

DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2016.22.009

我国燃煤部门履行 《关于汞的水俣公约》的对策建议^{*}

Strategic Recommendations for the Coal Combustion Sector in China on the Implementation of Minamata Convention on Mercury

摘要 我国政府已于2016年8月正式批准《关于汞的水俣公约》，大气汞污染防治是我国履约工作的重中之重，在我国的大气汞排放源中，燃煤部门的排放量占40%以上，是首要的控制对象，优先制定燃煤部门大气汞排放控制对策具有重要意义。本文分析了我国燃煤部门的履约要求，并从建立并更新燃煤部门大气汞排放清单、推行最佳可得技术/最佳环境实践（BAT/BEP）、实行全国汞减排总量控制、采用浓度控制和脱汞效率控制相结合的排放标准、强化汞污染防治监管体系五个方面，提出了我国燃煤部门履行《关于汞的水俣公约》的对策建议，为我国大气汞污染防治提供技术支持。

关键词 关于汞的水俣公约；大气汞；燃煤；BAT/BEP

文/张磊 王书肖 惠霖霖 郝吉明

汞是一种全球性痕量重金属污染物，以其神经毒性、长程传输性和生物富集性受到国际社会的广泛关注^[1]。2002年，联合国环境规划署（UNEP）基于对全球汞污染状况的评估，指出“人为活动的汞排放已经明显改变了全球汞的自然循环，对人类健康和生态系统构成了严重威胁”^[2]。2009年，UNEP第25届理事会会议就制定具有法律约束力的汞文书达成共识。经过五次政府间谈判，各国代表于2013年10月在日本熊本市签署并通过了《关于汞的水俣公约》（以下简称《公约》）。截止到2016年9月，共有128个国家签署了该《公约》，32个国家已经批准其生效。我国于2016年4月通过了关于批准《关于汞的水俣公约》的决定，同年8月正式批约，由此，我国的汞污染防治履约工作全面提上日程。

大气汞污染防治是我国履约工作的重中之重。我国人为源大气汞排

放量占全球排放总量的30%左右，居世界首位^[3]。《关于汞的水俣公约》附件D列出了大气汞排放的重点管控源，包括燃煤电厂、燃煤工业锅炉、有色金属（铅、锌、铜和工业黄金）生产当中使用的冶炼和焙烧工艺、废物焚烧设施和水泥熟料生产设施。在我国的大气汞排放源中，燃煤部门的排放量占40%以上，是首要的控制对象，优先制定燃煤部门大气汞排放控制对策具有重要意义^[4]。本文旨在分析我国燃煤部门的履约要求，并提出我国燃煤部门履行《公约》的对策建议。

我国燃煤部门的履约要求

针对大气汞排放控制的履约要求主要体现在《公约》第八项——“排放”部分。此部分针对重点管控源主要有以下四方面的要求。

一是缔约方须在《公约》生效之日起4年内制订“国家实施计划”

（NIP），对我国来说，即为2020年之前制订NIP，因此“十三五”是我国制订大气汞排放控制方案的关键时期。

二是对于新建排放源，缔约方须在《公约》生效之日起5年内使用最佳可得技术和最佳环境实践（BAT/BEP）控制并减少大气汞排放。

三是对于现有排放源，缔约方须在《公约》生效之日起10年内在国家计划中列入并实施以下一种或多种措施：采用控制并于可行时减少重点源汞排放的量化目标；采用控制并于可行时减少重点源汞排放的排放限值；采用BAT/BEP来控制重点源汞排放；采用针对多种污染物的控制对策，从而取得控制汞排放的协同效益；采用减少重点源汞排放的替代性措施。

四是缔约方须在实际情况允许时尽快且在《公约》生效之日起5年内建立并更新重点源大气汞排放清单。

我国燃煤部门与《公约》相关的重点排放源主要包括燃煤电厂和燃煤

^{*}基金项目：国家重点基础研究发展计划（973）项目（2013CB430001）；美国自然资源保护协会资助项目

工业锅炉，因此，履约要求可进一步理解表述为：建立并更新燃煤电厂和燃煤工业锅炉大气汞排放清单；对于新建电厂和工业锅炉，采用BAT/BEP以控制并减少大气汞排放；对于现有电厂和工业锅炉，采用总量控制、排放限值、BAT/BEP、多污染物协同控制、替代性措施或其组合措施，以控制并减少大气汞排放。以下分别从燃煤部门大气汞排放清单、BAT/BEP、全国汞减排总量控制、浓度控制和脱汞效率控制相结合的排放标准、汞污染防治监管体系这五个方面提出我国燃煤部门履行《公约》的对策建议。

我国燃煤部门履约的对策建议

建立并更新我国燃煤部门大气汞排放清单

大气汞排放清单是设置全国汞减排目标及制订NIP的基础，建立大气汞排放动态清单也是《公约》的核心要求之一，《公约》将以此作为衡量缔约方减排措施效果的关键指标。

清华大学王书肖团队使用“燃煤大气汞排放因子概率模型”计算得到了我国燃煤部门大气汞排放清单^[5-6]。研究首先通过对全国各主要煤田的采样分析，结合文献中已有的煤炭含汞量数据，建立我国分省原煤含汞量及相关煤质信息数据库，通过对煤炭跨省传输的调研，得到分省实际燃煤的含汞量；进而基于大量现场测试结果建立了燃煤大气汞排放因子估算模式，根据燃煤的煤质和所采用的污染控制设施计算烟气中不同形态汞的释放、转化及协同脱除效率；再通过文献调研，建立详细的燃煤大气汞排放活动水平数据库，包括分省的燃煤消费量、洗煤的应用比例、不同炉型的应用比例、不同大气污染控制设施的应用比例等；在上述信息的基础

上，应用蒙特卡洛模拟方法，计算得到我国燃煤部门的大气汞排放清单及其概率分布。结果表明，2012年我国燃煤电厂、燃煤工业锅炉和民用燃煤炉灶大气汞排放量的最佳估计值分别为93.8吨、75.7吨和17.5吨。山东、内蒙古、江苏、河南、河北这五个省2012年的燃煤大气汞排放量约占全国总排放量的40%^[6]。

该清单模型不同于传统的确定性排放因子模型，而是利用了蒙特卡洛模拟技术，给出了燃煤部门大气汞排放的概率分布，同时，首次引入了排放因子估算模式，基于大量现场测试结果^[7-9]，量化了煤质对大气污染控制设施脱汞效率的影响^[5]。模型还通过对炉型及控制技术的细分，建立了基于控制技术的活动水平数据库，提高了清单的精度。燃煤电厂、燃煤工业锅炉和民用燃煤炉灶这三个部门的清单不确定度分别为（-35%，+45%）、（-45%，+47%）和（-48%，+50%），较以往清单的不确定度（±40%~±70%）有显著下降。采用本方法建立的大气汞排放清单为我国参与《公约》谈判提供了重要的技术支持，也得到了国际同行专家的认可。

推行最佳可得技术和最佳环境实践（BAT/BEP）

BAT/BEP是《公约》优先推荐的控制手段，对于新建和现有的排放源均适用。BAT/BEP的可操作性是各类控制措施中最强的，留给地方政府和企业较大的空间来自选择成本效果最佳的控制技术。燃煤部门大气汞排放控制主要包括以下几方面的技术：燃烧前控制技术、协同控制技术、强化协同控制技术、专门脱汞技术^[10-11]。

燃烧前控制技术。燃烧前控制

技术主要包括洗选煤、混煤（或换煤）等，其适用性主要与煤质有关。煤中汞的赋存形态决定了洗煤的除汞效率，相比有机汞，黄铁矿伴生汞以及其他无机汞更容易通过洗煤过程去除。混煤或换煤是煤种影响的直接体现，从褐煤或亚烟煤切换到烟煤，会造成脱汞效率平均增加5%^[12]。关于我国燃煤部门大气汞排放协同控制效果的研究^[6]，基于清单模型和空气质量模型，评估了《大气污染防治行动计划》（“大气十条”）对我国燃煤部门大气汞排放的协同控制效果。其中，提高洗煤比例这项措施能为燃煤部门带来23.7吨的汞减排量，是继能源结构调整之后汞减排效果最好的控制措施。但需要注意的是，洗煤等燃烧前控制技术自身不算是BAT/BEP，需要和下面的各项技术一起来实现较高的脱汞效率。

协同控制技术。协同控制技术包括对汞具有协同脱除效果的颗粒物、二氧化硫、氮氧化物控制技术。我国广泛采用湿法烟气脱硫技术，该技术对气态二价汞具有很强的协同脱除效果，这是我国在汞排放控制方面的一项优势。对“十一五”期间我国燃煤电厂二氧化硫控制措施^[13]的协同控制效果进行评估，2010年我国燃煤电厂的大气汞排放基本与2005年持平，控硫措施的协同脱汞效果（42吨）抵消了电力需求增长带来的汞排放^[14]。前述对“大气十条”的效果评估^[6]结果表明，除尘设施的升级、湿法脱硫设施比例的提高以及选择性催化还原脱硝设施比例的提高将为燃煤电厂分别贡献6.6吨、8.0吨和2.8吨的大气汞减排。这三项措施对燃煤工业锅炉部门的协同脱汞效果则分别为12.0吨、5.2吨和0.3吨。

强化协同控制技术。强化协同

控制技术指通过添加某些化学物质强化常规污染物控制技术的协同脱汞效果。卤素添加技术可增加烟气的氧化性,使更多零价汞向二价汞转化,从而加强湿法脱硫设施对汞的捕集^[15]。卤素添加技术对选择性催化还原脱硝设施内零价汞催化氧化过程的促进作用尤为显著,因此,其与脱硫脱硝设施的联合使用将极大地提高协同脱汞效果。卤素添加技术是一项成本较低的汞控制技术,目前主要的瓶颈在于缺乏对于该技术二次环境影响的评估。另一项强化协同控制技术为脱硫稳定化技术,该技术可降低脱硫浆液中二价汞的还原再释放,从而强化湿法脱硫设施的协同控制效果。

专门脱汞技术。专门脱汞技术在目前主要指活性碳注入技术,该技术结合已有常规污染控制技术,对汞的总体脱除效果可达99%以上^[16-17],但该项技术的缺点是卤素活化的活性碳成本较高,且掺杂了活性碳的飞灰,难以二次利用反而需要作为危险废弃

物进行处置。对脱汞效率的要求是决定是否采用专门脱汞技术的关键^[18]。

选择并采用BAT/BEP主要有以下几个步骤:掌握排放源的基本信息、识别排放源可能采用的技术类型、选取技术上可行的控制措施、确定最为行之有效的技术方案、综合考虑控制成本及技术有效性。关于BAT/BEP决策模型的研究^[19]确定了影响BAT/BEP是否被采用的六项决定性因素:煤种、煤中汞的形态、现有的颗粒物控制装置、现有的二氧化硫控制设备、现有的氮氧化物控制装置、脱汞效率的要求。

实行全国汞减排总量控制

根据“十一五”和“十二五”期间二氧化硫和氮氧化物控制经验,设定燃煤电厂和燃煤工业锅炉的国家汞减排目标将有助于我国今后几年的大气汞减排。

通过情景预测研究表明^[6,20],我国燃煤电厂的国家汞减排目标可以设定为:到2020年,大气汞排放比2010

年减少25%;到2030年,大气汞排放比2010年减少50%~70%。目前,即使不采用任何专门的汞控制技术(如活性碳注入技术),到2020年燃煤电厂减排25%的目标也是可以实现的。但是,燃煤电厂为了实现2030年的目标,安装专门脱汞设施的比例需要超过30%。

由于目前我国燃煤工业锅炉的大气污染控制设施相对落后,所以工业锅炉相比燃煤电厂具有更大的减排空间。2020年燃煤工业锅炉的汞排放有望比2010年减少30%~50%,2030年有望比2010年减少50%~70%。上述汞减排可以通过采用洗选煤、湿式除尘器 and 麻石水膜除尘脱硫一体化设备向布袋除尘器的升级改造以及广泛应用湿法烟气脱硫技术来实现。

采用浓度控制和脱汞效率控制相结合的排放标准

我国通常使用基于浓度控制的排放标准,如燃煤电厂的汞排放限值为30微克/米³^[21],燃煤工业锅炉的汞

> 建立并更新燃煤电厂和燃煤工业锅炉大气汞排放清单是《公约》的核心要求之一



大气汞排放清单是设置全国汞减排目标及制订NIP的基础，建立大气汞排放动态清单也是《公约》的核心要求之一，《公约》将以此作为衡量缔约方减排措施效果的关键指标。

排放限值为50微克/米³[22]。但是，单纯基于浓度控制的标准有其局限性：若标准过严，则燃用高汞煤的地区难以达标；若标准过松，则起不到控制效果。清华大学、浙江大学、东南大学、上海交通大学等对我国50余家燃煤电厂和燃煤工业锅炉开展的现场测试表明^[7-9]，绝大多数燃煤电厂和燃煤工业锅炉在大气污染控制设施之前的烟气平均汞浓度值低于30微克/米³，燃煤电厂最终烟气平均汞浓度大部分低于10微克/米³，燃煤工业锅炉最终烟气平均汞浓度大部分低于15微克/米³。尽管目前实测的燃煤电厂和燃煤工业锅炉的数量还非常有限，但是所选的测试电厂从装机容量、所在省份、大气污染控制装置组合以及煤种来说，能基本反映中国目前的情况。根据清华大学王书肖研究团队对我国煤炭汞含量和典型大气污染控制设施组合脱汞效率的研究，同时考虑脱汞效率的波动，建议将我国燃煤电厂的汞排放限值设定为15微克/米³，将燃煤工业锅炉的汞排放限值设定为20微克/米³，煤中汞含量较高的西南地区的一些省份除外。

许多发达国家和地区使用基于效率控制的排放标准。在美国，《汞和有毒气体排放标准》^[23]规定，从2015年起，燃煤电厂要达到约90%的脱汞效率。加拿大关于电厂汞排放的标准规定，燃煤电厂平均汞控制效率在2010年达到60%，在2018年达到80%。清华大学基于全国各省燃煤电厂所使用的燃煤和大气污染控制设施计算得到，2010年，我国燃煤电厂和燃煤工

业锅炉的平均汞去除率分别为63%和43%。根据清华大学对燃煤部门汞排放的未来情景预测研究，我国燃煤电厂总体脱汞效率将在2020年和2030年分别达到74%和85%，而燃煤工业锅炉总体脱汞效率将在2020年和2030年分别达到68%和75%。

基于浓度控制的标准对于实时监控来说更加容易，并且这种标准鼓励使用低汞煤（通常也是低硫煤），而基于效率控制的标准为使用高汞煤的企业提供了更大的灵活性。因此，理想的方案是综合这两类标准。我国煤中平均汞含量约为0.2毫克/千克，假设1吨煤燃烧后产生约10000标准立方米烟气，那么在2020年脱汞效率水平下，燃煤电厂和燃煤工业锅炉的烟气平均汞浓度分别约为5.2和6.4微克/米³。进一步考虑煤炭汞含量和脱汞效率的变化，可采用1.5作为系数。2030年的情况类似，由此可得到以下推荐排放标准：

到2020年，燃煤电厂的综合汞排放标准可以是浓度排放限值为8微克/米³，或达到75%的脱汞效率；燃煤工业锅炉的综合汞排放标准可以是浓度排放限值为10微克/米³，或达到70%的脱汞效率。

到2030年，燃煤电厂的综合汞排放标准可以是浓度排放限值为5微克/米³，或达到85%的脱汞效率；燃煤工业锅炉的综合汞排放标准可以是浓度排放限值为7微克/米³，或者达到75%的脱汞效率。

强化汞污染防治监管体系建设
无论是总量控制还是排放标准，

都离不开汞污染防治监管体系的配套保障。这一体系包括汞排放监测和监管等。

建立汞排放监测标准体系。我国燃煤电厂和燃煤工业锅炉汞排放监测标准体系基本上仍是空白。2010年以来，环境保护部在16家试点电厂（包括15家来自中国五大电力集团和1家来自神华集团）开展汞排放监测和控制试点项目。该项目采用了在线和离线两种汞监测方法用于对比。然而由于进口的汞在线监测系统（CEMS）成本高、维护难，目前尚未在我国广泛应用。而试行的汞监测方法（HJ 543—2009）^[24]尚存在诸多问题，仍在修订中。因此，亟需建立和完善汞排放监测方法体系。

完善环保登记制度体系。我国环保登记制度体系目前仍在建设中。该体系不仅有助于控汞监测与监督，也有利于汞排放清单的建立，这对我国履行《公约》至关重要。对于燃煤工业锅炉尤其如此。我国目前有超过50万台燃煤工业锅炉，其中大部分只在国家特种设备安全监察局登记。目前的统计系统没有这些锅炉的燃煤情况和配备的大气污染控制设施的详细信息。排污申报登记及排污许可证制度是环保登记制度体系的一个关键环节，能有效提升环境准入门槛，是汞减排总量控制的重要保障。为了改善我国汞排放控制框架，推进汞排放清单的更新，需要加速我国的环保登记制度体系建设与完善。

完善工业锅炉监督管理体系。燃煤工业锅炉部门与燃煤电厂部门的差距十分显著，无论是在排放清单的信息采集方面还是污染控制措施的实施方面，主要原因涉及燃煤工业锅炉现有的管理体制。中国有成千上万的燃煤工业锅炉，作为辅助设施隶属于不

同种类的企业。由于数量的庞大和行业的复杂,工业锅炉的监督管理体系相对低效。目前,我国已经广泛采用大型锅炉集中供热,这能显著减少民用燃煤量,这一做法可以被应用到整个燃煤工业锅炉部门。大型锅炉可取代小型锅炉为整个工业园区提供集中供应蒸汽或热水,有利于提高管理效率。HB

参考文献

- [1]United Nations Environment Programme (UNEP). Global Mercury Assessment 2013: Sources, Emissions, Releases and Environmental Transport[R]. Geneva, Switzerland, 2013.
- [2]United Nations Environment Programme (UNEP). Global mercury assessment[R]. Geneva, Switzerland, 2002.
- [3]Zhang L, Wang S X, Wang L, et al. Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China[J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49(5): 3185-3194.
- [4]王书肖, 张磊. 我国人为大气汞排放的环境影响及控制对策[J]. 环境保护, 2013, 41(9): 31-34.
- [5]Zhang L, Wang S X, Meng Y, et al. Influence of mercury and chlorine content of coal on mercury emissions from coal-fired power plants in China[J]. Environmental Science and Technology, 2012, 46(11): 6385-6392.
- [6]惠霖霖, 张磊, 王书肖, 等. 中国燃煤部门大气汞排放协同控制效果评估及未来预测[OL]. 环境科学学报(优先出版), 2016-06-23. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1843.X.20160623.1543.002.html>.
- [7]张磊. 中国燃煤大气汞排放特征与协同控制策略研究[D]. 北京: 清华大学环境学院, 2012.
- [8]Wang S X, Zhang L, Li G H, et al. Mercury emission and speciation of coal-fired power plants in China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, 10(3): 1183-1192.
- [9]Chen L, Duan Y, Zhuo Y, et al. Mercury transformation across particulate control devices in six power plants of China: The co-effect of chlorine and ash composition[J]. Fuel, 2007, 86(4): 603-610.
- [10]王书肖, 张磊. 燃煤电厂大气汞排放控制的必要性与防治技术分析[J]. 环境保护, 2012, 40(9): 31-33.
- [11]Wang S X, Zhang L, Wang L, et al. A review of atmospheric mercury emissions, pollution and control in China[J]. Frontiers of Environmental Science and Engineering, 2014, 8(5): 631-649.
- [12]Zhang L, Wang S X, Wu Q R, et al. Mercury transformation and speciation in flue gases from anthropogenic emission sources: a critical review[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, 16(4): 2417-2433.
- [13]中华人民共和国国家发展和改革委员会, 国家环境保护总局. 现有燃煤电厂二氧化硫治理“十一五”规划[R]. 北京: 国家发展和改革委员会, 2007.
- [14]Wang S X, Zhang L, Wu Y, et al. Synergistic mercury removal by conventional pollutant control strategies for coal-fired power plants in China[J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2010, 60(6): 722-730.
- [15]Vosteen B W, Lindau L. Bromine based mercury abatement-promising results from further full scale testing[C]. MEC3 Conference. Katowice, Poland, 2006.
- [16]Campbell T. Low Cost Options for Moderate Levels of Mercury Control-2007 Update on TOXECON II™[C]. DOE/NETL Mercury Control Technology Conference. Pittsburgh, PA, USA, 2007.
- [17]Feeley T, Brickett L A, O'Palko B A, et al. DOE/NETL's Mercury Control Technology R&D Program-Taking Technology from Concept to Commercial Reality[C]. MEGA Symposium. Baltimore, MD, USA, 2008.
- [18]Ancora M P, Zhang L, Wang S X, et al. Economic analysis of atmospheric mercury emission control for coal-fired power plants in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 33: 125-134.
- [19]Ancora M P, Zhang L, Wang S X, et al. Meeting Minamata: cost-effective compliance options for atmospheric mercury control in Chinese coal-fired power plants[J]. Energy Policy, 2016, 88: 485-494.
- [20]Wang S X, Zhang L, Zhao B, et al. Mitigation potential of mercury emissions from coal-fired power plants in China[J]. Energy and Fuels, 2012, 26(8): 4635-4642.
- [21]中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 火电厂大气污染物排放标准(GB 13223—2011)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [22]中华人民共和国环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 锅炉大气污染物排放标准(GB 13271—2014)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [23]United States Environmental Protection Agency (US EPA). Mercury and Air Toxics Standards (MATS) for Power Plants[R]. Washington, DC, USA: US EPA, 2011.
- [24]中华人民共和国环境保护部. 固定源废气汞的测定冷原子吸收分光光度法(HJ/T 543—2009)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(张磊、惠霖霖, 清华大学环境学院; 王书肖系清华大学环境学院教授、博士生导师,《关于汞的水俣公约》燃煤汞排放控制BAT/BEP导则技术专家组组长; 郝吉明系清华大学环境学院教授、博士生导师, 中国工程院院士。王书肖系本文通讯作者)