安徽省东南部江淮平原区农业土壤的重金属含量特征

蒋金柱[1],吴媛媛[2],蒋艳娇[1] (1.安徽省地质环境监测总站,安徽合肥 230001;2.安徽省地质矿产勘查局 327 地质队,安徽合肥 230011)

摘要 为了解安徽省东南部长江北岸的江淮平原区土壤重金属含量特征、污染程度及来源,采集研究区 44 个土壤样品,测定 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg、Se 含量,应用单因子指数法评价土壤的污染状况,结合地累积指数法和相关性分析初步判断重金属来源。结果表明,Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 在土壤中有一定的积累,而 As、Hg、Se 3 种元素含量低于背景值,不会对环境造成危害;单因子指数评价结果显示,Cr、Co、Ni、Cu、Cd 属于轻微污染,Zn、Pb、As、Hg、Se 属于清洁无污染;由地累积指数法和相关性分析可知,Ni、Cr、Cu 3 种元素以人为污染源为主,Cr 与 Co、Ni、Cu、Zn 之间,Co 与 Ni、Cu、Zn 之间,Ni 与 Cu、Zn 之间,Cu 与 Zn 之间,Zn 与 Cd 之间,Cd 与 Hg、Se 之间,Pb 与 Se 之间,Hg 与 Se 之间同源性很强。

关键词 重金属;单因子指数法;地累积指数法;相关性分析
中图分类号 X53 **文献标识码** A
文章编号 0517-6611(2020)12-0049-03
doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2020.12.015
开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Heavy Metal Content Characteristics of Agricultural Soils in Jianghuai Plain of Southeastern Anhui Province

JIANG Jin-zhu[1], WU Yuan-yuan[2], JIANG Yan-jiao[1] (1.Anhui Institute of Geo-Environment Monitoring, Hefei, Anhui 230001;2.No. 327 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Resources of Anhui Province, Hefei, Anhui 230011)

Abstract In order to find the characteristics of soil heavy metal content, pollution degree and sources in Jianghuai Plain on the north bank of Yangtze River in southeastern Anhui Province, forty-four soil samples in the study area were collected and the contents of Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb, As, Hg and Se were determined. The single factor index method was used to evaluate the pollution status of soil, combination with geo-accumulation index method and correlation analysis, the sources of heavy metals in soil were determined preliminarily. The results showed that Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb accumulated in the soil to some extent, while the contents of As, Hg and Se were lower than the background values, which would not cause harm to the environment. The single factor index evaluation results showed that Cr, Co, Ni, Cu and Cd were minor pollution, while Zn, Pb, As, Hg and Se were clean and pollution-free. Based on the geo-accumulation index method and correlation analysis, it can be seen that the three elements of Ni, Cr and Cu were mainly man-made pollution sources. There was a strong homology between Cr and Co, Ni, Cu, Zn, between Co and Ni, Cu, Zn, between Ni and Cu, Zn, between Cu and Zn, Zn, Cd, between Cd and Hg and Se, between Pb and Se, between Hg and Se.

Key words Heavy metal;Single-factor exponential method;Geo-accumulation index method(GAI);Correlation analysis

近年来,中国土壤重金属污染事故频发[1-2]。因土壤重金属不可降解、具有生物累积性、移动且具有毒性而对粮食安全、生态系统以及人类安全造成了严重的威胁。其中,耕地土壤重金属污染引起国内外的广泛关注[3-4]。当前,中国对土壤重金属污染研究多集中在工业区[5-6]、矿区[7-8]、城郊耕地[9]、交通道路[10]等,但对粮食主产区耕地土壤重金属的研究较少。长江中下游的江淮地区是中国农业资源条件极为优越的五大粮食主产区之一,但耕地的土壤重金属污染情况直接威胁着中国的粮食安全和国民健康[11]。鉴于此,笔者以安徽省东南部长江北岸的江淮平原区为研究对象,采用单因子指数法评估耕地土壤重金属(Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg、Se)的污染现状;同时,基于样点的区位环境,结合地累积指数法分析土壤重金属的污染源,以期为建立土壤空间数据库、全面了解江淮平原粮食主产区耕地土壤重金属污染状况、查清污染来源及制定有效的防治策略提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况 研究区主要位于长江北岸,安徽省东南部,研究区属北亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 15.8 ℃,全区降雨丰富,多年平均降雨量为 1 041 mm,主要集中在 5—8 月,占年降雨量的 60%以上。年平均蒸发量为 1 561.0 mm,年平均相对湿度为 78.50%。

作者简介 蒋金柱(1962—),男,安徽全椒人,高级工程师,从事水文、工程、环境地质勘查研究。
收稿日期 2020-03-04

研究区地貌整体属江淮波状平原区,地貌类型有河谷平原、波状平原、浅丘状平原、丘陵等。总体上来看,中部和东南部沿江平原区地势低平,西部和东北部丘陵区地势较高。研究区主要被第四系覆盖,厚度在 20~60 m,出露地层主要为全新统和上更新统,岩性主要为黏土、亚黏土、粉砂、细砂等。

1.2 样品采集与处理 采用 1∶5万地形图针对性地布设样点,采样利用 GPS 精准定位,误差均小于 5 m。共采集农用地土壤样品 44 件,样品均布于整个研究区,深度 0~20 cm。单个样品的采取方法是将土壤掰碎,除去植物根茎(不刮去表层土)、砖头石块、虫体、肥料团块等杂物后组合成 1 个样品,样品采集重量约 1 000 g。

将样品置于干净整洁场所自然风干后,经木槌轻轻敲打,过 20 目尼龙筛。过筛后,样品剩余部分不能超过 1 g。将初步加工后的样品称重并装入样品袋中,每个单点样重量大于 500 g。

样品送交南京地质调查中心进行测试,采用国家一级土壤标准物质进行监控。分析测试方法为:采用离子选择性电极法(ISE)测定 pH;采用原子荧光法(AFS)测定 As、Hg 含量;采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定 Cr、Ni、Pb 含量;采用等离子体质谱法(ICP-MS)测定 Cd 含量。采用 Excel 软件和 SPSS 数据统计软件对数据进行处理。通过肖维纳检验法剔除异常值。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤重金属污染评价方法。单因子指数法[12]是以土

壤元素背景值为评价标准来评价重金属元素的累积污染程度。在针对单因子进行评价分析时,一般选用该方法,计算公式为:

$$P_i=\frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中,P_i 为土壤中单项重金属 i 的污染指数;C_i 为污染物 i 的实测浓度;S_i 为污染物 i 在《GB15168—2018 土壤环境质量标准农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中给出的筛选值。若 $P_i\leqslant1.0$,则重金属含量在土壤背景值含量之内,土壤没有受到人为污染;若 $P_i>1.0$,则重金属含量已超过土壤背景值,土壤已受到人为污染,指数越大则表明土壤重金属累积污染程度越高。依据《DZ/T 0295—2016 土地质量地球化学评价规范》将单因子污染指数 P_i 划分为 5 个等级,见表 1。

表 1 土壤重金属环境质量等级划分标准

Table 1 Standards for classification of environmental quality of heavy metals in soil

指标 Index	单因子污染指数 Single factor pollution index	描述 Description
1 级 Grade 1	$P_i\leqslant1$	清洁
2 级 Grade 2	$1<P_i\leqslant2$	轻微污染
3 级 Grade 3	$2<P_i\leqslant3$	轻度污染
4 级 Grade 4	$3<P_i\leqslant5$	中度污染
5 级 Grade 5	$5<P_i$	重度污染

1.3.2 土壤重金属污染源识别方法。地质累积指数法是德国科学家 Muller 于 20 世纪 60 年代提出的一种研究土壤及沉积物中重金属污染程度的定量指标[13],I_{geo} 值越大,则污染越严重。该方法重点考虑了环境地球化学背景值,以及自然活动对背景值的影响,用它来判别自然背景和人为污染对土壤重金属影响程度,可以为后续的污染源识别研究奠定基础。其计算公式为:

$$I_{geo}=\log_2\frac{C_i}{1.5B_i} \quad (2)$$

式中,I_{geo} 为重金属的地累积指数,C_i 是土壤样品的重金属的含量,B_i 是重金属的自然背景值,1.5 是考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数,其分级标准见表 2。

表 2 地质累积指数评价污染等级划分标准

Table 2 Criteria for classification of pollution grade by geo-accumulation index evaluation

指标 Index	单因子污染指数 Single factor pollution index	描述 Description
0	$I_{geo}\leqslant0$	无污染
1	$0<I_{geo}\leqslant1$	轻度污染
2	$1<I_{geo}\leqslant2$	中度污染
3	$2<I_{geo}\leqslant3$	中强污染
4	$3<I_{geo}\leqslant4$	强污染
5	$4<I_{geo}\leqslant5$	较强污染
6	$5<I_{geo}\leqslant10$	极强污染

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量比较 对研究区土壤样品的重金属含量进行统计分析,结果见表 3。由表 3 可知,研究区重金属元素 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 的平均含量分别为 77.25、15.15、35.38、28.25、74.49、0.11、26.25 mg/kg,均超过背景值,其中 Ni 高出背景值 0.32 倍,Cr 高出背景值 0.27 倍,Cu 高出背景值 0.25 倍。元素超出背景值表明其在土壤中存在累积现象。而 As、Hg、Se 3 种元素平均值低于背景值,因此这 3 种元素不会对土壤环境造成危害。样本的变异系数是衡量样本资料中各观测值变异程度的重要统计量,在一定程度上能反映出人为因素对样本的影响程度[14]。研究区土壤重金属的变异系数在 18%~63%,按变异等级划分,均属于中等变异(10%≤Cv≤100%)。其中,Cd 的变异系数最高,为 63%,说明研究区土壤中 Cd 的含量受人为影响较大。

表 3 研究区土壤重金属含量比较

Table 3 Comparison of the soil heavy metal content in the study area

重金属 Heavy metal	可疑数据个数 Number of suspicious data	背景值 Background value[15] mg/kg	平均值 Mean value mg/kg	最大值 Maximum value mg/kg	最小值 Minimum value mg/kg	标准差 Standard deviation mg/kg	变异系数 Variable coefficient %
Cr	0	61.00	77.25	105.00	44.20	13.94	0.18
Co	0	12.70	15.15	22.50	4.71	3.20	0.21
Ni	0	26.90	35.38	53.70	11.60	8.81	0.25
Cu	1	22.60	28.25	41.90	8.93	5.79	0.20
Zn	1	74.20	74.49	119.00	27.80	18.54	0.25
Cd	2	0.10	0.11	0.26	0.03	0.07	0.63
Pb	1	26.00	26.25	38.30	10.40	4.75	0.18
As	1	11.20	9.67	15.20	3.78	2.45	0.25
Hg	3	0.07	0.05	0.10	0.02	0.02	0.44
Se	1	0.29	0.18	0.30	0.09	0.05	0.28

2.2 土壤重金属污染评价 对研究区土壤样品的重金属含量进行单因子指数评价,结果见表 4。由表 4 可知,Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb、As、Hg、Se 的单因子指数均值分别为 1.25、1.19、1.32、1.22、0.98、1.14、0.99、0.88、0.64、0.62,污染程度从大到小依次为 Ni>Cr>Cu>Co>Cd>Pb>Zn>As>Hg>Se,其中 Cr、Co、Ni、Cu、Cd 的单因子指数 $1<P_i\leqslant2$,属于轻微污染,而 Zn、Pb、As、Hg、Se 的单因子指数 $P_i\leqslant1$,属于清洁无污染。

2.3　土壤重金属来源分析

2.3.1　地累积指数法。当 I_{geo} 值大于 0 时表示土壤中的金属来自人为活动而不是来源于自然地壳的贡献[11]。研究区土壤重金属的 I_{geo} 均值从大到小依次为 Ni>Cr>Cu>Co>Pb>Zn>Cd>As>Hg>Se(表 4),均表现为无污染。其中,Ni、Cr、Cu 的 I_{geo} 接近于 0,可初步判断研究区土壤中 Ni、Cr、Cu 3 种元素以人为污染源为主。

表 4　研究区土壤重金属污染指数比较

Table 4　Comparison of the soil heavy metal pollution index in the study area

重金属 Heavy metal	单因子指数 Single factor index			地质累积指数 Geo-accumulation index		
	平均值 Average value	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	平均值 Average value	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value
Cr	1.25	1.72	0.72	−0.28	0.20	−1.05
Co	1.19	1.77	0.37	−0.37	0.24	−2.02
Ni	1.32	2.00	0.43	−0.24	0.41	−1.80
Cu	1.22	1.85	0.40	−0.29	0.31	−1.92
Zn	0.98	1.60	0.37	−0.61	0.10	−2.00
Cd	1.14	2.68	0.33	−0.66	0.84	−2.18
Pb	0.99	1.47	0.40	−0.58	−0.03	−1.91
As	0.88	1.36	0.34	−0.82	−0.14	−2.15
Hg	0.64	1.46	0.32	−1.17	−0.04	−2.22
Se	0.62	1.03	0.31	−1.28	−0.54	−2.27

2.3.2　相关性分析。采用 SPSS 25 软件对重金属元素间的相关性进行分析,结果显示相关系数较高(表 5)。元素间相关性显著和极显著,说明元素间一般具有同源关系或是复合污染[16]。Cr 与 Co、Ni、Cu、Zn 在 0.01 水平上均呈极显著正相关,与 Cd 在0.05水平上呈极显著正相关;Co 与 Ni、Cu、Zn 在 0.01 水平上呈极显著正相关,与其他元素相关性不显著;Ni 与 Cu、Zn 在 0.01 水平上呈极显著正相关,与其他元素相关性均不显著;Cu 与 Zn 在 0.01 水平上呈极显著正相关;Zn 与 Cd 在 0.05 水平上呈极显著正相关,与其他元素相关性不显著;Cd 与 Hg、Se 在 0.01 水平上呈极显著正相关,与 Pb、As 相关性不显著;Pb 与 Se 在 0.01 水平上呈极显著正相关;As 与各元素间相关性不显著;Hg 与 Se 在 0.01 水平上呈极显著正相关。上述呈极显著正相关的元素之间具有很强的相关性,同源性很强。

表 5　研究区土壤重金属各元素含量间的相关系数矩阵

Table 5　Correlation coefficient matrix of soil heavy metal elements in the study area

重金属 Heavy metal	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	As	Hg	Se
Cr	1									
Co	0.674**	1								
Ni	0.949**	0.783**	1							
Cu	0.750**	0.888**	0.826**	1						
Zn	0.866**	0.703**	0.888**	0.835**	1					
Cd	0.323*	0.089	0.252	0.162	0.351*	1				
Pb	−0.178	−0.274	−0.273	−0.251	0.040	0.279	1			
As	−0.023	−0.217	−0.113	−0.165	−0.129	0.144	0.158	1		
Hg	0.118	−0.057	0.058	0.072	0.236	0.622**	0.290	−0.045	1	
Se	−0.046	−0.164	−0.108	−0.100	0.133	0.442**	0.547**	0.077	0.559**	1

注:**表示在 0.01 水平(双尾)相关性极显著;*表示在 0.05 水平(双尾)相关性显著

Note: ** indicated extremely significant correlation at 0.01 level; * indicated significant correlation at 0.05 level

3　结论与讨论

该研究以重金属含量特征分析为基础,结合土壤污染评价和相关性分析对研究区内重金属污染来源进行初步判定,得出以下主要结论:

(1)安徽省东南部江淮平原区农业土壤中 Cr、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 的平均含量分别为 77.25、15.15、35.38、28.25、74.49、0.11、26.25 mg/kg,均超过背景值,在土壤中有一定的积累。而 As、Hg、Se 3 种元素平均值低于背景值,不会对环境造成危害。

(2)单因子指数评价结果显示研究区土壤重金属元素污染程度从大到小依次为 Ni>Cr>Cu>Co>Cd>Pb>Zn>As>Hg>Se,其中 Cr、Co、Ni、Cu、Cd 的单因子指数 $1<P_i\leq 2$,属于轻微污染,而 Zn、Pb、As、Hg、Se 的单因子指数 $P_i\leq 1$,表明其清洁无污染。

(3)基于地累积指数法和相关性分析初步判定重金属的污染来源,结果表明 Ni、Cr、Cu 3 种元素以人为污染源为主,Cr 与 Co、Ni、Cu、Zn 之间,Co 与 Ni、Cu、Zn 之间,Ni 与 Cu、Zn 之间,Cu 与 Zn 之间,Zn 与 Cd 之间,Cd 与 Hg、Se 之间,Pb 与 Se 之间,Hg 与 Se 之间具有很强的相关性和同源性。

参考文献

[1] ZHOU C C, LIU G J, FANG T, et al. Partitioning and transformation behavior of toxic elements during circulated fluidized bed combustion of coal gangue[J].Fuel, 2014,135:1-8.

(下转第 59 页)

的生态修复指导原则下,海拔、坡向以及土壤类型等因素也对植被生长及分布情况造成影响。未来研究重点将侧重在气候、地形及土壤数据等潜在的各类生态条件,同时结合经济发展、国土空间规划,以期更加合理地设置全省及红线内土地覆被情况,并在此基础上模拟相关生态效益,从而对全省和局部地区的生态环境质量改善和服务价值提升提供更有益的借鉴。

4　结论

(1)2017 年,安徽省生态系统服务总价值达 20 838.0 亿元,红线内的服务价值总额达 7 346.4 亿元,占比 35.3%。通过划定红线保育生态系统服务价值的生态效益比达 2.33。

(2)2017 年,全省生态保护红线内的服务价值贡献以水体和林地为主,二者提供的服务价值之和占红线总价值的 97.7%;红线内水文调节服务价值突出,占红线总价值量的 55.3%。

(3)鉴于城镇扩张的巨大压力,5 种情景下全省生态系统服务价值相较于 2017 年均有下降。随着红线内修复强度提升,红线内和全省的服务价值量以及红线内服务价值占全省的比重均呈现梯度增加,在红线内开展生态修复能有效地提升红线内和全省的服务功能。

(4)随着红线内修复强度提升,情景 2~4 新增生态系统服务价值抵消生态工程花费需要的时间分别约为 2.1、1.3 和 1.0 年,修复强度的增加带来的服务效益是逐渐增加的,且生态经济效益也更为显著。

参考文献

[1] 国务院.关于加强环境保护重点工作的意见:国发〔2011〕35 号 [A/OL].(2011-10-20)[2019-08-25].http://www.gov.cn/zwgk/2011-10/20/content_1974306.htm.

[2] 环境保护部办公厅,国家发展和改革委办公厅.关于印发《生态保护红线划定指南》的通知:环办生态〔2017〕48 号[A/OL].(2017-07-27)[2019-08-25].http://www.hnep.gov.cn/xxgk/hbywxxgk/zrst/stbh/sthx/webinfo/2017/07/1510134721853018.htm.

[3] 中共中央办公厅,国务院办公厅.关于划定并严守生态保护红线的若干意见:厅字〔2017〕2 号[A/OL].(2017-08-25)[2019-08-25].http://www.china.com.cn/guoqing/2017-08/25/content_41472317.htm.

[4] 安徽省人民政府.关于发布安徽省生态保护红线的通知:皖政秘〔2018〕120 号[A/OL].(2018-06-27)[2019-08-25].http://www.ah.gov.cn/public/1681/7926661.html.

[5] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资源的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.

[6] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].自然资源学报,2008,23(5):911-919.

[7] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.

[8] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队.安徽省 2018 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL].(2019-03-01)[2019-08-25].http://tjj.ah.gov.cn/tjjweb/web/info_view.jsp? strId=fa3e804a5fea425db132860746f03c3e&strColId=14000601479283576&strWebSiteId=13781720451562390&_index=0.

[9] GONG P,LIU H,ZHANG M N,et al.Stable classification with limited sample:Transferring a 30-m resolution sample set collected in 2015 to mapping 10-m resolution global land cover in 2017[J].Science bulletin,2019,64(6):370-373.

[10] 安徽省统计局,国家统计局安徽调查总队.安徽统计年鉴 2018[M].北京:中国统计出版社,2018.

[11] 国家发展和改革委员会价格司.全国农产品成本收益资料汇编 2018[M].北京:中国统计出版社,2018.

[12] COSTANZA R,D'ARGE R,DE GROOT R,et al.The value of the world's ecosystem services and natural capital[J].Nature,1997,387:253-260.

[13] COSTANZA R,DE GROOT R,SUTTON P,et al.Changes in the global value of ecosystem services[J].Global environmental change,2014,26:152-158.

[14] WANG W J,GUO H C,CHUAI X W,et al.The impact of land use change on the temporospatial variations of ecosystems services value in China and an optimized land use solution[J].Environmental science & policy,2014,44:62-72.

[15] MA (Millennium Ecosystem Assessment).Ecosystems and human well-being[M].Washington,DC:Island Press,2005.

[16] 朱文泉,潘耀忠,张锦水.中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J].植物生态学报,2007,31(3):413-424.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.造林技术规程:GB/T 15776—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.森林抚育规程:GB/T 15781—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.

(上接第 51 页)

[2] NIU L L,YANG F X,XU C,et al. Status of metal accumulation in farmland soils across China:From distribution to risk assessment[J].Environmental pollution, 2013, 176:55-62.

[3] MA L,WANG L,TANG J,et al. Arsenic speciation and heavy metal distribution in polished rice grown in Guangdong Province, Southern China [J].Food chemistry, 2017, 233:110-116.

[4] FACCHINELLI A,SACCHI E,MALLEN L. Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils[J].Environmental pollution, 2001, 114(3):313-324.

[5] 柴育红,王明新,赵兴青.化工工业园区地表灰尘重金属污染及健康风险:以常州市为例[J].环境工程,2019,37(8):190-194,172.

[6] 方月梅,张晓玲,刘娟,等.工业园区农用土壤中重金属 Cu 和 Pb 的形态研究[J].湖北理工学院学报,2018,34(2):14-18.

[7] 吴红璇,史常青,张艳,等.乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析[J].环境科学,2020,41(3):1167-1175.

[8] 孙浩,周春财,徐仲雨,等.淮北矿区土壤重金属空间分布与环境评价[J].中国科学技术大学学报,2018,48(7):560-566.

[9] 陈毛华,刘明广,郭斌,等.阜阳市城郊菜地重金属污染调查与评价[J].地球与环境,2017,45(3):322-328.

[10] 张慧峰,钱枫,宋洋,等.城市交通对道路周边土壤重金属污染影响的研究[J].河北科技大学学报,2010,31(1):57-61.

[11] 尚二萍,许尔琪,张红旗,等.中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J].环境科学,2018,39(10):4670-4683.

[12] 范拴喜,甘卓亭,李美娟,等.土壤重金属污染评价方法进展[J].中国农学通报,2010,26(17):310-315.

[13] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J].Geology journal,1969,2(3):109-118.

[14] 方晓波,史坚,廖欣峰,等.临安市雷竹林土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].应用生态学报,2015,26(6):1883-1891.

[15] 魏复盛,杨国治,蒋德珍,等.中国土壤元素背景值基本统计量及其特征[J].中国环境监测,1991,7(1):1-6.

[16] 柴世伟,温琰茂,韦献革,等.珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J].中山大学学报(自然科学版),2004,43(4):90-94.