

我国人为大气汞排放的环境影响及控制对策

文/王书肖 张磊

汞是环境中毒性最强的重金属元素之一。由于汞在环境中具有持久性、易迁移性和高度生物蓄积性,汞污染已经成为目前最受关注的全球性环境问题之一。2009年,联合国环境规划署(UNEP)第25届理事会与会各方就制定具有法律约束力的汞文书达成共识,要求执行主任成立政府间谈判委员会,2010年,启动汞问题有法律约束力国际文书的谈判,并在2013年初完成。我国大气汞排放占全球人为汞排放的30%~40%,居世界首位,主要排放源为燃煤电厂、工业锅炉、有色金属冶炼、水泥生产、废物焚烧等,这些行业均被列为汞公约的重点管控源。当前,我国政府高度重视汞污染防治工作。2009年,国务院下发的《国务院办公厅转发环境保护部等部门关于加强重金属污染防治工作指导意见的通知》中,将汞污染防治列为工作重点。2010年发布的《国务院办公厅转发环境保护部等部门关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量指导意见的通知》中,进一步提出建设火电机组烟气脱硫、脱硝、除尘和除汞等多污染物协同控制示范工程。在《重金属污染综合防治“十二五”规划》中,汞也被列为重点管控的五种重金属之一,要求重点区域2015年的汞排放比2007年削减15%。

综上所述,无论是从国际履约还是国内汞污染防治的角度,我国均将面临着巨大的汞减排压力。然而,我国汞污染防治工作基础比较薄弱,基础信息、污染防治技术与对策都严重滞后于形势需求。为积极应对国际汞公约谈判,并为将来履约提供技术储备,同时推进国内大气汞排放的环境管理,本文总结了我国燃煤电厂、有色金属冶炼、水泥生产等重点源的排放现状,分析了我国人为大气汞排放对大气、土壤和水体环境的影响,并提出我国人为大气汞排放控制的对策建议,为我国环境保护科学决策提供技

术支持。

我国主要人为大气汞排放源的特征及现状

燃煤电厂、有色金属冶炼和水泥生产是我国最主要的大气汞排放源,环境影响最为显著。

燃煤电厂

我国是煤炭消费大国,2010年全国煤炭消耗量超过33亿吨,其中,电力燃煤消耗量达到16亿吨。考虑到未来一段时间内随着经济增加,我国电力燃煤消耗量仍将进一步增长。

我国煤炭平均汞含量在0.15~0.22毫克/千克的范围内。对于国内燃煤电厂最常见的煤粉炉,煤炭燃烧过程汞的释放率均在99%以上。

目前,我国新建燃煤电厂多采用四电场以上的静电除尘器,截至2010年底,全国93%以上机组采用静电除尘器,其余为布袋除尘器或电袋式除尘器。为满足“十一五”二氧化硫排放控制要求,截至2010年底,全国脱硫机组装机容量占全部煤电机组容量的比例由2005年的14%提高到86%,湿法脱硫系统应用最为广泛。2010年,已投运的烟气脱硝机组容量占煤电机组容量的14%,大部分为选择性催化还原脱硝(SCR)。为满足“十二五”氮氧化物排放控制要求,烟气脱硝设施也将逐步推广。清华大学、浙江大学等机构对我国部分燃煤电厂开展了汞排放特征现场测试研究,结果表明静电除尘器的平均汞去除效率为29%,布袋除尘器平均脱汞效率为67%。湿法脱硫系统能去除约80%的气态二价汞。静电除尘器和湿法脱硫系统的联合脱汞效率约为62%。SCR能将气态元素汞转化为气态二价汞,以便在后续的湿法脱硫系统中去除,SCR、静电除尘器和湿法脱硫系统的联合脱汞效率可达70%。据估算,2010年我国燃煤电厂经除尘脱硫后的大气汞排放约为100吨。

汞污染已经成为目前最受关注的全球性环境问题之一。

大气汞的沉降会引起该地区土壤和水体汞浓度的显著升高,从而引起农作物、陆生动物和水生动物汞浓度的升高,进而影响摄入人群的健康。

有色金属冶炼

我国是世界有色金属生产大国。有色金属矿石中含有的痕量汞,在高温冶炼过程中释放到大气中,进而通过沉降引起土壤和水体污染。有色金属冶炼的大气汞排放主要来自于锌、铅、铜等金属的冶炼。2010年,我国锌、铅、铜产量分别达到503万吨、279万吨、292万吨。精矿中汞的含量是煤炭中的几十倍到几万倍,我国锌、铅、铜精矿汞含量的几何均值分别为9.74毫克/千克、10.29毫克/千克和2.87毫克/千克。有色冶炼企业的大气污染控制设施主要包括除尘和制酸系统。有色冶炼主烟气一般使用静电除尘器,其他烟气多使用布袋除尘器,主烟气的二氧化硫浓度很高,因此会经过制酸系统将烟气中的二氧化硫转化为硫酸产品。我国有色冶炼企业最广泛使用的两转两吸制酸系统其平均脱汞效率在99%以上。据估算,2010年我国锌、铅、铜冶炼过程最终向大气共排放汞72.5吨。由于精矿的汞含量和污染控制设备的脱汞效率在很大范围内变化,有色冶炼汞排放量估算的不确定性要显著高于燃煤电厂。

水泥生产

我国水泥行业规模增长迅猛,2010年,全国水泥产量已达到18.68亿吨,比2005年增长了75%。水泥原料主要包括石灰石、煤、粘土、砂土、铁矿石、飞灰等,石灰石是最主要的原料,其汞含量的变化范围很大(0.5~2000微克/千克),其他原料汞含量同样存在较大的变化范围,粘土和砂土中的汞含量约为0.5~400微克/千克,铁矿石和飞灰中的汞含量约为0.5~600微克/千克。目前,我国80%以上的水泥厂使用新型干法工艺,立窑等落后工艺已逐渐被淘汰。水泥生产过程中的烟气主要包括窑尾烟气、窑头烟气以及煤磨烟气,大气汞排放主要来自窑尾烟气。由于大多数水泥厂使用了返尘工艺,收集下来的汞仍将返回水泥生产工艺,因此最终烟气释放的比例依高达80%。现场测试结果表明,立窑和回转窑工艺的大气汞排放因子约为0.01克/吨水泥,新型干法工艺的大气汞排放因子约为0.02~0.1克/吨水泥。清华大学和美国阿贡国家实验室的联合研究曾使用0.04克/吨水泥作为我国水泥生产行业的大气汞排放因子,据此估算,2010年我国水泥生产

行业大气汞排放总量为75吨。

我国人为大气汞排放的环境影响

对大气环境的影响

我国人为大气汞排放对大气环境的影响包括局地影响和区域影响两个方面。汞矿开采、有色金属冶炼等无组织面源或低矮工业点源易造成局地大气汞浓度的显著升高,燃煤电厂、水泥厂、钢铁厂等高架点源排放的大气汞能够进行长距离的传输,进而对区域尺度的大气环境造成影响。

东亚地区不同监测站点的大气汞浓度结果显示,北半球大气汞浓度的背景值约为1.5~1.7纳克/立方米,而我国农村/背景地区,除了瓦里关和长白山外,大气汞浓度都达到了北半球背景值的1.5~3倍。城市背景站,如北京密云、嘉兴、广州万顷沙、台湾新竹等,大气汞浓度约为3.2~5.4纳克/立方米,这与韩国的Kang Hwa和An-Myum两个城市背景站水平相当。长春等重工业城市的大气汞污染最为严重,达到了将近20纳克/立方米;北京、南京、广州、台北等经济发达城市的城区大气汞浓度也高达8~14纳克/立方米;重庆、贵阳等西南地区城市大气汞浓度也较高,约为7~10纳克/立方米;上海、宁波等沿海城市大气汞浓度较低,仅为3~4纳克/立方米。总体而言,我国城市地区的大气汞浓度约为欧美城市地区的2~6倍。区域大气环境汞浓度的升高会直接导致区域大气汞沉降的增加,从而使整个区域土壤和水体环境的汞污染加剧。

局地大气汞浓度的显著升高对当地环境的影响同样不容忽视。如中国科学院地球化学研究所的监测表明,贵州万山汞矿区的平均大气汞浓度最高达到1100纳克/立方米,而贵州一土法炼锌厂周边的汞浓度高达30~3814纳克/立方米。如此高水平的汞蒸气暴露可能导致暴露人群会出现血汞浓度升高的情况,极端条件下甚至会发生急性汞中毒。清华大学、中国科学院东北地理研究所对辽宁、湖南、甘肃、河南等地大型有色金属冶炼厂周边地区的监测表明,其大气汞浓度高达7~330纳克/立方米,显著高于我国典型城市地区大气汞浓度。大气汞的沉降会引起该地区土壤和水体汞浓度的显著升高,从而引起农作物、陆生

动植物和水生动植物汞浓度的升高,进而影响摄入人群的健康。

对土壤和水体环境的影响

大气中的汞沉降到地表进入土壤和水体环境,并通过光化学甲基化过程转化为生物毒性更强的甲基汞,由此对陆生和水生生态系统造成严重影响。土壤和水体环境的汞污染与大气环境相比,呈现出更强的局地性,因此,高强度大气汞排放源,如汞矿开采、有色金属冶炼等,更容易对周边的土壤和水体环境造成影响,使环境汞浓度显著升高。

我国土壤汞浓度的背景值约为38微克/千克,南方地区的背景值较高,北方地区的背景值较低。采样分析结果显示,汞矿开采对周边土壤环境的影响最为显著,其周边土壤平均汞浓度比土壤背景值高约2个数量级;有色冶炼厂周边土壤汞浓度可达到我国土壤背景值的10~40倍;北京水泥厂集中地区的土壤汞浓度为我国土壤背景值的3~4倍;湖北一家铜冶炼厂和四川的一家水泥厂周边土壤汞浓度约为我国土壤背景值的1.5~2倍。土壤环境汞浓度的增加会引起农作物和陆生动植物汞含量的显著升高,研究表明我国西南地区的水稻汞含量显著高于背景地区,这是该地区居民发汞含量较高的主要原因。

我国部分水系背景值调查显示:长江干流的汞背景值约为15纳克/升,松花江水系的汞背景值约为20纳克/升,洞庭湖水系的汞背景值约为2.5纳克/升。湖泊水库等地表水体主要受大气沉降影响,汞背景值较低,江河等地表水体受到大气沉降和水体直接排入等多种因素的影响,汞背景值较高。贵阳阿哈湖水体总汞浓度在2~20纳克/升范围内,平均值为7纳克/升,红枫湖水体总汞浓度在2.5~14纳克/升之间,平均值为7纳克/升,均高于我国湖泊水体的背景值。贵州一土法炼锌厂周边地表水体汞浓度约为138纳克/升,万山、务川等汞矿区周边地表水体汞浓度更高达25~7000纳克/升,远高于地表水体背景值。贵州乌江的水体汞浓度在11~330纳克/升的范围内,平均浓度为44纳克/升,约为我国江河水体汞背景值的2倍。松花江、黑龙江、乌苏里江的水体总汞浓度分别为96纳克/升、43纳克

/升、68纳克/升,显著高于我国江河水体汞背景值。水体环境汞浓度的增加会引起水生动植物汞含量的显著升高,研究表明松花江下游居民的发汞水平显著高于对照人群,经常吃鱼人群的发汞含量高于不常吃鱼人群,这就是水体环境中的汞在鱼体内生物富集的结果。

我国人为大气汞排放的控制对策

建立汞污染防治动态信息平台,制定国家减排计划

汞排放尚未纳入环境统计或污染源普查体系,我国也未建立完善的汞排放清单,导致汞排放底数不清,影响了汞减排目标和计划的制定。因此,亟需开展全国性汞排放调查,建立动态汞排放清单和汞污染防治信息平台。在此基础上,分析和识别重点污染源、重点行业以及重点区域或流域,确定优先控制目标清单。明确重点行业的汞减排潜力,进而制定汞污染防治国家计划。

推进产业结构调整 and 升级,实现汞排放的源头控制

积极推进国民经济产业结构调整,控制燃煤、水泥、有色金属冶炼等行业规模,优化产业布局,淘汰落后产能,严格环境准入。把结构减排放在更加突出的位置,继续强化工程减排和管理减排,通过制定行业准入条件和行业规划,针对重点行业和重点区域加大投入力度,逐步实现产业升级。在工业生产方面,加大对汞矿和有色金属土法冶炼的监管力度,发展规模化的有色冶炼企业。在能源利用方面,发展清洁能源,提高能源效率,控制煤炭消费总量,淘汰原煤散烧,从源头上减少大气汞排放。

开展多污染物协同控制,建立汞污染监管体系
协同脱汞是最为经济有效的大气汞控制手段,而我国区域大气污染联防联控工作作为协同脱汞提供了重要的平台。污染治理方面,要将颗粒物、SO₂、NO_x、VOC、POP_s等大气污染物的控制与大气汞排放的控制有机结合起来,开发高效的多污染物协同控制技术,建立重点行业多污染物联合防治体系。环境管理方面,要积极推进大气汞污染控制试点工作,加强大气汞监测和防控的能力建设,建立大气汞的环境影响评价机制。

研发高效脱汞技术，实现汞污染防治技术国产化

目前，商业化的大气汞排放控制技术多为发达国家所掌握，我国尚缺乏具有自主知识产权的汞排放控制关键技术，很大程度上制约了我国大气汞污染控制进程。因此，有必要在“十二五”期间，加强对国内具有自主知识产权的高效、低成本烟气脱汞技术的开发。针对燃煤电厂，开发燃煤烟气联合脱硝除汞技术与装备、催化剂再生回用技术与装备、燃煤烟气多污染物协同控制技术及其装备。针对有色金属冶炼行业，开发有色金属冶炼行业烟气汞回收技术，实现关键技术与设备的国产化，打破国外大型环保企业垄断的局面。积极推进汞污染防治技术的引进和成果转

化，实现汞污染防治技术国产化和产业化。

编制汞污染防治最佳可得技术/最佳环境实践指南

各类控制技术的成本效益直接影响到控制政策的选择，而控制技术的可行性则影响到技术的商业化进度。因此，有必要开展重点行业汞污染防治技术的筛选与综合评估，筛选出较为可行且具有商业化前景的控制技术或控制技术组合。同时，大力推广清洁生产工艺技术和示范工程，探索最佳可得技术和最佳环境管理实践，编制重点行业大气汞污染防治最佳可得技术/最佳环境实践指南。^{HB}

【基金项目：国家自然科学基金重点项目（20937002）】
（王书肖系清华大学环境学院教授、博士生导师；张磊，清华大学环境学院）

链接

我们身边的汞

温度计：日常生活中我们经常使用水银温度计，一支普通的棒式或内标式玻璃体温计约含汞 1 克，一支体温计打碎后外泄的汞全部蒸发后，可以使一间 15 平方米大 3 米高的房间内空气汞的浓度达到 22.2 毫克 / 立方米。而一般认为，人在汞浓度为 1.2~8.5 毫克 / 立方米的环境中可很快引起中毒。

血压计：一台台式血压计中含汞约 50 克，血压计若不慎打碎导致汞流出将会对环境造成比温度计破碎更大的威胁。

荧光灯：即日光灯，是一种在居民日常生活中普遍使用的照明设备，既有良好的照明效果又节约电能。一支管径为 36 毫米的粗管径荧光灯含汞量为 25 ~ 45 毫克，一支管径为 26 毫米的细管径荧光灯含汞量为 20 毫克，一支管径为 10 毫米的紧凑型荧光灯含汞量为 10 毫克。封闭在灯管内的汞不会造成汞污染，但如果这些荧光灯被打破，从灯管中释放出的汞就会对人类健康构成威胁。

电池：汞主要存在于一次性干电池中，是电池中电极的组成成分之一。根据国家有关规定，氧化汞电池已明令禁止生产和销售。

银汞合金：在医学领域，一般最常作为补牙材料是银汞合金（俗称银粉）。采用银粉作补牙材料已有一百多年的历史，它的成分是银、铜、锡、锌及水银。苏格兰的研究人员对 180 名牙医进行调查研究后发现，在这些牙医的尿液和指甲中，汞的含量是正常人的 4 倍。患者在用银汞合金补牙后，银汞填充物产生的汞蒸气对患者可能同样有害。

化妆品：化妆品中的汞对皮肤有较好的漂白作用，因此，具有漂白、祛斑作用的化妆品多含有汞。国家规定在化妆品中的汞含量不得超过 1 毫克 / 千克，但很多化妆品中的汞含量都出现超标的现象。