

贵州东部某燃煤电厂汞排放对周边环境空气及土壤的影响

高兰兰^{1,2}, 傅成诚¹, 冯新斌³, 李仲根³, 周少奇⁴

1. 贵州省环境监测中心站, 贵州 贵阳 550081
2. 贵州大学, 贵州 贵阳 550025
3. 中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081
4. 贵州省科学院, 贵州 贵阳 550001

摘要: 结合当地气象条件, 测定贵州省东部某燃煤电厂下风向环境空气汞浓度分布情况, 同时测定该燃煤电厂周边表层土壤中汞含量, 并对其污染程度进行评价, 探讨了土壤汞与理化性质间的相关性。结果表明, 该燃煤电厂下风向环境空气汞浓度远高于北半球大气气态总汞背景值, 空气汞浓度在 2.7 km 范围内随距离的增大而增大, 在 2.7~5.0 km 范围内汞浓度随距离的增大而减小。电厂周边表层土壤汞含量是贵州省 A 层土壤 Hg 背景值的 8.5 倍, 存在中度到重度程度的污染, 土壤 Hg 与土壤 pH 呈正相关性, 但与土壤有机质未表现出相关性。

关键词: 汞排放; 土壤; 污染评价; 环境空气; 燃煤电厂

中图分类号: X823, X825 文献标志码: A 文章编号: 1002-6002(2018)03-0051-08

DOI: 10.19316/j.issn.1002-6002.2018.03.08

Mercury Influence of a Coal-Fired Power Plant in East Guizhou on the Ambient Air and Soil

GAO Lanlan^{1,2}, FU Chengcheng¹, FENG Xinbin³, LI Zhonggen³, ZHOU Shaoqi⁴

1. Guizhou Environmental Monitoring Center, Guiyang 550081, China
2. Guizhou University, Guiyang 550025, China
3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
4. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang 550001, China

Abstract: This paper measures the mercury concentration distribution of ambient air in the downwind and the mercury content in the surrounding surface soil of a coal-fired power plant in east Guizhou according to the local meteorological conditions, evaluates the pollution degree and discusses the correlation between soil mercury and physicochemical property. The result shows that the mercury concentration of ambient air in the downwind of the coal-fired power plant is much higher than the total gaseous mercury background value of air in the Northern Hemisphere, and the mercury concentration of air is increased within 2.7 km and reduced within 2.7-5.0 km with the increasing of distance. The mercury content of the surface soil around the power plant is 8.5 times of the Hg background value of soil layer A in Guizhou and has moderate/serious pollution, and the soil Hg is positively correlated with the soil pH but has no correlation with the soil organic matter.

Keywords: mercury; soil; pollution assessment; ambient air; coal-fired power plant

汞(Hg)是一种具有高度生物累积性的有毒重金属,即使很小的释放量也会导致长期而严峻的环境健康问题。释放到环境中的Hg易发生甲基化生成甲基汞(MeHg),使毒性增强,MeHg还能通过食物链传递作用,逐级放大,在高营养级生物中高度富集,可通过人体的血脑屏障,对人体中枢神经系统产生危害^[1]。Hg可通过自然过程与人为活动

释放和迁移进入环境中,据估算,全球Hg排放中人为排放的Hg占60%~80%^[2]。在中国,煤炭是主要的自然资源和化石燃料,广泛用于火力发电厂的燃料,而煤炭中Hg平均含量为0.22 mg/kg^[3],其燃烧后Hg排放不容忽视。研究表明,1999年中国的人为排放总Hg为536(±236) t,其中38%来自于煤炭燃烧^[4]。2010年,全球经煤炭燃烧过

收稿日期: 2018-04-08; 修订日期: 2018-05-03

基金项目: 贵州省环境保护厅环境科技项目(黔环科[2013]8号); 贵州省优秀科技教育人才省长专项基金项目(201115)

第一作者简介: 高兰兰(1980-),女,贵州贵阳人,在读硕士研究生,高级工程师。

通讯作者: 傅成诚

程向大气排放的 Hg 为 474 t,来自燃煤电厂和工业用途的排放量超过 85%^[1],呈增加趋势。燃煤电厂排放的 Hg 不仅造成大气污染,还会经干湿沉降累积于土壤中,造成土壤环境污染。为了摸清贵州东部某典型燃煤电厂周边环境空气及土壤 Hg 污染状况,对贵州东部某典型燃煤电厂周边环境空气和土壤 Hg 含量进行监测,对其分布特征进行研究,以期为该电厂周边大气污染和土壤环境 Hg 污染的防治提供科学依据。

1 实验部分

1.1 火电厂概况

该燃煤火电厂位于贵州东部铜仁地区。属亚热带季风性湿润气候,冬无严寒,夏无酷暑。年平均相对湿度 79%,年降水量 1 174.1 mm,年日照

时数 1 206.7 h。该电厂现有建设规模为 2×300 MW 亚临界凝汽式汽轮发电机组,于 2004 年 4 月开工建设,1 号机组 2006 年 3 月投入试运行,2 号机组 2006 年 10 月投入试运行。原有电厂 2×12 MW 机组已于 2005 年 1 月 1 日正式关停。目前,该电厂的污染控制措施为选择性催化还原脱硝、静电除尘、石灰石-石膏湿法脱硫。

1.2 样品采集

根据该燃煤电厂所在地地形特征并结合当地年统计的风向玫瑰图,在电厂周围不同半径处采集土壤样品。土壤样品采集严格按照《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004) 执行。共设 11 个采样点位,采样深度为地表以下 5~20 cm,采样点位分布见图 1。同时,在电厂的实测下风向上、距电厂 5.0 km 范围内监测环境空气总 Hg 浓度,用 Lumex RA-915 M 测汞仪,共监测 30 个样点。

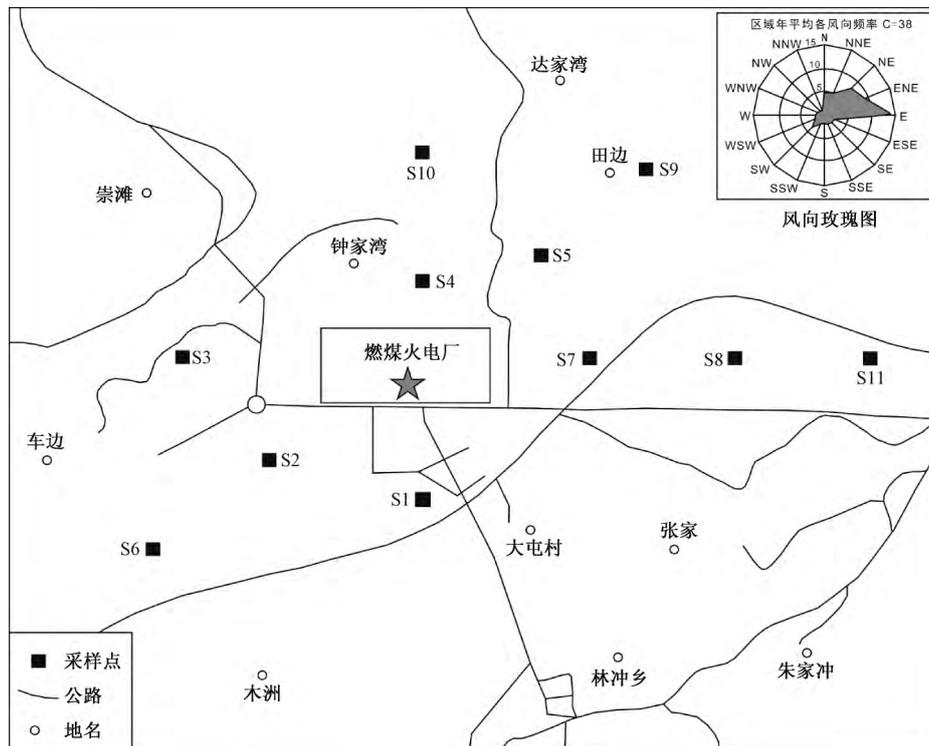


图 1 电厂周边土壤样品采样点位分布示意图

Fig. 1 Distribution of soil sampling points around the power plant

1.3 样品分析测试

1.3.1 样品处理

采集的土壤样品经通风晾干,去除碎石、植物残根等外来物后采用木棍碾碎,过 0.15 mm 尼龙筛后装袋备用。

1.3.2 样品分析

土壤 Hg 含量分析:称取 0.100 0~0.300 0 g

经上述处理后的土壤样品,利用 Lumex RA-915M 测汞仪进行测定。

土壤 pH 分析:采用实验室超纯水为浸提液,土-水混合溶液的质量比为 1:2.5。称取过 125 μm 筛的自然风干土壤样品 10.0 g 置于 50 mL 塑料离心管中,加入 25 mL 超纯水,在振荡器上振荡 5 min,静置 1~3 h 后将校正好的 pH 计玻璃电极插

入上层清液中,待读数稳定后记录待测溶液的 pH。

土壤有机质分析:采用重铬酸钾容量法进行测定。称取 0.10 ~ 0.20 g 经处理后的土壤样品加入 50 mL 比色管中,准确加入 5 mL 浓度为 0.16 mol/L 的 $K_2Cr_2O_7$ 溶液。摇匀置入沸水中,在 100 °C 下保持 15 min,将比色管中的反应物全部转入 250 mL 三角瓶中,加水至 120 mL 左右,加 3 滴邻菲罗啉指示剂,用浓度为 0.2 mol/L 的 $FeSO_4$ 溶液滴定至转为红色为止。

1.3.3 质量控制

样品在分析测试过程中均严格实施质控措施,包括平行样分析、样品加标回收等,其中加标回收率为 90% ~ 112%,分析质量可靠。

1.4 土壤 Hg 污染评价方法

1.4.1 单因子污染指数法

采用单因子污染指数法^[5]对该燃煤电厂周边表层土壤 Hg 污染程度进行评价,其计算公式为

$$P_i = C_i/S \quad (1)$$

式中: P 为单因子污染指数; C_i 为第 i 个采样点土壤 Hg 的实测值; S 为 Hg 污染评价标准的临界值,本次研究选择贵州省 A 层土壤背景值^[6]作为临界值。污染程度划分等级: $P \leq 1$ 为非污染, $1 < P \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P \leq 3$ 为中度污染, $P > 3$ 为重度污染^[7]。

1.4.2 地累积指数法

采用地累积指数法对该燃煤电厂周边表层土壤 Hg 污染现状进行评价,其计算公式为

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (k \times S)] \quad (2)$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_n 为第 n 个采样点土壤 Hg 实测值; k 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值变化而取的系数^[8],取值为 1.5; S 为土壤中 Hg 的地球化学背景值,本次研究选择贵州省 A 层土壤背景值^[6]作为背景值。地累积指数法^[9]评价结果分级标准,见表 1。

表 1 地累积指数分级标准

Table 1 Grading standard of The index of geo-accumulation

地累积指数范围	分级	污染状况
$I_{geo} \leq 0$	0	无
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	无污染 ~ 中污染
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	中污染
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中等 ~ 重污染
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	重污染
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	重污染 ~ 极重污染
$5 < I_{geo} \leq 6$	6	极重污染

1.4.3 Hakanson 潜在生态危害指数法

采用 Hakanson 潜在生态危害指数法对该燃煤电厂周边表层土壤 Hg 污染现状进行评价。其计算公式为

$$E_i = T \cdot P_i \quad P_i = C_i/S \quad (3)$$

式中: E_i 为 Hg 的潜在生态危害系数; T 为 Hg 的毒性系数(以 40 计)^[10]; C_i 为第 i 个采样点土壤 Hg 含量测定值; S 为 Hg 的地球化学参比值(背景值),本次研究选择贵州省 A 层土壤背景值^[6]作为参比值。Hakanson 潜在生态危害指数法^[11]评价结果分级标准,见表 2。

表 2 潜在生态危害指数土壤质量分级标准

Table 2 Soil quality classification standard of potential ecological risk index

潜在生态危害指数	潜在生态危害程度
$E_i < 40$	轻微
$40 \leq E_i < 80$	中等
$80 \leq E_i < 160$	强
$160 \leq E_i < 320$	很强
$E_i \geq 320$	极强

1.5 数理统计

采用 Excel 2003、SPSS 19.0 软件对数据进行统计、相关性分析,采用 Origin、Coreldraw 14.0 对图件进行绘制。

2 结果与讨论

2.1 燃煤电厂周边环境空气 Hg 含量特征

该燃煤电厂下风向环境空气中 Hg 浓度为 23.6 ~ 169.9 ng/m³,平均值为 91.7 ng/m³,远高于北半球大气气态总 Hg 的平均背景值(1.5 ~ 2.0 ng/m³)^[12],但低于国内规定的人居环境大气 Hg 标准值(300 ng/m³),也低于吸入元素 Hg 无癌症影响经验值(200 ng/m³),见图 2。电厂周边环境空气中 Hg 的浓度随距离的变化而呈现不同的趋势,表现为 2.7 km 范围内 Hg 浓度随距离的增大而增大,在 2.7 km 处出现最大值;2.7 ~ 5.0 km 范围内 Hg 浓度随距离的增大而减小。郑剑铭等^[13]研究指出,环境空气 Hg 浓度分布是高斯扩散与干湿沉降共同作用的结果,环境空气 Hg 浓度最大值出现在距排放源 1 ~ 2 km 的环形区域内,在 2.0 km 范围外,环境空气平均 Hg 浓度随采样点与污染源距离的增大而减小,其结论与本研究结果基本相同。可见,燃煤电厂 Hg 排放已造成周边环境空气 Hg 浓度的增加,并随着距离

的增加浓度值呈现先增后降的趋势,拐点在距离排放口2~3 km处。

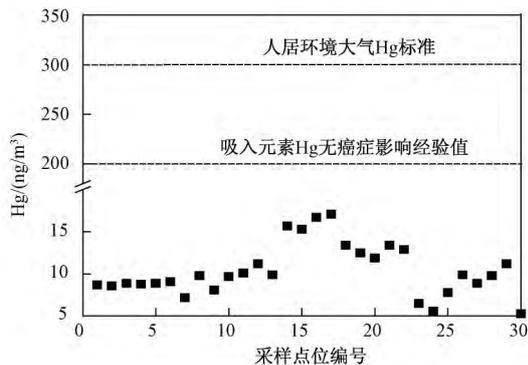


图2 电厂周边下风向地表空气 Hg 浓度

Fig.2 Mercury concentration of up-ground air of power plant

2.2 燃煤电厂周边土壤中 Hg 含量及理化性质

分析结果表明,该燃煤电厂周边表层土壤 pH 为 5.88 ~ 7.90,平均值为 6.95,变异系数为 10.45%。土壤呈中性。土壤有机质含量为 1.27% ~ 6.49%,平均值为 3.37%,变异系数为 54.78%。土壤 Hg 含量为 0.371 ~ 2.928 mg/kg,平均值为 0.939 mg/kg,略高于国家《土壤环境质量标准》(征求意见稿)(GB 15618—2008)中的二级标准限值(0.7 mg/kg, 6.5 < pH < 7.5),高于全国土壤 Hg 背景含量(0.065 mg/kg)和世界土壤 Hg 平均含量(0.030 mg/kg),且高于贵州省 A 层土壤 Hg 背景值(0.110 mg/kg)^[6],变异系数为 91.2%。

国内对燃煤电厂周边土壤 Hg 富集情况已开展了少量研究,所得结果不尽相同。其中,陕西宝鸡电厂周边土壤 Hg 含量为 0.137 ~ 2.105 mg/kg,平均值为 0.606 mg/kg^[14];安徽芜湖燃煤电厂周边土壤 Hg 含量为 0.025 ~ 1.696 mg/kg,平均值为 0.212 mg/kg^[15];安徽省某电厂周边土壤 Hg 含量为 0.015 ~ 0.076 mg/kg,均值为 0.030 mg/kg ($n=60$)^[16];内蒙古自治区某电厂周边土壤 Hg 含量为 0.06 ~ 0.49 mg/kg,均值为 0.23 mg/kg^[17]。该燃煤电厂周边表层土壤 Hg 含量,明显高于前人研究数据,这可能与该电厂的运营年限相对较长有关,燃煤电厂排放的 Hg 通过干湿沉降在土壤中累积,致使土壤 Hg 含量增高。

此外,有研究表明,贵州煤炭中 Hg 的平均含量为 0.552 mg/kg,燃煤引起的汞污染问题非常严重^[18-20]。该燃煤电厂周边土壤 Hg 含量为贵州省 A 层土壤背景值的 8.5 倍,可见,该燃煤电厂

已引起周边土壤 Hg 的累积,潜在环境问题突出。燃煤电厂周边土壤 Hg 含量的变异系数较大,为 91.20%,表明土壤 Hg 的空间差布受外界影响严重,存在较大的空间差异。采样点 S1、S10 土壤 Hg 含量明显较低,且位于电厂非主导风向的下风向,说明电厂主导风向上土壤 Hg 污染更严重。同时,从分布特征上看,燃煤电厂周边 1 km 内土壤中 Hg 浓度明显高于 1 km 外土壤中 Hg 浓度。可见,燃煤电厂气态污染物的排放是周边土壤污染的主要因素。电厂周边土壤 Hg 含量和理化性质见表 3。

表3 电厂周边土壤 Hg 含量和理化性质
Table 3 mercury content and physicochemical properties of soil around power plant

采样点编号	与火电厂距离/km	pH	土壤有机质/%	Hg 含量/(mg/kg)
S1	<1.0	5.88	4.23	0.849
S2	<1.0	6.14	1.98	1.251
S3	<1.0	7.47	5.16	1.202
S4	<1.0	7.90	4.86	0.521
S5	<1.0	7.54	3.13	1.137
S6	<1.0	7.70	1.71	2.928
S7	1.0~2.0	7.25	1.85	0.456
S8	1.0~2.0	7.20	4.39	0.371
S9	1.0~2.0	6.36	6.49	0.471
S10	2.0~5.0	6.34	1.27	0.544
S11	2.0~5.0	6.70	2.02	0.593
最大值		7.90	6.49	2.928
最小值		5.88	1.27	0.371
均值		6.95	3.37	0.939
标准偏差		0.73	1.85	0.856

2.3 燃煤电厂周边土壤 Hg 污染评价

以贵州省 A 层土壤背景值 0.110 mg/kg 为临界值,燃煤电厂周边土壤 Hg 污染的 3 种评价方法结果,见表 4。Hg 的单因子污染指数(P)为 3.373 ~ 26.618,平均值为 8.531,所有样品点位均为重度污染水平。Hg 的地积累指数(I_{geo})为 1.169 ~ 4.149,平均值为 2.224,整体呈现中度至重度污染水平,其中 54.5% 的样品点位呈中度至重度污染水平,36.4% 的样品点呈中度污染水平。仅一个样品点位(S6)呈现重污染至极重污染水平。根据 Hg 的 Hakanson 潜在生态危害指数评价结果,该区土壤 Hg 的潜在生态危害指数(E_i)为 134.909 ~ 1 064.727,平均值为 341.256,表明该区表层土壤的潜在生态危害程度整体为极强水平。其中 36.4% 的样品点位的潜在生态危害程度为极强水平,54.5% 的样品

点位的潜在生态危害程度为很强水平,仅一个样品点位(S8)的潜在生态危害程度为强水平。可以看出,单因子污染指数法不能准确反映实际情况,地积累指数法与 Hakanson 潜在生态危害指数评价结果类似。

以不同采样半径内表层土壤 Hg 平均值进行统计分析。结果表明,与电厂距离小于 1.0 km 范围内污染程度最严重,2.0 ~ 5.0 km 次之,1.0 ~ 2.0 km 范围内的样品点位污染程度较

轻。有研究表明,燃煤电厂周围 1 ~ 2 km 内表层土壤 Hg 污染程度有所升高,而 2 km 以外污染程度随距电厂距离的增加而降低^[16]。方凤满研究得出,表层土壤 Hg 含量在距燃煤电厂 1.0 km 处最大,距离 1.0 km 内次之,距离 1.0 km 以外,土壤 Hg 含量随距离增大而减小,衰减趋势明显^[15]。然而,本研究得出的 2.0 ~ 5.0 km 污染程度高于 1.0 ~ 2.0 km 的样品点位,表明该燃煤电厂周边土壤 Hg 污染范围较广。

表 4 燃煤电厂周边土壤 Hg 污染评价结果

Table 4 The results of mercury pollution assessment in soil around coal fired power plant

距离/km	样品数/个	P		I_{geo}		E_i	
		范围	平均值	范围	平均值	范围	平均值
<1.0	6	4.736 ~ 26.618	11.952	1.659 ~ 4.149	2.791	189.455 ~ 1064.727	478.061
1.0 ~ 2.0	3	3.373 ~ 4.282	3.933	1.169 ~ 1.513	1.383	134.909 ~ 171.273	157.333
2.0 ~ 5.0	2	4.945 ~ 5.391	5.168	1.721 ~ 1.846	1.783	197.818 ~ 215.636	206.727

2.4 Hg 含量与土壤理化性质的相关性

2.4.1 土壤 pH

pH 是土壤化学性质的综合反映,会影响土壤中各阴阳离子的吸附程度。方凤满等^[15]研究认为,偏酸性和中性的芜湖燃煤电厂周边土壤中 Hg 含量与土壤 pH 呈正相关性。也有学者认为,在中性偏碱性的土壤中 Hg 含量与 pH 呈负相关关系^[21-22]。王道涵等^[17]研究表明,在碱性土壤中, pH < 8 时,随着 pH 的升高, Hg 含量也升高,但当 pH 继续升高 (> 8.0) 时, Hg²⁺ 吸附量却会降低。这是由于 pH 升高, H⁺ 浓度降低,减少了 H⁺ 和 Hg²⁺ 在吸附点位上的竞争作用。低 pH 土壤中会有更多的 H⁺、Hg²⁺ 竞争吸附点位,导致 Hg²⁺ 吸附量小;而在 pH 继续升高 (> 8.0) 时, Hg²⁺ 吸附量却会降低。这是由于达到一定的 pH 以后, OH⁻ 浓度随 pH 升高而增加,使 Hg(OH)Cl 的活性比 Hg(OH)₂ 高,因此土壤中

Hg²⁺ 的吸附量也随之降低^[23]。本研究中,电厂周边土壤 pH 为 5.88 ~ 7.90,平均值为 6.95,土壤 Hg 含量与土壤 pH 呈一定程度的正相关性,与方凤满等研究结果一致,但短距离内土壤 pH 跨度较大,形成这种结果的原因可能是燃煤电厂排放污染物(如二氧化硫、氮氧化物等)已破坏了周边土壤原有平衡,同时排出的废气中含有一定量的氯化汞,原有的 Hg(OH)₂ 与 HgCl₂ 的吸附平衡状态被打破, H⁺ 与 OH⁻ 的多少不再决定 Hg²⁺ 的吸附量。

2.4.2 土壤有机质

众多研究表明,土壤 Hg 含量与土壤有机质呈正相关关系^[17-22]。陈文娟等^[24]研究指出,土壤 Hg 含量与土壤有机质呈一定程度的正相关性 ($r=0.1931$)。本次研究得出,该区土壤有机质含量为 1.27% ~ 6.49%,平均值为 3.37%,土壤 Hg 含量与土壤有机质呈负相关(图 3)。

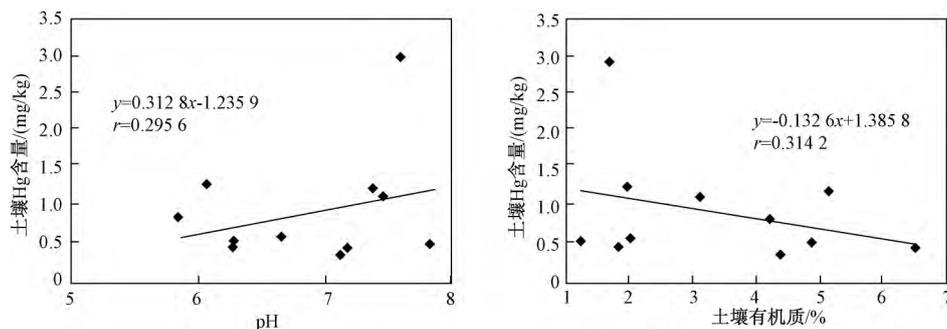


图 3 燃煤电厂周边土壤 Hg 含量与土壤理化性质关系

Fig.3 The relationship between soil mercury content and soil physicochemical properties

MILLER 等^[25]研究发现,有机质内存在多种能与 Hg 结合的点位,如酚羟基、氨基、羧基、巯基等基团,这些基团竞争结合 Hg,因此有机质是 Hg 的重要络合配体,对 Hg 的生物地球化学循环有重要作用。HAITZER 等^[26]研究发现,低 pH 环境不利于有机质与 Hg^{2+} 的结合,因为氢离子与 Hg^{2+} 竞争有机质上的结合位点。本次研究得出,土壤 Hg 含量与土壤有机质呈负相关性,可能存在低 pH 环境的影响,也可能是样品量少产生的影响。在今后的研究中应该加大采样点位数量,进一步分析土壤 Hg 含量与土壤有机质的相关关系。此外,由于该燃煤电厂周边土壤 Hg 累积作用明显,污染严重,致使土壤有机质吸附 Hg 的平衡被打破,正相关性未得到体现,甚至呈现负相关性的结论。

3 结论

1) 燃煤电厂下风向环境空气中 Hg 的浓度为 23.6 ~ 169.9 ng/m^3 ,平均值为 91.7 ng/m^3 ,远高于北半球大气气态总 Hg 的背景值(1.5 ~ 2.0 ng/m^3)。环境空气中 Hg 浓度在 2.7 km 范围内随距离的增大而增大,在 2.7 km 处出现最大值,2.7 ~ 5.0 km 范围内 Hg 浓度随距离的增大而减小。

2) 燃煤电厂周边表层土壤中 Hg 的含量为 0.371 ~ 2.928 mg/kg ,平均值为 0.939 mg/kg 。高于《土壤环境质量标准》(GB 15618—2008)中的二级标准值,高于贵州省 A 层土壤背景值(0.11 mg/kg),是贵州 A 层土壤 Hg 背景值的 8.5 倍。

3) 电厂周边土壤 Hg 的单因子污染指数结果表明,所有样品点位均呈现重度污染水平。Hg 的地积累指数为 1.169 ~ 4.149,平均值为 2.224,整体呈现中等至重度污染水平,其中 54.5% 的样品点位为中等至重度污染水平,36.4% 的样品点位呈中度污染水平。Hakanson 潜在生态危害指数评价结果与地积累指数法评价结果类似。

4) 电厂周边土壤 pH 为 5.88 ~ 7.90,呈弱酸性至中性。土壤 Hg 含量与土壤 pH 呈一定程度的正相关。土壤有机质含量为 1.27% ~ 6.49%,平均值为 3.37%,受燃煤电厂影响,土壤 Hg 含量高,累积作用明显,土壤 Hg 含量与土壤有机质未表现出正相关性。

5) 目前,对燃煤电厂污染物排放的行政管理

主要集中在废气、废水、废渣的有组织排放方面,对污染物排放造成周边环境累积污染的关注仍较少。建议行政管理部门应加强对燃煤电厂周边环境空气、土壤的监测及管理,将周边环境监测纳入电厂监督性监测,并制定出符合燃煤电厂周边环境特征污染特征的定期环境影响后评价机制。

参考文献(References):

- [1] 司徒高华,王飞儿,何云峰,等. 燃煤电厂周边土壤中汞的分布和累积研究进展[J]. 土壤, 2016, 48(3): 419-428.
SITU Gaohua, WANG Feier, HE Yunfeng, et al. Distribution and Accumulation of Hg in Soils Around Coal-Fired Power Plants: A Review [J]. Soils, 2016, 48(3): 419-428.
- [2] DVONCH J T, GRANEY J R, KEELER G J, et al. Use of Elemental Tracers to Source Apportion Mercury in South Florida Precipitation [J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(24): 4522-4527.
- [3] 王起超,沈文国,麻壮伟. 中国燃煤汞排放量估算[J]. 中国环境科学, 1999, 19(4): 318-321.
WANG Qichao, SHEN Wenguo, MA Zhuangwei. The Estimation of Mercury Emission from Coal Combustion in China [J]. China Environmental Science, 1999, 19(4): 318-321.
- [4] STREETS D G, HAO J, WU Y, et al. Anthropogenic Mercury Emissions in China [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(40): 7789-7806.
- [5] 郑袁明,余轲,吴泓涛,等. 北京城市公园土壤铅含量及其污染评价[J]. 地理研究, 2002, 21(4): 418-424.
ZHENG Yuanming, YU Ke, WU Hongtao, et al. Lead Concentrations of Soils in Beijing Urban Parks and Their Pollution Assessment [J]. Geographical Research, 2002, 21(4): 418-424.
- [6] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤环境背景值研究[J]. 环境科学, 1991, 12(4): 12-19.
WEI Fusheng, CHEN Jingsheng, WU Yanyu, et al. Study on the Background Contents on 61 Elements of Soils in China [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 1991, 12(4): 12-19.
- [7] 张建,郎咸东,陈蓉. 贵州六盘水马铃薯种植区土壤重金属含量状况及评价[J]. 广东农业科学, 2015, 42(17): 6-11.
ZHANG Jian, LANG Xiandong, CHEN Rong. Content Status and Assessment of Heavy Metals in Soils from Potato Growing Areas in Liuzhi, Panxian and

- Shuicheng Counties ,Guizhou Province [J]. Journal of Guangdong Agricultural Sciences , 2015 ,42 (17) : 6-11.
- [8] MULLER G. Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River [J]. Geojournal ,1969 ,2 (3) : 108-118.
- [9] 李娟娟,马金涛,楚秀娟,等. 应用地积累指数法和富集因子法对铜矿区土壤重金属污染的安全评价[J]. 中国安全科学学报, 2006 ,16 (12) : 135-139.
- LI Juanjuan , MA Jingtao , CHU Xiujuan , et al. Application of Index of Geo-Accumulation and Enrichment Factor in Safety Assessment of Heavy-Metal Contamination in Soil of Copper Refining [J]. China Safety Science Journal ,2006 ,16(12) : 135-139.
- [10] 张成,陈宏,王定勇,等. 三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价[J]. 环境科学, 2014 ,35(3) : 1 060-1 067.
- ZHANG Cheng , CHEN Hong , WANG Dingyong , et al. Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir [J]. Environmental Science ,2014 ,35(3) :1 060-1 067.
- [11] 古德宁,李光明,张兆海,等. 濮阳工业园区土壤重金属背景值及质量评价[J]. 中国环境监测, 2015 ,31(1) : 50-52.
- GU Dening , LI Guangming , ZHANG Zhaohai , et al. Background Value of Soil Heavy Metals in Puyang Industrial Park and Quality Assessment [J]. Environmental Monitoring in China , 2015 ,31 (1) : 50-52.
- [12] 万奇,冯新斌,郑伟,等. 长白山地区大气气态总汞含量的季节性特征研究[J]. 环境科学, 2008 , 29(2) : 296-299.
- WAN Qi , FENG Xinbin , ZHENG Wei , et al. Seasonal Variation of Total Gaseous Mercury in Changbai Mountain Area [J]. Environmental Science , 2008 ,29(2) : 296-299.
- [13] 郑剑铭,周劲松,何胜,等. 燃煤电厂汞排放对周边环境的影响 [J]. 化工学报, 2009 ,60 (12) : 3 104-3 111.
- ZHENG Jianming , ZHOU Jingsong , HE Sheng , et al. Environmental Impact of Mercury Emission from a Coal-Fired Power Plant [J]. CIESC Journal , 2009 , 60(12) : 3 104-3 111.
- [14] 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 , 38(3) : 622-624.
- WANG Lingqing , LU Xinwei , WANG Lijun , et al. Evaluation of Hg Pollution of Soil Around the Baoji Coal-Fired Power Plant [J]. Chinese Journal of Soil Science ,2007 ,38(3) : 622-624.
- [15] 方凤满,杨丁,汪琳琳,等. 芜湖燃煤电厂周边土壤中砷汞的分布特征研究[J]. 水土保持学报, 2010 ,24(1) : 109-113.
- FANG Fengman , YANG Ding , WANG Linlin , et al. Distribution of Arsenic and Mercury in Soil Around Coal-Fired Power Plant in Wuhu [J]. Journal of Soil and Water Conservation ,2010 ,24(1) : 109-113.
- [16] 单平,伍震威,黄界颖,等. 安徽某燃煤电厂周边土壤汞分布特征及风险评价[J]. 中国环境监测, 2015 ,31(5) : 86-92.
- SHAN Ping , WU Zhenwei , HUANG Jieying , et al. Distribution Analysis and Risk Assessment of Hg in Soils around a Coal-Fired Power Plant in Anhui [J]. Environmental Monitoring in China , 2015 ,31 (5) : 86-92.
- [17] 王道涵,杨亚利,任鹏,等. 内蒙古某电厂周围土壤汞分布特征及其影响因素[J]. 环境工程学报, 2015 ,9(12) : 6 135-6 140.
- WANG Daohan , YANG Yali , REN Peng , et al. Distribution Characteristics and Influencing Factors of Mercury in Soil around Some Coal-Fired Power Plant of Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering ,2015 ,9(12) : 6 135-6 140.
- [18] MARTIN J A R , NANOS N. Soil as an Archive of Coal-Fired Power Plant Mercury Deposition [J]. Journal of Hazardous Materials ,2016 ,308: 131-138.
- [19] WEIR S M , HALBROOK R S , Sparling D W. Mercury Concentrations in Wetlands Associated with Coal-Fired Power Plants [J]. Ecotoxicology , 2010 , 19(2) : 306-316.
- [20] 冯新斌,洪业汤,倪建宇,等. 贵州煤中汞的分布、赋存状态及对环境的影响[J]. 煤田地质与勘探, 1998 ,26(2) : 12-14.
- FENG Xinbin , HONG Yetang , Ni Jianyu , et al. Distribution and Occurrence Mode of Mercury in Some Coals of Guizhou Province and Its Environmental Impact [J]. Coal Geology and Exploration , 1998 , 26(2) : 12-14.
- [21] 刘汝海,王起超,郝庆菊,等. 三江平原湿地土壤汞的分布特征及影响因素分析[J]. 水土保持学报, 2003 ,17(1) : 122-124.
- LIU Ruhai , WANG Qichao , HAO Qingju , et al. Distribution Character of Hg in Wetland Soil in Sanjiang Plain and Analysis of Influential Factors [J].

- Journal of Soil and Water Conservation , 2003 ,17(1) : 122-124.
- [22] 徐小逊,张世熔,李丹阳,等. 川中典型丘陵区土壤砷和汞空间变异特征及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2010 29(7) : 1 320-1 325.
XU Xiaoxun , ZHANG Shirong , LI Danyang , et al. Spatial Variability Characteristics and Influencing Factors of Soil Arsenic and Mercury in the Typical Hilly Region of Central Sichuan , China [J]. Journal of Agro-Environment Science , 2010 , 29 (7) : 1 320-1 325.
- [23] 阴永光,李雁宾,马旭,等. 天然有机质介导的汞生物地球化学循环: 结合作用与分子转化[J]. 化学进展, 2013 25(12) : 2 169-2 177.
YIN Yongguang , Li Yanbin , Ma Xu , et al. Role of Natural Organic Matter in the Biogeochemical Cycle of Mercury: Binding and Molecular Transformation [J]. Progress in Chemistry , 2013 25(12) : 2 169-2 177.
- [24] 陈文娟,方凤满,余健,等. 安徽芜湖市土壤汞污染评价及影响因素分析[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2009 32(2) : 168-172.
CHEN Wenjuan , FANG Fengman , YU Jian , et al. Environmental Pollution Assessment of Soil Hg and Influence Factors in Wuhu , Anhui Province [J]. Journal of Anhui Normal University(Natural Science) , 2009 32(2) : 168-172.
- [25] MILLER C L , SOUTHWORTH G , BROOKS S , et al. Kinetic Controls on the Complexation Between Mercury and Dissolved Organic Matter in a Contaminated Environment [J]. Environmental Science & Technology , 2009 43(22) : 8 548-8 553.
- [26] HAITZER M , AIKEN G R , RYAN J N. Binding of Mercury (II) to Aquatic Humic Substances: Influence of pH and Source of Humic Substances [J]. Environmental Science & Technology , 2003 37(11) : 2 436-2 441.