doi:10.7515/JEE201504003

# 关中地区土壤重金属空间分布特征及其污染评价

邓文博,李旭祥

(西安交通大学人居环境与建筑工程学院,西安710049)

摘 要:结合关中地区地形分布,使用网格法布点,在该地区布设了239个采样点,使用X射线荧光光谱法测定了其表层土壤中六种重金属(Cr、Ni、Pb、Cu、Zn、As)和磷(P)的含量。统计结果表明:关中地区土壤重金属Cr、Ni、Pb、Cu、Zn、As和P的平均质量浓度分别为75.69 mg·kg<sup>-1</sup>、32.05 mg·kg<sup>-1</sup>、26.35 mg·kg<sup>-1</sup>、25.76 mg·kg<sup>-1</sup>、72.85 mg·kg<sup>-1</sup>、12.29 mg·kg<sup>-1</sup>、1038.99 mg·kg<sup>-1</sup>,其中Cr、Ni、Pb、P的含量均超过陕西省土壤背景值。采用克里金插值法、反距离插值法和污染负荷指数法,得到了表层土壤重金属含量的空间分布图以及整个关中地区土壤重金属污染评价结果。结果显示,关中地区土壤属中度污染,污染呈现南高北低的现象,其中户县周围的几个县土壤污染情况较为严重。

关键词:关中地区;重金属;空间分布特征;污染评价

中图分类号: X833 文献标志码: A 文章编号: 1674-9901(2015)04-0219-05

# Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in soil from Guanzhong area

#### DENG Wen-bo, LI Xu-xiang

(School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Concentrations of six heavy metals and P in 239 topsoil samples collected from Guanzhong area were determined in the paper. Statistical analysis results showed that average concentrations of six heavy metals (Cr, Ni, Pb, Cu, Zn, As) and P in Guanzhong area were 75.69 mg·kg<sup>-1</sup>, 32.05 mg·kg<sup>-1</sup>, 26.35 mg·kg<sup>-1</sup>, 25.76 mg·kg<sup>-1</sup>, 72.85 mg·kg<sup>-1</sup>, 12.29 mg·kg<sup>-1</sup>, 1038.99 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, and the concentrations of Cr, Ni, Pb, P exceeded their background levels. In the paper, Kriging method and inverse distance method were applied to estimate the unobserved points and their distribution maps were obtained which indicated that the soil pollution of southern area was higher than that in the northern area. Pollution load index method had been used to estimate the soil pollution of Guanzhong area and the result showed soil was in moderate pollution but the soil pollution of several counties around Huxian was more serious.

Key words: Guanzhong area; heavy metals; spatial distribution; pollution assessment

土壤是人类赖以生存的重要资源,优质的土 壤环境,可以保证人们的生活和生产需要。在自 然环境下,土壤重金属的来源主要是母岩风化和 动植物残骸。但是随着近现代工业的发展,人类 活动对重金属分布的影响不断加大,大量工业污 染物的不合理排放,造成土壤重金属含量的不断 上升。由于重金属污染本身有不易移动,不被微 生物降解等特点,故其进入土壤后容易发生集聚

收稿日期: 2015-07-11

通讯作者: 李旭祥, E-mail: xxli@mail.xjtu.edu.cn

基金项目:陕西省科学技术研究发展计划项目(2014 k15-03-01)

效应,导致土壤质量下降,并且可能通过食物链 最终在人体内积累,严重危害人类健康。因此, 研究土壤重金属分布特征对于土壤污染综合防治 和保障人民生活质量都有重要的意义(王成军等, 2014)。近些年,国内外学者对重金属污染分布 做了大量研究。关卉等(2006)研究雷州半岛土 壤重金属分布特征发现, Cr、Ni、Cu和Hg的质 量浓度具有明显的高值区,在工业发达的地区, 这些重金属的含量明显提高。邓秋静等(2006) 通过采集贵阳市416个土壤表层样品,研究发现 贵阳市主要工业区的土壤重金属含量较高。陈圆 圆等(2010)利用 GIS 和地统计学方法对宝山地 区重金属空间分布规律和分布特征进行研究,发 现As、Cd、Cr、Hg、Pb均表现为中等空间变异性, 并且 Cr、Hg 和 Pb 具有强烈的空间相关性。Nadya et al (2001)和 Vojtech et al (2004)利用地统计 学和同位素溯源相结合的方法,研究污染物来源 和分布问题。

关中地区地处陕西中部,土地面积 5.55 万平 方公里,在 20 世纪末人口数量已经达到了 2047 万 (王西琴,1997)。关中地区整体地势中部平坦, 南北及东部地势较高,具有温带季风性气候特征, 区域内土地肥沃,是我国北方重要的农产品生产区 域。虽然我国很多地方都进行过土壤重金属污染的 调查研究,但是针对关中地区的此类研究十分少见, 本研究通过探查关中地区土壤重金属分布特征,对 该地区土壤整体污染水平做出评价,为以后进一步 开展土壤污染防治工作提供基础资料和科学指引。

## 1 采样和分析方法

#### 1.1 样品采集

本次研究考察区域广阔,根据关中地区 自身特点,西北部和西南部一些区域海拔在 1000~2000 m以上,为沟壑区,居民相对较少, 土壤重金属污染情况相似,故在这两个区域少量 布点,在其他区域采用网格法布点,10 km 为一个 采样点,每个采样点都用 GPS 定位。实地采样时, 采取多点采样的方法,即在10 m×10 m的正方形4 个顶点和中心5 处各采集1 kg表层土(0~20 cm) 组成混合样,充分混合后采用四分法弃取,最终 保留1~2 kg作为该采样点混合样本收集起来。之 后将该采样点的经纬度和周围基本环境情况记录 下来。最终共采集土样 239 个。

#### 1.2 样品处理和测定方法

# 1.2.1 样品处理

样品首先经过自然风干,除去其中的石块, 残根等杂物,再用木棍碾压,之后进一步用玛瑙 钵研细,通过 200 目尼龙网筛,将通过网筛的样 品分成两个部分,一部分作为备份,另一部分供 分析测试使用。为了排除各种外来因素的影响, 所有样品在采集、混合、装袋、粉碎、研磨等过 程中,全部使用木头、塑料、玛瑙等用具。 1.2.2 测定方法

对土壤样品中六种重金属(Cr, Ni, Pb, Cu, Zn, As)和磷(P)的土壤浓度进行测定。 按照《土壤环境质量标准—2008》对不同元素进 行检测。本次测试使用的是X射线荧光光谱法, 其原理是使用X射线照射样品时产生的特征荧光, 进行定性和定量分析。前处理方法采用压片法, 将过200目的土壤样品在105℃下烘干2h,称取 10g,倒入放置于平板模具上的PVC塑料环(外 径40 mm,内径35 mm,高5 mm)中,在30 t压 力下加压30 s压制成型,编号放入干燥器中待测。 压好的片直接用 XRF 光谱仪测定。设备仪器型号 为Axios advanced (PW4400)。

## 1.3 评价方法

本次研究选用的土壤污染评价方法是污染负荷指数法,该方法能直观地反映各种元素对污染的贡献程度,以及各个污染物在时间和空间上的变化趋势(范拴喜等,2010)。该方法的评价模式为:

首先,根据单个污染物元素进行计算:

$$CF_i = \frac{C_i}{C_{0i}} \tag{1}$$

式中,  $CF_i$  为元素 *i* 的最高污染系数;  $C_i$  为元素 *i* 的实测含量;  $C_{0i}$  为元素 *i* 的背景值。

某一点的污染负荷指数(PLI)为:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \cdots CF_n}$$
(2)

式中, PLI为某一点的污染负荷指数; n 为评 价元素的个数。

某一区域(流域)的污染负荷指数为:

$$PLI_{\text{zone}} = \sqrt[n]{PLI_1 \times PLI_2 \times PLI_3 \cdots PLI_n}$$
(3)

式中: *PLI*<sub>zone</sub> 为流域污染负荷指数; *n* 为评价 点的个数(采样点的个数)。

污染负荷指数具体分级如表1所示。

表 1 污染负荷指数分级 Tab.1 Grading of pollution load index							
PLI 值	PLI<1	$1 \leq PLI < 2$	$2 \leq PLI < 3$	$3 \leq PLI$			
污染等级	0	Ι	Π	Ш			
污染程度	无污染	中等污染	强污染	极强污染			

# 2 结果与分析

## 2.1 土壤重金属含量检测结果统计

实验得到的分析数据首先采用格拉布斯方法剔除异常值,之后使用 SPSS 19.0 软件对选出的有效数据进行描述统计,结果见表 2,表中变异系数反

映数据的离散程度,偏度是表征概率分布密度曲线 相对于平均值不对称程度的特征数,直观来看就 是密度函数曲线尾部的相对长度。峰度描述数据 分布形态的陡缓程度,背景值是陕西省土壤背景 值(薛澄泽等,1986;杨柳和李旭祥,2014), 二级标准是国家土壤环境质量二级标准值。

	表 2 土壤中重金属的描述统计分析结果(mg·kg <sup>-1</sup> )	
Tab.2	Results of heavy metal in soil for descriptive statistics ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	)

土壤中重金属	均值	标准差	最大值	最小值	变异系数(%)	偏度	峰度	背景值	二级标准
Cr	75.69	22.10	306.27	55.46	29.21	5.72	43.70	62.5	350
Ni	32.05	8.54	102.93	19.97	26.66	3.99	22.11	24.9	50
Pb	26.35	9.34	125.11	16.41	35.44	6.85	61.92	21.4	80
Cu	25.76	5.74	66.79	14.10	22.27	2.78	14.25	25.9	100
Zn	72.85	14.96	205.17	47.93	20.54	3.65	24.74	73	300
As	12.29	1.96	25.5	6.7	15.94	0.78	6.36	11.2	25
Р	1038.99	274.24	2622.22	435.18	26.39	1.19	3.55	483	-

注:-表示数据缺失。

从表2可以看出,Cr、Ni、Pb、Cu、Zn、As 和P的土壤含量均值分别是陕西省背景值的1.21 倍、1.29倍、1.23倍、0.99倍、0.99倍、1.1倍、2.15 倍,说明该地区重金属和磷的含量较高,但是都 没有超过国家二级标准中的土壤质量限定值(P的 标准缺失)。As的变异系数小于其他元素,表明 As的分布相对比较均匀,具有较小的离散型,反之, Pb的变异系数较大,说明其分布较不均匀。As 和 P的偏度较小,接近于0,说明两个元素的分布基 本符合正态分布,也验证了K-S 检验的准确性。

使用 K-S 检验来判断数据是否符合正态分布 或者对数正态分布,结果表明 As 和 P 含量符合正 态分布,Ni、Cu 和 Zn 符合对数正态分布,Cr 和 Pb 不符合两个情况。

### 2.2 土壤重金属空间分布特征

由于克里金插值法要求数据符合正态分布或 对数正态分布,所以根据前文的 K-S 检验,As、P、 Ni、Cu、Zn 符合条件,而 Cr 和 Pb 则使用反距离 插值的方法来得到两种重金属的土壤含量分布特 征,图形采用 Arcmap 10.0 软件绘制,结果如图 1 所示。 从图1可以看出关中地区土壤中重金属的一些基本分布特征,整体来说关中地区重金属浓度 南部和西南部较高,东北部较低,这可能与南部 和西南部工业水平相对发达有关。具体到各个县 级区域,周至县、户县、长安县和蓝田县四个相 邻县的重金属含量较高,周至县Cu、Pb、Zn、P 浓度比较高,户县Cr、Cu、Pb、Zn、Ni、P浓度 高于其他地区,超过陕西省土壤环境背景值,长 安县Zn、Ni、Cr浓度过高,超过背景值,其他重 金属含量在背景值左右,蓝田县的As、Cu、Ni、 Pb、Zn含量超过背景值,其他重金属含量在背景 值范围内。

从重金属元素各自分布来看,As浓度较高的 区域比较大,其中在南部和西南部含量超过关中 其他区域,Cr、Ni有非常高的相关性,均是在户 县和大荔县周围浓度较高,这可能与两个县当地 的工业类型有关。Cu和Zn的相关性较高,主要 在周至县、户县、长安县、蓝田县分布浓度较高。 Pb 在耀县、华县、潼关县浓度分布最高,结合当 地工业水平来看,这可能是受结构性因素(比如 土壤母质、地形等)的影响。P的分布有明显的两 个高值区,一个是户县和兴平市周围,另外一个 是华县和大荔县周围,这两个区域土壤中 P 的含 量远远高于关中其他地区,应该与两个地区的工 业类型有很大关系。





106°30'E 107°0'E 107°30'E 108°0'E 108°30'E 109°0'E 109°30'E 110°0'E







106°30'E 107°0'E 107°30'E 108°0'E 108°30'E 109°0'E 109°30'E 110°0'E

(上接图1)





P土壤含量空间分布 N 韩城市 35°30'N 宜君县 白水乱 澄城县 合阳县 旬员县 长武县 彬县 綱具 35°0'N 蒲城县 富平县 千阳县 膝游县 日日 滑壶 34°30'N 高陵县 7.08月 34°0'N 图例 P值 (mg·kg<sup>-1</sup>) 705.03~843.24 843.25~959.34 959.35~1064.39 33°30'N 100 km 1064.40 1208.14 106°30'E 107°0'E 107°30'E 108°0'E 108°30'E 109°0'E 109°30'E 110°0'E 图1 土壤重金属含量空间分布图 Fig.1 Spatial distribution of soil heavy metal content

#### 2.3 污染负荷指数法评价结果

根据污染负荷指数法的评价办法,得到六种重金属和P的污染指数。Cr、Ni、Pb、Cu、Zn、As、P七种污染元素的最高污染系数平均值分别为1.21、1.29、1.23、1.94、0.99、1.10、2.15。结合分级标准,六种重金属均为中度污染,P为强污染,污染程度从低到高的排序为:Zn<As<Cr<Pb<Ni<Cu<P。最终,计算出关中地区总污染指数为1.21,为中度污染。图2为关中地区污染负荷指数法插值图,从图上可以看出污染主要集中在南部和西南部,这和这一区域的工业

# 分布有直接关系。



## 3 结论

(1)关中地区土壤重金属含量统计分析结果 表明, Cr、Ni、Pb、As和P的土壤含量均值都超 过了陕西省土壤背景值,其中As的变异系数小于 其他元素,表明As的分布相对比较均匀,具有较 小的离散性,反之,Pb的变异系数较大,说明其 分布较不均匀。As、P、Ni、Cu、Zn的含量分布 符合正态分布或对数正态分布,Cr和Pb为偏态 分布。

(2)结合土壤重金属含量分布图来看,关中地区的重金属分布明显呈南高北低的态势,尤其是周至县、户县、长安县和蓝田县四个相邻县的土壤污染情况较重,这也提醒当地政府在发展工业的同时,必须重视环境保护。

(3)污染负荷指数法评价结果表明, 关中地区土壤重金属污染由低到高的排序为 Zn<As<Cr<Pb<Ni<Cu<P,其中六种重金属污染均 为中等污染,P为强污染,关中地区总的污染情况 为中等污染,结合污染插值图来看,北部的情况 较好,南部尤其是西南部地区土壤污染问题较重, 需要密切关注这一区域的土壤污染情况,尽早采 取防控措施。

## 参考文献

陈圆圆,孙小静,王 军,等. 2010. 上海宝山区农业用地 土壤重金属空间分异规律及其分布特征研究 [J]. *环境* 化学, 29(2): 216–219. [Chen Y Y, Sun X J, Wang J, et al. 2010. Spatial variability and distribution of heavy metals in soil of Baoshan District [J]. *Environmental Chemistry*, 29(2): 216–219.]

邓秋静, 宋春然, 谢锋, 等. 2006. 贵阳市耕地土壤重金

属分布特征及评价 [J]. *土壤*, 38(1): 53-60. [Deng Q J, Song C R, Xie F, et al. 2006. Distribution and evaluation of heavy metals in cultivated soil of Guiyang [J]. *Soil*, 38(1): 53-60.]

- 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等.2010. 土壤重金属污染评 价方法进展[J]. *中国农学通报*,26(17):310-315. [Fan S X, Gan Z T, Li M J, et al. 2010. Progress of assessment methods of heavy pollution in soil [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,26(17):310-315.]
- 关 卉, 万洪富, 王冼民, 等. 2006. 雷州半岛土壤重金属 分布特征及其污染评价 [J]. *环境污染与防治*, 28(10): 757-761. [Guan R, Wan H F, Wang X M, et al. 2006. Distribution and pollution assessment of heavy metals in soil samples of Leizhou Peninsula [J]. *Environmental Pollution and Control*, 28(10): 757-761.]
- 王成军,孙大林,刘 勇,等.2014. 铅锌厂周围土壤中重金 属空间分布特征 [J]. *地球环境学报*, 5(1): 36-41. [Wang C J, Sun D L, Liu Y, et al. 2014. Spatial distribution of the soil heavy metal around the lead-zinc plant [J]. *Journal of Earth Environment*, 5(1): 36-41.]
- 王西琴. 1997. 陕西关中人口增长态势与可持续发展初析 [J]. 西北大学学报(自然科学版), 27(4): 345-349. [Wang X Q. 1997. The analysis of population growth trend and sustainable development in Guanzhong Region, Shaanxi Province [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 27(4): 345-349.]
- 薛澄泽,肖 玲,吴乾丰,等.1986.陕西省主要农业土壤中十 种元素背景值研究 [J]. *西北农业大学学报*,14(3):30-53. [Xue C Z, Xiao L, Wu Q F, et al. 1986. Studies of background values of ten chemical elements in major agricultural soils in Shaanxi Province [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 14(3):30-53.]
- 杨 柳,李旭祥.2014. 大气降尘中重金属元素及铅同位 素分析 [J]. *西安交通大学学报*,48(2):118-124. [Yang L, Li X X. 2014. Analysis of heavy metal pollution in atmospheric deposition [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*,48(2):118-124.]
- Nadya T, Yigal E, Ludwik H, et al. 2001. Distribuion of natural and anthropogenic lead in Mediterranean soils [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 2853–2864.
- Vojtech E, Martin M, Michael K. 2004. ICP-MS measurements of lead isotopic ratios in soils heavily contaminated by lead smelting: tracing the sources of pollution [J]. Anal Bioanal Chem, 378: 311–317.