文章编号:1674－2869(2018)02－0127－05

广州市污染土壤重金属的空间分布及其风险评价

刘　奕[1],胡立嵩[*1],张彩香[*2],谢梦萦[2],谢新末[1],黄长生[3]
1. 武汉工程大学化学与环境工程学院,湖北　武汉　430074;
2. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室,湖北　武汉　430074;
3. 中国地质调查局武汉地质调查中心,湖北　武汉　430205

摘　要:在珠江-西江经济带先行试验区环境地质调查的基础上,本研究于2016年9月对广州市重金属As、Pb、Cd、Cu污染较严重的区域进行了详查。按照《土壤环境检测技术规范》共采集并分析了69个表层土壤(0 cm~20 cm)样品,发现只有Pb未超标,重金属As、Cd、Cu的超标率分别为8.70%、56.52%、1.45%。利用地统计学对四种重金属进行了空间分布分析,发现 As和Cd表现为中等程度的空间相关性,表明采样区土壤中的As和Cd既受内源污染影响也受到人为活动影响;而Pb和Cu的空间相关性很弱,证明采样区的这两种金属元素已严重受到人为活动干扰。为了对采样区重金属污染进一步进行风险管控,通过潜在生态风险评价法对采样区重金属污染整体情况进行评价,发现该区域整体属于轻微生态风险水平,主要的潜在生态危害因子为Cd。

关键词:土壤重金属;地统计学;空间分布;潜在生态风险评价
中图分类号:X825　　**文献标识码**:A　　**doi**:10. 3969/j. issn. 1674-2869. 2018. 02. 002

Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Contaminated Soil in Guangzhou

LIU Yi[1], *HU Lisong*[*1], *ZHANG Caixiang*[*2], *XIE Mengying*[2], *XIE Xinmo*[1], *HUANG Changsheng*[3]
1. School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;
2. State Key Laboratory of Biology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074 ,China;
3. China Geological Survey, Wuhan 430205, China

Abstract: Heavy metals of As, Pb, Cd, Cu in the seriously polluted areas soil in Guangzhou were investigated based on the geological survey for the experiment site in the Pearl River-Xijiang River economic zone. The total of 69 samples in surface soil (0 cm–20 cm) were collected and analyzed according to the Technical Manual For Soil Analysis. The results showed that Pb content met the standard, however, the over-standard rates of As, Cd and Cu were 8.7%, 56.52% and 1.45%, respectively. The spatial distribution was analyzed by geostatistics. It was found that As and Cd appeared moderate spatial correlation, showing that the soil of sampling areas was affected by both endogenous and anthropogenic activities, while the spatial correlation between Pb and Cu was very weak, confirming that these areas were seriously disturbed by human activities. To further control the risk of heavy metal pollution in sampling areas, the potential ecological risk assessment method was used to evaluate the situation of soil heavy metal pollution, demonstrating that there is a slight ecological risk in sampling areas and Cd is a potential ecological risk factor.

Keywords: soil heavy metals; geostatistics; spatial distribution; potential ecological risk assessment

收稿日期:2017–09–03
基金项目:中国地质调查局水环境调查项目(DD20160257)
作者简介:刘　奕,硕士研究生。E–mail:653276956@qq.com
***通讯作者**:张彩香,博士,教授,博士研究生导师。E–mail:caixiangzhang@yahoo.com;
胡立嵩,博士,教授,硕士研究生导师。E–mail:289234646@qq.com
引文格式:刘奕,胡立嵩,张彩香,等. 广州市污染土壤重金属的空间分布及其风险评价[J]. 武汉工程大学学报,2018,40(2):127–131.

2014年全国土壤污染调查显示，全国土壤总的污染超标率为16.1%，污染类型以无机型为主。Cd、As、Cu、Pb四种无机污染物的超标率分别为7.0%、2.7%、2.1%、1.5%，属于8种无机污染物中超标率较高的4种金属元素[1]。因此《土十条》将镉、砷、铅等重金属列为监管重点，要求明确各类污染源并进行严格监控，到2020年全国土壤污染加重趋势得到初步遏制，土壤环境风险得到基本管控[2-3]。

根据土壤污染分布情况，南方土壤污染明显重于北方，长江三角洲、珠江三角洲等部分区域土壤重金属超标范围较大[4-5]。珠江-西江经济带作为六个先行试验区之一，已经开始加强重金属污染综合防治和土壤污染治理。本文在珠江-西江经济带先行试验区环境地质调查的基础之上对污染较严重的地区进行了详查，利用地理信息系统对该地区的空间变异及空间分布特征进行了分析[6-8]，并采用潜在生态风险评价法对该地区重金属污染整体情况进行了评价[9-10]，旨在为广州市土壤污染治理及土地利用提供一定的理论基础。

1 实验部分

1.1 土壤样品采集

在珠江-西江经济带先行试验区1∶50 000环境地质调查的土壤重金属污染状况基础上，本研究对广州市重金属污染较严重的地区进行详查（采样点如图1），首先对采样区进行功能分区，如生活区、工业（园）区、农业区、重点污染区及工业场地等区域。根据《土壤环境检测技术规范》（HJ/T166—2004）[11]，采用“梅花形”采样方法进行布点，主要采集表层土（0 cm~20 cm），将采取的4或5个点混合为1个土样，利用四分法取样。样品共计69个。

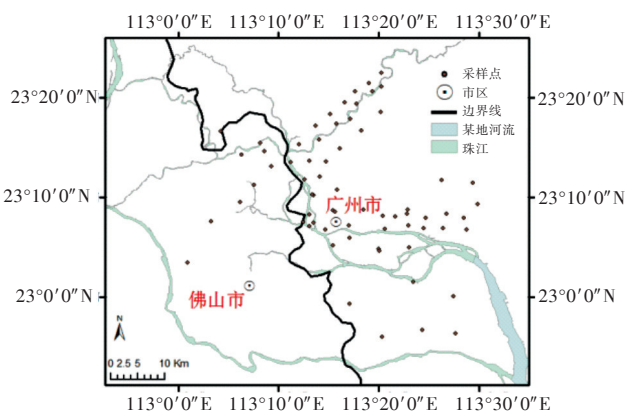

图1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution diagram of sampling points

1.2 样品分析

所有土壤样品自然风干，剔除其中的树枝、石头等杂物，研磨后过孔径0.075 mm筛，存于自封袋中，用于样品理化性质的测定。

土壤pH的测定标准为NY/T1377—2007[12]。重金属含量送往武汉市地调院统一测定，采用电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES）测定。

1.3 数据处理

采用Excel2010和SPSS22.0对数据进行描述性统计分析，用统计软件ArcGIS9.4进行空间变异分析。

1.4 潜在生态风险评价

潜在生态危害指数法是由瑞典科学家Hakanson提出的，从沉积学的角度对土壤重金属进行评价。计算公式为公式（1）（2）[13]：

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \tag{1}$$

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_r^i \tag{2}$$

其中，$C_f = C_{实测}/C_n$（C_n为标准值，即土壤环境质量标准二级标准），As、Pb、Cu、Cd的毒性系数分别为10、5、5、30。分级标准见表1。

表1 污染评价标准

Tab.1 Pollution evaluation criteria

潜在生态风险程度	轻微风险	中等风险	较强风险	很强风险	极强风险
Er	≤40	40~80	80~160	160~320	>320
RI	≤150	150~300	300~600	>600	—

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属的分布特征

采样区土壤中重金属含量见表2。从表2中数据可知，As的含量在2.49 mg/kg~122 mg/kg之间，平均值为19.08 mg/kg，中值为16.5 mg/kg；Pb含量在13.8 mg/kg~247 mg/kg之间，平均值为64.49 mg/kg，中值为53.8 mg/kg；Cd含量在0.07 mg/kg~2.12 mg/kg之间，平均值为0.41 mg/kg，中值为0.4 mg/kg；Cu含量在15 mg/kg~104 mg/kg之间，平均值为40.97 mg/kg，中值为38 mg/kg。根据测定的pH值显示，土壤样品的pH值在6.5~7.5之间，整体呈中性。以《土壤环境质量标准》（GB15618—1995）二级标准作为评价标准，As的超标率为8.70%，Cd的超标率为56.52%，Cu的超标率为1.45%，只有Pb未出现超标的情况。结合已有文献，李艳利等[14]对焦作市城市土壤重金属研究发现，Cd的超标率为

22.73%，Cu和Pb均未超标；姚娜等[15]对石家庄北郊土壤重金属研究表明该区Pb、Cd、Cu均为背景值的1.5倍~2.5倍；李小曼等[16]对苏南村镇土壤重金属含量分析发现，Cd超标10.91%，Cu、Pb、As未超标。以上均表明不同城市土壤都受到了不同程度的重金属污染，其中Cd污染都相对较严重。

表2　土壤中重金属含量统计（n=69）

Tab. 2　Statistics of heavy metals in soil（n=69）

金属元素	平均值±标准差（n=69）	重金属含量			国家二级标准（pH 6.5~7.5）	超标率（n=69）/ %
		最大值	最小值	中值		
As	19.08±16.17	122	2.49	16.50	30	8.70
Pb	64.49±43.23	247	13.80	53.80	300	0
Cd	0.41±0.30	2.12	0.07	0.40	0.30	56.52
Cu	40.97±17.50	104	15	38	100	1.45

2.2　土壤重金属的空间变异结构分析

以上描述性统计只能分析出该地区重金属污染的整体情况，而对于空间变异特征，应采用地统计法对其进行分析[17]。使用半变异函数对各种元素进行模拟[18]，不同金属的变异函数理论模型及检验参数见表3。

表3　变异函数理论模型及检验参数

Tab. 3　Semivariogram models and fitted parameters

重金属	拟合模型	块金常数C_0	基台值（C_0+C）	基底效应［C_0/（C_0+C）］/ %	变程 / m
C（As）	五球模型	30.54	42.15	72.45%	74.34
lg$C$（Pb）	J-Bessel模型	0.10	0.11	93.71%	191.20
lg$C$（Cd）	指数模型	0.27	0.39	67.40%	71.70
lg$C$（Cu）	J-Bessel模型	0.11	0.11	91.68%	111.10

在半方差函数中，C_0表示块金方差，是由实验误差等随机性因素引起的变异；（C+C_0）为基台值，表示系统内总的变异；C_0/（C+C_0）则表示的是空间变异程度，当该比值小于25%时，证明系统的空间相关性很强；在25%~75%之间时，表明系统的空间相关性属于中等程度；而大于75%则表明空间相关性很弱。

结合表3可知，As和Cd的基底效应分别为72.45%和67.40%，在25%~75%之间，呈现中等程度的空间相关性，表明既受到内源污染的影响，如土壤特征、气候变化等，又受外界的因素影响，如交通、建设、人为活动等[19]。而Pb和Cu的基底效应分别为93.71%和91.68%，均大于75%，表明空间相关性很弱，受到了人为活动的强烈干扰。

2.3　土壤重金属的空间分布特征

使用普通克里金插值法，绘制研究区域的重金属的空间分布图。由图2可知，高As区的范围较大，集中出现在研究区域南部，根据地理分区图，主要污染在佛山市的顺德区。黄庆熙等[20]对广州主城区土壤砷污染研究发现，在人口密集的地区，交通和生活垃圾的排放是城市土壤As污染的主要来源。而顺德自古经济发达，商业繁荣，土壤As污染的人为来源应主要是交通活动以及生活废弃物的排放，部分农田及公园地区As含量较高还源于喷洒了含砷农药导致土壤中As的累积。

Cd高值区在研究区域中部以及南部，在广州市和佛山市交界处，属于广州市的番禺区和佛山市的顺德区。除受土壤母质的自然影响外，番禺区的农业颇具特色，Cd含量较高可能是因为各种农药的滥用造成的；而顺德区自古有“世界美食之都”之称，大量的人口聚集产生的生活垃圾、汽车尾气等是造成该地区Cd含量较高的重要原因。李苹等[21]对北京市怀柔区土壤重金属研究发现Cd的富集与农业施肥及工业活动等有关；刘子龙等[22]的研究中也有类似结论，认为含Cd化肥及农药的施用造成了土壤中Cd含量的升高。

Cu的污染程度较轻，偏高值零星分布在研究区域中偏南部，根据现场调查，文化公园、江边公园等附近的Cu含量都偏高，表明土壤Cu的富集与交通流量有关。李永杰等[23]对广州市公园土壤重金属的研究也发现，公园土壤中重金属的含量与交通流量有显著的相关性。Pb的整体受污染程度最小，未超过国家二级标准。较高浓度主要出现在采样区域的东边，该地区包含有工业园区以及

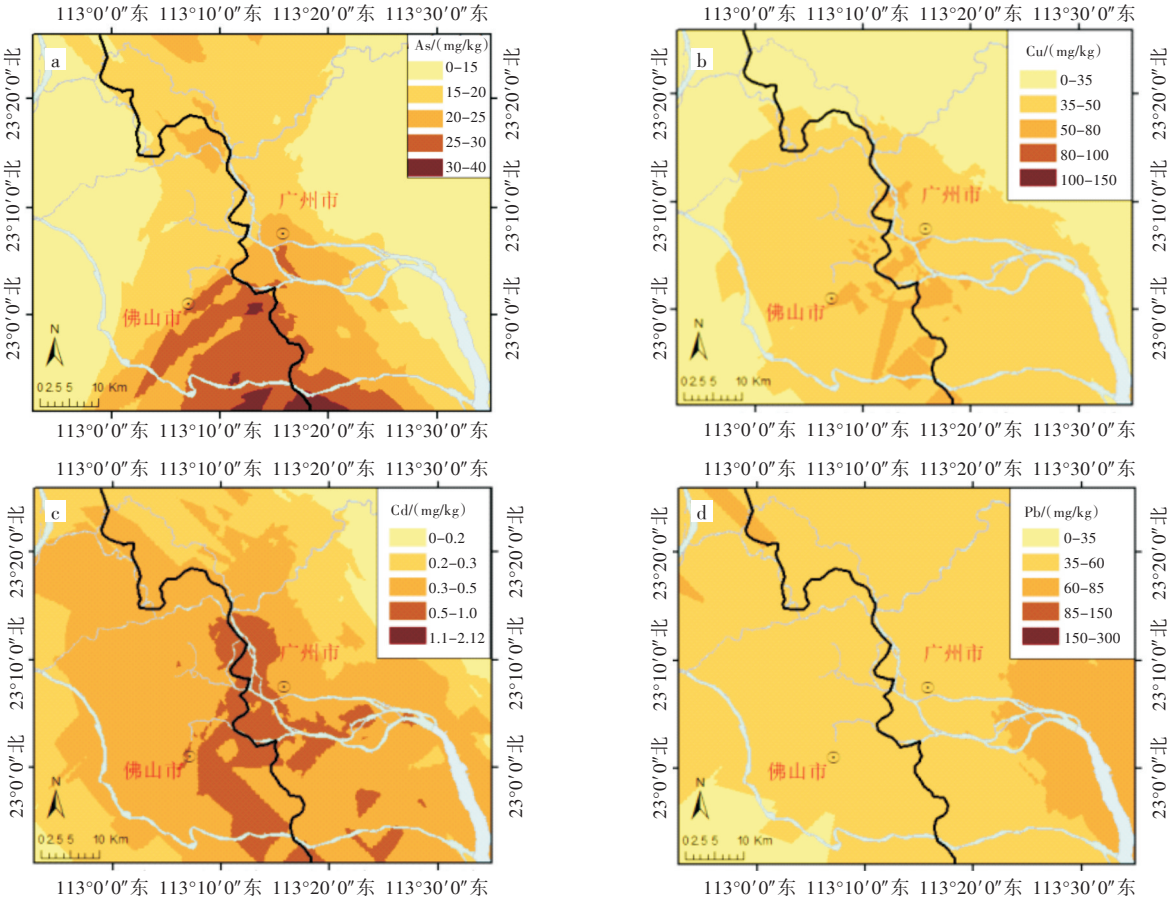

图2 土壤重金属空间分布图:(a)As含量;(b)Cu含量;(c)Cd含量;(d)Pb含量

Fig. 2 Spatial distribution of heavy metals in soil: content of (a)As; (b)Cu; (c)Cd and (d)Pb

化工区,工业园区的各种工厂产生的废水、废气、废渣中存在的Pb沉降到土壤中造成土壤Pb的累积。此外,园区内及周围的汽车尾气排放也是该地区Pb含量较高的一个重要原因。

2.4 土壤重金属潜在生态风险评价

为了解研究区重金属污染的整体情况,采用潜在生态危害法对土壤重金属的污染程度进行评价。土壤重金属潜在生态风险评价结果见表4。所有样品中Pb和Cu的*Er*值均小于40,表现为轻微生态风险水平(见表1);土壤As含量中,有1.45%的样品为中等风险,剩余98.55%为轻微生态风险;而土壤中的Cd有43.48%处于中等风险,5.80%处于较强风险,1.45%处于很强风险,表明该地区的Cd污染是最严重的,属于主要的潜在生态危害因子。根据潜在生态危害指数*RI*,有98.55%的样品*RI*值小于150,表现为轻微风险,剩余1.45%表现为中等风险。采样区域重金属的潜在生态危害整体上表现为轻微生态风险水平,目前对环境产生的影响较小。

表4 潜在生态风险评价

Tab. 4 Potential ecological risk assessment

项目	样品数	单项潜在生态危害指数*Er*			样品所占比例/%				
		最小值	最大值	平均值±标准差	轻微风险	中等风险	较强风险	很强风险	极强风险
As	69	0.83	40.67	6.36±5.39	98.55	1.45	0	0	0
Pb	69	0.23	4.12	1.07±0.72	100	0	0	0	0
Cd	69	7.2	212	40.63±29.68	49.27	43.48	5.80	1.45	0
Cu	69	0.75	5.20	2.05±0.87	100	0	0	0	0
RI	69	9.42	224.38	50.11±31.45	98.55	1.45	0	0	—

3　结　语

1)土壤重金属详查区含量除Pb未超过国家二级标准外,其他金属元素都存在不同程度的超标情况,最严重的为Cd,样品数达到56.52%。

2)根据半方差函数拟合,采样区土壤中的As和Cd都呈现中等程度的相关性,证明其既受到内源污染的影响,也受外界的人为活动、城市建设等的影响;Pb和Cu的空间相关性很弱,证明受人为活动干扰严重。根据空间分布情况,As、Cd、Cu三者的高值区均出现在采样区域中部以及偏南方向上,根据实际调查,该区域人流量较大,存在大量的公园、交通主干道、菜地等;Pb含量的高值区集中在采样区域东部,该区内工业园较多。

3)潜在生态危害指数法的分析结果表明,采样区整体属于轻微生态风险水平,目前对生态环境造成的威胁较小。主要的潜在生态危害因子为Cd。

参考文献:

[1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 国土资源通讯,2014(5):10-11.

[2] 郭修平,郭庆海. "土十条"与土壤污染治理[J]. 生态经济,2016,32(2):10-13.

[3] 谢庆裕. 土壤污染加重趋势到2020年得到遏制[N]. 南方日报,2017-01-01(2).

[4] 张玉环,余云军,龙颖贤,等. 珠三角城镇化发展重大资源环境约束探析[J]. 环境影响评价,2015,37(5):14-17.

[5] 周旋,郑琳,胡可欣,等. 污染土壤的来源及危害性[J]. 武汉工程大学学报,2014,36(7):12-19.

[6] 黄顺红,杨伊,李倩,等. 铅锌矿区土壤重金属空间分布及生态风险评价[J]. 环境科学与技术,2016,39(2):186-192.

[7] LI Z Y, MA Z W, KUIJP TS J V D, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health risk assessment [J]. Science of the Total Environment,2014,468/469:843-853.

[8] ZHANG H H, CHEN J J, ZHU L, et al. Spatial patterns and variation of soil cadmium in Guangdong Province, China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2011, 109(1): 86-91.

[9] 金阳,姜月华,周权平,等. 丹阳市吕城地区土壤重金属污染及其风险评价[J]. 环境科学与技术,2016,39(增刊1):366-370.

[10] 姚世厅,赵峰华,黄勇,等. 北京市大台煤矿区土壤重金属污染及风险评价[J]. 环境科学与技术,2016,39(增刊2):429-436.

[11] 刘希雯,胡立嵩,陆云平,等. 武汉北湖地区土壤中有机氯农药残留分布特征[J]. 武汉工程大学学报,2010,32(11):31-35.

[12] 中华人民共和国农业部. NY/T1377—2007土壤pH的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2007.

[13] 李军辉,卢瑛,张朝,等. 广州石化工业区周边农业土壤重金属污染现状与潜在生态风险评价[J]. 土壤通报,2011,42(5):1242-1246.

[14] 李艳利,肖春燕,王守全,等. 焦作市城区土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. 水土保持通报,2014,34(3):271-276.

[15] 姚娜,彭昆国,刘足根. 石家庄北郊土壤重金属分布特征及风险评价[J]. 农业环境科学学报,2014,33(2): 313-321.

[16] 李小曼,刘勤,徐梦洁,等. 苏南村镇土壤重金属空间变异性研究[J]. 土壤通报,2016,47(1):179-185.

[17] GU Y G, WANG Z H, LU S H, et al. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify source of anthropogenic impacts on metallic elements in sediments from the mid Guangdong coasts, China[J]. Environmental Pollution, 2012, 163: 248-255.

[18] LÜ J S, ZHANG Z L, LI S, et al. Assessing spatial distribution, sources, and potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of the Nansi Lake, Eastern China [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, 299 (3): 1671-1681.

[19] 安婧,晓双宫,陈宏伟,等. 沈抚灌区农田土壤重金属污染时空变化特征及生态健康风险评价[J]. 农业环境科学学报,2016,35(1):37-44.

[20] 黄庆熙,陈海珍,彭雪云,等. 广州主城区土壤砷元素污染及健康风险评价[J]. 环境与职业医学,2013,30(8):576-581.

[21] 李苹,黄勇,林赟,等. 北京市怀柔区土壤重金属的分布特征、来源分析及风险评价[J]. 现代地质,2018,32(1):86-94.

[22] 刘子龙,鲁建江,张广军. 石河子葡萄主产区土壤重金属含量分析及污染评价[J]. 西北林学院学报,2010,25(4):14-18.

[23] 李永杰,张宽义. 广州市公园土壤重金属含量特征及潜在生态危害评价[J]. 中国园艺文摘,2012,(11):43-45.

本文编辑:张　瑞