

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2016.0253

惠霖霖 张磊 王书肖 等.2017.中国燃煤部门大气汞排放协同控制效果评估及未来预测[J].环境科学学报,37(1):11-22

Hui M L , Zhang L , Wang S X , et al. 2017.Evaluation of co-benefits on atmospheric mercury emission control for coal combustion in China and future projection[J].Acta Scientiae Circumstantiae 37(1):11-22

中国燃煤部门大气汞排放协同控制效果评估及未来预测

惠霖霖¹ 张磊^{1,*} 王书肖^{1,2} 蔡思翌¹ 赵斌¹

1. 清华大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100084

2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室,北京 100084

收稿日期:2016-04-27 修回日期:2016-06-23 录用日期:2016-06-23

摘要:汞污染已成为一个全球性的环境问题,我国是世界上大气汞排放量最大的国家,在批准《关于汞的水俣公约》之后,我国的汞污染控制面临严峻的挑战。燃煤部门是我国大气汞排放的第一大部门,也是履约的重点部门。本研究建立了我国燃煤部门 2010 年和 2012 年的大气汞排放清单,评估了“大气污染防治行动计划(“大气十条”)”对燃煤部门大气汞排放的协同控制效果。同时,使用情景分析法,对 2020 年和 2030 年燃煤部门的大气汞排放进行了预测,分析了未来不同控制措施的减排效果。结果表明,2010 年中国燃煤电厂、燃煤工业锅炉和民用燃煤炉灶的大气汞排放量的最佳估计值分别为 100.0、72.5 和 18.0 t。“大气十条”的实施可使我国燃煤部门到 2017 年比 2012 年减少 92.5 t 的大气汞排放。能源结构的调整、洗煤比例的提高和除尘设备的升级改造对于大气汞的减排效果最显著。在最佳估计情景下,2020 年和 2030 年燃煤部门大气汞排放量分别为 128.5 和 80.0 t,与 2010 年相比分别降低了 33%和 58%;在最严格控制情景下,2020 年和 2030 年燃煤部门大气汞的排放量分别为 103.2 和 50.9 t,相较 2010 年分别下降了 46%和 73%。

关键词:燃煤部门;大气汞排放控制“大气十条”;关于汞的水俣公约

文章编号:0253-2468(2017)01-11-12 中图分类号:X511 文献标识码:A

Evaluation of co-benefits on atmospheric mercury emission control for coal combustion in China and future projection

HUI Mulin¹ , ZHANG Lei^{1,*} , WANG Shuxiao^{1,2} , CAI Siyi¹ , ZHAO Bin¹

1. School of Environment , State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control , Tsinghua University , Beijing 100084

2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex , Beijing 100084

Received 27 April 2016; received in revised form 23 June 2016; accepted 23 June 2016

Abstract: Mercury pollution has become a global environmental issue. China is the largest anthropogenic emitter of atmospheric mercury. After ratifying the Minamata Convention on Mercury , China faces substantial challenges on mercury emission control. Coal combustion is the largest atmospheric mercury emission sector as well as the key sector for fulfilling Convention obligations. In this study , we developed the atmospheric mercury emission inventories for coal-fired power plants (CFPPs) , coal-fired industrial boilers (CFIBs) and coal-fired residential stoves (CFRSSs) in 2010 and 2012 , evaluated the co-benefit of atmospheric mercury emission reduction associated with actions already conducted to comply with the Action Plan for Prevention and Control of Air Pollution(“Ten Measures”) , and predicted the atmospheric mercury emission from the coal combustion sector by 2020 and 2030 based on scenario analysis to evaluate the effectiveness of different control measures in the future. The best estimates for atmospheric mercury emission from CFPPs , CFIBs and CFRSSs in 2010 are 100.0 t and 72.5 t and 18.0 t , respectively. The implementation of the “Ten Measures” will reduce atmospheric mercury emission from the coal combustion sector by 92.5 t from 2012 to 2017. Adjustment of energy structure , increase of coal washing application rate and retrofit of dust collectors have the most significant co-benefit on atmospheric mercury emission reduction. Under the best estimate scenario , the mercury emission from the coal combustion sector in 2020 and 2030 will be 128.5 t and 80.0 t , respectively , 33% and 58% lower than that in 2010; and under the most stringent scenario , the mercury emission from the coal combustion sector in 2020 and 2030 will be 103.2 t and 50.9 t , respectively , 46% and 73% lower than that in 2010.

Keywords: coal combustion; atmospheric mercury emission control “Ten Measures”; Minamata Convention on Mercury

基金项目:美国自然资源保护协会项目;国家自然科学基金(No.21307070)

Supported by the Program of Natural Resources Defense Council and the National Natural Science Foundation of China(No.21307070)

作者简介:惠霖霖(1991—),女,E-mail: huimulin@163.com; * 通讯作者(责任作者) ,E-mail: lei-zhang@tsinghua.edu.cn

Biography: HUI Mulin(1991—) female E-mail: huimulin@163.com; * Corresponding author E-mail: lei-zhang@tsinghua.edu.cn

1 引言(Introduction)

汞是一种痕量重金属污染物,由于其具有毒性、生物累积性和长距离传输性,汞污染已成为备受关注的全球性环境问题。2013年10月,联合国环境规划署(UNEP)于日本熊本市主持召开外交全权代表大会,各国代表签署并通过了《关于汞的水俣公约》(UNEP, 2013),我国成为缔约国之一。截止到2016年2月,共有128个国家签署了该项公约,23个国家已经批准其生效。2016年4月,我国正式批准了《关于汞的水俣公约》。根据UNEP于2013年发布的《全球汞评估报告》,全球人为源大气汞排放总量为1960 t(AMAP/UNEP, 2013)。我国人为源大气汞排放量约为583 t,占全球排放量的30%左右(Zhang *et al.*, 2015)。我国最主要的大气汞排放源包括燃煤、有色金属冶炼、水泥熟料生产等部门,分别占我国人为源大气汞排放的47%、22%和18%(Zhang *et al.*, 2015)。我国的燃煤部门主要包括燃煤电厂、燃煤工业锅炉和民用燃煤炉灶(水泥生产过程等工艺用燃煤属于其他部门的管控范畴,因此,在本研究中未考虑),其中,燃煤电厂和燃煤工业锅炉在公约附件D所列的5类重点管控大气汞排放点源中,民用燃煤炉灶由于基本无污染控制设备,其大气汞排放也较为严重。

我国在公约生效后面临巨大的履约挑战。根据公约要求,需要获取重点部门的大气汞排放清单信息,评价现有污染控制措施对于大气汞的减排效果。在我国现有的大气污染控制措施中,“大气污染防治行动计划”(以下简称“大气十条”)(国务院, 2013)对燃煤部门的大气汞减排效果最为显著。本研究建立了2010年和2012年燃煤部门的大气汞排放清单,评估了“大气十条”对于燃煤部门大气汞排放的协同控制效果。2020—2030年很可能成为我国履行公约的重要时期,本研究使用情景分析法预测2020年和2030年燃煤部门的大气汞排放,分析不同控制措施可带来的减排效果。

2 研究方法和关键参数(Methods and key parameters)

2.1 清单方法学

中国现有的大气汞排放清单大多是基于确定性排放因子的方法得到的(Streets *et al.*, 2005; AMAP/UNEP, 2013),具体如公式(1)所示,所有参数均选取平均值。

$$E = \sum_i \sum_j [M_i \cdot A_{ij} \cdot (1 - Q \cdot w) \cdot R_j \cdot (1 - \sum_k P_{ijk} \cdot \eta_{jk})] \quad (1)$$

式中, E 为燃煤部门大气汞排放量(t), M 为燃煤中汞含量($\text{g} \cdot \text{t}^{-1}$), A 为煤炭消费量(Mt), Q 为洗煤应用比例, w 为洗煤的除汞效率, R 为锅炉的汞释放因子, P 为大气污染控制设备组合的应用比例, η 为大气污染控制设备组合的脱汞效率, i 表示省份, j 表示锅炉类型, k 表示大气污染控制设备组合的类型。

实际上,煤中汞含量符合对数正态分布,大气污染控制设备的脱汞效率符合 Weibull 分布(张磊, 2012)。确定性模型中使用算术平均值无法反映这些关键参数的概率分布特征,可能会导致对大气汞排放的高估或低估。本研究采用基于控制技术的概率排放因子模型来评估中国各省份燃煤部门的大气汞排放,具体如公式(2)所示。根据本研究所收集的详细数据,本文建立了该模型的内置统计分布函数,从而降低关键参数(如煤中汞含量、大气污染控制设备组合的脱汞效率等)的不确定性。

$$E(x_i, y_{jk}) = \sum_i \sum_j [M_i(x_i) \cdot A_{ij} \cdot (1 - Q \cdot w) \cdot R_j \cdot (1 - \sum_k P_{ijk} \cdot \eta_{jk}(y_{jk}))] \quad (2)$$

式中 $E(x, y)$ 表示燃煤部门大气汞排放的概率分布, $M(x)$ 为燃煤中汞含量的概率分布, $\eta(y)$ 为污染控制设备组合脱汞效率的概率分布。

该模型结合蒙特卡洛模拟法,考虑燃煤中汞含量和大气污染控制设备的脱汞效率的概率分布,通过统计分布的形式表现大气汞排放的结果。所有结果表示为分布曲线或置信区间,而不是单点的结果。为获得可靠的输出,蒙特卡洛模拟采样次数设置为10000。本研究使用 Crystal Ball™ 软件来完成计算。

煤质对大气污染控制设备的脱汞效率有显著影响。在前人对燃煤电厂大量现场测试的基础上,本研究的清单模型还开发了一个应用于燃煤电厂的子模型,该子模型考虑了煤质(包括煤中汞含量、氯含量、灰分含量等)对污染控制设备脱汞效率的影响。该子模型将煤质与电厂污染控制每一个环节中的烟气汞行为联系起来,从锅炉汞释放的形态入手,考虑燃煤的汞含量、氯含量和灰分含量,然后基于进入每个大气污染控制设备之前的3种不同形态烟气汞的比例,来估算不同设备的脱汞效率。加入该子模型后,应用于燃煤电厂的清单计算模型可以被修改为公式(3)和(4)。

$$E(x_i, z_i) = \sum_i \sum_j [M_i(x_i) \cdot A_{ij} \cdot (1 - Q \cdot w) \cdot R_j \cdot (1 - \sum_k P_{ijk} \cdot \eta_{jk}(x_i, z_i))] \quad (3)$$

$$\eta_{jk}(x_i, z_i) = f_{\eta_{jk}}(M_i(x_i), C_i(z_i), H_i) \quad (4)$$

式中 $E(x, z)$ 为燃煤部门大气汞排放的概率分布, $C(z)$ 为燃煤中氯含量的概率分布, H 为燃煤的灰分含量, $\eta(x, z)$ 为包含 $M(x)$ 、 $C(z)$ 和 H 的函数。

“大气十条”中的减排目标是以 2012 年为基准年, 因此, 本研究建立了 2012 年燃煤部门的大气汞排放清单, 考虑到我国将 5 年作为一个规划期, 而 2015 年的数据暂不可得, 因此, 本研究在预测 2020 年、2030 年燃煤部门大气汞排放时以 2010 年为基准年。

2.2 关键参的获取

2.2.1 煤炭消费量 2010 年我国燃煤电厂煤炭消费量为 15.9 亿 t (中国电力统计年鉴委员会 2011), 工业锅炉的煤炭消费量为 7.3 亿 t (《锅炉大气污染物排放标准》编制组 2013), 民用燃煤为 1.1 亿 t (中国能源统计年鉴 2013), 2012 年我国燃煤电厂的煤炭消费量为 18.6 亿 t, 工业锅炉的煤炭消费量为 7.8 亿 t, 民用燃煤的耗煤量为 1 亿 t. 各省份的煤炭消费量如图 1 所示, 其中, 山东、内蒙古、江苏、河南、河北、山西、广东、浙江、辽宁、安徽均为煤炭消费量较大的省份。

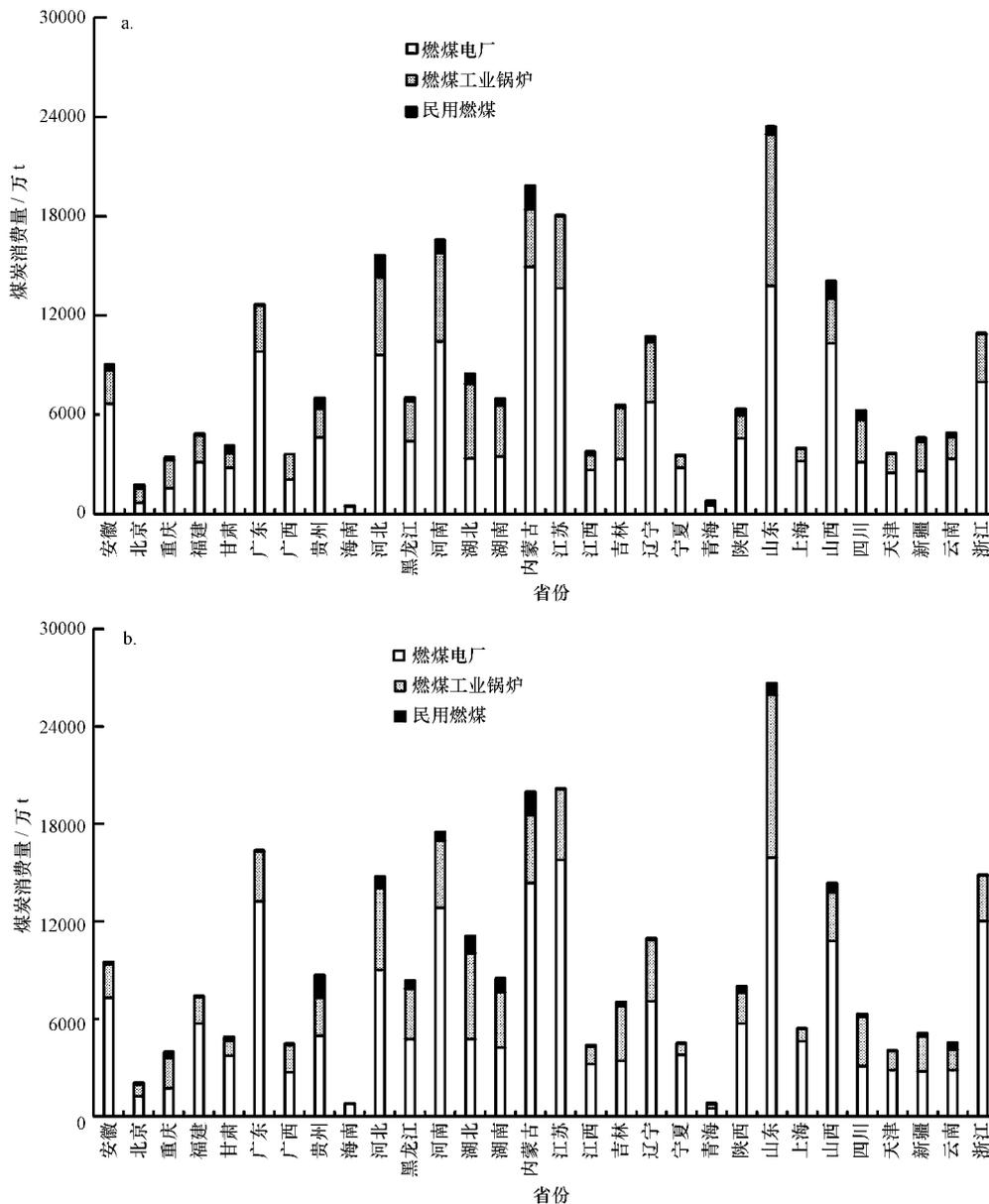


图 1 2010 年 (a)、2012 年 (b) 中国燃煤部门分省份煤炭消费量

Fig.1 Coal consumption of the coal combustion sector in China in 2010 (a) and 2012 (b) by province

2.2.2 燃煤中汞含量 本研究使用的煤炭汞含量数据库是基于课题组已有的研究 (Zhang *et al.*, 2012) 和美国地质调查局的研究 (USGS, 2004), 几乎涵盖了所有大型煤田。山西和内蒙古是中国最大的两个煤炭生产省份, 分别有 88 和 46 个煤炭样本数据。对于其他大型煤炭生产省份, 如陕西、河南、山东、安徽和黑龙江, 各有超过 20 个样本。样本

的数目主要是基于各省的煤炭产量, 对样本数目的选择也考虑到煤炭汞含量的差异。贵州被认为是全省煤炭汞含量差异最大的省份, 因此, 拥有 46 个样品。对于其他煤炭汞含量差异较大的省份, 如云南、四川和河北, 每个省选取了 15 个以上样本。我国分省原煤汞含量的最佳估计及置信区间如图 2 所示。

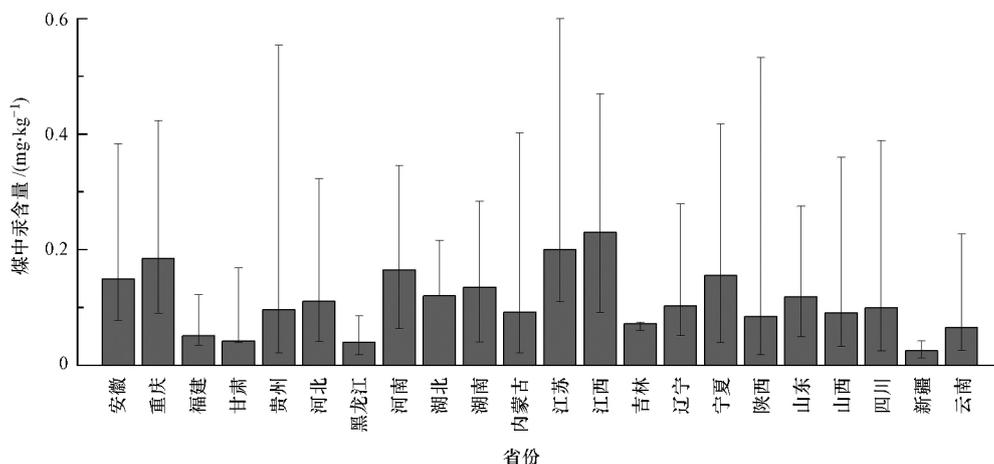


图 2 中国分省原煤汞含量最佳估计 (P_{50}) 及置信区间 ($P_{10} \sim P_{90}$)

Fig.2 Best estimates (P_{50}) and confidence intervals ($P_{10} \sim P_{90}$) of mercury contents in raw coals in China by province

由于煤炭存在广泛的跨省传输, 在某省生产的煤炭往往不在该省消费, 因此, 本研究通过煤炭传输矩阵(式(5)) 将各省份原煤中的汞含量转化为燃煤中的汞含量。

$$\begin{aligned}
 m_c &= A m_p \\
 m_c &= [m_{c1} \ m_{c2} \ \dots \ m_{cn}]^T \\
 A &= \{a_{ij}\}_{n \times n} \\
 m_p &= [m_{p1} \ m_{p2} \ \dots \ m_{pn}]^T
 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, 矢量 m_c 是各个省份消耗的煤炭的汞含量, 即燃煤中汞含量 m_p 是在各个省份生产的煤炭的汞含量, 即原煤中汞含量 A 是煤炭传输矩阵, a_{ij} 是煤炭从 j 省运到 i 省量的百分比, n 是省的数量。

2.2.3 污染控制设备安装比例 煤粉炉 (PC) 在中国电力行业应用最广泛, 占总产能的 88%, 其余的 12% 使用循环流化床 (CFB) 锅炉。2010 年, 洗煤在燃煤电厂中的应用比例只有 2%。静电除尘 (ESP) 与湿法脱硫 (WFGD) 的污染控制设施组合 (ESP + WFGD) 使用最为广泛, 安装比例为 64%, 选择性催化还原脱硝 + 静电除尘 + 湿法脱硫 (SCR + ESP + WFGD) 联用及布袋除尘 + 湿法脱硫 (FF + WFGD) 组合的安装比例分别为 13% 和 5%, SCR + FF + WFGD

的安装比例仅为 1% (中国电力统计年鉴委员会, 2011)。2012 年我国燃煤电厂 ESP + WFGD 的安装比例下降 17%, 但 SCR + ESP + WFGD 和 FF + WFGD 的安装比例分别上升了 15% 和 5% (中国电力统计年鉴委员会, 2013)。在我国燃煤工业锅炉使用的锅炉类型有层燃炉 (SF)、室燃炉 (CC) 和循环流化床锅炉 (CFB) 3 种。层燃炉是最广泛使用的锅炉类型, 占中小型燃煤锅炉 ($\leq 35 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$) 总容量的 90% 以上, 占大型燃煤锅炉 ($> 35 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$) 总容量的 70%。湿式除尘器 (WS) 和麻石水膜除尘脱硫一体化设备 (IMS) 都是我国燃煤工业锅炉普遍使用的污染控制设备, 2010 年这二者在中小型燃煤锅炉中的使用比例占到 95%, 在大型燃煤锅炉中的使用比例占到 80%。2012 年在燃煤工业锅炉中的使用比例为 88% (《锅炉大气污染物排放标准》编制组, 2013)。2012 年 FF + WFGD 和 SCR + FF + WFGD 在燃煤工业锅炉的使用比例分别为 6% 和 6% (Zhao *et al.*, 2013)。我国的民用燃煤炉灶主要用于农村的供热及城镇和农村居民的炊事, 使用过程中不安装污染控制设备。根据李仲根等 (2013) 的研究, 民用燃煤炉灶的汞释放率为 99.7%。

2.2.4 污染控制设备脱汞效率 洗煤能够脱除煤

中约 30% 的汞 其他污染控制设施组合(包括锅炉)的脱汞效率来自从已有研究搜集到的现场测试结果(Chen *et al.*, 2007; Cheng *et al.*, 2009; Duan *et al.*, 2005; Goodarzi, 2004; He *et al.*, 2007; Ito *et al.*, 2006; Kellie *et al.*, 2004; Kim *et al.*, 2010; Lee *et al.*, 2004; Lee *et al.*, 2006; Meij *et al.*, 2006; Otero-Rey *et al.*, 2003; Shah *et al.*, 2008; Shah *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2009; Yokoyama *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2012; Zhou, 2005; 陈进生等, 2008; 陈义珍等, 2006; 郭欣等, 2004; 汤顺林等, 2004; 王运军等, 2008; 杨祥花等, 2007; 张磊, 2012; 周劲松等, 2006; 2008). 其中, 有 4 种污染控制设备组合在燃煤电厂和燃煤工业锅炉中广泛使用, 现场测试的数据丰富, 本研究对其脱汞效率进行概率分布拟合, 结果表明, 这 4 种污染控制设备组合脱汞效率均符合 Weibull 分布, 如表 1 所示, 使用 P_{10} 、 P_{50} 、 P_{90} (拟合得到的概率分布曲线在累积概率达到 10%、50%、90% 时对应的脱汞效率) 3 个特征指标表示其脱汞效率信息. PC+ESP 和 PC+ESP+WFGD 的组合在实际计算中应用了 2.1 节中介绍的清单子模型, 将煤质的影响考虑在内.

表 1 普遍使用的污染控制设备组合的脱汞效率信息

Table 1 Information on mercury removal efficiency of common air pollution control device (APCD) combinations

污染控制设备组合	现场测试数目	脱汞效率		
		P_{10}	P_{50}	P_{90}
PC+ESP	63	7%	26%	56%
PC+ESP+WFGD	19	39%	65%	84%
PC+FF	10	53%	76%	91%
SF+WS	8	10%	23%	40%

注: PC 表示煤粉炉, SF 表示层燃炉, ESP 表示静电除尘器, FF 表示布袋除尘器, WFGD 表示湿法烟气脱硫, WS 表示湿式除尘器.

其他污染控制设备组合的脱汞效率没有足够的数据来进行概率分布拟合, 因此, 在大气汞排放清单的计算中使用平均值, 具体如表 2 所示.

表 2 污染控制设备组合的平均脱汞效率

Table 2 Average mercury removal efficiencies of APCD combinations

污染控制设备组合	平均脱汞效率	测试数目
PC+SCR+ESP+WFGD	69%	4
PC+FF+WFGD	86%	3
PC+SCR+FF+WFGD	93%	2
SF+IMS	38%	2
SF+FF+WFGD	86%	3
CFB+ESP	74%	3
CFB+FF	86%	3

注: CFB 表示循环流化床锅炉, IMS 表示麻石水膜除尘脱硫一体化设备, SCR 表示选择性催化还原脱硝, 其他含义同表 1.

2.3 “大气十条”下的汞排放控制情景设置

“十二五”期间, 对我国燃煤部门大气汞排放有影响的政策有 3 项, 分别为 2013 年国务院出台的“大气污染防治行动计划”(国务院, 2013), 以及 2011 年和 2014 年环保部分别发布的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011) (环境保护部, 2011) 和《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014) (环境保护部, 2014). 这 3 项标准中, “大气十条”对环境大气中的污染物浓度提出了要求, 其他两项标准对污染物排放浓度提出了要求. 本研究首先通过空气质量模型 (CMAQ 模型) 建立污染物排放量与环境浓度之间的关系, 再利用表面响应模型 (RSM 模型) 实现两者之间的非线性快速响应. 由此, 通过 CMAQ-RSM 将“大气十条”的空气质量目标转化为煤炭总量控制和污控设施优化的综合方案. 结果表明: 为达到“大气十条”的目标, 2017 年我国的燃煤电厂、燃煤工业锅炉及民用燃煤炉灶的煤炭消费量需要分别控制在 17.5 亿 t、7.2 亿 t 和 1.1 亿 t 以内, 燃煤电厂和燃煤工业锅炉洗煤的比例需分别提高至 50%~60%. 此外, “大气十条”中将京津冀、长三角和珠三角地区列为 $PM_{2.5}$ 的优先控制区域, 因此, 北京、天津、河北、上海、江苏、浙江和广东的布袋除尘器 (FF) 的应用比例高于其他省份. SCR+ESP+WFGD 和 SCR+FF+WFGD 将在 2017 年成为主要的燃煤电厂大气污染物控制装置. 对于燃煤工业锅炉来说, 由于“大气十条”对燃煤工业锅炉 $PM_{2.5}$ 和 SO_2 的严格控制要求, FF+WFGD 的应用比例将快速增长, 到 2017 年, 京津冀、长三角和珠三角地区燃煤工业锅炉采用 FF+WFGD 组合的比例预计为 50%~60%. 《火电厂大气污染物排放标准》和《锅炉大气污染物排放标准》加严了烟尘、 SO_2 、 NO_x 的排放浓度限值, 并首次提出了大气汞排放浓度限值, 分别为 $30 \mu g \cdot m^{-3}$ 和 $50 \mu g \cdot m^{-3}$. 本研究通过评估 3 项政策及标准, 发现“大气十条”最为严格, 且其他两项标准关于大气汞的排放浓度限值相对宽松, 对于燃煤电厂和燃煤工业锅炉的大气汞排放没有有效的约束力. 能够达到“大气十条”的要求意味着也能够满足其他两项标准中对于大气污染物排放限值的规定. 因此, 在设置 2017 年的减排情景中, 本文只考虑了“大气十条”的相关政策. 图 3 给出了 2012 年和 2017 年燃煤电厂和燃煤工业锅炉分省份的污染控制设备组合的应用比例.

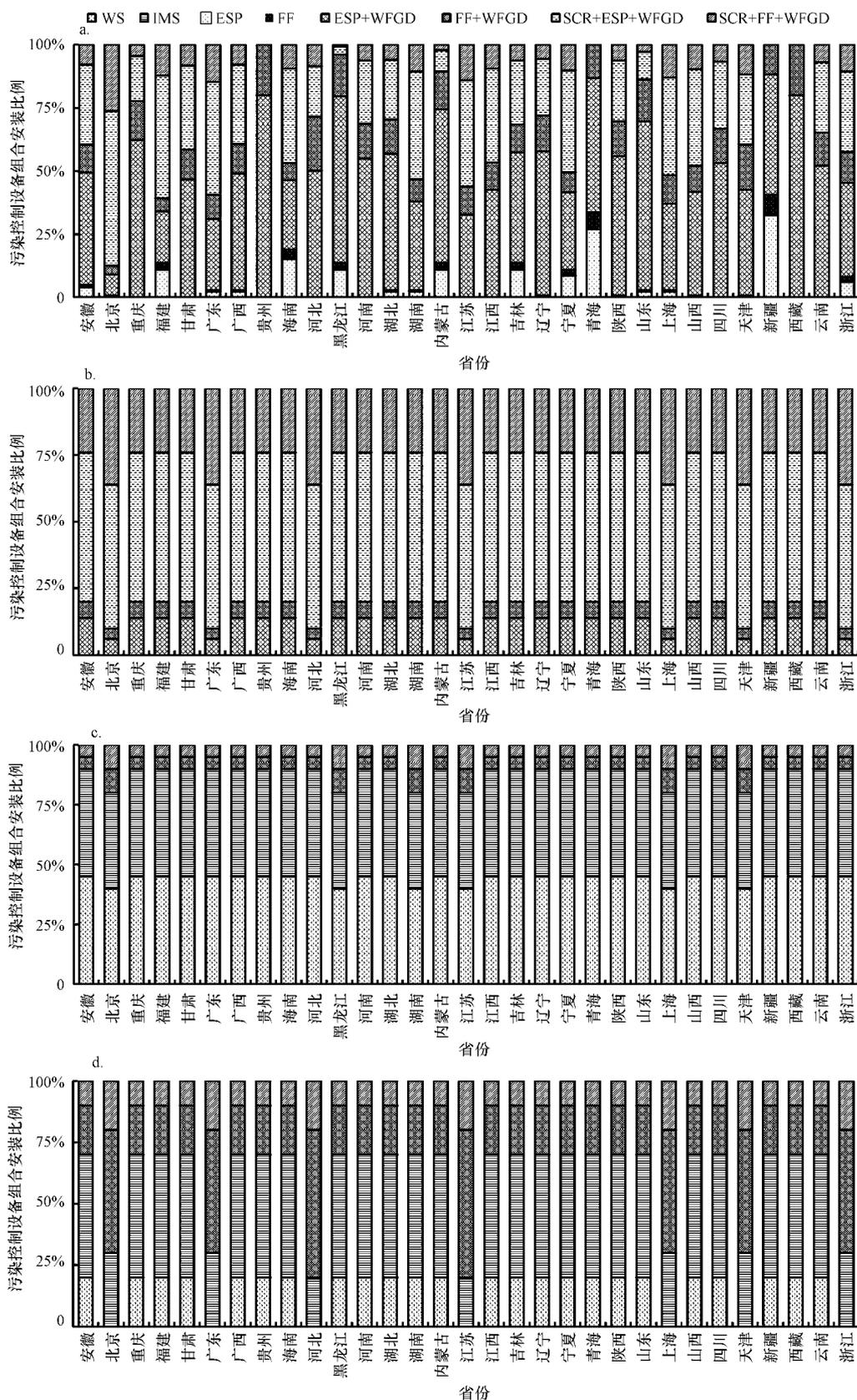


图3 中国各省大气污染控制设备组合的应用比例(a.燃煤电厂-2012年,b.燃煤电厂-2017年,c.燃煤工业锅炉-2012年,d.燃煤工业锅炉-2017年)

Fig.3 Applications of different APCD combinations in China by province (a.CFPPs-2012 , b.CFPPs-2017 , c.CFIBs-2012 , d. CFIBs-2017)

2.4 基于履约的未来情景设置

预测 2020 年和 2030 年的大气汞排放比 2017 年存在更大的不确定性,因此,本研究设置了 0、1、2 三种能源情景及基准情景(BAU)、政策情景(EEC)和加严情景(ACT)3 种控制情景来模拟 2020 年和 2030 年间燃煤部门的大气汞排放情况。情景 0 和 2 使用的是《中国煤炭消费总量控制规划研究报告》(中国煤控项目组,2015)中情景,其中,情景 2 的实质是根据“大气十条”中关于 2017 年的煤炭消费量的外延。情景 1 是本研究基于电力行业的发展趋势及使用到燃煤工业锅炉的各行业未来发展的需求设立的。其中,燃煤电厂通过预测人口变化及人均电力消费量得到电力的需求量,然后根据煤电比例的变化,得到煤电发电量;再根据发电小时、装机容量及供电标准煤耗的变化得到电力煤炭消费总量(张磊,2012)。燃煤工业锅炉的煤炭消费量参考了《中国 2050 年低碳发展之路》中的低碳情景(国家发展和改革委员会能源研究所课题组,2009)。民用燃煤炉灶的煤炭消费量参考了课题组已有的研究(Zhao *et al.*, 2013)。表 3 给出了能源情景的设置情况。

表 3 2020 年和 2030 年我国燃煤电厂和燃煤工业锅炉能源情景
Table 3 Energy scenarios of China's CFPPs and CFIBs in 2020 and 2030

部门	年份	各能源情景下的汞排放/亿 t		
		情景 0	情景 1	情景 2
燃煤电厂	2020	20.3	19.3	18.7
	2030	18.7	17.4	16.1
燃煤工业锅炉	2020	9.0	8.0	7.1
	2030	8.8	7.9	6.9
民用燃煤炉灶	2020	1.1	1.0	1.0
	2030	1.0	0.9	0.8

BAU 情景假设大气污染控制保持现有的政策标准不变,且已经颁布实施的政策标准基本按要执行;EEC 情景假设先进的大气污染控制技术在我国逐渐推广,“大气十条”控制要求都能达到;ACT 情景假设“十三五”期间我国出台新的政策及标准,最大限度地提高污染控制设施水平,并且为达到《关于汞的水俣公约》的要求,专门的脱汞设施被投入使用。对于燃煤电厂,在 3 种控制情景下 2020 年的污染控制设施水平的提高体现在 SCR+FF+WFGD 和 SCR+ESP+WFGD 安装比例的提升,2030 年使用了专门的脱汞设施(SMC),2030 年 SMC+ESP+SCR+WFGD 这种污染控制设备组合在 BAU、EEC、

ACT3 种情景下的比例分别为 10%、30%和 50%。对于燃煤工业锅炉,专门的脱汞设施应用的可能性不大,3 种控制情景在 2020 年和 2030 年均考虑的是污染控制水平提高,没有考虑专门脱汞设施的使用。

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 燃煤部门大气汞排放清单

本研究的结果表明,2010 年我国燃煤电厂、燃煤工业锅炉、民用燃煤炉灶的大气汞排放量的最佳估计值(P_{50})分别为 100.0、72.5 和 18.0 t,2012 年燃煤电厂、燃煤工业锅炉和民用燃煤炉灶的大气汞排放量的最佳估计值(P_{50})分别为 93.8、75.7 和 17.5 t。山东、内蒙古、江苏、河南、河北为燃煤部门大气汞排放大省,2010 年和 2012 年的大气汞排放量分别占全国总排放量的 41%和 39%,这与该五省的燃煤部门的煤炭消费量占据了我国煤炭消费总量的 36%有着直接关系。2010 年和 2012 年中国燃煤部门的分省份大气汞排放清单如图 4 所示。

3.2 燃煤部门大气汞排放协同控制效果评估

结合“大气十条”的相关政策,预计 2017 年燃煤电厂大气汞的排放量为 58.1 t,图 5a 给出了不同的措施对于燃煤电厂大气汞排放量的协同脱除效果。2017-0 情景表明,如果不考虑“大气十条”的相关政策,停留在 2012 年的污染控制水平,由于电力需求的增长,2017 年我国燃煤电厂大气汞的排放量将为 104.4 t。2017-1 至 2017-5 情景分别显示了由于能源结构的调整、洗煤比例的提高、ESP 升级为 FF、WFGD 和 SCR 比例的提高带来的大气汞排放量的降低。其中,能源结构的调整作用最为明显,协同脱除 16.0 t 的大气汞,其次为洗煤比例的提高,减少了 12.9 t 的大气汞排放,将 ESP 升级为 FF、提高 SCR 的安装比例、提高 WFGD 的安装比例分别避免了 6.6、2.8 和 8.0 t 的大气汞排放。“大气十条”协同脱除了燃煤电厂 46.3 t 的大气汞。2017 年预计燃煤工业锅炉大气汞的排放量为 40.5 t,图 5b 给出了不同措施对于燃煤工业锅炉大气汞排放量的协同脱除效果。能源结构的调整减少了 17.3 t 的大气汞,比燃煤电厂更加显著,洗煤减少了 10.8 t 的大气汞排放,对于燃煤工业锅炉来说,将 ESP 升级为 FF 比洗煤更有效,有助于避免 12.0 t 的大气汞排放。提高 WFGD 及 SCR 的安装比例分别避免了 5.2 和 0.3 t 的大气汞排放。“大气十条”协同脱除了燃煤工业锅炉 45.6 t 的大气汞。图 5c 给出了 2017 年能源结构调

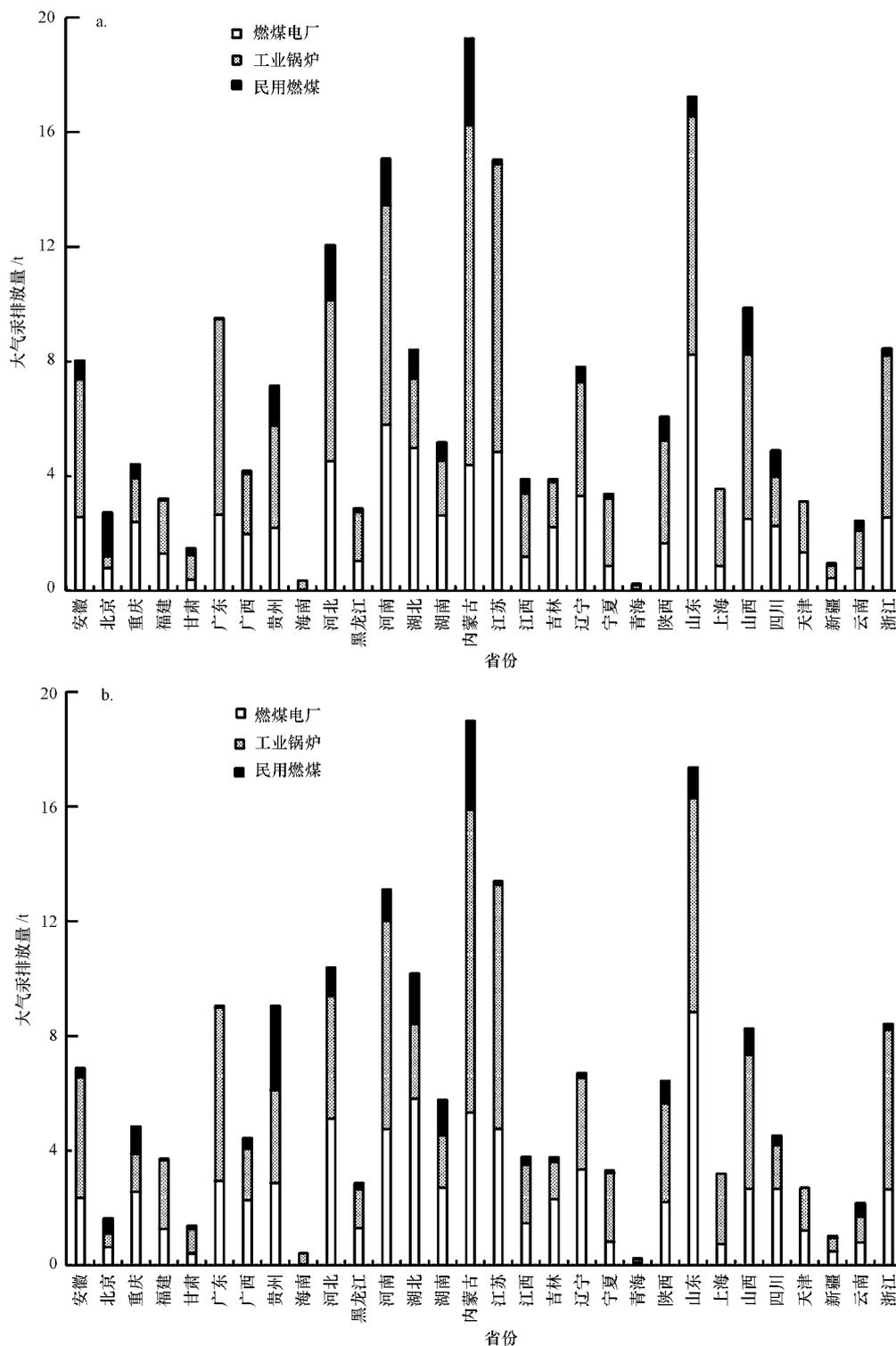


图 4 2010 年 (a) 和 2012 年 (b) 中国燃煤部门分省份大气汞排放量

Fig.4 Atmospheric mercury emission from the coal combustion sector in China in 2010 (a) and 2012 (b) by province

整对于民用燃煤炉灶大气汞排放量的协同脱除效果.随着我国城镇化步伐的加快,越来越多的农村变为城镇,使用集中供热(集中供热锅炉属于工业锅

炉),民用炉灶的煤炭消费量自然下降,在无控制的情况下,2017年的民用燃煤炉灶大气汞排放比2012年可减少0.1 t左右,在“大气十条”的要求下,2017

年大气汞排放为 16.8 t, 比无控制下削减 0.6 t.

整体来看,“大气十条”的实施有助于我国燃煤部门减少 92.5 t 的大气汞排放.其中,能源结构的调

整,洗煤比例的提高和将 ESP 升级为 FF 对于大气汞的减排效果最显著.

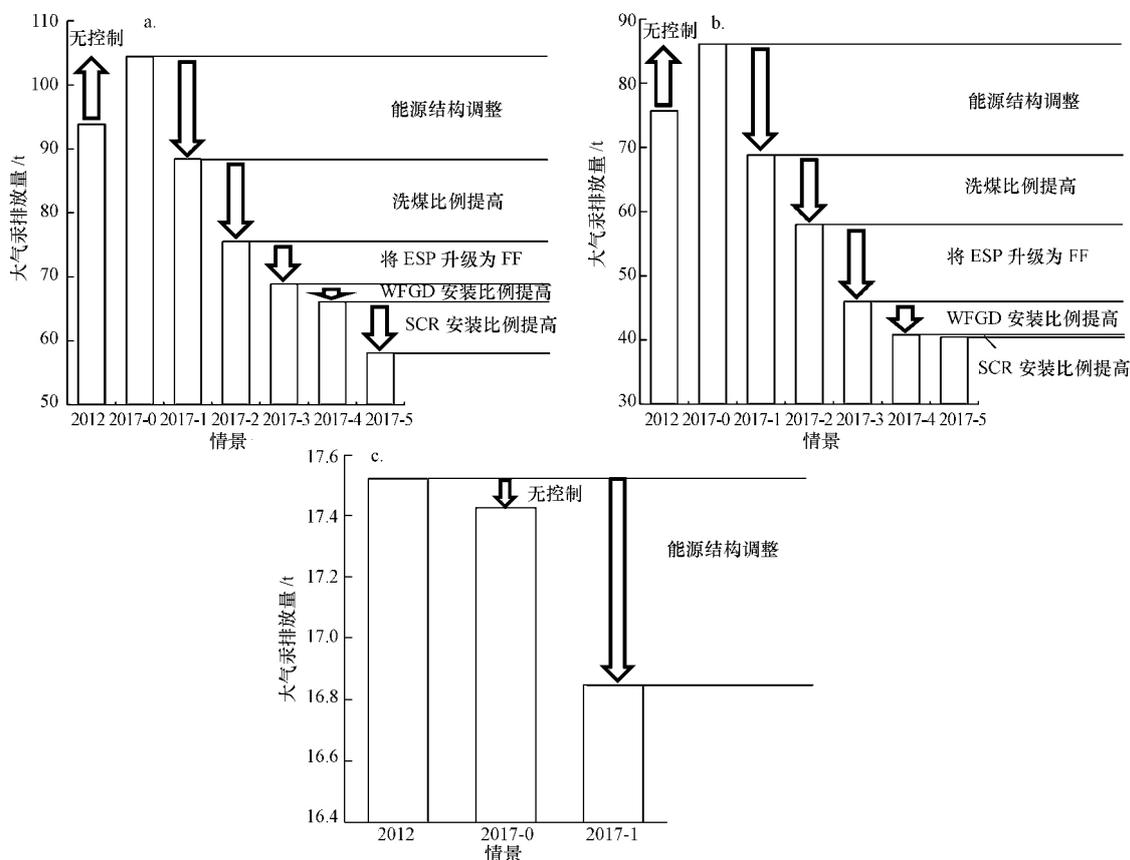


图 5 不同措施对燃煤电厂 (a)、工业锅炉 (b) 和民用燃煤炉灶 (c) 大气汞排放的协同脱除效果

Fig.5 Co-benefits on atmospheric mercury emission control from CFPPs (a), CFIBs (b) and CFRSs (c) by different measures

3.3 燃煤部门大气汞排放未来情景预测

图 6a 显示了燃煤电厂 2010—2030 年的大气汞排放变化趋势,9 种情景的平均结果表明,2020 年燃煤电厂的大气汞排放量比 2010 年降低了 22%,这表明由于对 SO_2 和 NO_x 排放控制而协同减少的大气汞排放量大于由于电力需求增加带来的大气汞排放.在 2010—2020 年间降低的基础上,2020—2030 年间燃煤电厂大气汞排放量相比 2010 年又降低了 32%.图 6b 显示了燃煤工业锅炉 2010—2030 年大气汞排放趋势,9 种情景的平均结果表明,与 2010 年相比,2020 年燃煤工业锅炉大气汞的排放量降低了 44%,在此基础上,2020—2030 年间大气汞的排放量又降低了 14%.可以看出,对于燃煤工业锅炉,2020—2030 年间大气汞的减排幅度小于 2010—2020 年间,这是由于 2010 年燃煤工业锅炉的污染

控制水平较低,污染控制设施的协同脱除效果主要体现在第一阶段.由于民用燃煤炉灶没有污染控制设备,根据活动水平的 3 种情景,图 6c 显示了民用燃煤炉灶 2010—2030 年大气汞排放变化趋势,3 种情景的平均结果表明,与 2010 年相比,2020 年民用燃煤炉灶的排放量降低了 10%,2030 年在此基础上又下降了 9%.

总体来看,EEC1 情景下的大气汞排放结果为本研究的最佳估计情景,在该情景下,2020 年和 2030 年燃煤部门大气汞排放量分别为 128.5 和 80.0 t,相较 2010 年的 190.5 t,分别降低了 33%和 58%.ACT2 情景下的结果代表的是最大限度的大气汞减排量,在该情景下,2020 和 2030 年燃煤部门大气汞的排放量分别为 103.2 和 50.9 t,相较 2010 年,分别下降了 46%和 73%.

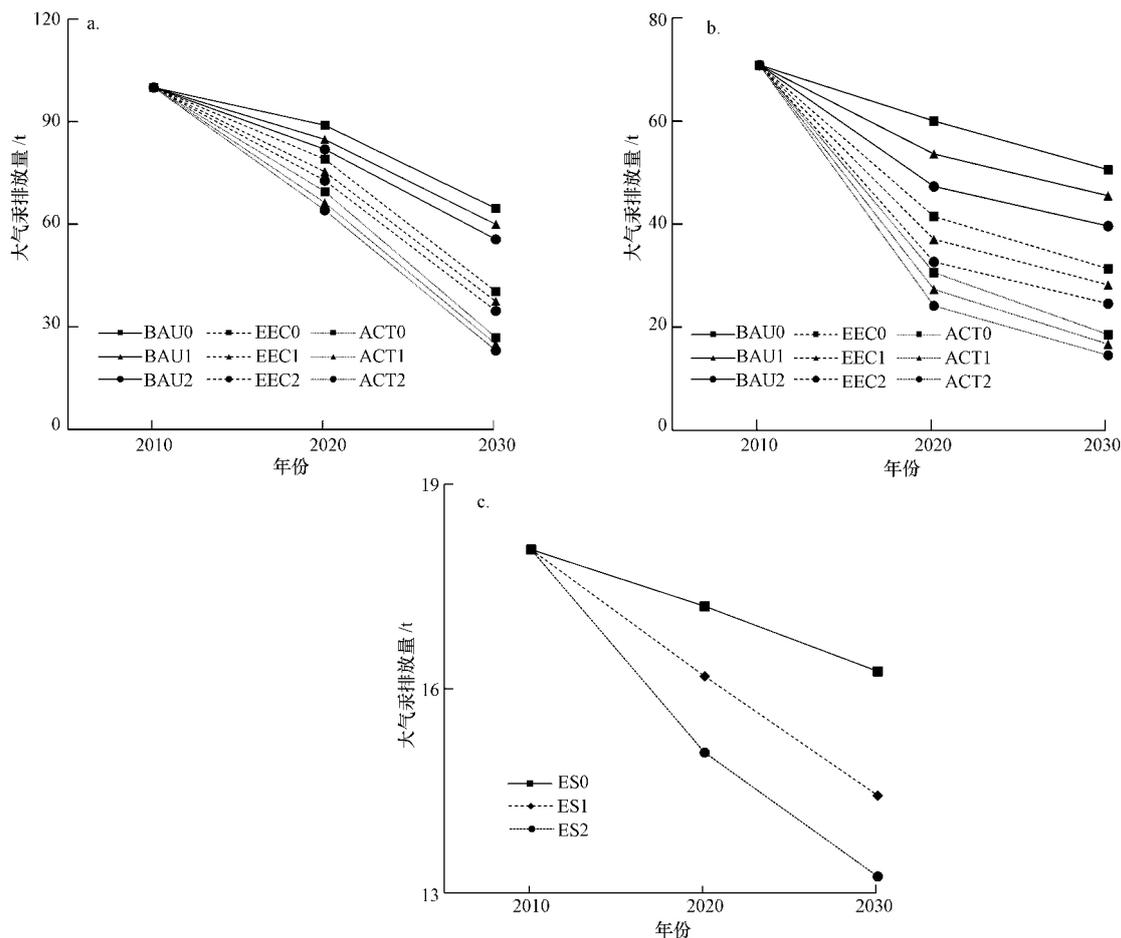


图 6 燃煤电厂 (a)、燃煤工业锅炉 (b) 和民用燃煤炉灶 (c) 2020 年和 2030 年大气汞排放情景预测

Fig.6 Scenario projections of atmospheric mercury emission from CFPPs (a), CFIBs (b) and CFRSs (c) in 2020 and 2030

4 结论 (Conclusions)

1) 2010 年和 2012 年我国燃煤电厂大气汞排放量的最佳估计值分别为 100.0 和 93.8 t, 燃煤工业锅炉的大气汞排放量的最佳估计值分别为 72.5 和 75.7 t, 民用燃煤炉灶大气汞排放量的最佳估计值分别为 18.0 和 17.5 t.

2) 到 2017 年,“大气十条”中的相关措施将协同脱除燃煤电厂 46.3 t 的大气汞,脱除燃煤工业锅炉 45.6 t 的大气汞,脱除民用燃煤炉灶 0.6 t 的大气汞排放.其中,能源结构的调整对于大气汞的协同脱除效果最为明显,分别协同脱除了燃煤电厂和燃煤工业锅炉 16.0 和 17.3 t 的大气汞,而民用燃煤炉灶的大气汞减排全部来自能源结构调整的协同控制作用.

3) 2020 年燃煤部门大气汞排放量在 103.2 ~ 129.5 t 之间,较 2010 年下降 32% ~ 46%; 2030 年燃煤部门大气汞排放量在 50.9 ~ 81.9 t 之间,较

2010 年下降 57% ~ 73%.

4) 为履行《关于汞的水俣公约》,我国应制定燃煤部门的大气汞减排目标.对于燃煤电厂,2020 年和 2030 年的减排目标可以分别设定为比 2010 年降低 25% 和 50% ~ 70%; 对于燃煤工业锅炉,2020 年和 2030 年的大气汞减排目标可以分别设定为比 2010 年降低 30% ~ 50% 和 50% ~ 70%; 对于民用燃煤炉灶,2020 年和 2030 年的大气汞减排目标可以分别设定为比 2010 年降低 5% ~ 15% 和 10% ~ 25%.

责任作者简介:张磊(1985—),男,博士,主要研究方向为大气汞排放特征与污染控制.

参考文献 (References):

- Ancora M P, Zhang L, Wang S X, et al. 2016. Meeting Minamata: cost-effective compliance options for atmospheric mercury control in Chinese coal-fired power plants[J]. Energy Policy 88: 485-494
- Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP) /United Nations

- Environment Programme (UNEP). 2013. Technical Background Report for the Global Mercury Assessment 2013 [R]. Geneva , Switzerland: UNEP Chemicals Branch
- 陈进生,袁东星,李权龙,等.2008.燃煤烟气净化设施对汞排放特性的影响[J].中国电机工程学报,28(2):72-76
- 陈义珍,柴发合,薛志钢,等.2006.燃煤火电厂汞排放因子测试设计及案例分析[J].环境科学研究,19(2):49-52
- Chen L ,Duan Y ,Zhuo Y ,*et al.* 2007. Mercury transformation across particulate control devices in six power plants of China: The co-effect of chlorine and ash composition[J].Fuel,86: 603-610
- Cheng C M ,Hack P ,Chu P ,*et al.*2009.Partitioning of mercury ,arsenic , selenium ,boron and chloride in a full-scale coal combustion process equipped with selective catalytic reduction , electrostatic precipitation and flue gas desulfurization systems [J]. Energy and Fuels,23: 4805-4816
- Duan Y ,Cao Y ,Kellie S *et al.*2005.In-situ measurement and distribution of flue gas mercury for a utility PC boiler system [J]. Journal of Southeast University (English Edition),21: 53-57
- Goodarzi F.2004.Speciation and mass-balance of mercury from pulverized coal fired power plants burning western Canadian subbituminous coals[J].Journal of Environmental Monitoring,6: 792-798
- 《锅炉大气污染物排放标准》编制组.2013.《锅炉大气污染物排放标准》(征求意见稿)编制说明[R].北京《锅炉大气污染物排放标准》编制组
- 郭欣,郑楚光,贾小红,等.2004.300MW 煤粉锅炉烟气中汞形态分析的实验研究[J].中国电机工程学报,24(6):185-188
- 国家发展和改革委员会能源研究所课题组.2009.中国 2050 年低碳发展之路[M].北京:科学出版社
- 国务院.2013.大气污染防治行动计划[OL].北京:国务院.2016-12-01.http://www.gov.cn/zwqk/2013-09/12/content_2486773.htm
- He B ,Cao Y ,Romero C E *et al.*2007.Comparison and validation of OHM and SCEM measurements for a full-scale coal-fired power plant [J]. Chemical Engineering Communication,194: 1596-1607
- 环境保护部.2011.GB13223-2011. 火电厂大气污染物排放标准[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会
- 环境保护部.2014.GB13271-2014. 锅炉大气污染物排放标准[S].北京:中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会
- Ito S ,Yokoyama T ,Asakura K.2006.Emissions of mercury and other trace elements from coal-fired power plants in Japan [J]. Science of the Total Environment,368: 397-402
- Kellie S ,Duan Y ,Cao Y *et al.*2004.Mercury emissions from a 100-MW wall-fired boiler as measured by semicontinuous mercury monitor and ontario hydro method[J].Fuel Processing Technology,85: 487-499
- Kim J H ,Pudasainee D ,Yoon Y S ,*et al.* 2010. Studies on speciation changes and mass distribution of mercury in a bituminous coal-fired power plant by combining field data and chemical equilibrium calculation [J].Industrial and Engineering Chemistry Research,49: 5197-5203
- Lee S J ,Seo Y C ,Jang H N *et al.*2006.Speciation and mass distribution of mercury in a bituminous coal-fired power plant [J]. Atmospheric Environment,40(12): 2215-2224
- 李仲根,冯新斌,李广辉,等.2013.贵州省民用燃煤的大气汞排放特征[A].中国矿物岩石地球化学学会第14届学术年会论文摘要专辑.13-14
- Lee S J ,Seo Y C ,Jung J ,*et al.*2004.Mercury emissions from selected stationary combustion sources in Korea [J]. Science of the Total Environment,325: 155-161
- Meij R ,Winkel H.2006.Mercury emissions from coal-fired power stations: The current state of the art in the Netherlands [J]. Science of the Total Environment,368: 393-396
- Otero Rey J R ,Lopez Vilarino J M ,Moreda Pineiro J *et al.*2003.As ,Hg , and Se flue gas sampling in a coal-fired power plant and their fate during coal combustion [J]. Environ Sci Technol,37: 5262-5267
- Shah P ,Strezov V ,Nelson P.2010.Speciation of mercury in coal-fired power station flue gas [J].Energy and Fuels,24: 205-212
- Shah P ,Strezov V ,Prince K *et al.*2008.Speciation of As ,Cr ,Se and Hg under coal fired power station conditions [J].Fuel,87: 1859-1869
- Streets D G ,Hao J M ,Wu Y *et al.*2005.Anthropogenic mercury emissions in China [J]. Atmospheric Environment,39: 7789-7806
- 汤顺林,冯新斌,商立海,等.2004.贵阳市小型燃煤锅炉烟气中汞的形态及释放[J].环境科学研究,17(2):74-76
- United Nations Environment Programme (UNEP). 2013. Minamata Convention on Mercury [OL].Geneva ,Switzerland: UNEP. 2016-12-01.http://www.mercuryconvention.org
- United States Geological Survey (USGS).2004.Mercury content in coal mines in China [R].Reston ,Virginia: USGS
- Wang S X ,Zhang L ,Li G H *et al.*2010.Mercury emission and speciation of coal-fired power plants in China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics,10(3): 1183-1192
- Wang Y ,Duan Y ,Yang L ,*et al.* 2009. Experimental study on mercury transformation and removal in coal-fired boiler flue gases [J].Fuel Processing Technology,90: 643-651
- 王运军,段钰锋,杨立国,等.2008.600MW 燃煤电站烟气汞形态转化影响因素分析[J].热能动力工程,23(4):399-403
- Yokoyama T ,Asakura K ,Matsuda H *et al.*2000.Mercury emissions from a coal-fired power plant in Japan [J]. Science of the Total Environment,259: 97-103
- 杨祥花,段钰锋,江贻满,等.2007.燃煤锅炉烟气和飞灰中汞形态分布研究[J].煤炭科学技术,35(12):55-58
- Zhang L ,Wang S X ,Meng Y ,*et al.* 2012. Influence of mercury and

- chlorine content of coal on mercury emissions from coal-fired power plants in China [J]. *Environmental Science and Technology* ,46: 6385-6392
- Zhang L ,Wang S X ,Wang L *et al.* 2015. Updated emission inventories for speciated atmospheric mercury from anthropogenic sources in China [J]. *Environmental Science and Technology* 49(5) : 3185-3194
- Zhao B ,Wang S X ,Liu H *et al.* 2013. NO_x emissions in China: historical trends and future perspectives [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics* ,13: 9869-9897
- Zhou J. 2005. Emissions and control of mercury from coal-fired utility boilers in China [R]. Beijing: China Workshop on Mercury Control from Coal Combustion
- 张磊. 2012. 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. 1-144
- 中国电力统计年鉴委员会(CEPYEC). 2011. 中国电力统计年鉴 [M]. 北京: 中国电力统计年鉴委员会
- 中国电力统计年鉴委员会(CEPYEC). 2013. 中国电力统计年鉴 [M]. 北京: 中国电力统计年鉴委员会
- 中国煤控项目组(中国煤炭消费总量控制方案和政策研究)及中国节能协会. 2015. 中国煤炭消费总量控制规划研究报告 [R]. 北京: 中国煤控项目组及中国节能协会
- 周劲松,王光凯,骆仲泱,等. 2006. 600MW 煤粉锅炉汞排放的试验研究 [J]. *热能动力工程* 21(6) : 569-572
- 周劲松,张乐,骆仲泱,等. 2008. 300MW 机组锅炉汞排放及控制研究 [J]. *热力发电* ,37(4) : 22-27
- 张磊. 2012. 中国燃煤大气汞排放特征与协同控制策略研究 [D]. 北