉平原后湖农场农用地土壤环境质量评价[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2005, 2(5): 341-345

[4] 袁媛, 马建华. 土壤重金属污染灰色聚类法评价[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2009, 19(2): 9-12

- [5] 乔丽芳, 马杰, 徐春林, 张毅川. 郑州黄河滩地生态重建研究[J]. 生态科学, 2006, 5(6): 537-541
- [6] 李玲, 冯新伟, 路捷. 郑州市城市化进程中土壤环境质量评价[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(5): 99-103
- [7] Swartjes FA, Dirven-Van Breemen EM, Otte PF, Beelen P van, Rikken MGJ, Tuinstra J, Spijker J, Lijzen. Human Health Risks due to Consumption of Vegetables from Contaminated Sites: Towards a Protocol for Site-specific Assessment[R]. RIVM report711701040, 2007
- [8] 赵其国, 史学正. 土壤资源概论[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 93-117
- [9] 王国庆, 骆永明, 宋静, 赵其国, 夏家淇. 土壤环境质量指导值与标准研究 I—国际动态及中国的修订考虑[J]. 土壤学报, 2005, 42(4): 666-673
- [10] 夏家淇, 骆永明. 我国土壤环境质量研究几个值得探讨的问题[J]. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1): 1-6
- [11] Kalis EJJ, Temminghoff EJM, Visser A, van Riemsdijk WH. Metal uptake by *Lolium Perenne* in contaminated soils using a four-step approach[J]. Environ. Toxicol. Chem., 2006, 26(2): 335-345

Evaluation of Soil Heavy Metal Pollution Based on Matter-element Method

—— A Case Study of Yellow River Beach in Northern Suburb of Zhengzhou

LIU Lei, JIANG Ling-yan, LI Qing-zhao, GAO Jun-xia

(Institute of Resources and Environment, Zhengzhou Institute of Aeronautical Industry Management, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The degree of soil heavy metal pollution has uncertainty. This paper attempted to establish soil evaluation quality model based on the matter-element theory. The Yellow River beach of Zhengzhou was taken as the study region, soil samples were collected and six heavy metals of Cd, Hg, As, Cu, Pb and Cr were measured for evaluation. The results showed that: soil pollution levels in the Yellow River beach were between the clean and pollution, which suggested the pollution was low. The evaluation method could deal with monitoring data more scientifically and effectively and the evaluation of the results was more credible. It could also scientifically determine the level of heavy metal pollution of soil, distinguish and quantify the degree of pollution and avoid the subjectivity in evaluation process. Therefore, the evaluation method based on the extension matter-element theory is an efficient new method in assessing soil heavy metal pollution.

Key words: Yellow River beach, Soil heavy metal pollution, Matter-element analysis, Environmental quality