

燃煤烟气对土壤-小麦系统中汞累积及分布的影响

刘文霞, 李 博, 吴明作, 李 有

(河南农业大学环境系, 郑州 450002)

摘 要:为研究燃煤烟气对土壤-小麦系统中汞积累和分布的影响, 在小麦苗期和成熟期采集河南省商丘市某燃煤电厂周围农田土壤和小麦植株样品, 用 ZYG-II 型智能冷原子荧光测汞仪测量样品中的汞含量。结果表明, 小麦苗期和成熟期, 土壤样品中汞含量没有超过土壤环境质量标准(GB 15618—1995)二级标准的限值。燃煤电厂周围表层土中汞含量要明显高于深层土, 呈表层富集现象, 苗期小麦根的汞含量高于茎叶, 其根、茎叶的汞含量与表层土的汞含量呈显著正相关。小麦从苗期到收获期, 表层土、小麦根和茎叶的汞浓度升高。小麦从苗期到收获期, 茎叶面积迅速增加, 小麦叶片直接从大气中吸收燃煤烟气中的汞, 使小麦茎叶通过叶面吸收的汞浓度增加, 收获期燃煤电厂周围小麦各器官汞含量为茎叶>根>颖壳>籽粒。成熟期小麦根的汞含量与表层土的汞含量呈显著正相关, 而茎叶汞含量与表层土的汞含量无相关性。因此, 燃煤烟气中汞沉降影响燃煤电厂周围种植的小麦各器官对汞的吸收和累积。

关键词:燃煤电厂; 汞; 冬小麦; 土壤

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2012)01-0030-06

The Influence of Coal-fired Flue Gas on Accumulation and Distribution of Mercury in Soil-Wheat System

LIU Wen-xia, LI Bo, WU Ming-zuo, LI You

(Department of Environmental Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: The soil and winter wheat around coal-fired power plant located in Shangqiu City, Henan Province were sampled during the seedling period and the harvest period, and the concentration of mercury was measured with ZYG-II cold atomic fluorescence spectrometry in order to study the influence of coal-fired flue gas on the accumulation and distribution of mercury in soil-wheat (*Triticum aestivum* L.) system. The results showed that the concentration of mercury in soil during the seedling period and the harvest period didn't exceed the limited value of the Soil Environmental Quality Standard in China (GB 15618—1995, Grade II). Moreover, mercury concentration in the topsoil was higher than that in the subsoil, revealing surface enrichment phenomenon. During the seedling period, the mercury concentration in the wheat roots was higher than that in the stem and leaves, and the concentration in the roots, and stem and leaves showed a significant positive correlation with that in the topsoil. In addition, the mercury content of topsoil, wheat roots, and stem and leaves increased from seedling period to harvest period of wheat. Leaf area of wheat increased rapidly from seedling period to harvest period, and wheat leaves directly absorbed mercury from coal-fired flue gas, resulting in increased mercury concentration by leaf absorption. During the harvest period, the order of mercury content in the winter wheat organs around coal-fired power plant was stem and leaf > root > glume > grain. Furthermore, during harvest period, the mercury concentration in roots had a significant correlation with that in the topsoil, whereas the mercury concentration in stem and leaves had not an apparent correlation with the topsoil. Therefore, mercury deposition of coal-fired flue gas affected the absorption and accumulation of mercury in wheat various organs around coal-fired power plant.

Keywords: coal-fired power plant; mercury; winter wheat (*Triticum aestivum* L.); soil

汞是唯一一种在常温常压下呈气态的有毒重金属, 具有长距离扩散的能力, 因此被认为是全球性的

污染物而备受关注。2008 年联合国环境规划署题为《全球大气汞评估: 来源、排放和运输》报告中指出, 燃煤电厂的汞排放量约占全球范围人为汞排放量的 25%。有研究表明我国每 100 MW 机组燃煤锅炉总汞排放量在 40~50 kg·a⁻¹ 左右^[1], 我国在以后相当长一段时间内仍会以火电为主, 而且火电容量还在不断增加, 因此我国燃煤电厂总汞排放量还将在一定时期内

收稿日期: 2011-06-17

基金项目: 河南省自然科学基金项目(092300410114)

作者简介: 刘文霞(1967—), 女, 河南安阳人, 博士, 副教授, 主要从事有毒污染物的环境行为与污染控制方面的研究。

E-mail: hjxliuwenxia@163.com

继续增加^[2],其对环境的影响不容忽视。

汞是环境中生物毒性极强的重金属污染物,具有持久性、迁移性和高度的生物富集性^[3],汞在植物体内积累,通过食物链的传递危害动物和人类的健康。近年来,随着我国城市用电需求量和新建发电厂数量的持续上升,燃煤排放的汞对厂区周边环境的影响也在不断加剧。陕西宝鸡燃煤电厂周边土壤中汞浓度高出当地背景值5倍^[4],上海市燃煤电厂排放烟气对周边环境产生了明显影响^[5-6],周边大气环境中的汞浓度比背景点高出2.58~5.36倍,表层土壤汞浓度高于背景点8.54~10.78倍,树叶中汞浓度高出背景点5.92~8.06倍。郑剑铭等用地统计学方法分析了电厂周边表层土壤汞含量的空间分布特性^[7],除距烟囱1~3 km的环形区域受影响较大外,污染程度随着与电厂距离的增大而递减。燃煤烟气中的汞可通过干湿沉降过程降于地表和植物叶面,使土壤和植物叶中的汞含量增大。然而燃煤电厂烟气排放对汞在土壤-植物系统中分布和累积的影响还未见报道。

小麦是世界上总产量第二的粮食作物,其世界产量和种植面积,居于栽培谷物的首位。在我国,小麦占全国夏粮产量的90%以上,保证小麦的产量与质量安全,对保障国家粮食安全,促进国民经济平稳较快发展有重要意义。本研究通过分析燃煤电厂周围农田土壤及小麦植物中汞含量,探讨燃煤电厂周围土壤-小麦中汞的积累及分布规律,为评价燃煤电厂对其环境和健康的影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

燃煤电厂位于商丘市西北部,该地区属于暖温带大陆性季风气候,冬季多偏北风,夏季多偏南风。春秋季节是偏北风和偏南风的交替阶段,风向变化基本上属于过渡型,主导风向不明显。年平均气温为14.1℃,年平均降水量681.0 mm,年平均日照时数1 944 h,平均相对湿度72%。

电厂周围地势平坦,电厂南部约1 km处为居民区,西南方向约600 m处为居民区,西北方向为居民区,北部为陇海铁路,毗邻铁路列检所,东部为道路及居民区,其余方向为农田。电厂有60 MW发电机组2台,2004年7月投产发电,年发电量 8.91×10^8 kWh,年燃煤量 6.24×10^5 t,以义马煤为主。燃煤烟气经过改性钙基脱硫剂进行炉内强化脱硫处理后经烟囱排入大气,电厂烟囱数量为3个,有效高度为150 m,顶部

排烟口直径3.5 m。

1.2 样品的采集与分析

根据当地实际地理环境条件,在电厂南、西、西南方向上布点,分别为正南200 m和500 m、正西180、500、1 000、1 500 m和1 800 m、西南150 m和300 m,共9个采样点,并用GPS定位。在各采样点和垂直于采样轴线的方向左右各距采样轴线10 m处取样,样品混合后作为该采样点样品进行分析和测试。

2010年3月20日,在各采样点用空气采样袋采集1.5 m高的环境空气样品10 L,用DEM6型轻便三杯风向风速表(天津市气象海洋仪器厂)测定当时的气象条件(温度、风向和风速)。样品带回实验室,立即用5 mL $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-HNO}_3$ 吸收液($40 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 和 $4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HNO_3 等体积混合液)进行吸收^[8],吸收完毕后,稀释溶液,利用 SnCl_2 还原为 Hg^0 蒸气,冷原子荧光法测定大气中汞浓度,每个样品均至少进行3次重复,求其平均值和标准偏差。

2010年3月20日和5月29日分别采集小麦苗期和收获期(成熟期)植物样品和其相应的表层土壤(0~20 cm)和深层土壤(20~40 cm),小麦品种为众麦1号。将采集的土壤样品去除石砾和动植物残体后,于阴凉通风处风干,研磨过20、100目筛备用。将采集的小麦样品先用自来水快速冲洗干净后,再用去离子水冲洗,然后置于阴凉通风处风干,苗期样品分为根、茎叶两部分,成熟期样品分为根、茎叶、颖壳、籽粒4部分,样品粉碎、研磨过20目筛备用。

土壤样品用王水水浴消解^[9],植物样品用硝酸水浴消解^[10],籽粒样品用微波消解^[11]后,用ZYG-II型智能冷原子荧光测汞仪测定其汞含量,每个样品均至少进行3次重复,在剔除个别异常数据后,对3个无显著差异测量值进行平均作为该样品的汞浓度。为了保证样品分析的准确性,用ESS 3标准土样进行分析,标准样品回收率在85%~105%之间。实验结果用Excel进行数据处理,用SPSS11.5统计软件进行统计分析,用Origin7.5绘制图表。

2 结果与讨论

2.1 燃煤电厂周围大气中汞浓度

燃煤电厂周围大气中的汞浓度见表1。地表空气中汞的浓度范围为68.18~784.09 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$,平均值为247.47 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 。2个样点大气中汞浓度高于国家规定的人居环境大气汞的标准300 $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$,燃煤电厂周围大气中汞污染值得关注。该燃煤电厂大气中汞浓度高

于上海市内 2 个燃煤电厂周边大气汞浓度^[5]和郑剑铭等报道的燃煤电厂大气中汞浓度^[7],分析其原因可能与燃煤汞含量有关,该燃煤电厂用煤是河南产的煤,汞含量较高,平均值为 $0.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而郑剑铭等报道的燃煤电厂用煤为山西大混,煤中汞含量较低为 $0.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。另一个原因可能与烟气净化系统有关,上海市内 2 个燃煤电厂和郑剑铭等报道的燃煤电厂烟气净化系统为静电除尘器(ESP)和石膏湿法烟气脱硫(WFGD),该系统对燃煤烟气中的颗粒态汞和气态氧化汞具有脱除作用^[7],而商丘市燃煤电厂烟气经过改性钙基脱硫剂进行炉内强化脱硫处理后排入大气,为了降低该燃煤烟气中汞浓度需要燃用汞含量低的煤和提高烟气脱硫效率。

采样期间,主导风向为北风,瞬时风速为 $0.40 \sim 1.36 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。从实测地表空气汞浓度的空间分布来看,电厂正西 180、500、1 000、1 500 m 和 1 800 m 处空气中汞浓度最大为正西 180 m,其次为正西 1 500 m。正西 1 500 m 处空气中汞浓度较高与烟气中汞扩散有关,而正西 180 m 处的汞浓度很高,除了与烟气中汞扩散有关外,另一个原因是该采样点离电厂内煤堆很近,煤含汞较高,汞易挥发,汞的无组织排放使该采样点汞浓度偏高。正南方向距电厂 200 m 和 500 m 处空气中汞浓度分别为 $200.76 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $371.21 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$,采样时风向为北风,该采样点在污染源的下风向,所以电厂正南空气中汞浓度较高。由于研究期间对电厂

周边大气汞浓度的测定时间段相对较短,所反映的是特定时间点的结果,不是长期的影响评价。而土壤和小麦植物对环境中汞的吸收是一个积累过程,分析其中的汞浓度可代表其长期暴露于大气的结果。

2.2 燃煤烟气对土壤中汞含量时空分布的影响

小麦苗期和成熟期土壤中汞含量见图 1。小麦苗期表层土中汞含量为 $0.003 2 \sim 0.031 9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值 $0.020 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),深层土壤中汞含量为 $0.001 6 \sim 0.025 0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值 $0.008 8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),在每个采样点表层土壤中汞含量都高于深层土。相关性分析表明,表层土壤中汞含量和深层土壤中汞含量显著相关 ($P < 0.05$),相关系数为 0.813。这说明燃煤电厂周围土壤中汞浓度呈表层富集现象,这与 Yang 等的研究结果相似^[4]。

小麦收获期表层土壤中汞浓度为 $0.005 7 \sim 0.036 4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (平均值 $0.018 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),小麦苗期和收获期土壤中汞含量均未超出 GB 15618—1995《土壤环境质量标准》中二级标准的限值。虽然该燃煤电厂周围空气中汞浓度较高,但由于该燃煤电厂建厂不到 6 年时间,燃煤排放的汞在土壤中的累积量较低,目前土壤中汞含量未超出环境质量标准。和河南省土壤中汞元素的背景值(0~20 cm) $0.034 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相比^[12],小麦成熟期土壤 22.2% 采样点高于背景值,高出背景值 5.00%~7.06%,燃煤电厂对周围土壤环境的影响需要关注。该燃煤电厂周围土壤中汞浓度远远低于上海热

表 1 燃煤电厂周围大气中汞浓度/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 1 Mercury concentration of atmosphere around coal-fired power plant/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$

采样点	正 W 180 m	正 W 500 m	正 W 1 000 m	正 W 1 500 m	正 W 1 800 m	SW150 m	SW300 m	正 S200 m	正 S500 m
Hg 浓度($\text{m} \pm \text{SD}$)	784.09 ± 59.04	68.18 ± 10.04	117.42 ± 31.45	280.30 ± 39.21	151.51 ± 35.29	102.27 ± 21.30	151.51 ± 34.68	200.76 ± 39.24	371.21 ± 52.49

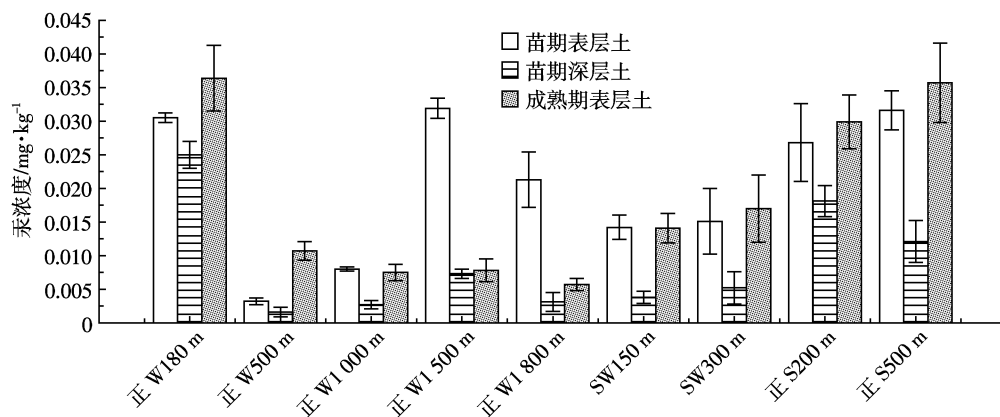


图 1 土壤样品汞含量

Figure 1 Concentrations of mercury in soils

电厂和陕西宝鸡燃煤电厂周围土壤中汞浓度^[4-6],这是由于上海热电厂和陕西宝鸡燃煤电厂建厂时间长,烟气中汞的沉降在土壤中积累,所以燃煤电厂长期、低浓度汞排放对周围土壤环境的影响不容忽视。

离电厂距离不同,小麦苗期和成熟期表层土壤中汞浓度也不同。在电厂以西方向 180~1 800 m 的范围,随着距离增大,苗期表层土中汞含量呈减小-增大-减小的变化趋势,在正西 1 500 m 处出现最大值,郑剑铭等的研究也发现有类似现象^[7]。而 Yang 等研究发现在距燃煤电厂小于 1 km 处土壤汞浓度最大^[4],这可能与烟囱的高度和烟气排放量有关。小麦成熟期,着与随电厂距离增大,表层土汞含量逐渐减小。比较同一采样点不同小麦生长期土壤中汞浓度,发现 67% 采样点小麦成熟期表层土中汞含量高于小麦苗期,随着小麦的生长,表层土壤中汞浓度升高,表明部分表层土壤汞含量有逐渐富集升高的趋势,这与苏静等对兰州市土壤汞污染的研究结果相似^[13]。

分析上述现象的原因,可能是商丘市年平均降水量不多,汞沉降应以干沉降为主,小麦苗期生物量少,汞沉降对土壤表层汞含量影响较大,其表层土中汞含量变化规律符合烟气点源扩散模式,故在电厂以西方向出现减小-增大-减小的变化趋势。燃煤排放的汞主要包括气态单质汞(GEM)、活性气态汞(RGM)和颗粒汞(PHg),其三者的沉降规律对燃煤电厂周围土壤及小麦中汞含量有重要影响。GEM 的干沉降速率远小于 RGM 和 PHg,所以在距离电厂较近的范围内,表层土的汞主要来自 RGM 和 PHg 沉降,在较远处则来自 GEM、RGM 和 PHg 沉降。小麦成熟期生物量较苗期剧增,由于茎叶可直接吸收大气中的 PHg^[14],导致沉降到土壤表面的汞减少,所以电厂以西方向成熟期表层土中汞含量随距离增加呈逐渐减小的趋势。

2.3 燃煤烟气对小麦各器官汞含量分布的影响

苗期和成熟期,小麦根的汞浓度分别为 0.002 7~0.014 0 mg·kg⁻¹(平均值 0.005 8 mg·kg⁻¹)和 0.003 3~0.019 8 mg·kg⁻¹(平均值 0.010 1 mg·kg⁻¹),小麦茎叶汞浓度分别为 0.000 5~0.007 0 mg·kg⁻¹(平均值 0.003 0 mg·kg⁻¹)和 0.014 8~0.025 8 mg·kg⁻¹(平均值 0.019 3 mg·kg⁻¹),小麦从幼苗生长到成熟,小麦根的汞浓度升高,同样小麦茎叶汞浓度也增加,成熟期小麦根和茎叶比苗期分别增加了 74.1%和 543.3%,表明小麦根和茎叶的汞含量随着小麦生长发生了累积,且小麦茎叶汞累积速度比根累积速度快。

各采样点苗期和成熟期小麦根与茎叶汞含量见

图 2,从平均值来看,小麦苗期根的汞浓度大于茎叶,除正西 1 500 m 采样点外,其他采样点小麦根的汞浓度高于茎叶。成熟期,小麦颖壳和籽粒中汞浓度分别为 0.006 0~0.008 1 mg·kg⁻¹(平均值 0.007 0 mg·kg⁻¹)和 0.000 03~0.000 63 mg·kg⁻¹(平均值 0.000 22 mg·kg⁻¹),小麦各器官汞含量为茎叶>根>颖壳>籽粒,这与他人研究发现小麦的根>茎叶>籽粒的规律不同^[15-16]。采样点不同各器官的分布略有不同,大部分采样点为茎叶>根>颖壳>籽粒,个别采样点小麦汞分布为茎叶>颖壳>根>籽粒。小麦由苗期生长到成熟期,茎叶生物量不断增加,叶面覆盖率增大,使得燃煤烟气中的 RGM 沉降更容易^[17],RGM 沉降量增大,直接沉降在植物叶面上,小麦叶片可直接从大气中吸收汞,使小麦茎叶通过叶面吸附的汞增加,因而小麦成熟期茎叶的汞含量高于根。

2.4 小麦汞含量与土壤中汞含量的关系

对小麦中汞浓度和其相应的表层土中汞含量进行相关分析,苗期根、茎叶和成熟期小麦根与表层土中汞含量相关系数分别为 0.766、0.816 和 0.882,呈显著正相关($P<0.01$),成熟期茎叶与表层土中汞含量无相关性($P>0.05$)。小麦苗期的茎叶生物量小,燃煤烟气的汞沉降对其影响不大,其茎叶中的汞主要来源是通过根从土壤中吸收,所以苗期茎叶汞含量与土壤中的汞含量呈显著正相关。小麦成熟期茎叶生物量增加,由于燃煤烟气中的汞易于在叶片表面沉降或直接被叶片吸收,使叶片从大气中吸收的汞增加,所以成熟期茎叶汞含量与土壤中汞相关性不显著。

重金属的富集系数(Bioconcentration Coefficients, BCF)为植物中重金属浓度和土壤中重金属浓度之比,衡量植物吸收土壤中重金属的难易程度。苗期小麦根和茎叶 BCF 值分别为 0.09~1.34(平均值 0.43)和 0.06~0.25(平均值 0.15),根 BCF 值大于茎叶;成熟期小麦根、茎叶和籽粒 BCF 值分别为 0.29~1.86(平均值 0.69)、0.54~2.96(平均值 1.50)和 0.004~0.030(平均值 0.012),成熟期小麦 BCF 茎叶>根>籽粒。成熟期小麦根和茎叶 BCF 值均大于苗期,且成熟期茎叶 BCF 值增长幅度很大。Liu 等研究结果表明郑州市郊区冬小麦根、茎叶和籽粒 BCF 值为根>茎叶>籽粒^[15]。一般情况下,小麦从土壤中吸收富集重金属汞,然后从根部向上迁移至茎叶和籽粒,而且迁移能力越来越弱。但在燃煤电厂周围种植的小麦,由于燃煤烟气中汞沉降的影响,茎叶不仅通过小麦的根从土壤中吸收汞,而且茎叶从大气沉降中吸收富集汞,所以燃煤电厂周

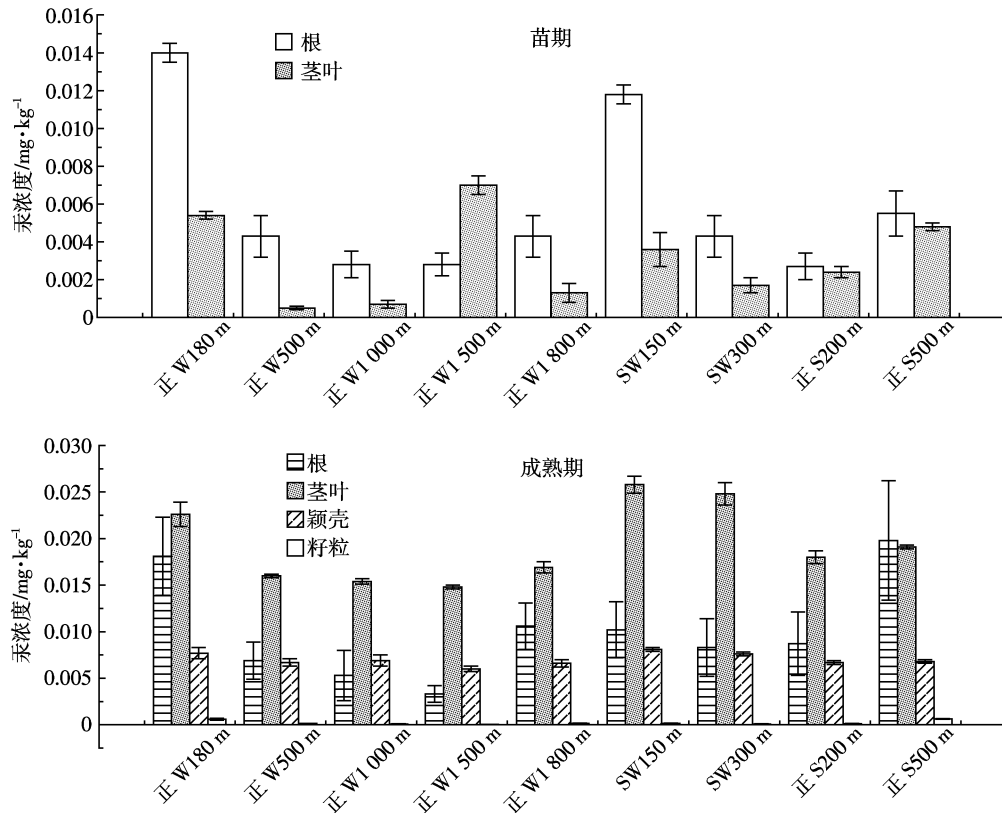


图2 苗期和成熟期小麦各器官的汞含量

Figure 2 Concentrations of mercury in wheat various tissue during seedling period and harvest period

围小麦 BCF 值为茎叶>根>籽粒。可见,燃煤电厂周围小麦各器官对汞的吸收富集已受到燃煤烟气中汞沉降的影响。

3 结论

(1)小麦苗期,表层土壤中汞含量高于深层土中汞含量,表层土壤中汞含量与深层土壤中汞含量呈显著正相关,在燃煤电厂周围土壤中的汞含量呈表面富集现象。小麦收获期,表层土中汞含量高于小麦苗期土壤中汞含量,随着小麦从苗期到收获期,部分表层土壤汞含量有逐渐富集升高的趋势。

(2)小麦苗期,根的汞含量大于茎叶;小麦成熟期,根的汞含量小于茎叶。小麦从苗期到收获期,小麦根和茎叶的汞浓度升高,小麦根和茎叶的汞浓度随着小麦生长发生了累积,且小麦茎叶汞累积速度比根累积速度快。收获期小麦各器官汞含量为茎叶>根>颖壳>籽粒,小麦从苗期到收获期,茎叶面积迅速增加,小麦叶片直接从大气中吸收燃煤烟气中的汞,使小麦茎叶通过叶面吸收的汞浓度增加,在燃煤电厂周围小麦对汞的吸收富集规律和一般情况下小麦汞含量为根>茎叶>籽粒的规律不同。

(3)小麦苗期根、茎叶及成熟期小麦根的汞含量均与相应表层土的汞含量呈显著正相关,苗期小麦各器官富集系数为根>茎叶;小麦成熟期茎叶生物量增加,燃煤烟气中的汞易于在叶片表面沉降或直接被叶片吸收,使叶片从大气中吸收的汞浓度增加,表现出成熟期茎叶汞含量与土壤中汞含量相关性不显著,小麦成熟期汞富集系数为茎叶>根>籽粒。

参考文献:

- [1] 胡长兴,周劲松,何 胜,等.我国典型电站燃煤锅炉汞排放量估算[J]. 热力发电, 2010, 39(3):1-8.
HU Chang-xing, ZHOU Jin-song, HE Sheng, et al. Estimation of mercury emission from coal-fired boilers in typical power plants of China[J]. *Thermal Power Generation*, 2010, 39(3):1-8.
- [2] 胡长兴,周劲松,何 胜,等.全国燃煤电站汞排放量估算[J]. 热力发电, 2010, 39(2):1-4.
HU Chang-xing, ZHOU Jin-song, HE Sheng, et al. Estimation of mercury emission from coal-fired power plants in China [J]. *Thermal Power Generation*, 2010, 39(2):1-4.
- [3] 胡月红.国内外汞污染分布状况研究综述 [J]. 环境保护科学, 2008, 34(1):38-41.
HU Yue-hong. Review of mercury pollution distribution status research at home and abroad[J]. *Environmental Protection Science*, 2008, 34(1):

- 38-41.
- [4] Yang X, Wang L. Spatial analysis and hazard assessment of mercury in soil around the coal-fired power plant: A case study from the city of Baoji, China[J]. *Environmental Geology*, 2008, 53(7): 1381-1388.
- [5] 王晓浩, 王娟, 王文华. 燃煤烟气中汞排放对周边环境影响[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 928-932.
- WANG Xiao-hao, WANG Juan, WANG Wen-hua. Effects of flue gas mercury emission from two coal fired power plants in Shanghai on peripheral environment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 928-932.
- [6] 卢静, 程金平, 胡晓芳, 等. 上海市吴泾工业区周边土壤和树叶中汞污染调查[J]. 环境化学, 2006, 25(1): 101-103.
- LU Jing, CHENG Jin-ping, HU Xiao-fang, et al. The research of mercury pollution soil and leaves around Shanghai Wujing industrial zone[J]. *Environmental Chemistry*, 2006, 25(1): 101-103.
- [7] 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): 3104-3111.
- ZHENG Jian-ming, ZHOU Jin-song, HE Sheng, et al. Environmental impact of mercury emission from a coal-fired power plant[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2009, 60(12): 3104-3112.
- [8] 陈乐恬, 张晓山, 林玉环, 等. 大气环境中汞的形态及其分析方法[J]. 环境化学, 1999, 18(6): 584-588.
- CHEN Le-tian, ZHANG Xiao-shan, LIN Yu-huan, et al. The species and analysis of mercury in atmospheric environment[J]. *Environmental Chemistry*, 1999, 18(6): 584-588.
- [9] 李仲根, 冯新斌, 何天荣, 等. 王水水浴消解-冷原子荧光测定土壤和沉积物中的总汞[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2005, 24(2): 140-143.
- LI Zhong-gen, FENG Xin-bin, HE Tian-rong, et al. Determination of total mercury in soil and sediment by aquaregia digestion in the water bath coupled with cold vapor atom fluorescence spectrometry[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2005, 24(2): 140-143.
- [10] 郑伟, 冯新斌, 李广辉, 等. 硝酸水浴消解-冷原子荧光光谱法测定植物中的总汞[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2006, 25(3): 285-287.
- ZHENG Wei, FENG Xin-bin, LI Guang-hui, et al. Determination of total mercury in plant by nitric acid digestion in the water bath coupled with cold vapor atom fluorescence spectrometry[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2006, 25(3): 285-287.
- [11] 吕东江. 微波消解-原子荧光光谱法测定小麦粉中的汞[J]. 分析实验室, 2008, 27(1): 394-396.
- LV Dong-jiang. Determination of mercury in wheat flour by microwave digestion with vapor atom fluorescence spectrometry[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 2008, 27(1): 394-396.
- [12] 环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 354.
- Environmental Monitoring Station. Background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 354.
- [13] 苏静, 程金平, 王文华. 兰州市土壤汞污染的现状及成因分析[J]. 能源与环境, 2006(1): 69-72.
- SU Jing, CHENG Jin-ping, WANG Wen-hua. Pollution status and reason analysis of mercury in the soils in Lanzhou city[J]. *Energy Sources and Environment*, 2006(1): 69-72.
- [14] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, 21(2/3): 436-457.
- FENG Xin-bin, QIU Guang-le, FU Xue-wu, et al. Mercury pollution in the environment[J]. *Progress in Chemistry*, 2009, 21(2/3): 436-457.
- [15] Liu W X, Liu J W, Wu M Z, et al. Accumulation and translocation of toxic heavy metals in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) growing in agricultural soil of Zhengzhou, China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 82(3): 343-347.
- [16] 刘文拔, 张琴, 张崇玉. 有机肥对土壤-小麦系统汞污染影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 890-896.
- LIU Wen-ba, ZHANG Qin, ZHANG Chong-yu. Effect of applying organic fertilizer and mercury added on Hg pollution in soils-winter wheat system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5): 890-896.
- [17] Bullock Jr O R, Brehme K A. Atmospheric mercury simulation using the CMAQ model: Formulation description and analysis of wet deposition results[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, 36(13): 2135-2146.