

燃煤电厂大气汞及其他痕量元素排放标准研究

王树民¹,白孝轩^{2,4},宋 畅³,张 翼¹,顾永正³,郭智辉^{2,4},毋波波^{2,4},余学海⁵,段 雷⁶,田贺忠^{2,4*} (1.国家能源投资集团有限责任公司,北京 100011; 2.北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100875; 3.中国神华能源股份有限公司国华电力分公司,北京 100025; 4.北京师范大学大气环境研究中心,北京 100875; 5.神华国华(北京)电力研究院有限公司,北京 100018; 6.清华大学环境学院,北京 100084)

摘要: 为探究中国超低排放燃煤电厂汞及其他有害痕量元素未来标准制定的可行性及建议,综合对比了中国与欧盟、美国等发达国家燃煤电厂大气痕量元素排放标准限值,并基于燃煤电厂现场测试相关文献调研分析,系统地评估了中国燃煤电厂汞及其他9种典型痕量元素(砷、铅、硒、镉、铬、锑、钴、镍和锰)的排放现状.结果表明:与美国、欧盟、加拿大等发达国家相比,目前我国燃煤电厂大气污染物排放标准限定的痕量元素污染物种类较为单一(仅规定了烟气汞及其化合物排放限值, $<30\mu\text{g}/\text{m}^3$)且排放标准限值较为宽松;在全国燃煤电厂已普遍完成超低排放升级与改造的新形势下,现行的《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)已难以起到对燃煤电厂大气汞及其他痕量元素排放控制的实际限制作用和对先进新技术的示范引领作用.作为世界上的最大燃煤消费国,中国燃煤电厂每年消耗煤炭占中国煤炭消费总量的一半左右,是国际社会和《关于汞的水俣公约》重点关注的排放源.因此,推动燃煤电厂大气汞排放标准限值的修订及其他有害痕量元素排放标准的制定,对于保护生态环境和公众健康及国际履约均具有较大的可行性及重要的现实意义.

关键词: 燃煤电厂; 痕量元素; 汞; 排放标准限值; 排放状况; 超低排放

中图分类号: X511,X822 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2001)04-1949-10

Study of atmospheric trace elements emission standards for coal-fired power plants in China. WANG Shu-min¹, BAI Xiao-xuan^{2,4}, SONG Chang³, ZHANG Yi¹, GU Yong-zheng³, GUO Zhi-hui^{2,4}, WU Bo-bo^{2,4}, YU Xue-hai⁵, DUAN Lei⁶, TIAN He-zhong^{2,4*} (1.National Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China; 2.State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation & Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3.Guohua Electric Power Branch, China Shenhua Energy Co., Ltd., Beijing 100025, China; 4.Center for Atmospheric Environmental Studies, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5.Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co. Ltd., Beijing 100018, China; 6.School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China). *China Environmental Science*, 2021,41(4): 1949~1958

Abstract: In this study, the trace elements emission standards of coal-fired power plants (CFPPs) between China and developed countries and the emission status in Chinese CFPPs were systematically evaluated to explore the feasibility and recommendations for establishing standards in the future. Results indicated that fewer species of trace element pollutants were currently restricted in China, and the existing emission limit for the single element (mercury and its compounds, $30\mu\text{g}/\text{m}^3$) was relatively laxer compared with CFPPs in developed countries. Moreover, the stack concentration of mercury in most plants was lower than $10\sim15\mu\text{g}/\text{m}^3$, indicating the current emission standard has failed to play a viable role in limiting the atmospheric mercury emission from Chinese CFPPs. Therefore, we suggested that the current atmospheric mercury emission limit for Chinese CFPPs should be revised and emission limits for other toxic trace elements could be introduced when revised emission standards for coal-fired power plants in the future, to better protect the ecosystem and human health and promote the successful fulfil of the Minamata Convention on Mercury.

Key words: coal-fired power plants; trace elements; mercury; emission standard; current emission status; ultra-low emission technology

随着国民经济对能源和电力需求的持续增长,中国电力工业快速发展.火力发电装机容量从 1978 年的 3984 万 kW 增长为 2019 年的 119055 万 kW^[1],增长了约 30 倍.中国“富煤、少油、贫气”的能源禀赋格局、进口石油与天然气成本高及国际贸易的巨大不确定性、国家能源安全保证等多方面因素共同影响,使得燃煤电厂占火力发电的比例超过 90%.

为保护环境和公众健康,满足国内大气污染防治的要求,中国燃煤电厂大气污染物排放标准经过多次修订,日趋严格.2014 年 6 月国务院办公厅首次发文

收稿日期: 2020-09-04

基金项目: 国家能源集团科技创新项目(GJNY-19-56);国家自然科学基金资助项目(21777008)

* 责任作者, 教授, hztian@bnu.edu.cn

要求新建燃煤机组大气污染物排放接近燃气机组排放水平^[2],由此拉开了中国燃煤电厂超低排放升级与改造计划的序幕.截至 2018 年第三季度末,中国超低排放煤电机组装机容量超过 7.5 亿 kW,已建成全球最大的清洁煤电供应体系^[3].目前,通过超低排放技术升级与改造,我国燃煤电厂烟尘、SO₂、NO_x三大常规污染物,已基本实现了与燃气电厂同等清洁的目标^[4].

近年来,燃煤电厂烟气中的汞及其他有害痕量元素(砷、铅、硒、镉等)排放成为国际大气环境与健康领域关注的热点问题^[5].自 2017 年 8 月 16 日,《关于汞的水俣公约》^[6]正式对中国生效,燃煤电厂是水俣公约排放条款附录 D 中的 5 个重点大气汞排放源之一.随着超低排放改造以及能源结构调整,近年来燃煤电厂的大气污染排放状况已发生根本性的改变,在常规污染物标准限值处于国际领先水平的前提下,开展汞及其他痕量元素等非常规污染物排放水平的国际比较研究,对于明确未来燃煤电厂大气污染控制方向及重点具有重要科学意义与现实应用价值.基于大量文献调研和实地考察,本研究综述了美国、欧盟等西方发达国家燃煤电厂大气汞及其他痕量元素相关排放标准及法规,结合中国燃煤电厂大气污染排放控制现状,提出燃煤电厂修订汞排放标准及制定其他痕量元素排放标准的建议与展望.

1 美国燃煤电厂大气痕量元素排放标准限值

1.1 美国相关法规与标准发展历程

根据美国《清洁空气法》^[7]法案第 111 和第 112 条款的规定和要求,美国环保署(US EPA)于 2011 年 12 月 16 日制定了涵盖现役机组及新建机组,包括非低阶煤(热值 >19305kJ/kg)、低阶煤(热值 ≤19305kJ/kg)、煤气化、美国大陆液态石油、非美国大陆液态石油、液态石油衍生物 6 种不同燃料类型的《汞及有毒空气污染物排放标准(MATS)》^[8],该标准于 2012 年 4 月 16 日起执行.如图 1 所示, MATS 标准最早于 1990 年提出,历时 21a 于 2011 年正式发布,从提出到最终发布实施过程历经波折^[9].

1990 年,《清洁空气法案(修正案)》^[10]要求 US EPA 通过发布国家标准以控制多种排放源包括汞在内的有毒空气污染物排放,但未涉及电厂.1994

年,US EPA 提出要通过公共事业设备有毒空气污染物研究,来判定是否有必要按照法案 112 条款的规定对电厂排放进行管制.期间受多种因素的影响,判定期限由 1995 年 11 月推迟至 1998 年 2 月又延至 2000 年 12 月.

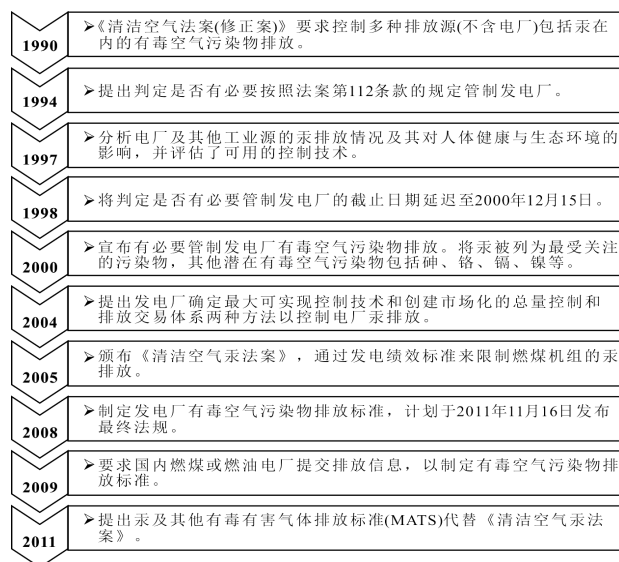


图 1 美国 MATS 标准提出、制定及发布历程^[8]

Fig.1 The launch process of American MATS standard

2000 年,US EPA 宣布有必要对电厂有毒空气污染物排放进行管控,并将 Hg 列为最应受关注的污染物,其他受关注的潜在有毒空气污染物包括砷(As)、铬(Cr)、镉(Cd)及镍(Ni)等.并于 2004 年提出 2 种控制电厂 Hg 排放的基本方法:(1)电厂按照法案 112(d)条款所规定的程序确定最大可实现控制技术(MACT)以实现汞的达标排放.(2)建立基于市场化的“总量控制与交易”体系(US EPA 建议采用该方法控制汞的排放).

2005 年,US EPA 颁布《清洁空气汞法案》^[11],规定通过“发电绩效”来限制新建及现役机组的 Hg 排放,并设定 Hg 总量控制目标及两阶段实施的交易计划;2008 年,美国联邦法庭撤销 US EPA 关于将电厂从法案 112(c)条款的排放源列表中移除的提案,同时撤销《清洁空气汞法案》^[11].同时,US EPA 宣布按照法案 112 条款规定,计划于 2011 年 3 月 16 日提出《发电厂有毒空气污染物排放标准》议案,并于 2011 年 11 月 16 日确定最终法规.

2009 年,US EPA 发布信息收集规定,要求美国所有燃煤及燃油电厂提交污染物排放信息,用于制

定《发电厂有毒空气污染物排放标准》;2011 年 12 月 16 日,US EPA 正式发布《汞及有毒空气污染物排放标准(MATS)》^[8].

1.2 美国 MATS 标准的修订历程

MATS 标准适用于 25MW 以上的新建及现役发电机组.自 2011 年 12 月 16 日发布以来,US EPA 结合 MATS 标准实际执行中存在的问题,陆续对标准中铅(Pb)、汞(Hg)、硒(Se)、锑(Sb)及铍(Be)的排放限值做了后续的修订工作,如表 1 所示.

历经多次修订后的美国现行 MATS 排放标准汇总如表 2 所示.可见,总体上新建机组汞及其他痕量元素排放标准限值严于现役机组.对于以低阶煤和非低阶煤为燃料的燃煤电厂来说,除 Hg 外其他金属元素在不同煤质下的排放标准限值相同,且不同机组类型下 Sb、Pb 和 Ni 的排放标准限值也相同,分别为 1.02、2.55 和 5.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.对于汞来说,新建和现役不同类型机组规定的标准限值差异较大,最低为 0.39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,最高限值为 5.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

表 1 MATS 标准限值的修订历程^[8]
Table 1 Revision process of MATS standard

修订日期	修订内容
2012 年 4 月 9 日	将以煤气化为燃料的现役机组的 Pb 排放标准限值由 1.8lb/MWh 修订为 1.8lb/GWh.
2012 年 11 月 30 日	将以煤(低阶煤和高阶煤)为燃料的新建机组的 Pb 排放标准限值由 0.002lb/GWh 修订为 0.03lb/GWh,Se 排放标准限值由 0.006lb/GWh 修订为 0.05lb/GWh; 将以非低阶煤为燃料的新建机组的 Hg 排放标准限值由 0.0002lb/GWh 修订为 0.003lb/GWh.
2015 年 2 月 17 日	将以煤(低阶煤和高阶煤)为燃料的新建机组的 Pb 排放标准限值由 0.03lb/GWh 修订为 0.02lb/GWh; 将以非低阶煤为燃料的新建机组的 Hg 排放标准限值由 0.0002lb/GWh 修订为 0.003lb/GWh; 将以液态石油衍生物为燃料的现役机组的 Sb 排放标准限值由 0.008lb/GWh 修订为 0.007lb/GWh,Be 排放标准限值由 0.0006lb/GWh 修订为 0.0005lb/GWh.

表 2 美国 MATS 现行排放标准($\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[12]
Table 2 Current emission standard of American MATS ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

机组类型	燃料类型	Hg	Sb	As	Be	Cd	Cr	Co	Pb	Mn	Ni	Se
现役机组	非低阶煤	1.70	1.05	2.62	0.26	0.39	3.92	1.05	2.62	6.54	5.23	7.85
	低阶煤	5.10	1.02	2.55	0.26	0.38	3.83	1.02	2.55	6.38	5.10	7.65
	煤气化	4.05	2.70	2.70	0.14	0.27	4.05	2.70	243.00	4.05	9.45	40.50
	液态石油,美国大陆	0.27	27.00	4.05	0.27	0.27	8.10	40.50	10.80	40.50	148.50	5.40
	液态石油,非美国大陆	0.05	2.70	10.80	0.41	0.41	40.50	189.00	10.80	40.50	553.50	27.00
	液态石油衍生物	0.27	0.95	0.68	0.07	0.54	2.70	2.70	2.70	5.40	27.00	2.70
新建机组	非低阶煤	0.39	1.05	0.39	0.08	0.05	0.92	0.26	2.62	0.52	5.23	6.54
	低阶煤	5.10	1.02	0.38	0.08	0.05	0.89	0.26	2.55	0.51	5.10	6.38
	煤气化	0.41	2.70	2.70	0.14	0.27	5.40	0.54	1.22	2.70	9.45	40.50
	液态石油,美国大陆	0.01	1.35	0.41	0.07	0.03	2.70	4.05	1.08	2.70	12.15	2.70
	液态石油,非美国大陆	0.05	1.08	8.10	0.27	0.27	2.70	40.50	4.05	13.50	553.50	2.70
	液态石油衍生物	0.27	1.08	0.41	0.08	0.09	0.81	0.27	2.70	0.95	5.40	0.81

注:美国标准单位为 lb/GWh,其中非低阶煤和低阶煤的换算系数为 0.013lb/GWh=1.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 0.12lb/GWh=15.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[13].其他燃料的换算系数为 0.03lb/GWh=4.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ^[14].

2 欧盟及其他国家燃煤电厂大气痕量元素排放标准限值

2.1 欧盟相关法规与标准发展历程

欧盟主要基于“经济上可行的最佳可用技术(BAT)”制定燃煤电厂污染物排放标准限值. BAT

指与生产发展及设备运行方法最有效、最先进的阶段相适应并普遍应用的特定技术,这种技术可为排放限值提供依据,以限制排放并减轻对环境的影响.截至目前,欧盟共陆续发布了 4 次指令性文件,以不断加强燃煤电厂污染排放控制.包括 1988 年发布的《大型燃烧企业大气污染物排放限值指令》(88/

609/EEC)、2001 年修订发布的《大型燃烧企业大气污染物排放限值指令》(2001/80/EC)、2010 年修订发布的《工业排放指令》(2010/75/EU)以及 2017 年发布的《经济上可行的最佳可用技术(BAT)结论文件》(2017/1442)(图 2)。

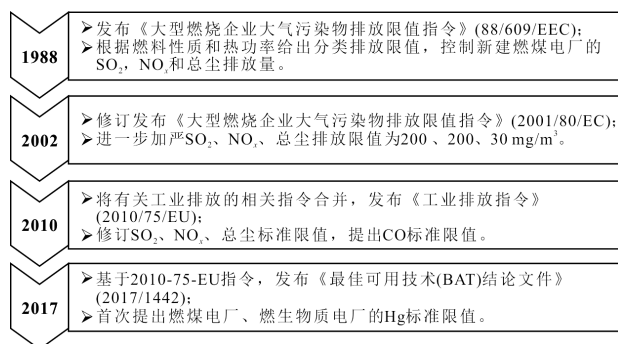


图 2 欧盟燃煤电厂指令发展历程^[15-18]

Fig.2 The launch process of EU coal power plant directive

《工业排放指令》(2010/75/EU)是 2010 年欧盟整合包括《大型燃烧企业大气污染物排放限值指令》(2001/80/EC)在内的有关工业排放的 7 则指令形成的综合性法规指令。2010/75/EU 指令第三章规定了针对含电厂在内额定输出功率 $\geq 50\text{MW}$ 燃烧装置的大气污染物排放标准限值。该指令修订了不同规模(50~100MW、100~300MW 和 $>300\text{MW}$)下燃煤电厂 SO_2 、 NO_x 、烟尘的排放标准限值,并提出垃圾焚烧行业汞及其他痕量元素的排放标准限值。2017 年 7 月 31 日,欧盟在发布的《经济上可行的最佳可用技术(BAT)结论文件》(2017/1442)中,首次提出燃煤电厂的 Hg 排放标准限值(表 3)。

表 3 2017/1442 中煤电 Hg 排放标准限值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)^[16]

Table 3 Hg emission standards in EU coal power plant directive 2017/1442 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

煤电机组类型	新建机组		现役机组	
	其他煤	褐煤	其他煤	褐煤
<300MW	<1~3	<1~5	<1~9	<1~10
$\geq 300\text{MW}$	<1~2	<1~4	<1~4	<1~7

注:生物质及煤泥燃烧不区分机组类型,Hg 排放标准限值均 $<1\sim 5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

可见,与常规大气污染物不同,欧盟燃煤电厂大气 Hg 排放标准限值按照燃烧装置规模分为 2 档,即 $<300\text{MW}$ 和 $\geq 300\text{MW}$ 。总的来看,新建机组标准严于现役机组,烟煤和无烟煤机组严于褐煤机组,并且装

置规模越大,排放标准越严格,其针对现役褐煤机组的最宽松标准限值为 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。此外,对以生物质和煤泥为燃料的电厂来说不区分机组类型,统一执行 $<1\sim 5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 Hg 排放标准限值。

2.2 加拿大相关排放标准限值

1998 年以来,加拿大环境部长理事会(CCME)发布的加拿大范围内标准(CWS)先后规定了金属冶炼厂及垃圾焚烧厂的大气汞排放标准限值,以实现保护环境及人类健康的目标。2003 年,CCME 报告指出燃煤电厂汞排放量为 2695kg,成为加拿大现存最大的人为汞排放源。因此,CCME 同意针对电力部门设置汞排放标准限值,以减少现役燃煤电厂的大气汞排放,并确保新建燃煤电厂在现有技术基础上达到经济可行的排放水平。标准于 2006 年 10 月发布,限值如表 4 所示。

表 4 加拿大燃煤电厂汞排放标准限值^[19]

Table 4 Hg emission standard of coal-fired power plant in Canada

国家	机组类型	煤种	去除效率(%)	排放限值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
加拿大	新建	烟煤/混合煤	85	2.32
	新建	亚烟煤	75	6.18
	新建	褐煤	75	11.60

注:原排放标准限值为 kg/TWh ,以 $1\text{kg}/\text{TWh} = 0.77\mu\text{g}/\text{m}^3$ 转换^[20]。

2.3 日本相关排放标准限值

表 5 日本燃煤电厂大气汞排放限值($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Table 5 Atmospheric Hg emission standard of coal-fired power plant in Japan ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

机组规模	机组类型	排放限值
大型	新建	8
大型	现役	10
小型	新建	10
小型	现役	15

为治理日益严峻的环境污染问题,1968 年,日本制定了《大气污染防治法》^[21],依法推进大气污染治理工作。《大气污染防治法》将人为污染源分为固定燃烧源(含燃煤电厂及工业排放等)和移动源(含机动车、飞机和轮船等)。2013 年 10 月,日本批准《关于汞的水俣条约》,并于 2015 年 6 月对《大气污染防治法》进行了修订,规定汞的排放标准限值。2016

年 9 月公布汞排放的测定方法.日本现行燃煤电厂 Hg 排放标准限值于 2018 年 4 月 1 日起执行^[18],如表 5 所示.

3 国内外燃煤电厂痕量元素排放标准比对分析

3.1 控制对象

美国 MATS 标准适用于额定功率大于 25MW 的新建及现役发电机组,涵盖非低阶煤(热值 $>19305\text{kJ/kg}$)、低阶煤(热值 $\leq 19305\text{kJ/kg}$)、煤气化、美国大陆液态石油、非美国大陆液态石油及液态石油衍生物 6 种不同燃料类型.此外,限定的痕量元素包括汞(Hg)、锑(Sb)、砷(As)、铍(Be)、镉(Cd)、铬(Cr)、钴(Co)、铅(Pb)、锰(Mn)、镍(Ni)及硒(Se)11 种.

欧盟燃煤电厂相关指令文件的实施对象为额定功率超过 50MW 的机组,涵盖的燃料类型为褐煤和其他煤.2017 年 7 月 31 日,欧盟发布的《经济上可行的最佳可用技术(BAT)结论文件》(2017/1442)中将燃烧装置规模进一步分为 $<300\text{MW}$ 和 $\geq 300\text{MW}$,以更好地限定大气 Hg 的排放.

加拿大 CWS 标准限定了新建煤电机组的大气 Hg 排放,涉及的燃料类型包括:烟煤/混合煤、亚烟煤和褐煤.对于日本来说,其最新发布的燃煤电厂大气 Hg 排放标准限值,适用于大型燃烧设备(换算为重油时,燃烧能力 >50 万 L/h)及小型燃烧设备(换算为重油时,燃烧能力 ≤ 10 万 L/h)的新建和现役机组.

与美国、欧盟、加拿大等发达国家相比,我国现行《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)^[22]中仅限定了 Hg 的排放,限定痕量元素物种较为单一,且未从燃煤煤质、新建机组或现役机组、以及机组规模大小等角度进行进一步细化和区分.

3.2 标准限值

由于仅有美国 MATS 标准限定了煤电除 Hg 外其他痕量元素的大气排放限值,故在此以 Hg 为例进行标准限值比对.我国煤电大气 Hg 排放统一执行 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准限值,与美国、欧盟、加拿大和日本等发达国家相比处于较高水平.相比于发达国家相对最为宽松的标准限值,如美国 MATS 标准以低阶煤为燃料机组约为 $5.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 Hg 排放限值、欧盟 2017/1442 针对现役褐煤机组 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 Hg 排放限值、加拿大 CWS 标准关于新建褐煤机组约

$11.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 Hg 排放限值、日本《大气污染防治法》^[21]对小型现役机组 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的 Hg 排放限值,我国现行的 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准限值分别为其约 5.9 倍、3.0 倍、2.7 倍及 2.0 倍.

我国政府已批准自 2017 年 8 月 16 日起《关于汞的水俣条约》^[6]对我国正式生效,在燃煤电厂通过实施超低排放升级与改造计划实现常规污染物标准限值居于世界前列的形势下,为促进燃煤电厂汞排放削减和履约,有必要在识别我国煤电排放现状的基础上对中国现行的烟气汞排放标准进行修订加严.

4 中国煤电大气痕量元素排放现状评估

4.1 中国煤电痕量元素控制技术现状

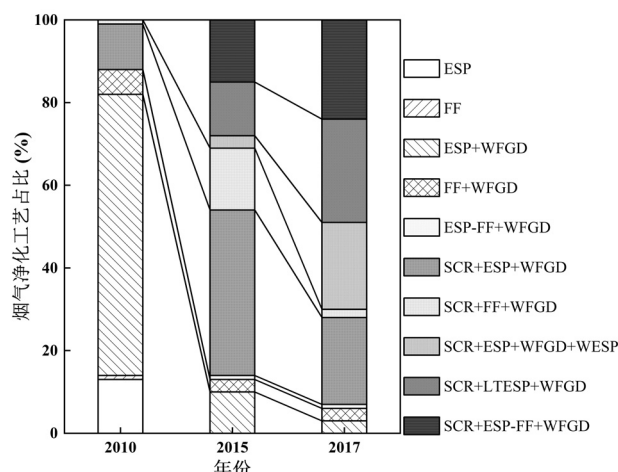


图 3 中国燃煤电厂烟气净化技术应用发展情况

Fig.3 Development of air pollution prevention and control technology for coal-fired power plants in China

电除尘器(ESP);袋式除尘器(FF);湿法脱硫(WFGD);电袋复合除尘器(ESP-FF);选择性催化还原法脱硝(SCR);湿式电除尘(WESP);低低温电除尘(LTESP),下同.

随着中国经济科技水平的快速发展及 2014 年后超低排放国家专项行动的推进,中国燃煤电厂大气污染防治技术发展迅速,目前已处于国际领先水平^[4].如图 3 所示,“十二五”以来,中国燃煤电厂污染防治技术发生了根本性的变化,主流的烟气净化工艺已由 2010 年的电除尘(ESP)+湿法脱硫(WFGD)发展为 2015 年的选择性催化还原(SCR)+电除尘(ESP)+湿法脱硫(WFGD),再到 2017 年超低排放改造后的选择性催化还原(SCR)+低-低温电除尘(LTESP)/电袋复合除尘(ESP-FF)+湿法脱硫(WFGD)

及选择性催化还原(SCR)+电除尘(ESP)+湿法脱硫(WFGD)+湿式电除尘(WESP)等^[23]。

如图 4 所示,随着污染防治技术的变化,污染控制措施对燃煤电厂大气 Hg 排放的协同脱除效率增效显著.平均协同脱除效率由电除尘(ESP)/电袋复合除尘(ESP-FF)+湿法脱硫(WFGD)的 69.21%(27.48%~95.80%),增长为选择性催化还原(SCR)/选择性非催化还原(SNCR)+电除尘(ESP)/布袋除尘(FF)/电袋复合除尘(ESP-FF)+湿法脱硫(WFGD)的 83.35%(36.46%~99.80%),再提高到超低排放烟气净化工艺技术水平下的 87.04%(76.40%~95.80%)。

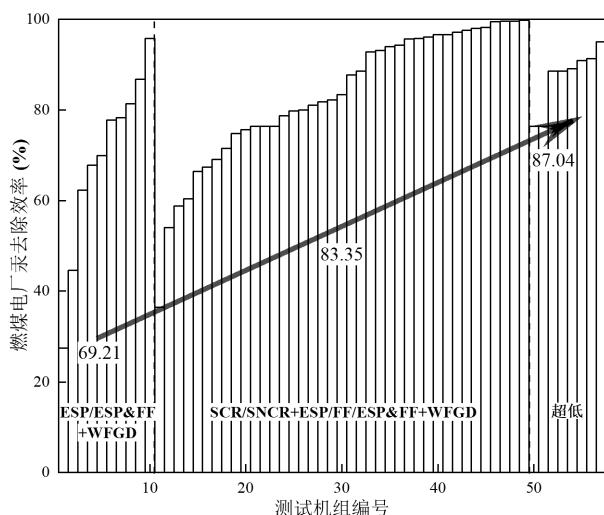


图 4 中国燃煤电厂 Hg 协同脱除效率变化^[24-45]

Fig.4 Change of mercury collaborative removal efficiency in coal-fired power plants in China

测试机组对应的工艺技术分别为:1.ESP-FF+WFGD(机组 1~5); 2.ESP+WFGD(机组 6~10); 3.SCR+ESP-FF+WFGD(机组 11~12,17,20,29,38,43); 4.SCR+ESP+WFGD(机组 13~16,18~19,21~28,30~37,39~42,44~49); 5.SCR+ESP+WFGD+WESP(机组 50); 6.SCR+LTESP+WFGD(机组 51); 7.SCR+LTESP+WFGD+WESP(机组 52~57)

4.2 中国煤电痕量元素排放水平现状

图 5 汇总了 2010 年之后公开发表的 65 个中国燃煤电厂机组烟气汞排放测试结果.这些机组涵盖了不同的燃煤类型(烟煤、无烟煤、褐煤和混合煤)及不同的燃烧器类型(煤粉炉和循环流化床炉).总的来看,中国燃煤电厂的平均 Hg 排放浓度为 $2.41\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($0.1\sim 11.3\mu\text{g}/\text{m}^3$).所有测试结果均远低于我国现行的 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准限值.其中,98%的测试电厂 Hg 排放浓度低于 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$,88%的测试电厂 Hg 排放浓度低于 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$,71%的测试电厂 Hg 排放浓度低于

$3\mu\text{g}/\text{m}^3$,40%的测试电厂 Hg 排放浓度低于 $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

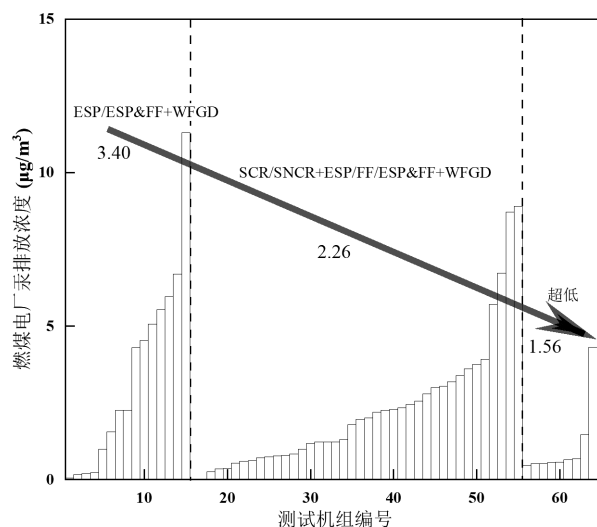


图 5 中国燃煤电厂烟气 Hg 排放浓度^[24-48]

Fig.5 Mercury emission concentrations from coal-fired power plants in China

测试机组对应的工艺技术分别为:1.ESP-FF+WFGD(机组 1~5); 2.ESP+WFGD(机组 6~15); 3.SCR+ESP-FF+WFGD(机组 16~17,22,25,34,43,48,55); 4.SCR+ESP+WFGD(机组 18~21,23~24,26~33,35~42,44~47,49~54); 5.SCR+ESP+WFGD+WESP(机组 56); 6.SCR+LTESP+WFGD(机组 57); 7.SCR+LTESP+WFGD+WESP(机组 58~65)

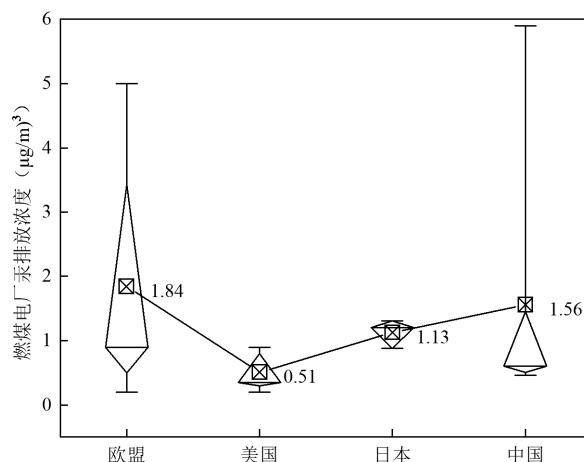


图 6 国内外燃煤电厂烟气 Hg 排放现状^[33-35,37,42-43,46]

Fig.6 Mercury emission concentrations from coal-fired power plants at domestic and foreign

燃煤电厂每年消耗煤炭约为我国煤炭消费总量的一半左右,是中国大气汞排放的重要来源^[41-42].随着除尘、脱硫、脱硝等烟气净化工艺技术的进步和联合应用,中国燃煤电厂的平均汞排放浓度由 ESP/ESP-FF+WFGD 工艺组合下的 $3.40\mu\text{g}/\text{m}^3$ 削减为 SCR/SNCR+ESP/FF/ESP-FF+WFGD 工艺组合下

的 $2.26\mu\text{g}/\text{m}^3$,再到当前超低排放工艺水平下的 $1.56\mu\text{g}/\text{m}^3$.

图 6 汇总了 2014 年后国内外燃煤电厂汞排放测试结果.可见,我国超低排放工艺水平下的汞排放浓度高于美国的 $0.51\mu\text{g}/\text{m}^3$,略高于日本的 $1.13\mu\text{g}/\text{m}^3$,低于欧盟的 $1.84\mu\text{g}/\text{m}^3$.可见我国燃煤电厂超低排放改造的实施,显著降低了汞的排放浓度水平.现行超低排放工艺技术组合下,我国燃煤电厂的平均 Hg 排放浓度满足除美国非低阶煤外的其他美国、欧盟、加拿大等国家的排放标准限值.可见,中国燃煤电厂现行的大气 Hg 排放标准限值,已无法起到大气汞排放的实际限制作用,亟需进行修订加严.

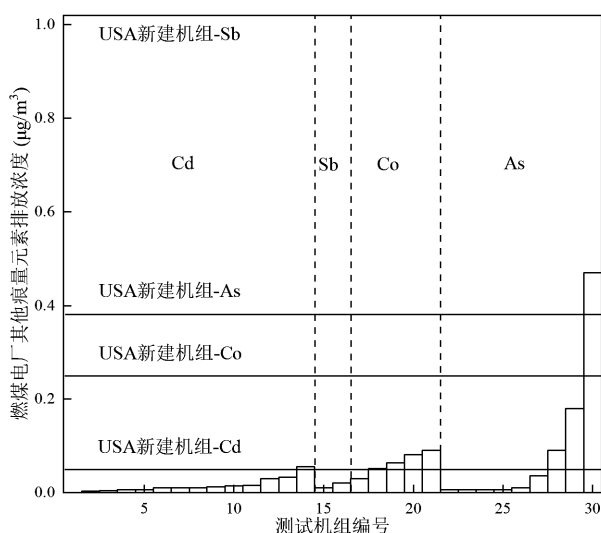


图 7 中国燃煤电厂 Cd、Sb、Co 及 As 排放浓度^[35,48-54]

Fig.7 Emission concentrations of Cd, Sb, Co, and As from coal-fired power plants in China

测试机组对应的工艺技术分别为:1.SCR+ESP+FF+WFGD(机组 4,7,10, 12~14,18~25);2.SCR+ESP+WFGD(机组 2~3,5~6,9,11,16,28,30); 3.SCR+ESP+WFGD+WESP(机组 1,8,15,17,26,27,29)

相比于 Hg,有关中国燃煤电厂其他痕量元素的烟气排放测试结果较为有限,图 7 和图 8 分别汇总分析了 2014 年超低排放改造后公开发表的 24 个燃煤电厂机组除汞外其他痕量元素的排放测试结果,用以反映当前中国超低排放改造后燃煤电厂的排放水平,并与美国 MATS 关于燃煤电厂痕量元素排放最严格的低阶煤标准限值进行比对.可见,燃煤电厂末端烟气中的镉(Cd)、锑(Sb)、钴(Co)、砷(As)、硒(Se)、铬(Cr)、镍(Ni)、铅(Pb)及锰(Mn)9 种痕量元素的平均排放浓度分别约为 0.02, 0.02, 0.06, 0.09,

0.69, 0.76, 0.77, 0.81 及 $1.68\mu\text{g}/\text{m}^3$.其中,100%测试机组排放的 Sb、Co、Se 和 Ni 浓度满足美国 MATS 对新建燃煤机组的相关排放标准限值.此外,94%、93%、89%及 67%的测试机组分别满足 MATS 关于新建机组 Pb、Cd、As 及 Cr 的排放标准限值.燃煤机组测得的平均 Mn 排放浓度 $1.68\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($1.33\sim 2.02\mu\text{g}/\text{m}^3$),超过 MATS 关于新建机组 $0.51\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准限值,但是满足其关于现役机组 $6.35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准限值.可见,为进一步促进先进燃煤发电与烟气净化技术的应用,保护生态环境和公众健康,我国煤电在实现常规污染物超低排放的同时,制定除 Hg 外其他痕量元素的排放标准限值也具有较大的现实可行性和必要性.

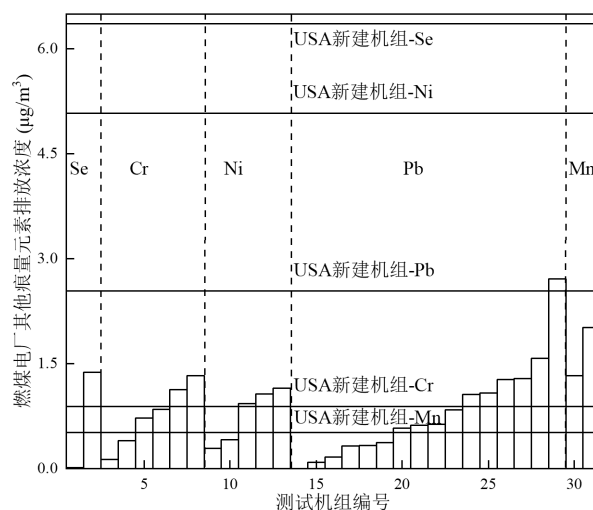


图 8 中国燃煤电厂 Se、Cr、Ni、Pb 及 Mn 排放浓度^[35,47,49-54]

Fig.8 Emission concentrations of Se, Cr, Ni, Pb, and Mn from coal-fired power plants in China

测试机组对应的工艺技术分别为:1.SCR+ESP+FF+WFGD(机组 3~4,6~7, 10,12~15,19,22,25);2.SCR+ESP+WFGD(机组 2,5,17~18,20~21,26~28, 31);3.SCR+ESP+WFGD+WESP(机组 1,8~9,11,16,29~30)

4.3 中国超低煤电痕量元素迁移转换规律

图 9 梳理了 2014 年后公开发表的涵盖 3 种典型超低排放技术路线(图 3)下 Hg 节点化排放测试结果,以更好的识别其不同工艺节点间的迁移转化规律.可见,3 种典型超低排放技术路线下,烟气 Hg 浓度随烟气的流向稳步下降.烟气经过除尘工艺时,由于除尘设施对 Hg^{p} 的有效脱除,烟气 Hg 浓度显著降低,降幅介于 34%~50%.烟气经过脱硫工艺时,得益于脱硫浆液冲刷作用对 Hg^{2+} 的脱除,烟气 Hg 浓度进一步降低.对于以湿式电除尘器为核心的技术路线,

由于 WESP 电晕放电产生高能电子,电离高湿度烟气组分形成 OH 自由基等活性物质,能够促进气相 Hg^0 的氧化和气相 Hg^{2+} 的脱除,烟气在经过 WESP 时,总 Hg 浓度进一步下降,WESP 对烟气总 Hg 的脱除效率约为 20%.

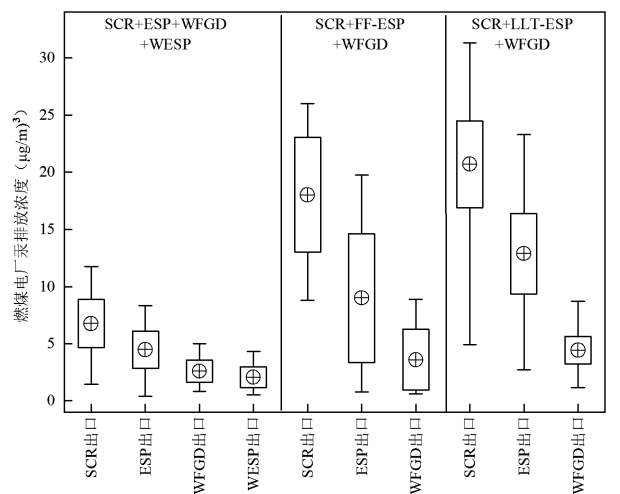


图9 超低排放技术路线下 Hg 迁移转化规律^[31,34-36,38-39,43,46,55]
Fig.9 Migration and transformation characteristics of Hg under ultra-low technology route

表6 SCR+ESP+WFGD+WESP 技术路线下其他痕量元素迁移转化规律^[50,55-56]

Table 6 Migration and transformation characteristics of other trace elements under SCR+ESP+WFGD+WESP technology route

污染物	工艺节点污染物排放浓度(μg/m ³)			
	SCR 出口	ESP 出口	WFGD 出口	WESP 出口
As	223.88	2.02	0.56	0.08
Cd	4.18	0.04	0.01	0.01
Co	595.97	0.29	0.1	0.03
Cr	1202.44	1.58	1.54	1.33
Cu	1103.84	0.58	0.35	0.21
Mn	17421.6	8.88	4.37	1.33
Ni	1014.77	0.88	0.21	0.29
Pb	1636.3	8.05	3.20	1.43
Sb	223.16	0.14	0.04	0.01
Zn	4261.57	2.33	0.73	0.82

以湿式电除尘器为核心的技术路线下其他痕量元素的迁移转化规律如表 6 所示.受烟气中元素易富集于颗粒物表面特性的影响,在烟气经过除尘工艺时,随着颗粒物的高效去除,痕量元素的浓度显著降低,降幅均高于 99%.烟气经过 WFGD 时,随着颗粒物被脱硫浆液冲刷脱除,元素的浓度进一步下降.

受元素特性的影响,不同元素在 WFGD 环节的去除效率介于 3%~84%之间,差异较为显著.烟气经过 WESP 时,除 Ni 和 Zn 轻微上升外,大多数元素的浓度进一步降低.该现象出现的原因可能是样品采集过程中的不当操纵所致.

5 结论与建议

5.1 与美国、欧盟、加拿大等发达国家相比,我国燃煤电厂的痕量元素排放标准限值较为宽松,且限定物种较为单一(仅规定了烟气汞及其化合物排放限值).此外,未从燃煤煤质、新建机组或现役机组、以及机组规模大小等角度进行进一步细化和区分.

5.2 基于现有的部分锅炉烟气测试结果,超低排放工艺组合下,我国燃煤电厂平均 Hg 排放浓度约为 $1.56\mu\text{g}/\text{m}^3$,远低于我国 $30\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的标准限值.其中,98%的测试电厂 Hg 排放浓度低于 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$,71%的测试电厂 Hg 排放浓度低于 $3\mu\text{g}/\text{m}^3$,现行标准限值已无法起到大气 Hg 排放的实际限制作用,亟需进行修订并加严到 $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 甚至 $3\mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,考虑对燃用不同煤质的新老机组要兼顾公平性和技术可达性,建议可针对新建机组和现役机组及不同燃煤煤质制定差异化的标准限值,比如对贵州等西南地区燃用汞含量高的无烟煤机组执行标准限值略宽于燃用普通烟煤和褐煤的机组,且审慎发展汞、砷等重金属含量高的新建燃煤机组.

5.3 基于现有的有限燃煤电厂测试结果,除个别机组外,目前我国燃煤电厂除汞外其他 9 种痕量元素(Cd、Sb、Co、As、Se、Cr、Ni、Pb 及 Mn)的排放浓度,均满足美国现行的 MATS 的相关标准限值.近年来,燃煤导致的砷、铅、镉等痕量元素大气排放及健康影响已引起国家社会高度关注.为保护生态环境和公众健康,在当前我国燃煤电厂已基本完成超低排放改造的背景下,建议进一步加强燃煤电厂痕量元素排放水平的调查研究,并借鉴美国、欧盟等发达国家的标准限值,制定我国燃煤电厂除 Hg 外其他有害痕量元素的排放标准限值,也具有现实的可行性和必要性.

5.4 综上,通过将二氧化硫和氮氧化物排放纳入国民经济发展计划的约束性指标,加之 2014 年以来全国范围内的燃煤电厂超低排放升级与改造计划实施,我国已建成世界最大的清洁煤电体系,为我国大

气环境质量改善做出了贡献.为进一步保护生态环境和公众健康,促进国际履约能力建设,在已实现烟尘、二氧化硫和氮氧化物三项常规大气污染物超低排放的基础上,系统评估燃煤电厂大气汞及其他痕量元素的排放现状,适时推动燃煤电厂大气汞排放标准限值的修订及除汞外其他痕量元素的标准限值制定,具有较大的可行性及现实意义.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中华人民共和国 2017 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202002/t20200228_1728913.html.
National Bureau of Statistics. Statistical report of China on the 2017 National Economic and Social Development [EB/OL]. http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202002/t20200228_1728913.html.
- [2] 国务院办公厅.国务院办公厅关于印发能源发展战略行动计划(2014-2020 年)的通知 [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm.
Office of the State Council in China. Energy Development Strategy Action Plan (2014-2020) published by the State Council [EB/OL]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2014-11/19/content_9222.htm.
- [3] 国家能源局.我国已建成全球最大清洁煤电供应体系的通知 [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2019-02/12/c_137815509.htm.
National Energy Administration. Notice of China has built the largest clean coal power supply system in the world [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2019-02/12/c_137815509.htm.
- [4] 酈建国,朱法华,孙雪丽.中国火电大气污染防治现状及挑战 [J]. 中国电力, 2018,51(6):2-10.
Wu J G, Zhu F H, Sun X L. Current situation and challenge of air pollution control of thermal power plants in China [J]. Electric Power, 2018,51(6):2-10.
- [5] 卢锦程,段钰锋,赵士林,等.600MW 燃煤电厂痕量元素排放特性实验研究 [J]. 中国环境科学, 2018,38(12):4444-4450.
Lu J C, Duan Y F, Zhao S L, et al. Experimental study on emission characteristics of trace elements in 600MW coal fired power plant [J]. China Environmental Science, 2018,38(12):4444-4450.
- [6] United Nations Environment Programme (UNEP). Minamata convention on mercury [M]. Japan: UNEP, 2013.
- [7] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Clean Air Act [S]. Washington DC, United States: US EPA, 1963.
- [8] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Mercury and air toxics standards-history of the MATS regulation [EB/OL]. <https://www.epa.gov/mats/history-mats-regulation>.
- [9] 郑伟,刘伟,王宁,等.美国燃煤电厂大气汞排放控制法规探析 [J]. 环境保护科学, 2019,45(1):1-4.
Zheng W, Liu W, Wang N, et al. Exploration on atmospheric mercury emission control regulations for coal-fired power plants of the United States [J]. Environmental Protection Science, 2019,45(1):1-4.
- [10] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Clean Air Act Amendments [S]. Washington DC, United States: US EPA, 1990.
- [11] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Clean Air Mercury Rule [S]. Washington DC, United States: US EPA, 2005.
- [12] National emission standards for hazardous air pollutants from coal and oil-fired electric utility steam generating units and standards of performance for fossil-fuel-fired electric utility, industrial commercial institutional, and small industrial commercial institutional steam generating units [S]. Washington DC, United States: US EPA, 2016.
- [13] Natural Resources Defense Council (NRDC). Summary of Recent Mercury Emission Limits for Power Plants in the United States and China [EB/OL]. <https://www.nrdc.org/resources/summary-recent-mercury-emission-limits-power-plants-united-states-and-china>.
- [14] 陈敏敏,王军霞,张守斌,等.中国燃煤电厂汞达标排放分析 [J]. 环境污染与防治, 2016,38(2):106-110.
Chen M M, Wang J X, Zhang S B, et al. Analysis of mercury compliance emission for coal-fired power plants in China [J]. Environmental Pollution & Control, 2018,38(2):106-110.
- [15] Directive 2010/75/EU of the European parliament and of the council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) [S]. Brussels, Belgium: EU, 2010.
- [16] Commission implementing decision (EU) 2017/1442 of 31 July 2017 establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants [S]. Brussels, Belgium: EU, 2017.
- [17] Directive 88/609/EEC on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants [S]. Brussels, Belgium: EU, 1988.
- [18] Directive 2001/80/EC of the European parliament and of the council of 23 October 2001 on the limitation of emissions of certain pollutants into the air from large combustion plants [S]. Brussels, Belgium: EU, 2001.
- [19] The Canada-wide standards for mercury emissions from coal-fired electric power generation plants [S]. Ottawa, Canada: Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME), 2006.
- [20] Wu Q R, Wang S X, Liu K Y, et al. Emission-limit-oriented strategy to control atmospheric mercury emissions in coal-fired power plants toward the implementation of the Minamata convention [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(19):11087-11093.
- [21] Air pollution control law [S]. Tokyo, Japan: Ministry of the Environment of Japan (MOE), 2018.
- [22] GB13223-2011 火电厂大气污染物排放标准 [S].
GB13223-2011 The emission standard of air pollutants for thermal power plants [S].
- [23] 吴清茹,赵子鹰,杨帆,等.中国燃煤电厂履行《关于汞的水俣公约》的差距与展望 [J]. 中国人口·资源与环境, 2019,29(10):52-60.
Wu Q R, Zhan Z Y, Yang F, et al. Gaps and prospects for the implementation of Minamata Convention on Mercury by China's coal-fired power plants [J]. China Population, Resources and Environment, 2019,29(10):52-60.
- [24] Wang J, Wang W H, Xu W, et al. Mercury removals by existing pollutants control devices of four coal-fired power plants in China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2011,23(11):1839-1844.
- [25] 李文俊.燃煤电厂和水泥厂大气汞排放特征研究 [D]. 重庆:西南大学, 2011.
Li W J. Characterization of atmospheric mercury emissions from coal-fired power plant and cement plant [D]. Chongqing: Southwest University, 2011.
- [26] 蔡同锋,时志强,刘宁凯,等.江苏省 300MW 以上燃煤电厂汞排放现状分析 [J]. 环境科技, 2014,27(5):5-11.
Cai T F, Shi Z Q, Liu N K, et al. Study on mercury emission from coal-fired power plant more than 300MW in Jiangsu province [J]. Environmental Science and Technology, 2014,27(5):5-11.
- [27] 尹得仕,酈建国,袁建国,等.国内典型燃煤电厂大气汞排放特性分析 [J]. 电站系统工程, 2014,30(5):50-55.
Yin D S, Wu J G, Yuan J G, et al. Analysis of mercury emission for typical domestic coal-fired power plants [J]. Power System Engineering, 2014,30(5):50-55.
- [28] Tang S L, Wang L N, Feng X B, et al. Actual mercury speciation and

- mercury discharges from coal-fired power plants in Inner Mongolia, Northern China [J]. *Fuel*, 2016,180:194-204.
- [29] Wang S M, Zhang Y S, Gu Y Z, et al. Using modified fly ash for mercury emissions control for coal-fired power plant applications in China [J]. *Fuel*, 2016,181:1230-1237.
- [30] 史晓宏,张 翼,赵 瑞,等.燃煤电厂烟气汞减排技术研究与实践 [J]. *中国电力*, 2016,49(8):135-139.
- Shi X H, Zhang Y, Zhao R, et al. Research and practice of mercury emission reduction technology in coal-fired power plants [J]. *Electric Power*, 2016,49(8):135-139.
- [31] 杨丽莎.燃煤电厂汞排放现场测试及排放量估算 [D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- Yang L S. Field test and estimation of mercury emission from the coal-fired power plant [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [32] Sung J H, Back S, Jung B, et al. Speciation and capture performance of mercury by a hybrid filter in a coal-fired power plant [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017,170:35-40.
- [33] Tang H J, Duan Y F, Zhu C, et al. Characteristics of a biomass-based sorbent trap and its application to coal-fired flue gas mercury emission monitoring [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2017,170:19-27.
- [34] Zhang Y, Yang J P, Yu X H, et al. Migration and emission characteristics of Hg in coal-fired power plant of China with ultra-low emission air pollution control devices [J]. *Fuel Processing Technology*, 2017,158:272-280.
- [35] Zhao S L, Duan Y F, Chen L, et al. Study on emission of hazardous trace elements in a 350MW coal-fired power plant. Part 1. Mercury [J]. *Environmental Pollution*, 2017,229:863-870.
- [36] 刘发圣,夏永俊,徐 锐,等.燃煤电厂污染控制设备脱汞效果及汞排放特性试验 [J]. *中国电力*, 2017,50(4):162-166.
- Liu F S, Xia Y J, Xu R, et al. Experimental study on mercury removal effect and mercury emission characteristics of pollution control equipment in coal-fired power plants [J]. *Electric Power*, 2017,50(4):162-166.
- [37] 宋 畅,张 翼,郝 剑,等.燃煤电厂超低排放改造前后汞污染排放特征 [J]. *环境科学研究*, 2017,30(5):672-677.
- Song C, Zhang Y, Hao J, et al. Mercury emission characteristics from coal-fired power plant before and after ultra-low emission retrofitting [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017,30(5):672-677.
- [38] Cui J, Duan L B, Jiang Y, et al. Migration and emission of mercury from circulating fluidized bed boilers co-firing petroleum coke and coal [J]. *Fuel*, 2018,215:638-646.
- [39] Li C F, Duan Y F, Tang H J, et al. Study on the Hg emission and migration characteristics in coal-fired power plant of China with an ammonia desulfurization process [J]. *Fuel*, 2018,211:621-628.
- [40] Li C F, Duan Y F, Tang H J, et al. Mercury emissions monitoring in a coal-fired power plant by using the EPA method 30B based on a calcium-based sorbent trap [J]. *Fuel*, 2018,221:171-178.
- [41] 郅光皓.山东省燃煤电厂大气汞的排放与分析 [D]. 济南:山东大学, 2018.
- Qie G H. Emission and analysis of atmospheric mercury in coal-fired power plants in Shandong province [D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [42] 王树民,余学海,顾永正,等.基于燃煤电厂“近零排放”的大气污染物排放限值探讨 [J]. *环境科学研究*, 2018,31(6):975-984.
- Wang S M, Yu X H, Gu Y Z, et al. Discussion of emission limits of air pollutants for "near-zero emission" coal-fired power plants [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018,31(6):975-984.
- [43] 焦 峰.超低排放燃煤电厂烟气重金属污染物排放特征浅析 [J]. *低碳世界*, 2019,9(1):11-13.
- Jiao F. Analysis on emission characteristics of heavy metal Pollutants from flue gas of ultra-low emission coal-fired power plants [J]. *Low Carbon World*, 2019,9(1):11-13.
- [44] Zhu C Y, Tian H Z, Cheng K, et al. Potentials of whole process control of heavy metals emissions from coal-fired power plants in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016,114:343-351.
- [45] Liu K Y, Wang S X, Wu Q R, et al. A highly resolved mercury emission inventory of Chinese coal-fired power plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018,52(4):2400-2408.
- [46] 郑剑铭.燃煤电站汞排放环境影响与 TAC 对烟气零价汞的吸附机理研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2013.
- Zheng J M. Environmental effects of mercury emission from coal-fired power plant and mechanic study on mercury captured by TAC [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [47] 万 勤,李金芬,陈 平,等.石河子市燃煤电厂重金属去向及平衡分析 [J]. *干旱环境监测*, 2015,29(3):110-118.
- Wan Q, Li J F, Chen P, et al. Destination and balanced analysis of heavy metals in coal-fired power plants in Shihezi city [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2015,29(3):110-118.
- [48] 柴小康,黄国和,解玉磊,等.某燃煤超低排放机组非规污染物脱除 [J]. *环境工程学报*, 2020,14(12):3480-3494.
- Chai X K, Huang G H, Xie Y L, et al. Unconventional pollutant removal of a coal-fired ultra-low emission unit [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020,14(12):3480-3494.
- [49] Zhao S L, Duan Y F, Li Y N, et al. Emission characteristic and transformation mechanism of hazardous trace elements in a coal-fired power plant [J]. *Fuel*, 2018,214:597-606.
- [50] Chang L, Yang J P, Zhao Y C, et al. Behavior and fate of As, Se, and Cd in an ultra-low emission coal-fired power plant [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,209:722-730.
- [51] Li X Y, Bi X Y, Li Z G, et al. Atmospheric lead emissions from coal-fired power plants with different boilers and APCDs in Guizhou, Southwest China [J]. *Energy & Fuels*, 2019,33(11):10561-10569.
- [52] 华 伟,孙和泰,祁建民,等.燃煤电厂超低排放机组重金属铅、砷排放特性 [J]. *热力发电*, 2019,48(10):65-70.
- Hua W, Sun H T, Qi J M, et al. Emission characteristics of Pb and As from an ultra-low emission coal-fired power plant [J]. *Thermal Power Generation*, 2019,48(10):65-70.
- [53] Wang J W, Zhang Y S, Wang T, et al. Effect of modified fly ash injection on As, Se, and Pb emissions in coal-fired power plant [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020,380:122561.
- [54] Zhou X, Bi X Y, Li X Y, et al. Fate of cadmium in coal-fired power plants in Guizhou, Southwest China: With emphasis on updated atmospheric emissions [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2020, 11(5):920-927.
- [55] 崔 健.煤与石油焦混燃的循环流化床锅炉重金属、SO_x和 Cl 排放特性 [D]. 南京:东南大学, 2018.
- Cui J. Emission characteristics of heavy metal, SO_x and Cl from circulating fluidized bed boilers [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [56] Zhao S L, Duan Y F, Tan H Z, et al. Migration and emission characteristics of trace elements in a 660MW coal-fired power plant of China [J]. *Energy & Fuels*, 2016,30:5937-5944.

作者简介: 王树民(1962-),男,山东东平人,教授级高级工程师,博士,主要从事电力生产技术管理、燃煤电站污染物控制技术应用研究.发表论文 11 篇.