

陕北地区土壤重金属污染特征及生态风险评价

王 莎, 马俊杰, 赵 丹, 雷品婷

(西北大学城市与环境学院, 陕西 西安 710127)

摘 要:以陕西省靖边县表层土壤(0~20 cm)为研究对象,应用 SPSS 19.0 软件分析土壤样品中重金属 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb、Hg 等 7 种重金属的含量及来源,运用 Hakanson 潜在生态危害指数法评价研究区土壤重金属潜在生态危害程度。结果表明,研究区土壤重金属平均含量均低于《土壤环境质量标准》二级标准,各重金属元素变异性较小;相关性分析表明,研究区土壤重金属元素中 Cu、Zn、As、Pb 两两之间呈极显著的正相关关系;因子分析显示,土壤中重金属的主要来源可能包括研究区附近石油开采活动、交通运输、无机农药和化肥的施用以及工业和居民燃煤等;生态危害评价显示,研究区土壤中仅有 Cd 元素存在潜在生态风险,其他 Cr、Cu、Zn、As、Pb、Hg 6 种元素的潜在生态风险均处于低危害水平。

关键词:土壤重金属;污染特征;潜在生态风险;陕西省

中图分类号:X820.4

文献标志码:A

文章编号:1005-4944(2013)05-0044-04

Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Metals in the North Area of Shaanxi Province, China

WANG Sha, MA Jun-jie, ZHAO Dan, LEI Pin-ting

(College of Urban and Environment Science, Northwest University, Xi'an 710127, China)

Abstract: The contents and source of soil heavy metals, such as Cr, Cu, Zn, As, Cd, Pb and Hg in surface soil (0~20 cm) of Jingbian County were analyzed by SPSS 19.0. The soil potential ecological hazards of heavy metals were evaluated using the Hakanson potential ecological risk index. The results showed that the average contents of selected heavy metals were lower than the environmental quality secondary standard values of soils, and variability of most heavy metals were low. The correlation analysis showed that Cu, Zn, As, Pb had good correlations. The factor analysis results suggested that the main source of heavy metals in the soil were the oil exploration activities, transportation, the use of pesticides and fertilizers, industrial and residential coal-fired. The potential ecological risk assessment showed that the risks of Cr, Cu, Zn, As, Pb and Hg were on a low level, except Cd.

Keywords: soil heavy metals; pollution characteristics; potential ecological risk assessment; Shaanxi Province

随着农业经济的高速发展,人类各种活动对土壤环境的影响也在不断增加。重金属在环境中影响范围广、危害大,而且很难在短时间内被分解掉,因此,重金属造成的环境污染尤其是土壤环境污染引起了全社会的广泛关注^[1]。陕北地区多为丘陵沟壑区和风沙滩区,耕地面积在土地总面积中所占比例较小。近几年来,随着城市的扩张和城镇化的发展,农业用地不断减少,现有的耕地大多受到不同重金属的污染。对

于以农业为主要经济来源的陕北地区来说,耕地土壤环境质量显得尤为重要。因此,为了了解陕北地区现有耕地土壤重金属污染情况,保障人们生命健康安全,文章以陕西省靖边县为例,运用统计学方法和潜在生态危害指数法对靖边县内土壤重金属元素进行分析,研究重金属在土壤中的变异性、相关性,综合评价土壤质量状况和生态风险,从而为该地区土壤生态环境的安全及污染的修复提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

靖边县位于陕西省榆林市西南部,地处东经

收稿日期:2013-05-22

基金项目:国家高技术研究发展计划(2012AA050103)

作者简介:王 莎(1987—),女,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为生态环评与规划。E-mail:sand368@126.com

108°17'15"~109°20'15", 北纬 36°58'45"~38°03'15", 东西宽 91.3 km, 南北长 116.2 km, 总面积 5 088 km²。全县海拔介于 1 123~1 823 m 之间, 地势南高北低。靖边县属半干旱大陆性季风气候, 光照充足、温差大、气候干燥、通风条件好、雨热同季、四季明显。年平均降雨量 395.4 mm, 年平均气温 7.8 ℃, 年平均无霜期为 130 d。靖边县境内土壤多为壤质性黄绵土和绵沙土, 土层深厚, 土质疏松, 农作物主要有蔬菜、马铃薯、玉米和小杂粮。

1.2 样品采集

按照《农田土壤环境质量监测技术规范》^[2]的规定在研究区均匀布点, 共选择 26 个调查点位, 分别位于乔沟湾、薛家畔、张兴渠、小河乡等地。确定采样地点后先用 GPS 准确定位, 然后去除土壤表层的小石块和动植物残体等, 用铁锹采集 0~20 cm 的表层土壤 2 kg, 装进可封闭的塑料袋中。

1.3 样品处理与分析

土壤样品自然风干后去除土壤中的杂质, 用玻璃研磨器研磨, 然后过 100 目尼龙筛。土壤中 As 分析采用原子荧光法 (AFS-230 原子荧光光度计), Cd、Cr、Hg 和 Pb 分析采用 X 射线法 (Axios X 射线光谱仪), Zn 和 Cu 用电感耦合等离子体质谱方法分析 (XSERIES2 型 ICP-MS)。数据的分析处理采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 完成。

1.4 评价标准及方法

土壤污染评价标准以国家《土壤环境质量标准》^[3]和陕西省土壤背景值为参照。相关标准见表 1、表 2。

土壤重金属潜在生态风险评价采用潜在生态危害指数法^[5]。该方法考虑全面, 将重金属含量、重金属生态效益环境效应等联系在一起, 并定量划分各种重金属元素的潜在生态危害程度^[5]。其公式如下:

$$RI = \sum E_r^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

表 1 土壤重金属含量评价标准(mg·kg⁻¹)^[3]

重金属	土壤一级标准	土壤二级标准 (pH>7.5)	陕西省土壤 背景值
As	15	25	10.8
Hg	0.15	1	0.217
Zn	100	300	66.1
Pb	35	350	20.9
Cu	35	100	20.1
Cr	90	250	61.1
Cd	0.2	0.6	0.088 6

表 2 土壤综合污染指数评价标准^[4]

等级	内梅罗污染指数($P_{综}$)	污染等级
I	$P_{综} \leq 0.7$	清洁(安全)
II	$0.7 < P_{综} \leq 1.0$	尚清洁(警戒限)
III	$1.0 < P_{综} \leq 2.0$	轻度污染
IV	$2.0 < P_{综} \leq 3.0$	中度污染
V	$P_{综} > 3.0$	重污染

$$C_f^i = C_{\text{表层}}^i / C_n^i$$

式中: RI 为潜在生态风险指数; C_f^i 为单项污染系数; E_r^i 为潜在生态风险因子; $C_{\text{表层}}^i$ 为土壤重金属浓度实测值; C_n^i 为参比值, 采用陕西省土壤背景值; T_r^i 为重金属毒性响应系数, 各种金属的响应系数分别为 Hg=40, Cd=30, As=10, Pb=5, Cu=5, Cr=2, Zn=1。

通过研究区表层土壤中重金属浓度和陕西省土壤重金属背景值计算出研究区土壤中各种重金属的单项污染系数, 最后根据各重金属元素的响应情况得到其潜在生态风险因子^[6-8]。依据 E_r^i 值的大小能够判断某一环境下每一种污染物的潜在生态风险, 而且在实际应用中, 也可用于确定污染程度严重的重金属元素, 从而为重金属污染治理提供科学依据^[9]。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量分析

研究区土壤重金属含量的描述性统计结果见表 3。由表 3 可知, 研究区土壤样品中 Cr、Cu、Hg、Zn、As 和 Pb 的平均值均低于我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 一级标准, Cd 的平均含量高于一级标准, 但低于二级标准。与陕西省土壤重金属元素背景值相比, 研究区土壤样品中 Cd 的富集程度较高, 其平均含量是陕西省土壤重金属元素背景值的 2.79 倍。其他重金属元素平均含量均低于陕西省土壤重金属元素背景值, 富集程度较低。从单项污染指数可

表 3 土壤中重金属含量描述性统计分析(mg·kg⁻¹)

重金属	最小值	最大值	算数均值	标准差	变异系数	单向污染指数
Cr	48.1	67.2	56.196	4.639	0.083	0.920
Cu	11.7	19.0	16.046	1.796	0.112	0.798
Zn	37.0	58.1	46.796	4.97	0.106	0.708
As	8.8	11.3	9.696	0.683	0.070	0.898
Cd	0.089	0.78	0.247	0.161	0.652	2.788
Pb	14.6	21.3	18.477	1.586	0.086	0.884
Hg	0.012 1	0.175	0.031	0.035	1.129	0.143

以看出,研究区土壤重金属 Cd 的污染最为严重,单项污染指数达到 2.788,属于中度污染;其他重金属元素基本处于污染警戒限值附近,属于尚清洁状态。总体而言,研究区土壤重金属含量较低,污染相对较小。

变异系数(C_v)表示土壤特性空间变异性的 $C_v \leq 0.1$ 时为弱变异性, $0.1 < C_v < 1$ 时为中等变异性, $C_v \geq 1$ 时为强变异性^[9]。由表 3 可知,研究区土壤重金属中各元素的变异系数由大到小顺序为 $Hg > Cd > Cu > Zn > Pb > Cr > As$ 。其中 Hg 的变异系数相对较大,表明 Hg 在土壤中的波动性较大,根据研究区的地理位置和土地利用情况推断出,这种波动可能是由于当地居民生产生活活动引起的。

2.2 土壤重金属潜在生态风险评价

研究区土壤中重金属的潜在生态危害单项系数见表 4。由表 4 可知,研究区土壤中 Cr、Cu、Zn、As、Pb、Hg 等 6 种重金属潜在生态风险为低危害水平,估计在近几年内应该不会对农产品造成危害;潜在生态风险较高的重金属是 Cd,在 26 个样点中,大约有 3.9% 样品的 Cd 潜在生态危害达到严重水平,有 11.5 % 样品的 Cd 潜在生态危害为重度水平。因此,研究区土壤样品中 Cd 对总的潜在生态风险指数贡献率最大,其生态危害最严重^[10]。

表 4 土壤重金属元素潜在生态危害系数频数分布

潜在生态危害单 项系数 E_i^i 范围	单项潜在生 态风险程度	潜在生态危害频率/%						
		Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
$E_i^i < 30$	低	100	100	100	100	0	100	100
$30 \leq E_i^i < 60$	中	0	0	0	0	34.6	0	0
$60 \leq E_i^i < 120$	较重	0	0	0	0	50	0	0
$120 \leq E_i^i < 240$	重	0	0	0	0	11.5	0	0
$E_i^i \geq 240$	严重	0	0	0	0	3.9	0	0

对于农田土壤而言,重金属的潜在生态风险达到中度以上(包括中度)水平时都会在一定程度上影响到农产品的产量和质量^[10]。因此,靖边县在农业生产时,土壤重金属中的主要污染控制对象为 Cd,应采取物理、化学或生物技术对受到污染的土壤进行修复治理,减少土壤中 Cd 的含量,保证土壤的安全性。

2.3 土壤重金属相关性分析

利用土壤中各重金属元素的相关性可以推断其重金属是否同源,若相关性较大,则来源有可能相同,若相关性较小,则说明其来源可能不同^[11]。利用 SPSS 19.0 软件对研究区土壤 7 种重金属进行相关性分析,其结果见表 5。

表 5 土壤重金属元素的相关系数

元素	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
Cr	1						
Cu	0.499**	1					
Zn	0.397	0.918**	1				
As	0.260	0.703**	0.747**	1			
Cd	0.432*	0.042	0.053	0.049	1		
Pb	0.456*	0.863**	0.841**	0.624**	0.159	1	
Hg	-0.163	-0.133	-0.081	-0.077	0.109	0.008	1

注:采用 Pearson 方法进行相关分析,*($P < 0.05$)为显著相关,**($P < 0.01$)为极显著相关。

由表 5 相关系数可知,研究区土壤重金属元素中 Cu、Zn、As、Pb 元素两两之间呈极显著的正相关关系,Cr 和 Cu 呈极显著正相关关系,Cr 和 Cd、Pb 和 Cr 呈显著相关关系。从以上结果可以看出,研究区土壤重金属 Cu、Zn、As、Pb、Cr 的来源有可能相同。

2.4 土壤重金属因子分析

相关研究表明,来自同一个污染源的污染物之间一般有一定的相关性,其反映的信息具有一定的重叠^[10]。因子分析法可以将相关性比较密切的几种元素归为一类,每一类变量就成为 1 个因子,可以通过各因子中的特征元素,判断该因子中的元素来源。因此,本文采用因子分析法来判别土壤重金属的来源^[10]。因子分析结果见表 6。

表 6 土壤重金属元素因子分析

元素	初始因子载荷矩阵			方差最大正交旋转后的 因子载荷矩阵		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
Cr	0.594	0.568	-0.314	0.373	0.751	-0.263
Cu	0.952	-0.137	0	0.944	0.136	-0.126
Zn	0.939	-0.176	0.086	0.954	0.082	-0.047
As	0.796	-0.224	0.104	0.933	-0.006	-0.024
Cd	0.194	0.896	0.028	-0.040	0.900	0.174
Pb	0.908	0.013	0.150	0.893	0.218	0.048
Hg	-0.125	0.203	0.950	-0.028	0.015	0.979
贡献率/%	52.170	18.105	14.896	49.071	20.681	15.419

由表 6 可以看出,研究区农田土壤中前 3 个因子反映了 7 种重金属全部信息的 85.17%。因此,前 3 个因子即可反映所有数据的基本情况。旋转前后因子载荷的差别较大,变量与一个因子的联系系数绝对值(载荷)越大,则该因子与变量关系越近,因此采用旋转后的正交因子载荷矩阵进行分析^[10]。

因子 1 的贡献率是 49.071%,其中,Cu、Zn、As 和

Pb 的浓度在该因子上具有较高的正载荷,其因子载荷值分别为 0.944、0.954、0.933、0.893。由相关性分析可知,研究区土壤重金属元素中 Cu、Zn、As、Pb 元素两两之间呈极显著的正相关关系。因此,这 4 种元素很有可能来自同一个污染源。根据靖边县经济发展现状可知,靖边县石油资源丰富,2012 年生产原油达 354 万 t,此次选择的研究区域在石油矿井附近。另外,相关研究表明^[5,10,12-14],Cu、Zn 和 As 的富集可能是矿产开发所致,Pb 一般被认为是机动车辆的标识元素。因此,研究区周围土壤中 Cu、Zn、As、Pb 等金属元素积累可能是由于附近石油开采活动和运输石油车辆的影响。

因子 2 的贡献率为 20.681%,高载荷指标为 Cd,因子载荷值为 0.900。由表 3 和表 4 可以看出,研究区土壤重金属元素中 Cd 的含量较多,污染较为严重。由榆林市统计年鉴可知,2005 年靖边县化肥使用量达 29 384 t(实物量),农用薄膜 498 819 kg,农药 13 196 kg,一般情况下,Cd 可作为农药和化肥等农业活动的标识元素^[10]。结合靖边县实际情况可以推断出,引起土壤中 Cd 含量较多的主要原因是农药、化肥和地膜的大量使用。

因子 3 的贡献率为 15.419%,高载荷指标是 Hg,因子载荷值为 0.979。Hg 为气迁移元素,主要通过大气中迁移污染物的干沉降和湿沉降散落到土壤中^[10]。2012 年,延长石油股份有限公司靖边采油厂燃煤约 28 000 t,居民采暖用煤量也在不断增加,煤烟在排放过程中产生的污染物较多。相关研究表明^[10],土壤中 Hg 可能是由于附近工业和居民燃煤造成的。污染物中的 Hg 随着烟尘在附近沉降,造成了土壤中 Hg 的积累。同时,由因子 2 的分析可知,靖边县农药使用量较大,而农药中含有一定量的 Hg。因此,土壤中 Hg 的主要来源是当地工业和居民燃煤以及农药的使用。

3 结论

(1)靖边县土壤中重金属元素除 Cd 外,均达到国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)一级标准,Cd 元素虽然超过一级标准,但低于二级标准,土壤环境整体良好。空间变异分析结果显示土壤中 Hg 的变异系数相对较大,表明这种元素在土壤中含量分布不平衡,具有较大波动性。

(2)通过土壤重金属潜在生态风险评价可知,研

究区土壤中 Cr、Cu、Zn、As、Pb、Hg 6 种元素的潜在生态风险均处于低危害水平,而 Cd 元素则存在潜在生态风险。大约有 3.9%样品 Cd 的潜在生态危害达到严重水平,11.5%样品达到重度水平,50%样品达到较重水平,34.6%样品达到中度水平。应采取一些物理、化学、生物以及农业等措施对已经受到污染的土壤进行修复治理,确保生态环境及人类健康安全。

(3)由重金属相关性和因子分析可知,研究区土壤重金属可能来自多种污染源。通过分析认为土壤中重金属的主要来源包括研究区附近石油开采活动、运输车辆、农药和化肥的施用、工业和居民燃煤等。

参考文献:

- [1] 邓秋静,宋春然,谢 锋,等.贵阳市耕地土壤重金属分布特征及评价[J].土壤,2006,38(1):53-60.
- [2] 中华人民共和国农业部. NY/T 395—2000 农田土壤环境质量监测技术规范[S].北京:中国标准出版社,2000.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S].北京:中华人民共和国环境保护部,1995.
- [4] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S].北京:中国环境科学出版社,2004.
- [5] 王 斌,张 震.天津近郊农田土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价[J].中国环境监测,2012,28(3):23-26,28.
- [6] 杜 平,马建华,韩晋仙.开封市化肥河污灌区土壤重金属潜在生态风险评价[J].地球与环境,2009,37(4):436-440.
- [7] 毛平平,胡恭任,于瑞莲,等.泉州市主要工业区表层土壤重金属污染评价[J].环境化学,2010,29(5):984-985.
- [8] 张丽会,张思冲,崔可瑜,等.哈尔滨市东南郊菜地土壤重金属潜在生态危害评价[J].中国农学通报,2011,27(6):128-132.
- [9] 王 宏,吕殿青,刘 庆,等.经济快速发展城郊区土壤重金属空间分布及潜在生态危害评价——以慈溪市横河镇为例[J].热带地理,2011,31(6):560-564.
- [10] 李瑞平,郝英华,李光德,等.泰安市农田土壤重金属污染特征及来源解析[J].农业环境科学学报,2011,30(10):2012-2017.
- [11] 辛 蕊,张思冲,周晓聪,等.大庆城区土壤重金属污染及相关性分析[J].中国农学通报,2008,24(9):416-420.
- [12] 丁海霞,南忠仁,刘晓文,等.金昌市郊农田土壤重金属的污染特征[J].农业环境科学学报,2008,27(6):2183-2188.
- [13] Garcia R, Maiz I, Millan E. Heavy metal contamination analysis oroad soils and grasses from Gipuzkoa(Spain)[J]. Environmental Technology, 1996,17(7):763-770.
- [14] Loska L, Wiechula D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik Reservoir [J]. Chemosphere, 2003,51:723-733.