

# Study on Heavy Metals Pollution of Forest Soils around Qianbei Coal-Fired Plant

Xianfei Huang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Guizhou Provincial Key Lab. for Environment, Guizhou Normal University, Guiyang Guizhou

<sup>2</sup>College of Forestry, Guizhou University, Guiying Guizhou

Email: hxfsjws@gznu.edu.cn

Received: Jul. 31<sup>st</sup>, 2016; accepted: Aug. 15<sup>th</sup>, 2016; published: Aug. 18<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

To study the heavy metals pollution status of soils from forest land surrounding coal-fired plant in mountainous area, species community structures of 7 forest lands surrounding Qianbei Coal-fired Plant were investigate. Soil samples were collected at central parts and edge parts of these forest lands, and soils in cropland out of these forest lands were sampled as well. Pollution levels of Pb, Cd, Hg, As, Cu and Cr were analyzed. The results suggested that Pb in soils of forest land was mainly associated with rock weathering; forest trees are good shields against the Pb pollution caused by atmospheric deposition. For Hg and Cd pollution, its protection primary depended on its forest closure and components. According to the single factor and Nemerow comprehensive index method, study region was polluted with Hg, Cd and Pb, and no pollution of As, Cu and Cr in these areas was observed.

## Keywords

Coal-Fired Plant, Forest, Soil, Heavy Metals

---

# 黔北火电厂周边森林土壤重金属污染现状研究

黄先飞<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>贵州师范大学, 省山地环境重点实验室, 贵州 贵阳

<sup>2</sup>贵州大学, 林学院, 贵州 贵阳

Email: hxfsjws@gznu.edu.cn

## 摘要

为探索山区火电厂周边森林土壤重金属污染现状，调查了贵州省黔北火电厂周边7个森林样地物种群落结构概况，在7个森林样点的中心部分、林地边缘及林外耕地进行了土壤样品采集，分析研究了土壤样品中铅、镉、汞、砷、铜与铬6中重金属的污染水平。结果表明林地土壤重金属Pb基本源于土壤形成的基岩，受外界污染较小。林地植被对大气沉降引起的Pb污染具有较好屏蔽效果，但对Hg、Cd两种元素的屏蔽效果相对较弱，主要受林分与密闭度的影响。基于贵州省土壤背景值及单因子指数与综合污染指数法评价结果，研究区土壤主要存在Hg、Cd、Pb的污染，而As、Cu及Cr则不存在污染现象。

## 关键词

火电厂，森林，土壤，重金属

## 1. 引言

重金属污染是当今环境污染研究领域的重点之一[1]。由于重金属具有毒性大、潜伏期长，且能沿食物链富集等特点，对生态环境及人类健康存在较大的潜在危害[2] [3]。受重金属污染的土壤、水域等工程治理难度大、耗费高，普遍学者认为源头防治是环境重金属污染控制的首要途径[4] [5]。

火电厂重金属污染主要源于煤炭燃烧，煤炭燃烧过程中，会有多种元素(特别是重金属 Hg 及半金属 AS 元素)通过烟气、灰渣、废水等介质最终污染周边大气、土壤及水环境[6] [7]。冯新斌等研究发现燃煤和有色金属冶炼是我国两个最大的人为 Hg 释放源，在燃煤过程中 Hg 几乎全部以气态形式进入烟气而被排放到大气中[8]，年均释放量约占总释放量的 80% [9]。刘娜等对贵阳市中心城区采集的 21 个大气降水进行了研究，通过分析降水中总 Hg 和阴阳离子之间的相互关系，发现总 Hg 和阴离子  $\text{SO}_4^{2-}$  具有显著的相关性，与  $\text{F}^-$  有一定的相关性，而与  $\text{NO}_3^-$  不具有相关性。同时认为贵阳市大气降水中的总 Hg 主要来源于燃煤等人为释放源[10]。王凌青等研究发现，宝鸡燃煤电厂周围土壤 Hg 严重污染，且具有很强的潜在生态危害[11]-[13]。方凤满等研究表明，芜湖燃煤电厂周边土壤中 Hg 含量高于国家标准[14]。付亚宁等对宁夏地区大武口电厂周围土壤中 Cu、Zn、Pb 和 Cr 进行测定分析后，电厂是复杂的外源重金属进入土壤的主要途径之一[15]。国外学者也曾对燃煤火电厂周边土壤中 As、Hg 污染进行研究[16] [17]。Smolka-Danielowska 对地处波兰南部西里西亚地区(Silesia)的 Rybnik 燃煤火电厂引起的烟尘中 Cu, Ni, Pb, Zn, Cr 及 Cd 六种重金属进行了研究。发现烟尘中 Cu, Ni, Pb, Zn, Cr 及 Cd 含量分别达到了 38 mg/kg, 41 mg/kg, 44 mg/kg, 120 mg/kg, 64 mg/kg 和 3 mg/kg [18]。金沙煤炭储量丰富，已探明的优质无烟煤储量达 44.97 亿吨。1996 年黔北电厂动工后，林华、龙凤、林东、腾龙等一批大型煤矿落户金沙。全县已建成规模矿井 121 对，全县原煤产量由 80 万吨/年到 2006 年的全县原煤产量达 856 万吨。黔北电厂投入使用后，贡献了地方财政、安置了地方劳动力，为地方经济发展做出了巨大贡献，同时也推动了“西电东送”工程力度。然而，由此带来的负面效应也是显然的，其引起的环境污染、生态破坏问题日渐突出。

目前，黔北电厂正筹划迁址与扩建事宜。本研究结合黔北电厂周边地形地貌结构特征，拟研究电厂大气污染对周边森林土壤重金属污染情况，探讨燃煤电厂对周边森林土壤重金属的影响，为新厂区环境规划、林地培育、生态建设、民居与农作活动缓冲区划分等提供参考。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区域

黔北电厂位于金沙县城边上。金沙位于贵州省西北部，地处乌蒙山与娄山山脉的交汇处，夹在乌江与赤水河之间。本研究主要集中在黔北电厂周围(图 1)，自然林地乔木层主要以马尾松(*Pinus massoniana* Lamb)、侧柏(*Platycladus orientalis* L. Franco)、柳杉(*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Dietr)、喜树(*Camptotheca acuminata* Decne)、青冈(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst)为主，灌木层主要以悬钩子(*Rubus corchorifolius* L. F.)、荚蒾(*Viburnum dilatatum* Thunb)、野花椒(*Zanthoxylum simulans* Hance)、棕榈(*Trachycarpus fortunei* (Hook.) H. Wendl.)、崖豆藤(*Millettia wight et Arn.*)及火棘(*Pyracantha fortuneana* (Maxim.) Li)为主，草本层主要为肾蕨(*Tuber sword Fern*)、茅草(*Imperata cylindrica* Linn. Beauv)、野烟(*Lobelia seguinii* Levl. Et Vant.)、白蒿(*Herba artimisiae* Sieversianae)与苦蒿(*Herba Acroptili* Repentis)。研究区小地形为宽峡谷形。常年风向以东风为主，东北风、西风与西北风次之。2014 年，该区域东风、东北风、西风、西北风、北风、东南风、西南风与南风分别为 108 天、68 天、63 天、52 天、37 天、25 天、11 天与 3 天(风向玫瑰图见图 1)。因而，从风向上看，火电厂引起的污染将主要集中在西面，西南、东面与东南面次之。这与研究组前期对该火电厂耕地土壤重金属污染的研究结果有所差异[19]，这可能还受周围地形、林地分布的影响。

### 2.2. 野外调研与样品采集

基于黔北电厂周边地形、林地分布情况及课题组前期对该电厂周边耕地土壤中重金属污染的研究结果，2015 年 8 月在电厂周边林地共设置了 7 个样点，样地信息见表 1。分别在样点所处林地的中心部分、边缘及林地外的耕地进行了表层(0~10 cm)土壤样品采集。土壤样品采集约 1 kg，运回实验室后除杂，室温晾干，过 2 mm 筛样品用于 pH 值测定，过 0.145 mm 筛样品用于重金属元素 Pb、Cd、Cr、Hg、As 及 Cu 分析。

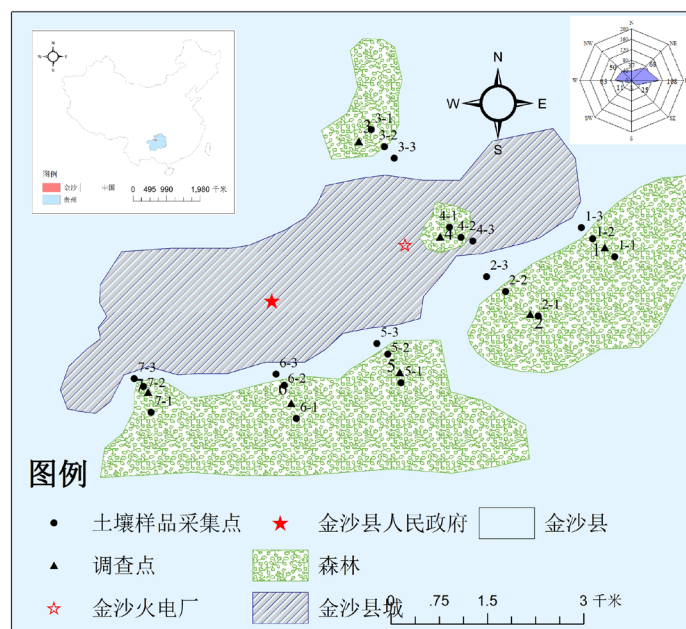


Figure 1. Location of forestry survey plots

图 1. 研究区样点设置分布图

Table 1. General information of forestry sampling plots

表 1. 样地基础信息

样点	地形	小生境	坡度(°)	坡向	坡位	土壤颜色	质地	海拔(米)	人为活动强度
1#	坡地	土面	31	北	坡中部	黄色	壤土	976	弱
2#	坡地	土面	44	北	坡中部	棕黄色	壤土	975	弱
3#	坡地	石土面	57	东	坡上部	褐色	砂土	999	弱
4#	平地	土面	0	/	/	棕黄色	壤土	899	强
5#	坡地	石土面	34	西南	坡上部	黄色	壤土	1002	弱
6#	坡地	土面	20	西南	坡上部	黄色	壤土	1053	无
7#	坡地	土面	14	东北	坡下部	褐色	砂土	939	强

### 2.3. 分析方法

土壤 pH 采用酸度计法测定；Cr、Cu 采用酸全分解法进行消解，等离子发射光谱法进行测定；Pb、Cd 采用酸全分解法进行消解，石墨炉 - 原子吸收法进行分析；Hg、As 采用王水消化，冷原子荧光法测定[13]。制图与数据统计分析采用 Microsoft excel 2003，SPSS 18.0 及 ArcGis 10.3 等软件完成。

## 3. 结果

### 3.1. 重金属分布情况

有表 2 可知，研究区林中与林缘土壤 pH 值皆大于 7，显弱碱性，而林外耕作区土壤 pH 值皆小于 7，显弱酸性。林中、林缘与林外表层土中 Pb 含量在平均值上没有显著差异(表 2)。林中表层土中重金属 Pb 含量分布较为均匀，变异系数为 16.47%。而林外、林缘表层土中 Pb 含量变异性则较大变异系数分别达到了 49.47%和 38.40%。林中与林缘表层土壤中皆出现 Cd 未检出现象，林中 Cd 含量最高值出现在 7 号样点，达 1.03 mg/kg。5、6 号样点 Cd 含量也相对较高。但 Hg 含量相对较低。林中表层土壤中 Hg 平均含量为 0.30 mg/kg 显著低于林缘(0.64 mg/kg)与林外(0.69 mg/kg)耕地表层土。As 在林中、林缘与林外表层土中含量变异性皆较大，变异系数大于 70%。可以看出，3、5、6、7 号样点 As 皆较低，可能与这些样地草本层或灌木层长势较好有关。Cu 与 Cr 在林中、林缘与林外表层土中含量皆无明显规律，但变异性较大，变异系数在 48%以上。

### 3.2. 重金属污染水平

中国土壤环境质量标准(II 级)及 1990 年全国土壤普查时贵州省土壤背景值见表 3。中国土壤环境质量标准 II 级(pH 范围 6.5~7.5)为参照，镉含量则普遍超过土壤环境质量标准限量值，林中、林缘及林外土壤镉超标率分别为 85.71%，57.14%与 71.43%。汞超标率略低于镉，林中、林缘及林外土壤超标率分别为 14.28%，71.43%及 57.14%。研究区土壤铅、砷、铜、铬污染水平相对较低，仅 2 号样地林中土壤砷含量超过土壤环境质量标准 II 级限量值。

以 1990 年全国土壤普查时贵州省土壤背景值为参照，仅铬元素不存在污染现象，其余各重金属元皆存在一定的污染现象。为此本研究采用了单因子指数与综合污染指数法进行评价[21]。单因子污染指数计算公式为：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

**Table 2. Heavy metals in soil samples (mg/kg)**  
**表 2. 表层土样品中重金属情况(mg/kg)**

样地	pH	Pb	Cd	Hg	As	Cu	Cr
1#林中	7.15	31.00	0.36	0.40	27.00	11.91	18.62
2#林中	7.45	24.37	ND*	0.22	31.23	4.42	1.96
3#林中	7.14	38.37	0.42	0.14	1.18	36.01	77.28
4#林中	7.06	40.16	0.98	0.42	3.21	22.56	48.33
5#林中	7.32	36.57	0.67	0.15	4.26	17.55	29.23
6#林中	7.15	39.01	0.99	0.38	3.72	46.65	36.15
7#林中	7.06	32.64	1.03	0.52	4.54	51.34	26.71
平均值	7.21	33.66	0.69	0.30	11.99	27.98	31.66
变异系数(%)	2.00	16.47	44.86	51.20	111.66	69.32	79.71
1#林缘	7.12	11.72	0.20	0.65	26.96	4.41	5.02
2#林缘	7.22	32.49	ND	0.45	4.73	8.90	17.18
3#林缘	7.15	39.04	0.52	0.90	16.70	23.58	37.30
4#林缘	7.11	38.25	0.32	0.76	14.11	22.13	30.22
5#林缘	7.18	38.66	ND	0.37	9.92	8.138	29.72
6#林缘	7.01	51.58	ND	0.55	4.48	8.56	3.83
7#林缘	7.10	14.31	0.45	0.92	8.16	41.73	32.63
平均值	7.13	31.30	0.39	0.64	11.83	15.89	20.95
变异系数(%)	1.02	49.47	43.13	35.85	73.16	89.96	68.91
1#林外	6.83	27.17	0.97	1.36	ND	30.48	21.47
2#林外	6.57	53.51	0.68	0.12	18.16	21.79	27.23
3#林外	6.59	48.25	0.51	0.50	1.35	33.55	39.87
4#林外	6.51	51.22	0.67	0.32	11.23	30.66	29.87
5#林外	6.75	19.21	0.29	0.40	4.69	21.30	8.42
6#林外	6.66	40.46	0.21	0.54	6.62	8.48	5.97
7#林外	6.85	25.75	0.72	1.20	7.78	46.93	36.49
平均值	6.71	35.73	0.56	0.69	6.43	27.09	23.24
变异系数(%)	1.79	38.40	50.58	70.64	100.65	48.27	60.51

注：“ND”为未检出，Cd 的检出限为 0.05 mg/kg；As 检出限为 0.5 mg/kg。

**Table 3. Environmental quality standard for soils and background values of heavy metals in soils from Guizhou Province (mg/kg)**

**表 3. 土壤环境质量标准及贵州省土壤重金属背景值(mg/kg)**

	Pb	Cd	Hg	As	Cu	Cr
土壤环境质量标准(II级)	300.00	0.30	0.50	30.00	200.00	300.00
贵州省土壤重金属背景值[20]	35.20	0.66	0.11	20.00	32.00	95.50

式中,  $P_i$  为土壤中第  $i$  污染物的污染指数;  $C_i$  为第  $i$  种污染物的实测含量(mg/kg);  $S_i$  为土壤的第  $i$  污染物的背景值。内梅罗综合污染指数法:

$$P'_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(P_{i_{\text{max}}})^2 + (P_{i_{\text{ave}}})^2}{2}}$$

式中:  $P$  内梅罗综合污染指数,  $P_{i_{\text{max}}}$  为环境污染物中单项污染因子中最大值的平方,  $P_{i_{\text{ave}}}$  为环境污染物中单项污染因子的平均值的平方, 内梅罗综合污染指数评价标准见表 4。

从单因子污染指数来看(表 5), 无论林中、林缘, 还是林外耕地, 都存在 Hg 元素污染现象, 表明该地区土壤 Hg 污染是较为严重的。此外, 林地中部土壤还存在 Cd 污染现象。林外耕地土壤还受到了 Pb 污染, 主要受农作活动的影响。基于贵州省土壤背景值, 研究区 As、Cu 及 Cr 不存在污染现象。从内梅罗综合指数来看, 林中、林缘及林外耕地土壤均受到了污染, 从林中、林缘到林外耕地, 内梅罗综合指数逐渐增大。同时可以看出综合指数的主要贡献源于 Hg、Pb 及 Cd。

**Table 4.** The evaluation criterion for Nemerow comprehensive pollution index of the soil  
**表 4.** 土壤内梅罗综合污染指数评价标准

等级划分	1	2	3	4	5
综合污染指数( $P_{\text{综}}$ )	<0.7	0.7~1.0	1.0~2.0	2.0~3.0	>3.0
污染等级	安全	警戒级	轻污染	中污染	重污染

**Table 5.** Classification results of single factor and Nemerow comprehensive index method (n = 7)  
**表 5.** 单因子和内梅罗综合指数分级结果(n = 7)

研究位置	元素	单因子	污染水平	内梅罗指数
林地中部	Pb	0.96	未污染	2.08 重污染
	Cd	1.05	污染	
	Hg	2.73	污染	
	As	0.60	未污染	
	Cu	0.87	未污染	
	Cr	0.33	未污染	
	Pb	0.89	未污染	
林缘	Cd	0.59	未污染	4.36 重污染
	Hg	5.82	污染	
	As	0.59	未污染	
	Cu	0.50	未污染	
	Cr	0.22	污染	
	Pb	1.02	污染	
	Cd	0.85	未污染	
林外耕地	Hg	6.27	污染	4.58 重污染
	As	0.32	未污染	
	Cu	0.85	未污染	
	Cr	0.24	未污染	

### 3.3. 重金属污染源解析

研究区域土壤重金属 Pb 基本无污染,林中表层土壤 Pb 含量稳定在 30 mg/kg 左右。分布相对均匀,说明研究区域无明显 Pb 点源污染。林中表层土壤 Pb 则主要来源于土壤背景值,大气沉降大部分被植被所屏蔽。林缘与林外土壤 Pb 含量变化差异较大,林缘土壤 Pb 差异可能主要源于植被的屏蔽差异;而林外耕地土壤 Pb 含量变化差异则可能主要源于农作活动与大气沉降,如农作物种类,施肥情况等。Cd、Hg 在林中、林缘与林外皆存在较大差异。林中重金属污染主要源于土壤背景值与大气沉降(主要源于火电厂大气污染)。前期研究结果表明该火电厂对研究区域 Hg、Cd、Cu 与 Cr 污染具有区域性的。本研究进一步表明,这四种元素污染方向的区域性。同时林地植被对 Cd、Hg 两种元素的屏蔽作用并不显著,主要受林分密闭度的影响。As 元素含量总体较低,本研究还发现灌木层与草本层植物对土壤 As 污染具有较好的去除效果,如 3 号、5 号、6 号与 7 号样点,虽然 6 号样点灌木层较弱,但该样地草本层长势较好。其次,地理环境及土壤质地,也可能是影响土壤重金属污染水平的因素之一。

## 4. 结论

山区火电厂的污染主要受地形、风向的影响,因而在山区火电厂建立选址时,生态环境效应为主要考虑因素之一。黔北火电厂对周边林地乔木层有一定的影响,但对灌木层与草本层的影响较小。基于贵州省土壤背景值及单因子指数与综合污染指数法评价结果,研究区土壤主要存在 Hg、Cd、Pb 的污染,而 As、Cu 及 Cr 不存在污染现象。综合而言,贵州山区火电厂周边林地培育中,特别是防护林与缓冲区林地培育中,乔木层可重点考虑侧柏、松、杉等非阔叶物种;灌木层可重点考虑油茶等;而草本层则当重点考虑蕨类植物。同时,乔木层林分密闭度应进行合理控制,充分发挥林地灌木层与草本层的生态作用。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(21407031)。

## 参考文献 (References)

- [1] 李奔, 谢文娟, 胡敏予. 施用复合肥和腐植酸液肥对苋菜重金属富集与转运的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2013(9): 105-111.
- [2] 黄先飞, 秦樊鑫, 胡继伟. 重金属污染与化学形态研究进展[J]. 微量元素与健康研究, 2008(1): 48-51.
- [3] Donald, L.S. (2005) Toxic Metals in the Environment: The Role of Surfaces. *Elements*, **1**, 193-197. <http://dx.doi.org/10.2113/gselements.1.4.193>
- [4] Huang, X.F., Hu, J.W., Li, C.X., Deng, J.J., Long, J. and Qin, F.X. (2009) Heavy-Metals Pollution and Potential Ecological Risk Assessment of Sediments from Baihua Lake. *International Journal of Environmental Health Research*, **19**, 405-419. <http://dx.doi.org/10.1080/09603120902795598>
- [5] 韩龙喜, 朱党生. 河网地区水环境规划中的污染源控制方法[J]. 水利学报, 2001(10): 28-31.
- [6] Wei, X., Han, B.P., Zhou, D. and Ange, N. (2012) Physicochemical Properties and Heavy Metals Leachability of Fly Ash from Coal-Fired Power Plant. *International Journal of Mining Science and Technology*, **22**, 405-409. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2011.12.002>
- [7] Wu, Y.L., Rahmaningrum, D.G., Lai, Y.C., Tu, L.K. and Lee, S.J. (2012) Mercury Emissions from a Coal-Fired Power Plant and Their Impact on the Nearby Environment. *Aerosol and Air Quality Research*, **12**, 643-650. <http://dx.doi.org/10.4209/aaqr.2012.04.0080>
- [8] 冯新斌, 洪业汤, 洪冰, 等. 煤中汞的赋存状态研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2001, 20(2): 71-78.
- [9] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, 21(3): 436-457.
- [10] 刘娜, 仇广乐, 冯新斌, 等. 贵阳市大气降水中汞的分布特征[J]. 生态学杂志, 2011(5): 933-938.

- [11] 王凌青, 卢新卫, 王利军, 等. 宝鸡燃煤电厂周围土壤环境 Hg 污染及其评价[J]. 土壤通报, 2007(3): 622-624.
- [12] 王凌青, 卢新卫, 戴丽君, 等. 燃煤电厂周围土壤中 Hg 的空间分析和风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2007(2): 629-633.
- [13] 李晓雪, 卢新卫, 任春辉, 等. 宝鸡二电厂周边农田土壤重金属污染特征及评价[J]. 干旱地区农业研究, 2012(2): 220-224.
- [14] 方凤满, 张志明, 陈文娟, 等. 芜湖市区春季地表灰尘中汞和砷的空间及粒径分布规律[J]. 环境科学学报, 2009(9): 1871-1877.
- [15] 付亚宁, 范秀华, 邹璐, 等. 电厂周围土壤重金属空间分布与风险评价研究[J]. 中国环境监测, 2011(6): 5-8.
- [16] Adamczyk, D. (2010) Assessing Heavy Metal Content in Soils Surrounding a Power Plant. *Polish Journal of Environmental Study*, **19**, 849-853.
- [17] Popescu, L. and Stanca, A. (2008) Monitoring of Heavy Metals Soil Contents in the Area of Thermal Power Plants in Romania. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, **20**, 282-286.
- [18] Smółka-Danielowska, D. (2006) Heavy Metals in Fly Ash from a Coal-Fired Power Station in Poland. *Polish Journal of Environmental Study*, **15**, 943-946.
- [19] 范明毅, 杨皓, 黄先飞, 等. 喀斯特山区燃煤电厂土壤重金属污染评价[J]. 化工环保, 2016, 36(3): 338-344.
- [20] 田林锋, 胡继伟, 罗桂林, 等. 贵州百花湖沉积物重金属稳定性及潜在生态风险性研究[J]. 环境科学学报, 2012(4): 885-894.
- [21] 宁晓波, 项文化, 方晰, 等. 贵阳花溪区石灰土地土壤重金属含量特征及其污染评价[J]. 生态学报, 2009(4): 2169-2177.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>