

基于双权重因子模糊综合模型的 金昌市土壤重金属污染评价

张志斌¹, 王 耀¹, 蒲瑞丰²

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070;
2. 甘肃省计量研究院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 以西部矿业城市金昌市为对象, 测定不同用地类型的土壤中重金属的含量, 运用双权重因子模糊综合模型对土壤污染进行评价。结果表明, 居住用地为Ⅲ级轻污染, 公共设施用地为Ⅳ级中污染, 工业用地、道路广场用地、绿地以及农田为Ⅴ级重污染; 在各用地类型中镍和钴的污染程度较高。长期的冶炼生产、沙尘暴、水土流失及酸雨等, 更加重了重金属的污染程度, 土壤重金属污染已成为制约生态环境健康的瓶颈, 采取合理防治措施迫在眉睫。

关键词: 城市土壤; 重金属污染; 双权重因子; 金昌市

中图分类号: X 53; X 144 文献标识码: A 文章编号: 1001-988 X (2009)02-0089-04

Evaluation for the heavy metal pollution in soils of Jinchang City based on double weighing factors of fuzzy mathematical model

ZHANG Zhi-bin¹, WANG Ke¹, PU Rui-feng²

(1. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
2. Gansu Measure Graduate School, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This paper studies the mining city—Jinchang in the western area of China. The method of fuzzy mathematics is used to evaluate the characteristics of heavy metal pollution in urban soil based on different land-use types. The results show that, the ranking quality for soils from the habitation are Ⅲ, the public infrastructure land are Ⅳ, the industry land, the roads and squares land, the agricultural land and the city greenbelt are Ⅴ, Ni and Co are highly contaminative. Synergistic effect of sand and dust storm, soil and water loss and acid rain strengthen the pollution degree, the serious pollution is the “bottle-neck” problem in the sustainable ecological development, so that it is high time to take measures to prevent heavy metal pollution.

Key words: urban soil; heavy metal pullution; double weighing factor; Jinchang City

城市土壤是重金属污染物的源和汇, 直接影响到城市环境质量和城市人群健康^[1]。重金属是土壤环境中具有潜在危害的污染物, 易富集, 不易淋滤、分解, 积累初期不易觉察, 毒害作用表现明显时已难以消除, 故有“化学定时炸弹”的说法^[2]。

20世纪90年代城市土壤研究逐渐成为国际土壤学研究的新领域。在城市土壤重金属污染风险评估方面, 西班牙的Nadal通过建立评价模型发现工业地区甜菜中Cr的积累与摄入有可能导致癌症发病率增加^[3]; 英国的Yong等提出的线性数学模

收稿日期: 2008-05-22; 修改稿收到日期: 2009-01-06

基金项目: 国家社会科学基金西部项目(04XJL003); 西北师范大学学生学术科研资助项目

作者简介: 张志斌(1965—), 男, 甘肃会宁人, 教授, 博士, 硕士研究生导师。主要研究方向为城市与区域发展规划。

E-mail: zbzhang@nwnu.edu.cn

型可根据人体对特定蔬菜的摄入量来计算土壤污染的健康风险^[4]。我国部分学者开展了香港^[5]、南京^[6,7]、广州^[8]、北京^[9]等城市的重金属含量和化学形态测定。已有的城市土壤重金属污染研究主要集中于东南沿海发达地区，而对存在严重土壤重金属污染、生态环境极其脆弱的西北内陆矿业城市关注较少。有鉴于此，笔者以我国镍都——甘肃省金昌市为研究对象，揭示不同土地利用类型的土壤重金属污染特征，并采用双权重因子模糊综合模型进行污染评价，以期对我国西北矿区城市受污染土壤评估的研究有一定的参考意义。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

金昌市位于河西走廊东段，四周山原丘漠包围，扼河西走廊之“蜂腰”。该市既是甘肃省重点商品粮生产基地，又是全国镍工业生产基地。2007年城镇人口27.06万人，乡村人口19.96万人，城镇化率达57.55%。作为传统农业区基础上建设的新兴资源型城市，先矿后城的建市模式导致城市布局不合理，工业区与住宅区间无隔离带，尾矿库和选冶工业区建在上风向，长期的冶炼活动，加上沙尘暴、土地荒漠化、酸雨和水土流失等影响，导致建成区20 hm²的土壤受到污染，占建成区面积的74%，存在较高环境风险^[10]。

1.2 用地类型划分、布点和采样

参照《城市用地分类与规划建设用地标准》(GBJ 137—90)，结合重金属污染特征，将金昌市建设用地划分为居住用地、公共设施用地、工业用地、道路广场用地、绿地、农田等6种类型。

以冶炼厂为中心，在半径为3 km的范围内进行放射状布点采样。在各个用地类型中共选择50余个采样点。采样层次为3~5 cm，每个土壤混合样品均采用“梅花点”法设分点若干个，取混合土样每份1 kg。土壤混合样去除石头和植物的根、叶等，放在通风处自然风干，碾磨，过100目，保存待测。

1.3 土壤样品测定方法

对镍、钴、铜用火焰原子吸收法，镉用石墨炉原子吸收法，砷用原子荧光法进行测定。用污染农田土壤成分分析标准物质(GBW 08303)进行测量过程的质量控制，测量方法采用环境监测分析方法^[11]。

1.4 土壤质量评价方法

1.4.1 确定数学模型^[12,13] 已知评价因子集 $I = \{i_1, i_2, \dots, i_n\}$ ，评价集 $J = \{j_1, j_2, \dots, j_m\}$ ，设 A 为评价因子 I 在评价集 J 上的隶属度所构成的关系模糊矩阵，简记为

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nm} \end{bmatrix}.$$

R 为评价集 J 对因子的权重分配构成的权重向量，则有 $R = (r_1, r_2, \dots, r_n)$ ， r_i 为第 i 种污染因子所对应的权重。

据矩阵运算法则， A 确定了一个模糊映射，把评价因子集 I 上的权重向量 R 映射到评价集 J ，得模糊子集 B ，即 $B = A \cdot R$ 。据最大隶属度原则确定评价等级。

1.4.2 评价单项污染因子 S_i 为隶属度函数的拐点，用分段直线函数模拟，得隶属度函数，其中 $S_i (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 为污染因子 i 在 j 级上的指标；用 X_i 表示污染因子实测值。

当 $j=1$ 时，

$$A_{i1} = \begin{cases} 1, & X_i \leq S_{i1}, \\ \frac{S_{i2} - X_i}{S_{i2} - S_{i1}}, & S_{i1} < X_i < S_{i2}, \\ 0, & X_i \geq S_{i2}; \end{cases}$$

当 $j=m$ 时，

$$A_{im} = \begin{cases} 0, & X_i \leq S_{i(m-1)}, \\ \frac{X_i - S_{i(m-1)}}{S_{im} - S_{i(m-1)}}, & S_{i(m-1)} < X_i < S_{im}, \\ 1, & X_i \geq S_{im}; \end{cases}$$

当 $j=2, 3, \dots, m-1$ 时，

$$A_{ij} = \begin{cases} 0, & X_i \leq S_{i(j-1)} \text{ 或 } X_i \geq S_{i(j+1)}, \\ \frac{X_i - S_{i(j-1)}}{S_{ij} - S_{i(j-1)}}, & S_{i(j-1)} < X_i < S_{ij}, \\ \frac{S_{i(j+1)} - X_i}{S_{i(j+1)} - S_{ij}}, & S_{ij} < X_i < S_{i(j+1)}, \\ 1, & X_i = S_{ij}. \end{cases}$$

1.4.3 确定权重向量^[14,15] 以 C_i, r_i 表示因子权重值， f_i 为因子毒性指数，将污染物浓度和毒性指数加权叠加，作归一化处理，得权重公式：

$$C_i = \left(X_i / \sum_{j=1}^m S_{ij} \right) / \left(\sum_{i=1}^n X_i / \sum_{j=1}^m S_{ij} \right),$$

$$r_i = \frac{C_i}{f_i} / \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{f_i}.$$

2 评价与分析

2.1 选定评价因子

从金昌市自然降尘和土壤样品实验结果中选取典型的重金属镍、钴、铜、镉和砷作为评价因子集(表1)。

表1 评价区土壤环境中重金属含量的实测平均值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Tab 1 The average contents of heavy metal elements in soil environment

评价样品/代码	Ni	Co	Cu	Cd	As
居住用地/R	180.000	55.900	52.100	0.163	10.100
公共设施用地/C	295.000	46.000	34.000	0.105	20.300
工业用地/M	384.000	62.900	43.500	0.220	23.600
道路广场用地/S	370.000	54.000	54.000	0.164	21.000
绿地/G	780.000	91.400	74.100	0.365	24.000
农田/E	1 590.000	142.600	179.000	0.260	27.500
±s	511.000	70.800	67.100	0.211	22.500
±1s	±519.000	±36.000	±53.200	±0.101	±7.400

2.2 制定评价标准

直接采用国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)对区域土壤进行评价会产生偏差^[16], 故 C_i 的标准参照甘肃省土壤重金属元素背景值^[17]和临界含量; 仅考虑重金属浓度超标会忽略其对生物体的毒性作用^[15], 故 r_i 的标准参照Hakanson的重金属毒性响应系数^[18]所确定的毒性指数(表2)。

表2 土壤重金属污染程度分级标准及生物毒性指数($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Tab 2 Standards for grading of the soil heavy metal pollution and the biotoxicity index of heavy metal

污染因子	清洁	尚清洁	轻污染	中污染	重污染	毒性指数
	I	II	III	IV	V	
Ni	35.200	60.400	160.000	240.000	400.000	5.000
Co	12.600	30.000	40.000	80.000	120.000	5.000
Cu	24.100	40.600	120.000	280.000	400.000	4.000
Cd	0.116	0.251	0.600	1.400	2.000	2.000
As	12.600	19.000	24.000	36.000	60.000	3.000

2.3 单项污染因子评价

设土壤环境质量 $J = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, 分别代表(清洁, 尚清洁, 轻污染, 中污染, 重污染)。据表1和表2的数据, 得各用地类型的关系模糊矩阵:

$$A_R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.7500 & 0.2500 & 0 \\ 0 & 0 & 0.6025 & 0.3975 & 0 \\ 0 & 0.8552 & 0.1448 & 0 & 0 \\ 0.6519 & 0.3481 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.6563 & 0.3437 \\ 0 & 0 & 0.8500 & 0.1500 & 0 \\ 0.4000 & 0.6000 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.7400 & 0.2600 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.1000 & 0.9000 \\ 0 & 0 & 0.4275 & 0.5725 & 0 \\ 0 & 0.9635 & 0.0365 & 0 & 0 \\ 0.2296 & 0.7704 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0800 & 0.9200 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.1875 & 0.8125 \\ 0 & 0 & 0.6500 & 0.3500 & 0 \\ 0 & 0.8312 & 0.1688 & 0 & 0 \\ 0.6444 & 0.3556 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6000 & 0.4000 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.7150 & 0.2850 \\ 0 & 0.5781 & 0.4219 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6734 & 0.3266 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_E = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0.6313 & 0.3687 & 0 \\ 0 & 0.9742 & 0.0258 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7083 & 0.2917 & 0 \end{bmatrix}.$$

由模糊关系矩阵可知, 在重金属的空间分布上, 镍在工业用地、农田、绿地和道路广场用地中显著富集, 达到V级重污染, 隶属度均大于0.8, 居住用地达到Ⅲ级轻污染, 公共设施用地达到Ⅳ级中污染; 钴在农田中显著富集, 达到V级重污染, 隶属度为1, 工业用地和绿地中达到Ⅳ级中污染, 其中工业用地隶属度仅为57.25%, 有较大的治理空间, 居住用地和公共设施用地以及道路广场用地为Ⅲ级轻污染; 铜在农田中达到Ⅲ级轻污染, 隶属度为85.52%, 其余用地类型中为Ⅱ级尚清洁, 污染不明显; 镉在居住用地、公共设施用地和道路广场用地中达到I级清洁, 工业用地、绿地和农田中达到Ⅱ级尚清洁, 污染不明显; 砷在居住用地中达到I级清洁, 公共设施用地、道路广场用地中为Ⅱ级尚清洁, 工业用地、绿地和农田中达到Ⅲ级轻污染, 隶属度分别为92%, 100%和70.83%。

由于金昌市是我国最大的镍钴生产基地^[19], 长期的冶炼活动导致土壤中镍和钴的污染程度偏

高, 砷的浓度也相对较高^[20]. 重金属主要通过自然降尘途径迁移^[21], 其次为地表径流。城市用地空间布局不合理, 导致市内和郊区遭受严重的重金属污染, 如农田的采样点高崖子村, 位于冶炼厂下风向, 承受污水灌溉和大气烟尘的双重污染。居住用地与工业用地之间无明显隔离带, 尾砂库和选冶工业区位于其上风向, 重金属污染对人群(尤其是儿童)仍存在极大健康威胁^[20].

2.4 污染因子权重值评价

结合表1和表2, 得污染因子权重值(表3). 权重值越大, 重金属在各自质量等级污染超标叠加毒性作用的程度越大.

表3 各参评因子的权重值

Tab 3 The weighing of every assessment factors

用地类型	Ni	Co	Cu	Cd	As
居住用地	0.296 2	0.291 6	0.111 0	0.137 5	0.163 7
公共设施用地	0.399 5	0.197 4	0.059 6	0.072 9	0.270 7
工业用地	0.389 9	0.202 4	0.057 2	0.114 5	0.236 0
道路广场用地	0.410 2	0.189 8	0.077 5	0.093 2	0.229 3
绿地	0.490 9	0.182 3	0.060 4	0.117 8	0.148 7
农田	0.593 8	0.168 8	0.086 6	0.049 8	0.101 1

2.5 模糊综合评价结果

将隶属度矩阵A和权重向量R(表3)代入B=A·R, 即可得各用地类型对评价等级的隶属度B, 根据最大隶属度原则确定该用地类型所属的污染等级(表4).

表4 模糊综合评价结果

Tab 4 The results of fuzzy comprehensive evaluation

用地类型	I	II	III	IV	V	评价等级
居住用地	0.253 3	0.142 8	0.413 9	0.190 0	0.000 0	Ⅲ
公共设施用地	0.096 7	0.236 0	0.238 2	0.291 8	0.137 3	Ⅳ
工业用地	0.026 3	0.162 2	0.305 7	0.154 9	0.350 9	Ⅴ
道路广场用地	0.060 1	0.235 1	0.228 1	0.143 3	0.333 3	Ⅴ
绿地	0.000 0	0.114 2	0.212 7	0.130 3	0.542 8	Ⅴ
农田	0.000 0	0.048 5	0.127 5	0.061 4	0.762 6	Ⅴ

由表3和表4可知, 6种土地利用类型中, 居住用地土壤综合质量为Ⅲ级轻污染, 隶属度为0.413 9, 其中镍和钴的权重最大, 分别为0.296 2和0.291 6, 公共设施用地综合质量达到了Ⅳ级中污染, 隶属度为0.291 8, 治理空间较大, 其中镍和砷的权重贡献较大, 分别为0.399 5和0.270 7; 工业用地污染达到Ⅴ级重污染, 其中镍、砷和钴的权重贡献最大, 分别为0.389 9, 0.236 0和0.202 4, 由于工业用地是其他用地重金属污染的来源^[20], 应对该用地重点治理; 道路广场用地综合环境质量

为Ⅴ级重污染, 其中镍和砷的权重贡献最大, 为0.410 2和0.229 3, 钴次之为0.189 8. 绿地和农田的土壤环境质量为Ⅴ级重污染, 镍和钴的权重贡献最大.

3 结语

随着金昌市经济结构的逐步转型, 建立生态型城市是其必然选择. 城市建设用地中严重的土壤重金属污染, 已成为其生态环境健康发展的瓶颈, 沙尘暴、水土流失以及酸雨等协同作用, 更加重了重金属污染程度, 因此采取合理防治措施已迫在眉睫.

参考文献:

- [1] DE KIMPE C R, MOREL J - L. Urban soil management: a growing concern[J]. *Soil Science*, 2001, **165**(1): 31-40.
- [2] 李天杰. 土壤环境学: 土壤环境污染防治与土壤生态保护[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996: 102-106.
- [3] NADAL M, SCHUHMAEHER M, DOMINGO J L. Metal pollution of soils and vegetation in an area with petrochemical industry[J]. *The Science of the Total Environment*, 2004, **321**(1-3): 59-69.
- [4] 黄勇, 郭庆荣, 任海, 等. 城市土壤重金属污染研究综述[J]. 热带地理, 2005, **25**(1): 14-18.
- [5] 陈同斌, 黄铭洪, 黄焕忠, 等. 香港土壤中的重金属含量及其污染现状[J]. 地理学报, 1997, **52**(3): 228-236.
- [6] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤Pb的含量及其化学形态[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(2): 156-160.
- [7] 吴新民, 潘根兴, 李恋卿. 南京市不同功能区土壤中铅的污染特征[J]. 环境与健康杂志, 2004, **21**(5): 291-293.
- [8] 管东生, 陈玉娟, 阮国标. 广州城市及近郊土壤重金属含量特征及人类活动的影响[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2001, **40**(4): 93-96.
- [9] 苏明会. 北京市区不同年代尘土中重金属元素的变化特征及污染源追踪研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.
- [10] 金昌市统计局. 2007年金昌市国民经济和社会发展统计公报(2008)[EB/OL]. [2008-03-20] <http://www.gs.stats.gov.cn/doc>ShowArticle.asp?ArticleID=2881>.

(下转第98页)

- [6] 李玲, 李娟文. 湖北省旅游中心地空间结构系统优化研究[J]. 经济地理, 2005, 25(5): 740-744.
- [7] 龙丽民, 连进元, 袁金国, 等. 石家庄市旅游中心城市构建及旅游资源整合的探讨[J]. 河北师范大学学报: 自然科学版, 2004, 28(4): 419-423.
- [8] 刘名俭. 旅游目的地空间结构体系构建研究——以长江三峡为例[J]. 经济地理, 2005, 25(4): 581-584.
- [9] 杨新军. 旅游目的地区域及空间结构研究——以西安为例[J]. 地理科学, 2004, 5(6): 620-626.
- [10] 赵现红, 吴丽霞, 马耀峰. 西安市旅游资源空间结构研究[J]. 西安师范大学学报: 自然科学版, 2005, 33(1): 115-119.
- [11] 国家统计局. 中国区域统计年鉴 2005[M]. 北京: 中国统计出版社, 2005: 399.
- [12] 桑广书. 陕西旅游网络通道体系构建[J]. 干旱区资源与环境, 2003, 17(4): 48-52.
- [13] 赵正宁. 2006 陕西旅游业[M]. 西安: 陕西省旅游局, 2007: 4-5.
- [14] 徐建华. 计量地理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 226.
- [15] 杜忠潮. 咸阳旅游资源核心竞争力及整合开发研究[J]. 咸阳师范学院学报, 2006, 21(1): 17-21.
- [16] 童力冲. 宝鸡市旅游业发展问题与对策初探[J]. 宝鸡文理学院院报: 自然科学版, 2006, 22(2): 67-70.
- [17] 唐亦功. 西安及毗邻的地区旅游线路的配置及规划[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2002, 32(2): 185-188.

(责任编辑 惠松骐)

(上接第 92 页)

- [11] 《环境监测分析方法》编写组. 环境监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1986: 278-300.
- [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[J]. 化工环保, 1993, 13(4): 235-238.
- [13] 李相虎, 贾新颜, 黄天明. 干旱区水环境质量评价的模糊数学法[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(8): 163-167.
- [14] 窦磊, 周永章, 王旭日, 等. 针对土壤重金属污染评价的模糊数学模型的改进和应用[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 101-105.
- [15] 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.
- [16] 高怀友, 赵玉杰, 师荣光, 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,
- [17] 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: 17-28.
- [18] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. Water Res, 1980, 14(8): 975-1001.
- [19] 汤绪. 西部资源型城市转型期城市定位及空间布局初探——以金昌市为例[J]. 城市规划, 2003, 27(11): 73-75.
- [20] 廖晓勇, 陈同斌, 武斌, 等. 典型矿业城市的土壤重金属分布特征与复合污染评价——以“镍都”金昌市为例[J]. 地理研究, 2006, 25(5): 843-852.
- [21] 赵雅芳. 金昌市环境中铜的来源调查分析[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2005, 15(3): 70-73.

(责任编辑 惠松骐)