基于在线监测的2015年中国火电排放清单

崔建升[1],屈加豹[1,2],伯 鑫[2*],常象宇[3],封 雪[4],莫 华[2],李时蓓[2],赵 瑜[5],朱法华[6],任阵海[7] (1.河北科技大学环境科学与工程学院,河北 石家庄 050000；2.环境保护部环境工程评估中心,北京 100012；3.西安交通大学管理学院,陕西 西安 710049；4.中国环境监测总站,北京 100012；5.南京大学环境学院,江苏 南京 210023；6.国电环境保护研究院,江苏 南京 210031；7.中国环境科学研究院,北京 100012)

摘要：伴随着超低排放技术在中国火电行业的广泛应用,中国火电行业排放水平已发生了显著变化.故现有火电排放清单排放因子和排放量等无法反映当前火电污染物排放提标情况.基于全国火电在线监测(CEMS)、环境统计和排污许可等数据,提出一种自下而上逐企业建立中国火电行业排放清单的方法.与传统方法相比较,该方法的特点是更加全面的考虑了火电行业超低技术,实际排放浓度与活动水平等综合因素.作为实例,本文基于所提出的火电行业排放清单的方法计算了新的2015年中国火电行业排放清单(HPEC).结果表明2015年全国火电厂SO_2、NO_x和烟尘平均排放浓度范围分别为7.88~208.57、40.33~238.2和5.86~53.93mg/m^3.北京、上海火电排放基本达到《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014~2020年)》制定的超低改造目标;绝大部分的省份SO_2、NO_x在线监测均值小于排污许可执行标准均值.中国燃煤机组的SO_2、NO_x、烟尘排放因子平均值分别为0.67、0.76、0.16g/kg(以入炉煤计).全国火电CO、VOCs、NO_x、SO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$总排放量分别为403.87、10.73、122.94、146.68、28.72和22.80万t/a,平均排放绩效值分别为1.06、0.03、0.32、0.39、0.08、0.06g/(kW·h).

关键词：排放清单；火电；超低排放；排污许可；在线监测

中图分类号：X51 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2018)06-2062-13

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0226

High resolution power emission inventory for China based on CEMS in 2015. CUI Jian-sheng[1], QU Jia-bao[1,2], BO Xin[1,2*], CHANG Xiang-yu[3], FENG Xue[4], MO Hua[2], LI Shi-bei[2], ZHAO Yu[5], ZHU Fa-hua[6], REN Zhen-hai[7] (1.School of Science and Technology of Environmental, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050000, China；2.The Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100012, China；3.School of Management, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China；4.China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China；5.School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China；6.State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing 210031, China；7.Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2018,38(6)：2062~2074

Abstract：Ultra-low-emission technology has been extensively applicated in China's thermal power industry. Accompanyed with it, the emission level of China's thermal power industry has undergone significant changes. Therefore, inventory emission factors and emissions in China's thermal power industry is unable to reflect the current situation of thermal power pollutant emissions. In this paper, a bottom-up method was proposed to establish China's thermal power industry emissions, which was based on the data of continuous emission monitoring systems (CEMS) for thermal power, environmental statistics and the data of pollutant emission permits. Compared with traditional way, the proposed new method was characterized by a more comprehensive consideration of the ultra-low-tech thermal power industry, the actual concentration of emissions and activity levels and other comprehensive factors. It is a concrete example. And accroding to the proposed the bottom-up method, this paper calculated high resolution power emission inventory for China based on CEMS in 2015 (HPEC). The results showed that in 2015, the average emission concentration values of SO_2, NO_x and particulate matter in different provinces are 7.88~208.57, 40.33~238.20 and 5.86~53.93mg/m^3, respectively. Beijing and Shanghai had reached ultra-low emission requirements as a whole. In most provinces, the average concentrations values

收稿日期：2017-11-06

基金项目：清华大学环境学院重点学术机构2015年度开放基金课题;国家环保公益性行业科研专项(201509010)

* 责任作者, 高工, boxinet@gmail.com

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

of SO_2 and NO_x online monitoring less than the average implementation of emission permits standards. The average emission factors of SO_2, NO_x and particulate matter (PM) for China's thermal power plants were 0.667, 0.764, 0.162g/kg of coal for coal-fired power plants, respectively. The emission performance values of CO, VOCs, SO_2, NO_x, PM_{10}, $PM_{2.5}$ were 1.06, 0.03, 0.32, 0.39, 0.08, 0.06g/(kW·h), respectively. The emissions of that in 2015 were 4038.7, 107.3, 1229.4, 1466.8, 287.2, 228.0kt/a, respectively.

Key words：emission inventory；power plants；ultra-low emission；pollutant emission permits；continuous emission monitoring systems

2000~2015 年我国火电行业中间煤耗占我国煤炭消耗总量的 47.5%~56.1%,2015 年火电行业耗煤达20.34 亿t[1],因此火电厂是大气污染物治理过程重点考虑的行业之一.2014 年中国火电行业开始在全国范围内进行超低改造工作[2-3],并于2017 年 6 月底基本完成全国火电企业排污许可证核发工作[4-5],预计 2020 年底,完成 5.8 亿 kW 机组超低排放改造任务[6].火电行业技术的快速迭代导致过去已有研究的排放因子不再适用于火电排放现状,已有火电清单无法反映火电行业最新的大气排放特征,并且在超低排放阶段中,末端治理的效率难以确定.国内外区域尺度清单主要有 TRACE-P, INTEX-B, REAS1.1, REAS2.0, MEIC, MIX 等[8-13],有关电力部门的编制基准年大多在 2012 年之前,研究者利用不同的估算方法、活动数据、排放因子,在不同尺度对火电行业排放进行了估算[13-22].上述火电排放研究的排放因子、活动水平、排放量等均存在一定差异[23-34].例如,INTEX-B(2006)中,对中国火电行业清单编制使用自上而下的编制方法,NO_x 排放因子均值为 7.1g/kg[9];自下而上的 2006 年全国火电行业排放清单[16],NO_x 排放因子范围为 4.05~11.46g/kg.近年来,我国大部分火电行业配有在线监测装备,在线监测数据(CEMS)也为排放清单的编制提供了新的思路,伯鑫、戴佩虹等利用在线监测等数据编制了京津冀、广东等地区的火电排放清单[14,35-36].

本研究根据 2015 年全国火电 CEMS 数据、环境统计数据等,综合考虑火电行业超低技术、实际排放浓度、活动水平等因素,构建了基于在线监测数据浓度的排放因子库,初步自下而上建立了中国火电排放清单(HPEC),清单包括 6 种污染物(CO、VOCs、NO_x、SO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$),分析了火电行业整体排放浓度水平、污染物排放量,对比了各省排污许可浓度与实际浓度情况,为全国火电大气污染物减排、大气污染源解析、大气污染成因分析、大气污染预报预警、空气质量达标规划等工作提供支撑.

1　材料与方法

1.1　研究区域与对象

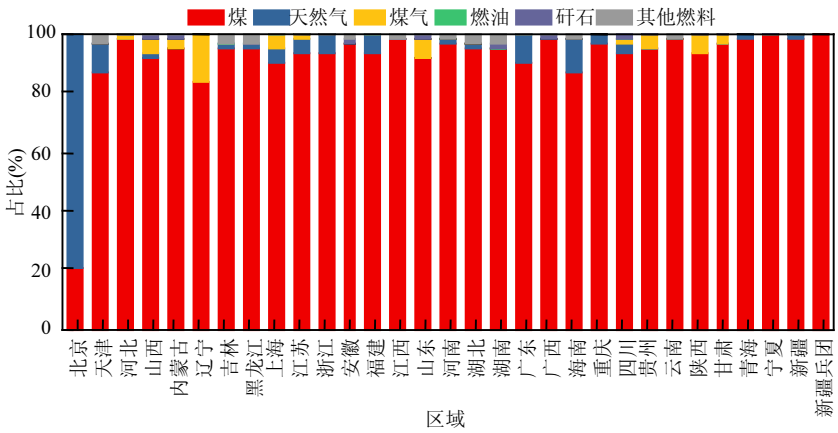


图 1　2015 年各省火电行业不同燃料占比(折标煤后)

Fig.1　Share of different varied fuels in the thermal power, 2015

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

研究基准年为 2015 年,区域包括中国大陆 30 个省、自治区及直辖市(香港、澳门、台湾、西藏地区暂不考虑),在线监测数据(CEMS)来自环境保护部环境监察局(包括 1124 家火电企业,共 2731 个排放口);环统数据来源于中国环境监测总站(火电企业 1923 家);排污许可数据来源于环境保护部环境工程评估中心(火电企业 1890 家,排口 3734 个).

本研究纳入分析的机组覆盖装机总量约 9.384 亿 kW,发电 3.813 万亿 kWh,供热 31 亿 GJ,燃煤 18.6 亿 t,燃油 34.7 万 t,天然气 290.5 亿 m^3,煤气 605 亿 m^3,煤矸石 2472 万 t,生物质等其他燃料折合 987.4 万 t 标准煤,分别占 2015 年火电行业装机容量、发电量、供热量的 92%、91%、85%.将各类燃料折标煤后,分省进行统计,如图 1 所示,煤炭依然是我国发电燃料的主体来源,占比达 93.28%.北京市火电行业天然气占比已达 80%,天津、海南、上海、福建、江苏、浙江省等区域火电行业天然气消耗比例明显高于其他区域,随“煤改气”等政策的推进,我国天然气机组比例存在上升空间,烟尘、SO_2 等污染物排放有望进一步降低.

1.2 估算方法

首先基于 CEMS 数据,计算出各个安装在线监测设备的企业常规污染物年均排放浓度.根据各个企业的燃煤低位发热值数据,计算获得各 CEMS 企业单位燃煤理论干烟气量;结合理论烟气量及排放浓度信息,获得各个 CEMS 企业的排放因子;最后依据排放因子法,自下而上计算得到每个 CEMS 企业污染物的排放量.对于没有安装 CEMS 的企业,根据该企业所在省份平均浓度来计算.除燃煤外的其他燃料类型的电厂,由于数据样本不足,不分区域统计.具体公式[14,37]如下:

$$\mathrm{Em}=\sum_n\sum_i \mathrm{AC}_{n,i}\times \mathrm{EF}_{n,i} \tag{1}$$

$$C_{\mathrm{AVG},n,i}=\sum_j\sum_h C_{j,h}\Big/\sum_j \mathrm{Oph}_j \tag{2}$$

$$\mathrm{EF}_{n,i}=C_{\mathrm{AVG}\ n,i}\times V_{n,i} \tag{3}$$

$$V=1.04\times\frac{Q_{\mathrm{L}}}{4186.8}+0.77+1.0161\times(\alpha-1)\times V_0 \tag{4}$$

$$V_0=\begin{cases}0.251\times\dfrac{Q_{\mathrm{L}}}{1000}+0.278 & (\text{烟煤})\\ \dfrac{Q_{\mathrm{L}}}{4140}+0.606 & (\text{无烟煤})\end{cases} \tag{5}$$

式中:Em 为排放量,t/a;EF 为排放因子,g/kg 燃料;AC 为环境统计燃料消耗量,t/a;n 区分不同省份;i 区分不同电厂; C_{AVG} 为排放浓度统计均值,mg/m^3;C 为在线监排口污染物浓度小时均值,j 为排口编号,h 代表第 h 个运行小时;Oph 为纳入分析的监测小时数;V 为理论烟气量,m^3/kg(其他燃料的烟气量估算由查《第一次全国污染源普查工业污染源产排污系数手册》获得);Q_{L} 为燃煤低位发热值,kJ/kg;α 为过量空气系数,取 1.4;V_0 为理论空气量.

表 1 火电行业不同燃料 CO 与 VOCs 的排放因子

Table 1 Emission factors of CO & VOCs in varied flues form thermal power

污染物	燃煤(g/kg)	天然气(g/m^3)	煤气(g/m^3)	煤矸石(g/kg)	燃油(g/kg)	其他燃料(g/kg)
CO	2	1.3	1.3	2	0.6	6.22
VOCs	0.04	0.02	0.05	0.04	2.88	1.13

参考《国家监控企业污染源自动监测数据有效性审核办法》[38],本研究在线监测数据为通过有效性审核的数据,对缺失及失控数据的修约处理按照 HJ/75-2007《固定污染源烟气排放连续监测技术规范》[39]执行.本研究对 $PM_{2.5}$、CO、VOCs 排放的估算选择使用排放因子法,排放因子选自《城市大气污染物排放清单编制技术手册 2017》[40]等.

2 结果与讨论

2.1 基于 CEMS 的火电排放浓度分析

本研究基于全国每个在线监测火电排口数据,计算得到各省平均排放浓度(表 2),其中云南省

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

火电在线监测数据质量较差,本研究后续计算以临近省份(贵州省)数据代替.全国各省火电 SO_2、NO_x、烟尘平均排放浓度范围为 7.88~208.57mg/m^3、40.33~238.2mg/m^3、5.86~53.93mg/m^3,不同地区之间有 1~20 倍的差异.三类常规污染物排放浓度的空间分布如图 2 所示,具有较为明显的地区差异,经济较为发达的 3 大区域(京津冀、长江三角洲、珠江三角洲),排放浓度均值明显低于其他地区,高值区主要集中在东北地区以及西南地区.

表 2　基于在线监测分析的各省火电企业污染物年均排放浓度(mg/m^3)

Table 2　Annual average concentration of pollutants in different provinces from thermal power plants based on CEMS(mg/m^3)

省(市、地区)	烟尘	SO_2	NO_x
北京	5.86	7.88	40.33
天津	11.55	40.25	73.91
河北	12.13	44.93	65.02
山西	17	88.62	105.39
内蒙古	28.51	109.92	108.01
辽宁	34.22	111.13	145.65
吉林	31.88	114.01	173.51
黑龙江	45.56	129.44	203.12
上海	6.37	35.3	58.84
江苏	13.88	53.8	71.53
浙江	10.75	51.24	68.2
广东	12.85	48.4	64.21
安徽	18.51	64.01	92.65
福建	14.75	52.08	65.94
江西	28.49	134.92	113.7
山东	18.06	84.76	106.05
河南	17.98	85.62	94.75
湖北	16.12	77.21	119.18
湖南	53.93	116.77	116.76
广西	49.08	192.86	103.67
海南	14.15	113.55	83.04
重庆	50.84	208.57	108.34
四川	17.12	178.51	111.35
贵州	28.88	199.56	129.85
云南	--	--	--
陕西	28.65	110.18	118.52
甘肃	33.01	93.3	112.31
青海	33.43	64.73	238.2
宁夏	19.88	104.63	107.82
新疆	26.89	65.64	97.33
新疆兵团	26.35	110.94	111.01

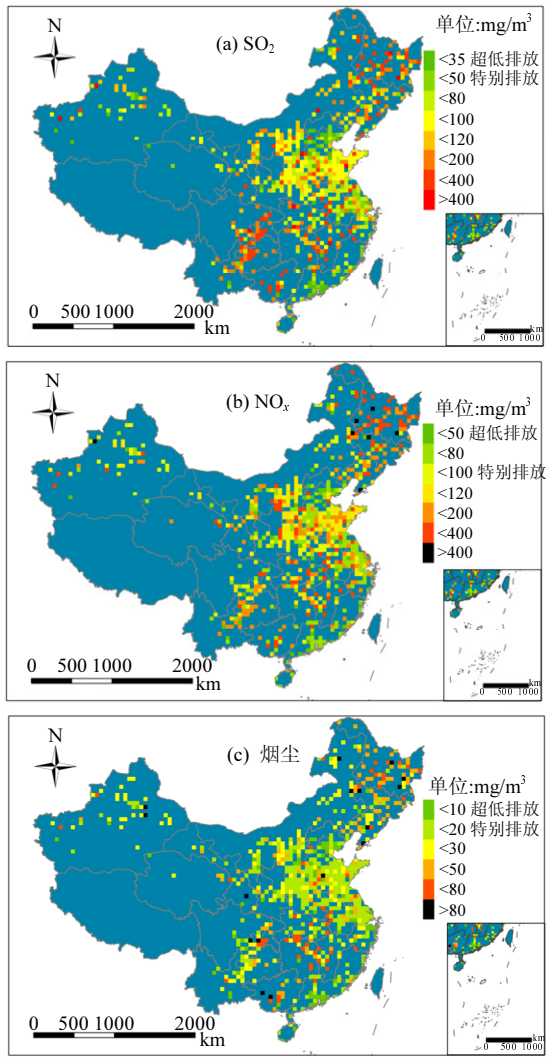


图2　2015年我国火电行业常规污染物排放浓度的空间分布

Fig 2　Spatial distributions of emission concentration for themal power plants based on CEMS, 2015

如表 2 所示,北京、上海的火电烟气 SO_2 平均排放浓度基本达到超低排放 35mg/m^3 限值要求;天津市、河北省、广东省、浙江省、福建省、江苏省的排放均值在 40.25~53.8mg/m^3,基本达到 GB13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》[41]的特别排放限值要求(50mg/m^3);平均排放浓度最高的是西南地区(高硫煤质地区),GB13223-2011 明确要求广西、重庆、四川、贵州 4 省市现有与新建火电燃煤锅炉分别执行 400 和 200mg/m^3.

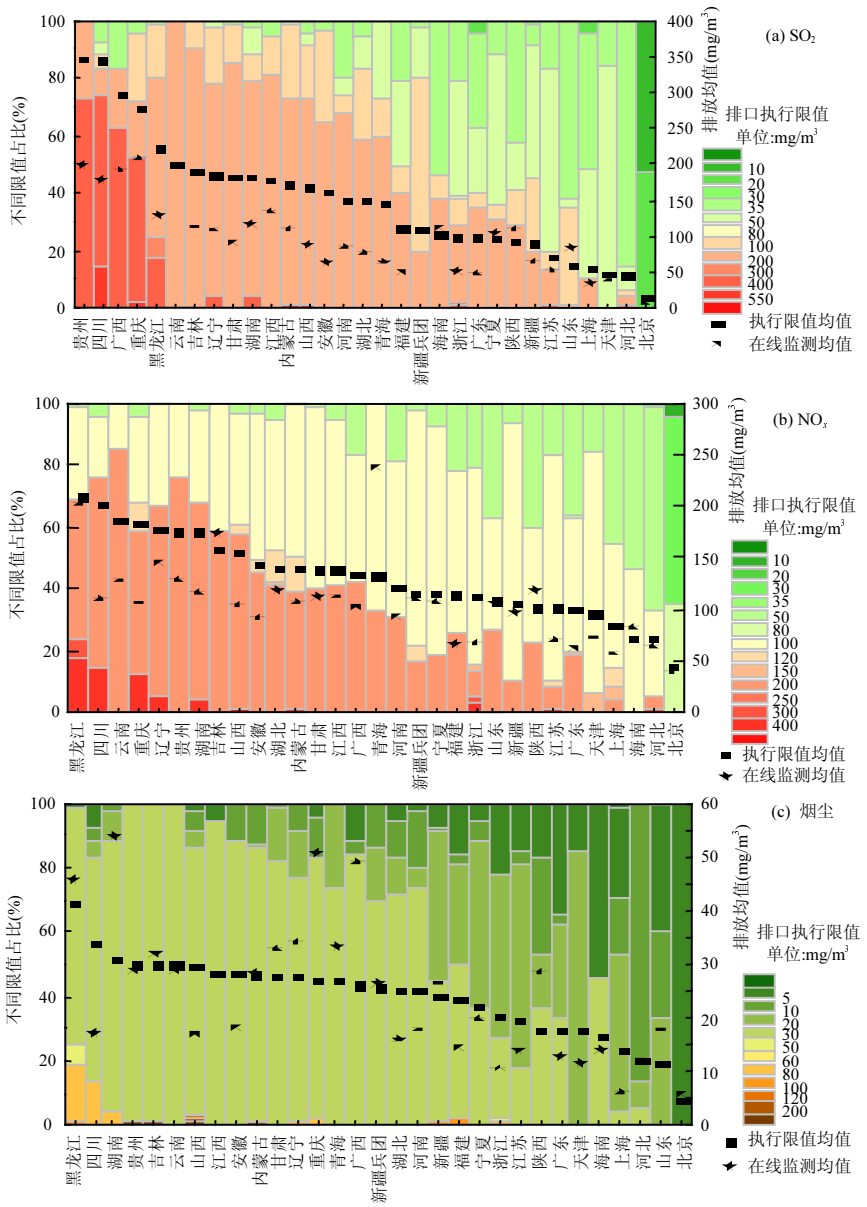
NO_x 排放.仅北京市电厂烟气 NO_x 排放均值达

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

到超低排放 50mg/m^3 限值要求,为 40.33mg/m^3;上海市、广东省、河北省等 11 省市 NO_x 排放浓度均值基本达到特别排放限值要求,平均浓度为 58.84~97.33mg/m^3;平均排放浓度高的省份为辽宁省、吉林省、黑龙江省、青海省,平均浓度在 145~238mg/m^3 之间,根据环境统计数据,东三省燃煤低位发热值省均值在 14802~15417kJ/kg, NO_x 平均排放浓度高的原因可能与地区煤质热值较低有关.3 大区域明显优于临近地区.

全国火电行业烟尘排放,整体表现较好,北京市、上海市的排放均值达到超低排放限值要求(10mg/m^3),天津市等 14 省市排放浓度均值在 10~20mg/m^3,达到 20mg/m^3 的限值要求,另有 7 省市烟尘排放浓度均值在 20~30mg/m^3,共计 23 省市排放均值达到 GB13223-2011[38]烟尘排放限值要求(30mg/m^3).其余 8 个地区的烟尘排放平均浓度在 31.88~54mg/m^3, 湖南省最高,为 53.93mg/m^3.东北地区、湖南-江西地区出现明显的集中高值区.

2.2 基于排污许可的排放限值分析



(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

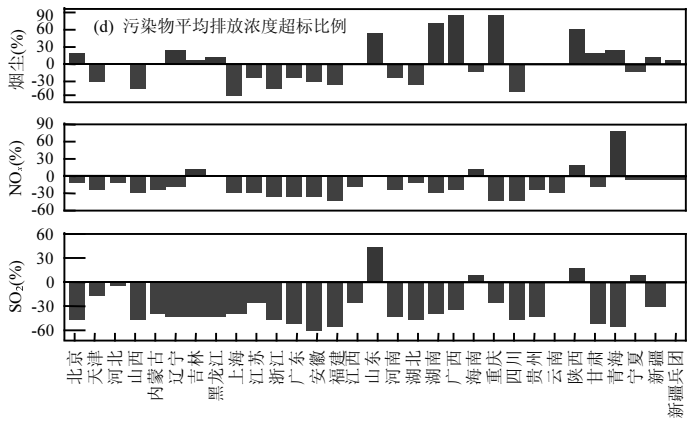


图 3　各省火电企业排口排放浓度限值(排污许可)分布及在线监测排放浓度均值对比

Fig.2　Comparison of maximum allowable discharge concentrations (pollutant emission permits) and averages of CEMS for thermal power plants in each province

本研究统计分析了各省排污许可火电企业烟气排口烟尘、SO_2、NO_x 等污染物执行排放浓度限值分布情况,对比 2015 年各省火电企业烟气在线监测浓度均值与相应的排污许可执行限值均值如图 3 所示.

由于技术、煤质等原因,全国范围内不同地区执行的标准不尽相同. SO_2 排放限值执行较多的为 200、100、50、35mg/m^3,分别占火电 SO_2 排口的 37.2%、16.2%、16.7%、22.4%;NO_x 排放限值,执行较多的为 200、120、50mg/m^3,分别占火电 NO_x 排口的 30.2%、45%、17.9%;烟尘排放限值,执行较多的为 30、20、10mg/m^3,分别占火电烟尘排口的 46.7%、23%、27.1%.超低排放限值方面(烟尘 10mg/m^3、SO_2 35mg/m^3、NO_x 50mg/m^3),独立火电企业中烟尘、SO_2、NO_x 许可浓度限值均满足超低排放要求的烟气排口占独立火电烟气总排口数的 18.81%.

2015 年在线监测数据分析结果与执行标准分布情况有显著的一致性,GB13223−2011[41]标准在实际监管中得到较好的落实,三大地区的火电大气污染物排放执行标准较其他地区更为严格,该部分地区火电企业排放控制已处于全国领先水平,西部、东北地区的 SO_2、NO_x 排污许可浓度限值较宽松;《煤电节能减排升级与改造行动计划(2014~2020 年)》[2]要求稳步推进东部地区 11 省市(北京市、上海市、天津市、河北省、广东省、浙江省、福建省、江苏省、山东省、辽宁省、海南省)现役机组超低排放改造,从 2015 年 CEMS 数据分析结果来看,北京、上海火电排放基本达到超低排放要求;东部地区 11 省市中,辽宁省、海南省排放浓度表现有待加强.

各省火电企业排口排放浓度限值(排污许可)分布及在线监测排放浓度均值对比[图 3(d)],各省 SO_2、NO_x 排放的在线监测均值达标表现要优于烟尘排放,其中 SO_2 在线监测浓度均值大于排污许可执行标准均值的省份有山东省等 5 省;NO_x 在线监测浓度均值大于排污许可执行标准均值的省份有青海省等 4 省;烟尘在线监测浓度均值大于排污许可执行标准均值的省份有广西壮族自治区等 13 个省.总而言之,以排污许可限值作为监管要求,我国火电企业实现达标排放的压力不大.

2.3　燃煤发电机组的排放因子分析

全国燃煤发电机组 SO_2 排放因子为 0.06~4.83g/kg,平均值为 0.67g/kg,中位数为 0.59g/kg;NOx 排放因子为 0.11~7.5g/kg,平均值为 0.76g/kg,中位数为 0.67g/kg;烟尘的排放因子为 0.01~2.42g/kg,平均值为 0.16g/kg,中位数为 0.13g/kg.从排放因子的 5%~95%分位数来看,SO_2、NO_x、烟尘的排放因子差距分别为 6.5 倍、4.5 倍以及 6.4 倍.如图 4(d)所示,排放因子更多的集中在 P5~P95 之间,这可能是由于 2015 年我国火电排

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

放标准对燃煤电厂的排放起到了强有力的限制作用,将排放因子压缩在扁平的区间内,表明当前我国燃煤发电排放控制起到了一定的成效,但是仍有部分电厂未达标排放,或执行着较宽松的标准.

各省的排放因子有明显的地域差异,同时,同一省份不同企业排放因子也存在着较大的差别.不同地区的排放因子如图 4 所示,表 3 给出了各省的排放因子均值及其 95%置信区间.SO_2 平均排放因子较大的省是广西壮族自治区、四川省、重庆市、贵州省(1.15~1.57g/kg),单个企业排放因子最大值出现在黑龙江省,为 4.83g/kg;NO_x 排放因子平均值较大的省是黑龙江省、吉林省、辽宁省、青海省(0.95~1.87g/kg),单个企业排放因子最大值出现在河南省,为 7.5g/kg;烟尘排放因子平均值较大的省是黑龙江省、湖南省、重庆市、广西壮族自治区(0.31~0.44g/kg),单个企业排放因子最大值出现在重庆市,为 2.42g/kg.

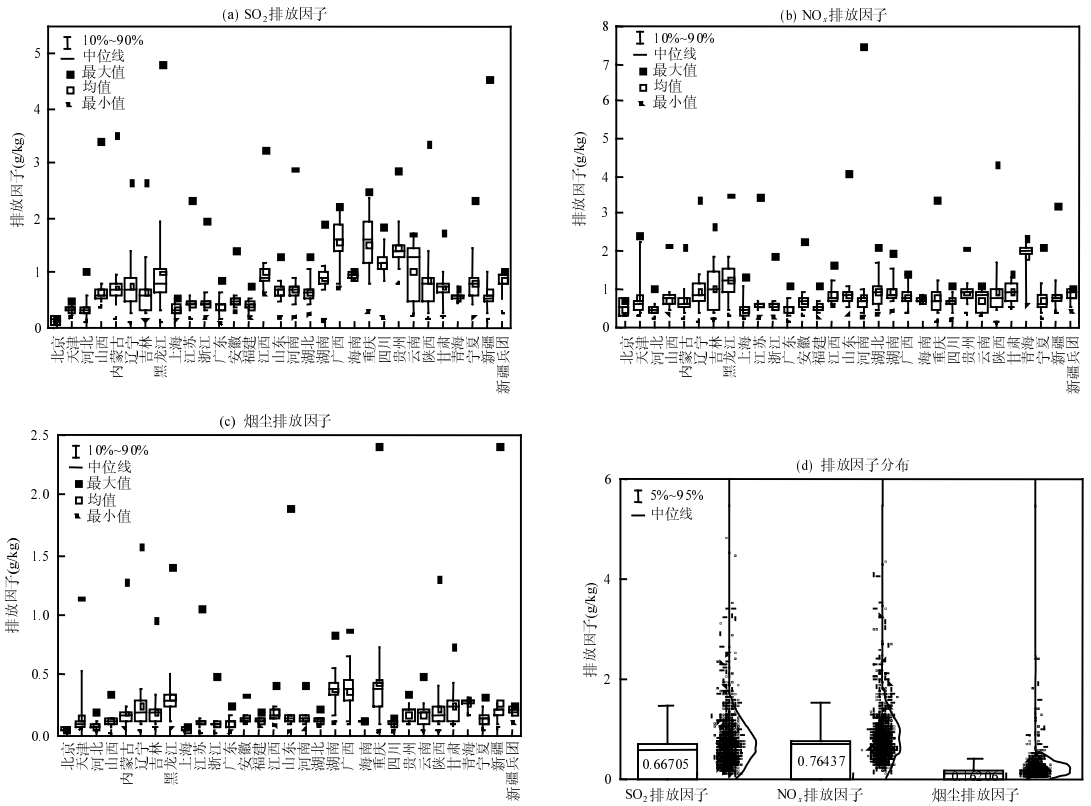


图 4 基于在线监测分析得出的燃煤电厂排放因子分布

Fig.4 Distribution of emission factors for coal-fired power plants in each province based on CEMS

本研究所得出的燃煤电厂 SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 排放因子与已有研究做了对比分析(图 5).图 5(a)为燃煤电厂 SO_2 排放因子对比,Liu 等[24]研究发现,2005 年后,我国 SO_2 排放因子急剧下降,2010 年 SO_2 排放因子均值为 4.89g/kg,而本研究得到 2015 年 SO_2 排放因子均值为 0.67g/kg;戴佩虹[35]利用在线监测与物料衡算两种方法对 2011 年广东省的排放因子进行相关研究,发现利用物料衡算的方式得出排放因子为 0.76~3.16g/kg,而利用 CEMS 得出的结果为 0.43~1.71g/kg,在线监测所得结果更低,本研究对 2015 年全国火电分析得出 SO_2 排放因子结果在 0.06~4.83g/kg 之间,P5~P95 为 0.22~1.44g/kg.2011 年后,火电行业排放提标[41],“倒逼”企业进行烟气治理技术升级, 湿法脱硫的大面积普及,促使我国火电行业的 SO_2 排放控制水平有了长

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

足的进步,对我国火电行业烟气 SO_2 治理有明显 的改善.

表 3　“煤电”污染物的年均排放因子(g/kg)

Table 3　Annual average emission factors of coal-fired power plants in each provinces (g/kg)

地区	SO_2		NO_x		烟尘	
	均值	95%置信区间	均值	95%置信区间	均值	95%置信区间
北京	0.12	−0.63~0.87	0.51	−2.16~3.18	0.05	0~0.1
天津	0.33	0.28~0.38	0.77	0.43~1.11	0.16	0.01~0.31
河北	0.33	0.29~0.37	0.47	0.44~0.5	0.08	0.08~0.09
山西	0.64	0.58~0.71	0.73	0.68~0.77	0.12	0.11~0.12
内蒙古	0.73	0.65~0.82	0.69	0.63~0.75	0.18	0.15~0.22
辽宁	0.76	0.64~0.88	0.95	0.81~1.1	0.24	0.18~0.31
吉林	0.66	0.48~0.85	1.03	0.81~1.25	0.20	0.15~0.26
黑龙江	1.00	0.8~1.2	1.28	1.13~1.42	0.31	0.26~0.37
上海	0.31	0.24~0.38	0.46	0.28~0.64	0.05	0.05~0.06
江苏	0.45	0.42~0.48	0.59	0.54~0.64	0.11	0.1~0.13
浙江	0.45	0.42~0.49	0.57	0.54~0.6	0.09	0.08~0.1
广东	0.39	0.34~0.43	0.49	0.44~0.54	0.10	0.09~0.11
安徽	0.47	0.43~0.51	0.69	0.6~0.79	0.14	0.13~0.15
福建	0.40	0.35~0.45	0.52	0.46~0.59	0.12	0.1~0.13
江西	1.02	0.75~1.3	0.84	0.71~0.96	0.19	0.16~0.23
山东	0.67	0.65~0.69	0.85	0.81~0.89	0.15	0.13~0.17
河南	0.69	0.62~0.75	0.81	0.63~1	0.14	0.13~0.15
湖北	0.67	0.58~0.75	0.93	0.77~1.09	0.13	0.12~0.14
湖南	0.90	0.77~1.02	0.94	0.8~1.08	0.38	0.32~0.45
广西	1.57	1.34~1.8	0.83	0.66~1	0.37	0.26~0.47
海南	0.95	0.87~1.02	0.69	0.61~0.78	0.12	0.11~0.12
重庆	1.53	1.28~1.78	0.83	0.53~1.12	0.44	0.22~0.66
四川	1.15	1.03~1.27	0.68	0.61~0.75	0.10	0.09~0.11
贵州	1.45	1.29~1.62	0.91	0.78~1.04	0.18	0.16~0.21
云南	1.03	0.77~1.3	0.72	0.58~0.86	0.18	0.12~0.23
陕西	0.86	0.65~1.07	0.96	0.72~1.21	0.21	0.15~0.28
甘肃	0.73	0.6~0.86	0.91	0.8~1.03	0.24	0.18~0.3
青海	0.56	0.49~0.63	1.87	1.32~2.42	0.26	0.22~0.31
宁夏	0.82	0.64~0.99	0.73	0.57~0.88	0.14	0.11~0.16
新疆	0.63	0.43~0.83	0.83	0.69~0.97	0.27	0.16~0.38
新疆兵团	0.85	0.76~0.94	0.85	0.78~0.92	0.20	0.19~0.22
全国	0.67	0.65~0.69	0.76	0.74~0.79	0.16	0.15~0.17

近几年,我国对 NO_x 排放控制趋严,火电企业普遍进行了机组的低氮改造,NO_x 排放因子出现“断崖式”下降[图 5(b)].NO_x 的排放估算主要以排放因子法为主,研究者多以排放因子库的形式给出, Zhao 等[37]给出我国 2010 年燃煤电厂的排放因子在 1.5~11.2g/kg 之间,戴佩虹[35]通过 CEMS 数据发现 2011 年广东省的燃煤电厂 NO_x 排放因子在 0.77~4.57g/kg 之间,本研究得出 2015 年全国燃煤发电 NO_x 排放因子 P5~P95 值为 0.33~1.5g/kg.

对颗粒物的排放因子研究多以 PM_{10} 或 $PM_{2.5}$ 为主,在线监测对颗粒物粒径没有区分,相关对比结果如图 5(c)所示.当前火电企业的排放因子均值较 2010 年水平又有了明显的下降, GB13223-2011[41]给出的烟尘排放标准为 30mg/m^3,相较于 GB13223-2003 给出的第三时段

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

50~200mg/m^3 的标准有了大幅度的提升,且部分机组开始执行 20mg/m^3 的特别排放限值以及10mg/m^3 的超低排放限值,这些对烟尘排放的控制都起到了显著效果.

中国燃煤发电 SO_2、NO_x、烟尘排放因子平均值分别为 0.67、0.76、0.16g/kg,本研究因子水平低于已有研究者的结果,本研究的排放因子是基于全国在线监测数据得出,考虑了火电生产技术、污染物治理技术等进步,较好的反映了当前中国火电排放情况,下一步可结合空气质量模型开展中国火电对大气污染贡献分析.

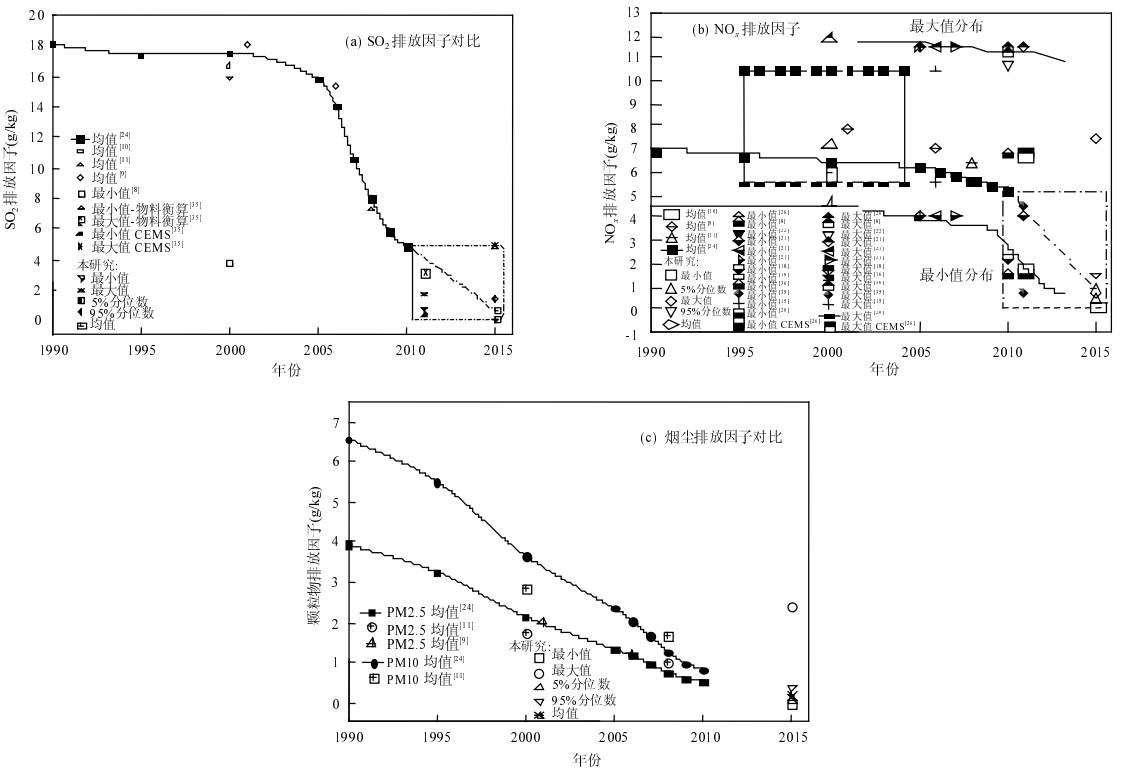


图 5 已有文献公开的燃煤电厂排放因子与本研究的对比

Fig.5 Comparison of emission factors of coal-fired power plants with published literatures

1mg/m^3=0.01g/kg 煤,1g/GJ=0.02g/kg 煤

2.4 非燃煤发电机组的排放因子

根据全国火电在线监测数据,对不同燃料类型的火电排放因子进行了分析,由于样本不足,未采取分省统计形式,结果如表 4 所示.

表 4 不同燃料机组污染物的平均排放因子

Table 4 Average emission factors of thermal power using varied fuels

机组类型	理论烟气量	烟尘		SO_2		NO_x	
	(m^3/单位燃料)	均值	95%置信区间	均值	95%置信区间	均值	95%置信区间
燃气锅炉机组(g/m^3)	24.55	0.1	0.08~0.12	0.05	0.01~0.08	1.46	1.31~1.62
燃气轮机组(g/m^3)	24.55	0	0~0.01	0.03	0.01~0.04	1.43	1.29~1.57
煤矸石机组(g/kg)	4.806	1.02	0.08~1.96	1.94	1.5~2.38	1.5	0.81~2.18
煤气机组(g/m^3)	5.894	0.14	0.09~0.19	0.62	0.24~1	1.67	1.29~2.04
生物质机组(g/kg)	6.24	0.24	0.15~0.33	0.78	0.58~0.97	1.33	1.02~1.65
其他燃料机组(g/kg)	7.722	0.1	0.03~0.17	0.94	0.64~1.25	2.21	0.91~3.51

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

2.5　2015 年中国火电排放绩效值及排放量

根据 HPEC 清单结果显示(表 5),全国火电 CO、VOCs、NO_x、SO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 平均排放绩效值分别为 1.06、0.03、0.32、0.39、0.08、0.06g/(kW·h),不同区域的排放绩效有一定的差异. CO 排放绩效值范围为 0.03~1.09g/(kW·h); VOCs 排放绩效值范围为 0.01~0.08g/(kW·h); SO_2 排放绩效值范围为 0.08~0.82g/(kW·h); NO_x 排放绩效值范围为 0.16~0.97g/(kW·h);PM_{10} 排放绩效值范围为 0.01~0.23g/(kW·h);$PM_{2.5}$ 排放绩效值范围为 0.01~0.13g/(kW·h).排放绩效值下降的幅度较排放因子下降的幅度更为明显,这是由于火电行业减排措施的贡献,同时这也与我国火电的节能降耗改造有关[24].

表 5　各省火电大气污染物排放量

Table 5　Emissions of air pollutants from thermal power plants in 2015

省(市、地区)	污染物排放量(万 t/a)					
	CO	VOCs	SO_2	NO_x	PM_{10}	$PM_{2.5}$
北京	1.48 (0.38)	0.03 (0.01)	0.31 (0.08)	0.61 (0.16)	0.04 (0.01)	0.04 (0.01)
天津	5.43 (0.94)	0.17 (0.03)	1.05 (0.18)	2.62 (0.46)	0.37 (0.06)	0.27 (0.05)
河北	19.95 (1.03)	0.44 (0.02)	3.12 (0.16)	4.82 (0.25)	0.78 (0.04)	0.71 (0.04)
山西	25.63 (1.18)	0.6 (0.03)	7.99 (0.37)	9.61 (0.44)	1.49 (0.07)	1.28 (0.06)
内蒙古	41.47 (1.34)	0.87 (0.03)	12.65 (0.41)	13.13 (0.43)	2.79 (0.09)	2.29 (0.07)
辽宁	18.88 (1.49)	0.42 (0.03)	5.64 (0.44)	9.16 (0.72)	1.57 (0.12)	1.18 (0.09)
吉林	9.92 (1.81)	0.44 (0.08)	2.71 (0.49)	4.55 (0.83)	0.77 (0.14)	0.56 (0.1)
黑龙江	12.09 (1.64)	0.43 (0.06)	4.14 (0.56)	7.17 (0.97)	1.34 (0.18)	0.88 (0.12)
上海	5.33 (0.87)	0.12 (0.02)	1.03 (0.17)	1.61 (0.26)	0.18 (0.03)	0.16 (0.03)
江苏	35.59 (0.91)	0.96 (0.02)	7.34 (0.19)	10.85 (0.28)	1.84 (0.05)	1.58 (0.04)
浙江	19.95 (0.95)	0.58 (0.03)	4.73 (0.23)	5.88 (0.28)	0.96 (0.05)	0.8 (0.04)
广东	22.63 (0.84)	0.49 (0.02)	4.26 (0.16)	6.13 (0.23)	1.13 (0.04)	1 (0.04)
安徽	18.65 (1.02)	0.67 (0.04)	4.32 (0.24)	5.49 (0.3)	1.26 (0.07)	1.07 (0.06)
福建	9.13 (0.9)	0.24 (0.02)	1.71 (0.17)	2.4 (0.24)	0.53 (0.05)	0.47 (0.05)
江西	6.58 (0.93)	0.2 (0.03)	3.3 (0.47)	3.03 (0.43)	0.56 (0.08)	0.45 (0.06)
山东	44.77 (1.13)	1.28 (0.03)	15.08 (0.38)	17.57 (0.44)	3.61 (0.09)	2.92 (0.07)
河南	23.71 (1)	0.65 (0.03)	8.24 (0.35)	8.71 (0.37)	1.69 (0.07)	1.4 (0.06)
湖北	8.79 (0.95)	0.37 (0.04)	2.67 (0.29)	3.53 (0.38)	0.53 (0.06)	0.45 (0.05)
湖南	6.02 (1.02)	0.25 (0.04)	2.81 (0.48)	2.89 (0.49)	1.04 (0.18)	0.58 (0.1)
广西	3.59 (0.98)	0.13 (0.04)	2.52 (0.69)	1.44 (0.39)	0.59 (0.16)	0.37 (0.1)
海南	1.83 (0.92)	0.07 (0.04)	0.8 (0.4)	0.79 (0.4)	0.1 (0.05)	0.09 (0.05)
重庆	3.75 (0.95)	0.08 (0.02)	3.23 (0.82)	1.57 (0.4)	0.9 (0.23)	0.5 (0.13)
四川	3.49 (1.08)	0.07 (0.02)	2.16 (0.67)	1.21 (0.38)	0.2 (0.06)	0.17 (0.05)
贵州	9.37 (1)	0.19 (0.02)	6.29 (0.67)	4.33 (0.46)	0.86 (0.09)	0.68 (0.07)
云南	2.81 (1.3)	0.11 (0.05)	1.18 (0.55)	0.88 (0.41)	0.23 (0.11)	0.17 (0.08)
陕西	12.24 (1)	0.26 (0.02)	3.75 (0.31)	5.11 (0.42)	0.88 (0.07)	0.73 (0.06)
甘肃	6.06 (1.1)	0.12 (0.02)	2.23 (0.4)	2.56 (0.46)	0.65 (0.12)	0.46 (0.08)
青海	0.82 (1.27)	0.02 (0.03)	0.22 (0.34)	0.63 (0.96)	0.09 (0.14)	0.07 (0.11)
宁夏	9.74 (1.02)	0.2 (0.02)	3.21 (0.34)	2.98 (0.31)	0.49 (0.05)	0.43 (0.05)
新疆	8.48 (1.06)	0.18 (0.02)	2.11 (0.26)	3.13 (0.39)	0.75 (0.09)	0.6 (0.08)
新疆兵团	5.68 (0.92)	0.11 (0.02)	2.12 (0.35)	2.29 (0.37)	0.54 (0.09)	0.44 (0.07)
总计	403.87 (1.06)	10.73 (0.03)	122.94 (0.32)	146.68 (0.39)	28.72 (0.08)	22.8 (0.06)

注:括号内为排放绩效值[g/(kW·h)].

2015 年,全国火电 CO、VOCs、NO_x、SO_2、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 排放量分别为 403.87、10.73、122.94、146.68、28.72 和 22.80 万 t/a.排放量的空间分布如图 6 所示, CO 的排放量主要集中在

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

京津冀、长三角、珠三角 3 大区域以及相关临近地区,表明该地区的火电生产活动水平较高,东北、西北地区活动水平则相对较低,其他污染物排放量空间分布与在线监测排放浓度的分布存在一定的差异,即 3 大区域及临近省份的排放浓度水平较低,但排放量相对较高,这些地区应当是下一阶段我国火电行业排放控制工作的重点区域.

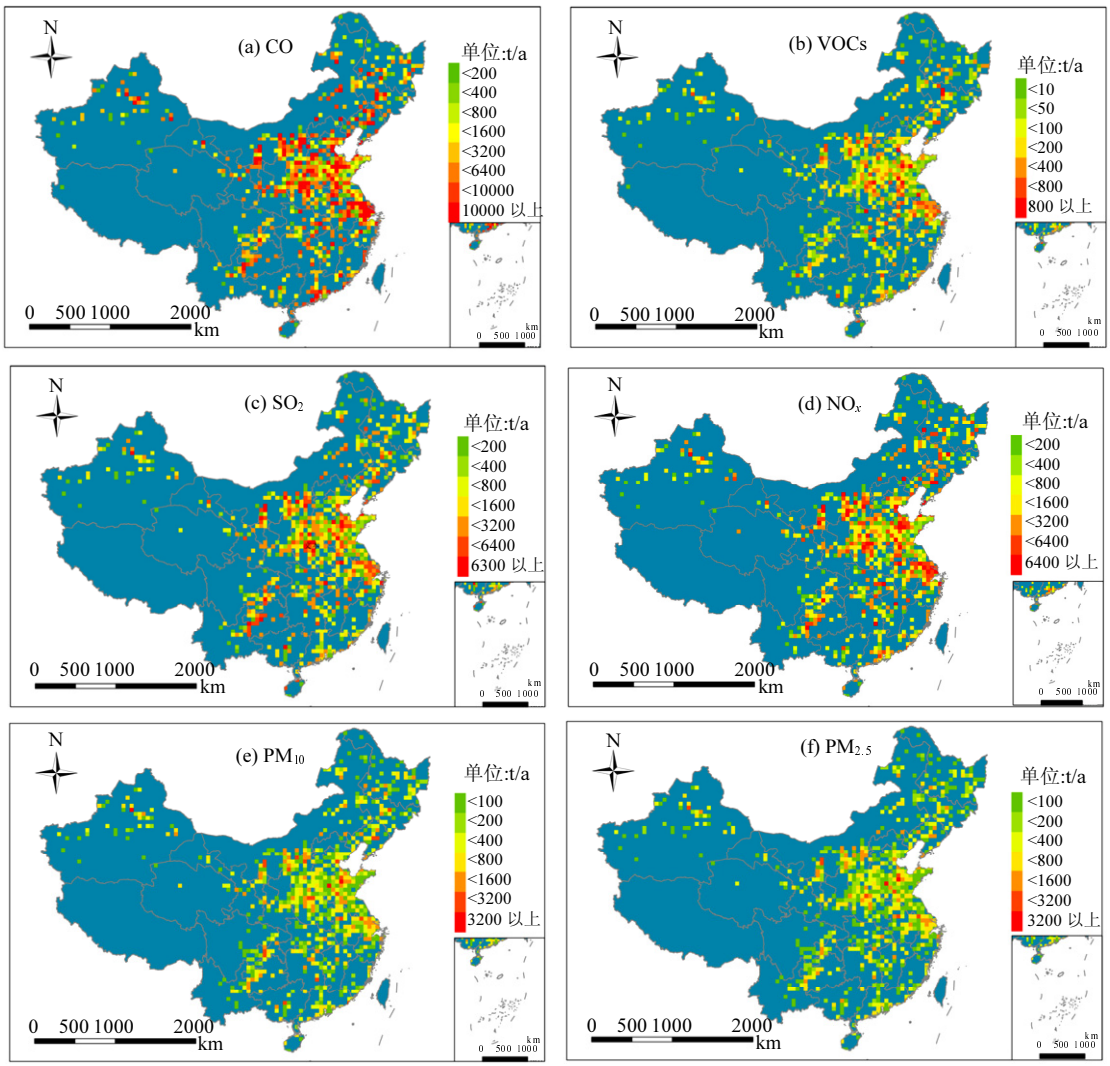


图 6 2015 年中国火电大气污染物排放量空间分布

Fig.6 Spatial distributions of air pollutants emission from thermal power, 2015

2.6 不确定性分析

本研究使用的活动水平数据质量较好,活动水平的不确定性较低.结果的不确定性主要来源于两个方面,一是采用在线监测数据对全国火电排放浓度进行分析,数据样本存在一定的不确定性,对于部分数据样本较少的省份,结果可能存在较大的偏差;二是对于燃煤机组的排放因子估算使用燃煤低位发热值计算理论干烟气量,与实际工况存在一定差异.

3 结论

3.1 全国各省火电 SO_2、NO_x、烟尘平均排放浓度范围为 7.88~208.57、40.33~238.2、5.86~53.93mg/m^3.北京、上海火电排放基本达到超低

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

排放要求;辽宁省、海南省排放浓度明显高于其余 9 省市,超低改造有待加强.

3.2　三类常规污染物排放浓度的空间分布具有较为明显的地区差异,经济较为发达的三大区域,排放浓度均值明显低于其他地区,高值区主要集中在东北地区以及西南地区;全国火电 CO、VOCs、SO_2、NO_x、PM_{10}、$PM_{2.5}$ 排放量分别为 403.87、10.73、122.94、146.68、28.72 和 22.80 万 t/a.污染物排放量空间分布与在线监测排放浓度的分布不同,排放主要集中在活动水平相对较高的三大区域及临近地区,虽然这些地区排放浓度控制水平已全国领先,排放控制工作仍需要关注.

参考文献:

[1] 中华人民共和国国家统计局,国家数据 [EB/OL]. http://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01. 2017-06-16.

[2] 中华人民共和国环境保护部,国家发展和改革委员会,国家能源局.煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020 年) [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/gwy/201409/W020140925407622627853.pdf. 2014-09-12.

[3] 中华人民共和国环境保护部,国家发展和改革委员会,国家能源局.全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案[EB/OL] http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm?_sm_au_=iVVR2PCFSksVLj6H. 2015-12-11.

[4] 中华人民共和国国务院办公厅.控制污染物排放许可制实施方案 [EB/OL] http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-11/21/content_5135510.htm. 2016-11-21.

[5] 中华人民共和国环境保护部.关于开展火电、造纸行业和京津冀试点城市高架源排污许可证管理工作的通知 [EB/OL]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201701/t20170105_394016.htm. 2016-12-27.

[6] 中华人民共和国国务院.“十三五”节能减排综合工作方案[EB/OL].http://www.gov.cn/zhengce/content/2017-01/05/content_5156789.htm. 2017-01-05.

[7] 刘　菲.基于卫星遥感的中国典型人为源氮氧化物排放研究 [D]. 北京:清华大学, 2015.

[8] Streets D G, Bond T C, Carmichael G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003,108(21): 1-23.

[9] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, et al. Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2009,9(14):5131-5153.

[10] Ohara T, Akimoto H, Kurokawa J, et al. An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980~2020 [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2007,7(16): 6843-6902.

[11] Kurokawa J, Ohara T, Morikawa T, et al. Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000~2008: Regional emission inventory in ASia (REAS) version 2 [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2013,13(21):11019-11058.

[12] 清华大学.中国多尺度排放清单模型(MEIC) [EB/OL]. http://meicmodel.org/index.html.2017-02-07.

[13] Li M, Zhang Q, Kurokawa J, et al. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2017,17(23):34813-34869.

[14] 孙洋洋.燃煤电厂多污染物排放清单及不确定性研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2015.

[15] Zheng J, Zhang L, Che W, et al. A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. Atmospheric Environment, 2009,43(32):5112-5122.

[16] Zhao Y, Wang S, Duan L, et al. Primary air pollutant emissions of coal-fired power plants in China: Current status and future prediction [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(36):8442-8452.

[17] Zhao Y, Zhang J, Nielsen C P. The effects of recent control policies on trends in emissions of anthropogenic atmospheric pollutants and CO_2 in China [J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2012,12(9):24985-25036.

[18] Zhao B, Wang S X, Liu H, et al. NO_x emissions in China: historical trends and future perspectives [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2013,13(19):9869-9897.

[19] Zhang Q A, Streets D G, He K B, et al. Major components of China's anthropogenic primary particulate emissions. [J]. Environmental Research Letters, 2007,2(4):1-7.

[20] Zhang Q, Streets D G, He K, et al. NO_x emission trends for China, 1995~2004 The view from the ground and the view from space [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007, 112(D22)D22306.

[21] Wang S W, Zhang Q, Streets D G, et al. Growth in NO_x emissions from power plants in China: bottom-up estimates and satellite observations [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2012,12(1): 45-91.

[22] Tian H, Liu K, Hao J, et al. Nitrogen oxides emissions from thermal power plants in china: current status and future predictions. [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(19):11350.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[23] Lu Z, Streets D G, Zhang Q, et al. Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000. [J]. Atmospheric Chemistry & Physics Discussions, 2010,10(4):6311-6331.
[24] Liu F, Zhang Q, Tong D, et al. High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2015,15(13):18787-18837.
[25] Lei Y, Zhang Q, He K B, et al. Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990~2005 [J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2011,11(3):17153-17212.
[26] Chen L, Sun Y, Wu X, et al. Unit-based emission inventory and uncertainty assessment of coal-fired power plants [J]. Atmospheric Environment, 2014,99:527-535.
[27] Wang S, Zhang Q, Martin R V, et al. Satellite measurements oversee China's sulfur dioxide emission reductions from coal-fired power plants [J]. Environmental Research Letters, 2015,10(11):114015.
[28] 陈必新.京津冀地区火电行业排放特征及其对空气质量的影响研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2016.
[29] 张英杰,孔少飞,汤莉莉,等.基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 [J]. 环境科学, 2015,36(8):2775-2783.
[30] 田贺忠,郝吉明,陆永琪,等.中国氮氧化物排放清单及分布特征 [J]. 中国环境科学, 2001,21(6):493-497.
[31] 杨柳林,曾武涛,张永波,等.珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立 [J]. 中国环境科学, 2015,35(12):3521-3534.
[32] 张楚莹,王书肖,邢 佳,等.中国能源相关的氮氧化物排放现状与发展趋势分析 [J]. 环境科学学报, 2008,28(12):2470-2479.
[33] 翟一然,王勤耕,宋媛媛.长江三角洲地区能源消费大气污染物排放特征 [J]. 中国环境科学, 2012,32(9):1574-1582.
[34] 丁青青,魏 伟,沈 群,等.长三角地区火电行业主要大气污染物排放估算 [J]. 环境科学, 2015,36(7):2389-2394.
[35] 戴佩虹.基于 CEMS 数据的火电厂 SO_2 和 NO_x 排放因子建立与不确定性分析 [D]. 广州:华南理工大学, 2016.
[36] 伯 鑫,王 刚,温 柔,等.京津冀地区火电企业的大气污染影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(2):364-373.
[37] Zhao Y, Wang S, Nielsen C P, et al. Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants [J]. Atmospheric Environment, 2010,44(12):1515-1523.
[38] 环境保护部.国家重点监控企业污染源自动监测数据有效性审核教程 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2010.
[39] HJ/75-2007 固定污染源烟气排放连续监测技术规范 [S].
[40] 贺克斌.城市大气污染物排放清单编制技术手册 2017 [R]. 北京:清华大学环境学院, 2017.
[41] GB 13223-2011 火电厂大气污染物排放标准 [S].

致谢：感谢环境保护部环境监察局为本研究提供污染源在线监测资料.

作者简介：崔建升(1966-),男,河北沧州人,教授,博士,主要从事环境监测技术研究.发表论文 60 余篇.

《中国环境科学》获评“2014 中国最具国际影响力学术期刊”

DOI:10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2018.0227

2014 年 12 月,中国环境科学学会主办的《中国环境科学》被评为“2014 中国最具国际影响力学术期刊”.

“中国最具国际影响力学术期刊”是《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、清华大学图书馆、中国学术国际评价研究中心对我国 5600 余种中外文学术期刊，根据总被引频次、影响因子、被引半衰期等计算出的国际影响力综合评价指标 CI 进行排序,遴选出的排名前 5%的期刊.获评“中国最具国际影响力学术期刊”的科技类期刊共 175 种.

自 2012 年开始此项评选以来，《中国环境科学》已连续 3 年获此殊荣.

《中国环境科学》编辑部

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net