环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社

2020
Vol.41 No.9
第41卷 第9期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第41卷 第9期
2020年9月15日

目 次

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第41卷第9期 2020年9月
Vol.41, No.9 Sep., 2020

超低改造下中国火电排放清单及分布特征

屈加豹[1], 王鹏[1,2], 伯鑫[1*], 薛晓达[1,3], 董广霞[4], 崔磊[5], 康明雄[6], 王彤[7], 汤铃[3,8], 朱法华[9], 李时蓓[1*]

(1. 生态环境部环境工程评估中心, 北京 100012; 2. 北京化工大学数理学院, 北京 100029; 3. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191; 4. 中国环境监测总站, 北京 100012; 5. 中圣环境科技发展有限公司, 西安 710000; 6. 福建省环境保护设计院有限公司, 福州 350012; 7. 陕西省环境调查评估中心, 西安 710000; 8. 北京化工大学经济管理学院, 北京 100029; 9. 国电环境保护研究院, 南京 210031)

摘要: 本研究基于2018年火电在线监测和环境统计等数据,自下而上编制了中国高分辨率火电行业排放清单,并核算了排放浓度、排放因子和排放量. 结果表明超低排放政策效果显著:2018年火电 SO_2、NO_x 和烟尘平均排放浓度分别为37.57、56.71和7.41 mg·m^{-3}. 比2015年分别下降58.71%、43.12%和60.79%; 中国燃煤机组的 SO_2、NO_x 和烟尘平均排放因子分别为0.30、0.48和0.06 g·kg^{-1},比2015年分别下降55.2%、36.84%和62.5%; 中国火电 SO_2、NO_x、烟尘和 $PM_{2.5}$ 总排放量分别为72.14、118.38、14.90和13.59万t·a^{-1},比2015年分别下降41.32%、19.29%、48.12%和40.39%.

关键词:连续在线监测系统(CEMS); 排放清单; 超低; 排放因子; 火电

中图分类号: X51 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2020)09-3969-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.202001042

Inventory and Distribution Characteristics of China's Thermal Power Emissions Under Ultra-Low Reconstruction

QU Jia-bao[1], WANG Peng[1,2], BO Xin[1*], XUE Xiao-da[1,3], DONG Guang-xia[4], CUI Lei[5], KANG Ming-xiong[6], WANG Tong[7], TANG Ling[3,8], ZHU Fa-hua[9], LI Shi-bei[1*]

(1. Appraisal Center for Environment and Engineering, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100012, China; 2. College of Mathematics and Physics, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China; 4. China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China; 5. Zhongsheng Environmental Technology Development Co., Ltd., Xi'an 710000, China; 6. Fujian Environmental Protection Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350012, China; 7. Shaanxi Environmental Investigation and Assessment Center, Xi'an 710000, China; 8. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 9. State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing 210031, China)

Abstract: This study updates a bottom-up high-resolution emission inventory and estimates the concentrations, emission factors, emissions, and performance values of China's power plants, based on the data from continuous emission monitoring systems and environmental statistics in 2018. The results show that the ultra-low emission policy has significant effects: the average concentrations of SO_2, NO_x, and PM in thermal power plants were 37.57, 56.71, and 7.41 mg·m^{-3}, respectively in 2018, which were 58.71%, 43.12%, and 60.79% lower than those in 2015. The average emission factors of SO_2, NO_x, and PM from coal-fired units in China were 0.3, 0.48, and 0.06 g·kg^{-1}, respectively, which were 55.2%, 36.84%, and 62.5% lower than those in 2015. The total emissions of SO_2, NO_x, PM, and $PM_{2.5}$ in thermal power plants were 721.4, 1 183.8, 149.0, and 135.9 kt·a^{-1}, respectively, down by 41.32%, 19.29%, 48.12%, and 40.39% from 2015.

Key words: continuous emission monitoring systems; emission inventory; ultra-low emission; emission factors; thermal power

2018年中国火电行业装机容量占中国总装机容量的60.2%,发电量占比达到70.4%[1]. 作为主要大气污染源, 2015年期间,其 SO_2、NO_x 和烟尘排放量占中国总排放量的占比分别约为28%、30%和11%[2]. 为有效控制火电行业大气污染物排放,中国对火电行业进行超低排放改造[3~5],其中要求中部地区在2018年前完成. 为打赢蓝天保卫战, 2018年推进火电等重点行业的全面达标排放[6],因此,开展2018年中国火电排放清单研究,可定量评估火电行业超低改造的减排效果,精确反映当前污染物排放特征.

国内外研究者开展了系列中国火电排放清单研究. Kurokawa 等[7] 建立了2000~2008年的 REAS (regional emission inventory in Asia) 污染源,有学者

收稿日期: 2020-01-05; **修订日期**: 2020-03-23
基金项目: 清华大学环境学院重点学术机构2015年度开放基金项目; 生态环境部环境工程评估中心创新科研项目(2019-10); 国家重点研发计划项目(2016YFC0208101); 大气重污染成因与治理攻关项目(DQGG0209-07, DQGG0304-07)
作者简介: 屈加豹(1993~),硕士,工程师,主要研究方向为排放清单编制及空气质量数值模拟, E-mail: qujb@acee.org.cn
* 通信作者, E-mail: boxin@acee.org.cn; lisb@acee.org.cn

构建了 2012 ~ 2016 年的 MEIC 清单(multi-resolution emission inventory for China, http://meicmodel.org/index.html)[8],上述排放清单中的火电排放因子多采用传统的抽样检测方法,采样样本数量相对少,时间多为 2016 年以前,排放特征无法反映出火电大规模超低改造后的情况. 基于火电污染源在线监测数据(continuous emission monitoring systems, CEMS)的火电排放清单,可有效评估火电超低改造减排效果. 例如,文献[9 ~ 20]基于火电污染源在线监测数据、环境统计和总量减排等数据,建立了基于 CEMS 的 2014 ~ 2017 年中国火电排放清单,Liu 等[20]对中国能源集团 38 个发电机组的 CEMS 数据进行检验,发现超低排放改造后, SO_2、NO_x 和 PM 的排放因子降低了 1 ~ 2 个数量级. 在线监测数据具有极高的时间分辨率,基本覆盖我国所有火电机组,在我国超低排放改造进程中,可客观评价我国火电行业的排放变化,在已有研究中已有大量应用.

本研究使用 2018 年中国火电行业的在线监测数据,结合环境统计数据中的活动水平,自下而上建立了 2018 年中国高分辨率火电行业大气污染源排放清单(high resolutionpower plant emission inventory for China, HPEC),讨论了中国各省火电主要污染物(SO_2、NO_x 和烟尘)排放浓度、排放因子和排放量的情况,并与 2015 年中国火电清单做了对比,分析了 2018 年各省火电行业超低排放改造的最新进程,以期为打赢蓝天保卫战以及空气质量达标规划等提供坚实的基础数据.

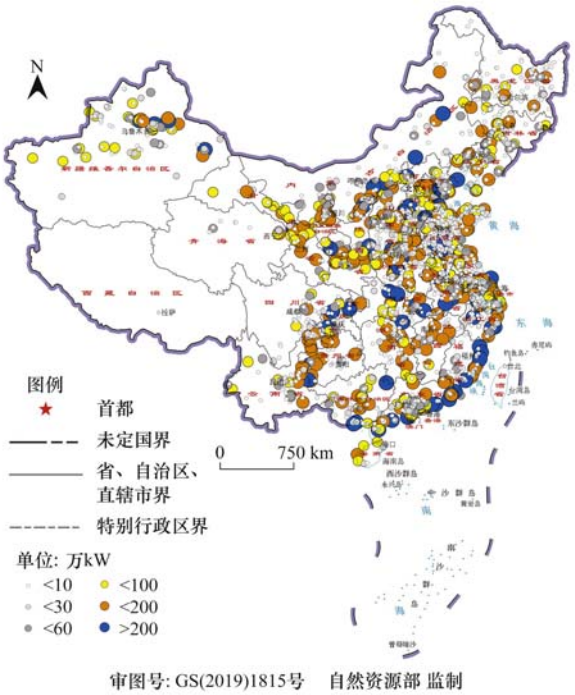
1 材料与方法

1.1 研究区域与对象

本研究以 2018 为基准年,区域包括中国大陆 30 个省、自治区及直辖市(中国香港、澳门、台湾和西藏地区暂不考虑),CEMS 来自生态环境执法局(包括2 110家火电企业,原始数据未公开); 环境统计数据来源于中国环境监测总站(火电企业3 124家,原始数据未公开),机组覆盖装机总量约 11.1 亿 kW,占全国总装机容量的 97.4%. 将各类燃料折合标煤后约 19 亿 t,较 2015 年增加约 20.87%,虽然中国电力行业天然气机组近年来比例大幅增加,但总体结构仍以煤电为主. 从图 1 可以看出,火电机组主要分布在东部沿海地区、西部煤电基地和北部煤电基地.

1.2 清单编制方法

基于 CEMS 和环境统计的火电行业排放清单编制方法,已在多个项目得到了应用[12~15],取得了很好的效果. 主要方法流程如公式(1)[15],根据 2018 年在线监测污染物年均浓度数据和燃料理论烟气量,获得每个火电企业的排放因子如公式(3),结合环境统计企业的燃料消耗量,自下而上得到每个火电企业的排放量. 对于没有安装 CEMS 的企业,该企业的排放浓度由相同类型机组且执行相同标准的统计特征值来表征.



中国香港、澳门、台湾和西藏地区资料暂缺,下同

图 1 2018 年中国火电企业分布示意

Fig. 1 Distribution of China's power plants in 2018

$$E_m = \sum_n \sum_i AC_{n,i} \times EF_{n,i} \quad (1)$$

$$C_{AVG_{n,i}} = \frac{\sum_j \sum_h C_{j,h}}{\sum_j Oph_j} \quad (2)$$

$$EF_{n,i} = C_{AVG_{n,i}} \times V_{n,i} \quad (3)$$

式中,E_m 为排放量,$t \cdot a^{-1}$; EF 为排放因子,$g \cdot kg^{-1}$; AC 为环境统计燃料消耗量,$t \cdot a^{-1}$; 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,$mg \cdot m^{-3}$; $C_{j,h}$ 为在线监排口污染物浓度小时均值,$mg \cdot m^{-3}$; j 为排口编号; h 为运行小时数; Oph 为纳入分析的监测小时数; V 为理论烟气量,$m^3 \cdot kg^{-1}$(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).

2 结果与讨论

2.1 火电排放浓度时空特征分析

2.1.1 空间分析

由图 2 可知, 2018 年全国各省火电 SO_2、NO_x 和烟尘平均排放浓度范围为 2.47 ~ 197.70、21.35

~129.11 和 1.63 ~ 20.08 mg·m^{-3}，其均值分别为 37.57、56.71 和 7.41 mg·m^{-3}，与 2015 年[15]相比，分别下降了 58.71%、43.12% 和 60.79%.

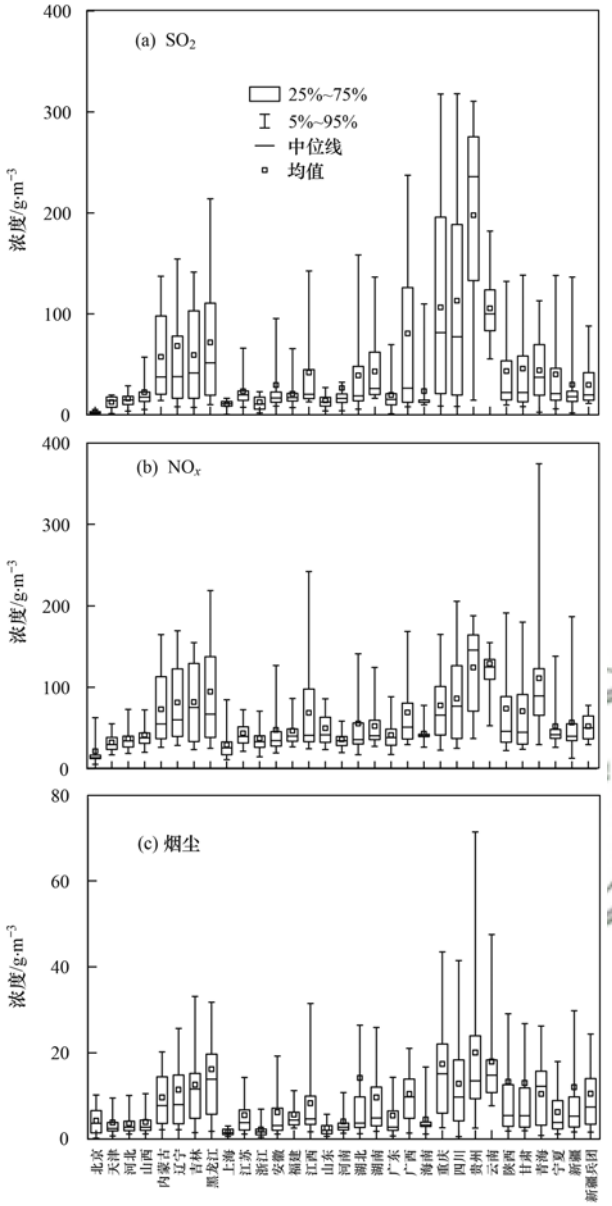


图 2　基于在线监测分析得出的火电排放浓度分布

Fig. 2　Distribution of emission concentrations for power plants in each province based on CEMS

北京、天津和河北等 15 个地区的火电烟气 SO_2 平均排放浓度基本达到超低排放 35 mg·m^{-3}限值要求；江西、湖北和湖南等 7 个地区的排放均值在 40.04 ~45.76 mg·m^{-3}，基本达到《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223-2011)[21]的特别排放限值要求(50 mg·m^{-3})；平均排放浓度最高的是西南地区（高硫煤质地区），GB 13223-2011 明确要求贵州和云南等地的现有与新建火电燃煤锅炉分别执行 400 mg·m^{-3}和 200 mg·m^{-3}.

北京和天津等 13 个地区电厂烟气 NO_x 排放均值达到超低排放 50 mg·m^{-3}限值要求；江西和湖北等 15 各地区 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 52.09 ~ 94.43 mg·m^{-3}；平均排放浓度高的省份为贵州和云南，平均浓度在 120 mg·m^{-3}以上.

中国火电行业烟尘排放，整体表现较好，基本达到 GB 13223-2011 的特别排放限值要求（20 mg·m^{-3}）；北京、天津和河北等 17 个地区的排放均值达到超低排放限值要求(10 mg·m^{-3}).

根据 2018 年中国各企业 SO_2、NO_x 和烟尘的平均排放浓度，表征企业是否达到超低标准. 结果显示，2018 年中国火电行业装机容量超低排放覆盖率已超过 74.1%，提前达到 2020 年完成 5.8 亿 kW[5]机组超低排放改造的任务.

2.1.2　月度分析

2018 年中国火电行业大气污染物月均排放浓度基本保持下降趋势(图 3)，2018 年 1 月，火电行业 SO_2、NO_x 和烟尘平均浓度为 38.59、60.45 和 7.78 mg·m^{-3}，2018 年 12 月火电行业 SO_2、NO_x 和烟尘月均浓度下降到 33.77、55.86 和 7.62 mg·m^{-3}，比 1 月分别下降了 12.5%、7.6% 和 2.0%. 图 3 结果显示，2018 年中国火电行业 SO_2、NO_x 和烟尘排放浓度月变化规律与火电发电量[22]（国家统计局 1 ~2 月发布数据为累计发电量，本研究暂不分析 1 ~2 月发电量）月变化规律没有显著的相关性. 但是，随着对燃煤电厂排放限制提出更高标准[21]，行业的执行标准对排放浓度的导向性影响已显著高于煤质参数等工况因素，从图 3 中可以明显看出，4 月和 10 月等发电负荷较低的月份，氮氧化物排放浓度均值明显稍高，这可能与低负荷脱硝技术的投运及达标稳定性有关[23]，氮氧化物受整体负荷的影响高于烟尘和二氧化硫.

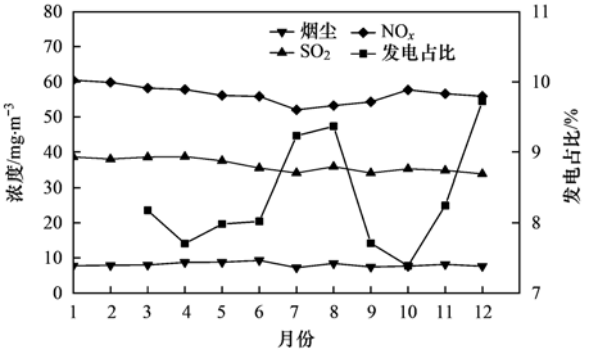


图 3　2018 年中国火电行业排放浓度的月度变化分布

Fig. 3　Distribution of monthly emission concentrations in China's thermal power industry in 2018

2.2　煤电排放因子分析

2018 年中国燃煤发电机组 SO_2 排放因子为 0.01 ~ 2.6 g·kg^{-1}，95% 分位数 0.07 ~ 0.97

$g \cdot kg^{-1}$,平均值为 0.3 $g \cdot kg^{-1}$(比 2015 年下降了 55.2%);NO_x 排放因子为 0.03 ~ 2.8 $g \cdot kg^{-1}$,95% 分位数 0.23 ~ 0.98 $g \cdot kg^{-1}$,平均值为 0.48 $g \cdot kg^{-1}$(比 2015 年下降了 36.84%);烟尘的排放因子为 0.002 ~ 1.23 $g \cdot kg^{-1}$,95% 分位数 0.01 ~ 0.16 $g \cdot kg^{-1}$,平均值为 0.06 $g \cdot kg^{-1}$(比 2015 年下降了 62.5%).

由表 1,各省煤电排放因子有一定的地域差异. SO_2 平均排放因子较大的省是贵州(1.20 $g \cdot kg^{-1}$);NO_x 平均排放因子较大的省是贵州(0.86 $g \cdot kg^{-1}$);烟尘平均排放因子较大的省是重庆(0.20 $g \cdot kg^{-1}$). 西南地区(贵州和云南等地)排放因子较高,这主要是由于西南地区属于高硫煤地区,火电排放浓度较高,导致排放因子较高.

表 1 "煤电"污染物的年均排放因子[1)]/$g \cdot kg^{-1}$

Table 1 Annual average emission factors of coal-fired power plants in each province/$g \cdot kg^{-1}$

地区	SO_2		NO_x		烟尘	
	本研究均值(HPEC, 2018 年)	2015 年研究均值(HPEC, 2015 年)	本研究均值(HPEC, 2018 年)	2015 年研究均值(HPEC, 2015 年)	本研究均值(HPEC, 2018 年)	2015 年研究均值(HPEC, 2015 年)
北京	0.04	0.12	0.13	0.51	0.06	0.05
天津	0.14	0.33	0.38	0.77	0.05	0.16
河北	0.13	0.33	0.29	0.47	0.04	0.08
山西	0.20	0.64	0.36	0.73	0.04	0.12
内蒙古	0.50	0.73	0.68	0.69	0.09	0.18
辽宁	0.49	0.76	0.66	0.95	0.11	0.24
吉林	0.49	0.66	0.64	1.03	0.12	0.20
黑龙江	0.52	1.00	0.71	1.28	0.13	0.31
上海	0.09	0.31	0.21	0.46	0.01	0.05
江苏	0.19	0.45	0.36	0.59	0.05	0.11
浙江	0.11	0.45	0.31	0.57	0.02	0.09
安徽	0.26	0.47	0.42	0.69	0.05	0.14
福建	0.20	0.40	0.44	0.52	0.06	0.12
江西	0.38	1.02	0.58	0.84	0.06	0.19
山东	0.11	0.67	0.40	0.85	0.02	0.15
河南	0.16	0.69	0.32	0.81	0.04	0.14
湖北	0.35	0.67	0.55	0.93	0.06	0.13
湖南	0.37	0.90	0.45	0.94	0.10	0.38
广东	0.20	0.39	0.42	0.49	0.07	0.10
广西	0.86	1.57	0.63	0.83	0.11	0.37
海南	0.21	0.95	0.40	0.69	0.04	0.12
重庆	1.10	1.53	0.80	0.83	0.20	0.44
四川	0.85	1.15	0.63	0.68	0.09	0.10
贵州	1.20	1.45	0.86	0.91	0.14	0.18
云南	0.83	1.03	0.83	0.72	0.13	0.18
陕西	0.36	0.86	0.56	0.96	0.11	0.21
甘肃	0.36	0.73	0.56	0.91	0.07	0.24
青海	0.38	0.56	0.82	1.87	0.15	0.26
宁夏	0.29	0.82	0.42	0.73	0.06	0.14
新疆	0.25	0.63	0.54	0.83	0.08	0.27
新疆兵团	0.32	0.85	0.48	0.85	0.12	0.20
平均值	0.30	0.67	0.48	0.76	0.06	0.16

1)2015 年数据来自本研究团队 2015 年火电排放清单[15];中国香港、澳门、台湾和西藏地区资料暂缺,下同

2.3 非燃煤机组排放因子分析

非燃煤发电机组的排放因子结果如表 2 所示,由于样本较少,未进行分省统计. 2018 年非燃煤发电机组的排放因子整体小于 2015 年的结果[15]. 由于我国燃油发电规模近年持续减少,而生物质发电和燃气发电规模不断上涨,非煤机组排放因子的下降说明了我国生物质和燃气发电的管控效果显著.

2.4 火电排放绩效值及排放量分析

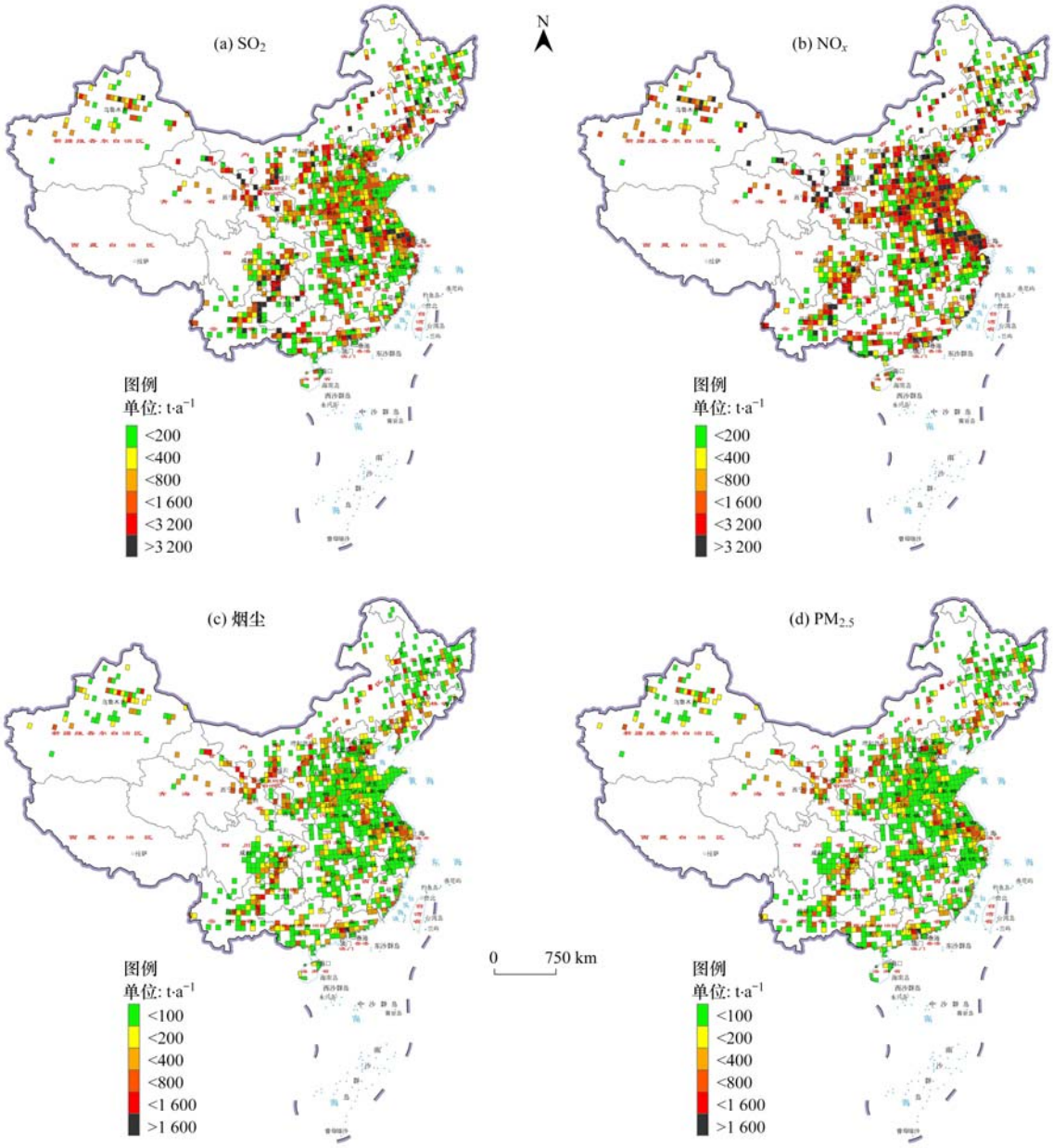
表 3 和图 4 结果显示,2018 年中国火电 SO_2、NO_x、烟尘和 $PM_{2.5}$ 排放量分别为 72.14、118.38、14.90 和 13.59 万 $t \cdot a^{-1}$,与 2015 年[15]相比,排放量分别下降了 41.32%、19.29%、48.12% 和 40.39%;其中内蒙古火电 SO_2、NO_x、烟尘和 $PM_{2.5}$ 排放量最高,分别为 9.86、13.76、1.73 和 1.60 万 $t \cdot a^{-1}$,这主要是由内蒙古自治区大型煤电基地燃煤活动强度较高且全区控制水平弱于东部发达地区导致.

SO_2、NO_x、烟尘和 $PM_{2.5}$ 平均排放绩效值分别

表 2　不同燃料机组污染物的平均排放因子

Table 2　Average emission factors of thermal power using varied fuels

项目	SO_2		NO_x		烟尘	
	2018 年均值	2015 年均值	2018 年均值	2015 年均值	2018 年均值	2015 年均值
燃气/$g\cdot m^{-3}$	0.09	0.18	0.44	0.78	0.04	0.06
燃油/$g\cdot kg^{-1}$	1.91	7.5	1.37	2.22	0.67	1.7
生物质/$g\cdot kg^{-1}$	0.23	0.55	0.5	0.87	0.09	0.1



审图号: GS(2019)1815号　自然资源部 监制

图 4　2018 年中国火电大气污染物排放量空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of air pollutants emissions from thermal power, 2018

为 0.16、0.26、0.033 和 0.03 $g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$，与 2015 年相比，排放绩效值分别下降了 50%、33.3%、62.5% 和 50%[15]. SO_2 排放绩效值范围为 0.03 ~ 0.75 $g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$，NO_x 排放绩效值范围为 0.06 ~ 0.85 $g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$，烟尘排放绩效值范围为 0.01 ~ 0.12 $g\cdot(kW\cdot h)^{-1}$.

与文献[8,15,24,25]的排放量对比如图 5 所示，相同年份，火电排放清单(HPEC)SO_2、NO_x 和烟尘排放量低于其它研究者排放量，一方面数据统计口径存在 2%~5% 的偏差，如中电联主要覆盖了全国6 000 kW·h及以上电厂约11.3 亿kW·h的机组数据；而在计算方法方面，本研究使用大量高频小时

表 3 各省火电大气污染物排放量和排放绩效值[1)]

Table 3 Provincial thermal power air pollutant emissions and performance values

地区	SO_2	NO_x	烟尘	$PM_{2.5}$
北京	0.09(0.02)	0.29(0.06)	0.02(0.004)	0.02(0.004)
天津	0.48(0.06)	1.15(0.13)	0.16(0.02)	0.15(0.02)
河北	2.23(0.03)	4.62(0.06)	0.53(0.01)	0.5(0.01)
山西	3.21(0.12)	6.3(0.24)	0.58(0.02)	0.55(0.02)
内蒙古	9.86(0.3)	13.76(0.42)	1.73(0.05)	1.6(0.05)
辽宁	3.72(0.29)	5.32(0.41)	0.79(0.06)	0.7(0.05)
吉林	2.33(0.23)	3.29(0.32)	0.56(0.05)	0.49(0.05)
黑龙江	3.2(0.40)	4.88(0.61)	0.82(0.10)	0.71(0.09)
上海	0.41(0.04)	1.01(0.10)	0.09(0.01)	0.07(0.01)
江苏	4.72(0.11)	8.93(0.21)	1.17(0.03)	1.07(0.03)
浙江	1.77(0.07)	4.8(0.19)	0.28(0.01)	0.26(0.01)
安徽	2.46(0.09)	4.4(0.17)	0.47(0.02)	0.44(0.02)
福建	1.26(0.08)	2.88(0.19)	0.36(0.02)	0.33(0.02)
江西	1.27(0.13)	1.95(0.19)	0.23(0.02)	0.21(0.02)
山东	3.07(0.07)	9.3(0.22)	0.45(0.01)	0.42(0.01)
河南	2.63(0.09)	4.8(0.17)	0.53(0.02)	0.5(0.02)
湖北	1.5(0.11)	2.62(0.19)	0.31(0.02)	0.3(0.02)
湖南	1.2(0.15)	1.62(0.2)	0.24(0.03)	0.22(0.03)
广东	2.7(0.07)	6.18(0.17)	0.89(0.02)	0.8(0.02)
广西	3.04(0.4)	2.59(0.34)	0.4(0.05)	0.37(0.05)
海南	0.21(0.07)	0.46(0.16)	0.04(0.02)	0.04(0.01)
重庆	2.44(0.44)	2.12(0.39)	0.49(0.09)	0.45(0.08)
四川	2.01(0.08)	1.86(0.07)	0.22(0.01)	0.19(0.01)
贵州	4.81(0.73)	3.41(0.52)	0.58(0.09)	0.53(0.08)
云南	1.86(0.75)	2.1(0.85)	0.29(0.12)	0.27(0.11)
陕西	2.24(0.13)	3.92(0.22)	0.71(0.04)	0.64(0.04)
甘肃	1.57(0.14)	2.32(0.21)	0.35(0.03)	0.32(0.03)
青海	0.41(0.19)	0.93(0.43)	0.16(0.08)	0.15(0.07)
宁夏	2.1(0.15)	3.37(0.24)	0.41(0.03)	0.34(0.02)
新疆	2.43(0.12)	5.48(0.27)	0.75(0.04)	0.67(0.03)
新疆兵团	0.89(0.10)	1.7(0.19)	0.29(0.03)	0.27(0.03)
总和	72.14(0.16)	118.38(0.26)	14.90(0.033)	13.59(0.03)

1) 括号外为排放量(万 $t \cdot a^{-1}$);括号内为排放绩效值 $[g \cdot (kW \cdot h)^{-1}]$

数据,基于实时在线监测数据计算,对时间尺度上的响应远超传统的排放因子法,这是导致清单结果差异的主要因素. HPEC(2015 年)的 SO_2、NO_x 和烟尘排放量比中电联分别低 39.0%、18.3% 和 27.5%[15],尽管 2018 年中国火电发电量相比 2016 年增加了 12.22%,但 HPEC(2018)的 SO_2、NO_x 和烟尘排放量比 2016 年中电联排放量分别降低 63.5%、29% 和 62.8%, 2018 年中国火电行业装机容量超低排放覆盖率已达 74.1%,这说明 2018 年中国火电超低改造减排效果显著.

2.5 不确定性分析

本研究清单的不确定性主要来源于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. 本研究通过采用蒙特卡罗方法对 CEMS 浓度在日维度数据基础上,依照各企业的概率分布,随机生成数值,并进行了10 000次模拟,估计了火电污染物排放量的误差范围. 分析结果表明,本研究清单的 SO_2、NO_x 和烟尘排放量误差在 ±1.09% 以内.

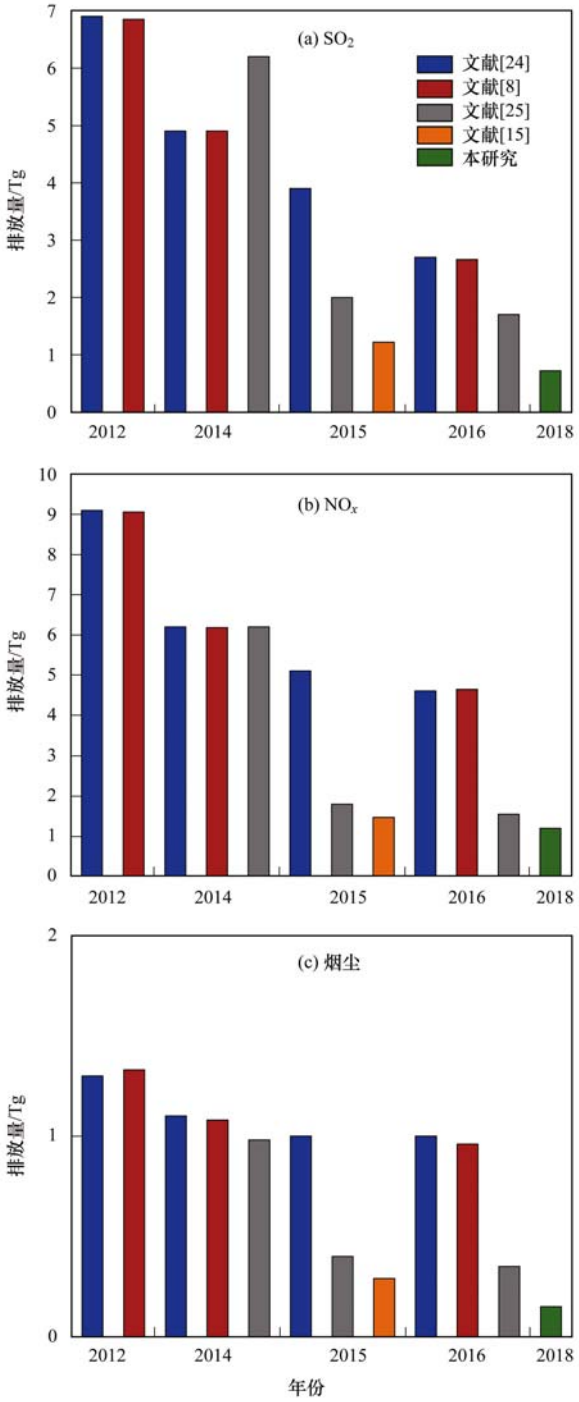


图 5 与其他研究者排放量对比

Fig. 5 Comparison of emissions with other studies

3 结论

(1)以高时间分辨率的在线监测数据可客观反映火电行业排放现状,结果显示,当前超低排放政策效果显著, 2018 年,中国火电行业超低排放覆盖率已达 74.1%,超低改造取得重大进展,提前完成

2020 年改造目标. 2018 年,火电行业 SO_2、NO_x、烟尘和 $PM_{2.5}$ 总排放量分别为 72.14、118.38、14.90 和 13.59 万 $t \cdot a^{-1}$.

(2)除煤电行业外、生物质及燃气发电同样得到了有效治理. 经济较为发达的区域(“2 + 26”城市、长三角地区),排放浓度均值明显低于其他地区,其中北京、上海和天津等 13 个地区的火电排放浓度基本达到超低排放要求；而东北地区和西南地区的污染物浓度偏高,其中贵州省和云南省排放浓度整体较高,超低改造有待论证.

(3)中国火电行业不同省份和区域的 SO_2、NO_x 和烟尘的排放量有一定的差异,主要集中在东部和北部地区. 虽然平均排放浓度水平和排放绩效值相对较低,但是各项污染物排放量相对较高,这主要是相关省份和区域的活动强度较高. 在时间尺度上,氮氧化物在低负荷条件下的排放情况稍差于其他时段,受发电负荷的影响仍旧比较明显,二氧化硫及烟尘治理相对稳定.

参考文献：

[1] 刘斯颉. 坚持底线思维 创新管理方式 推进协同共享 确保电力生产安全、稳定、高效运行——在 2019 年全国电力行业设备管理工作会议暨中国电力设备管理协会一届五次会员代表大会上的工作报告(摘要)[J]. 电力设备管理, 2019, (3): 18-39.

[2] 中华人民共和国环境保护部. 中国环境统计年报·2015[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.

[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. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014-2020 年)[EB/OL]. http://www.gov.cn/foot/2014-09/19/content_2753137.htm, 2014-09-19.

[4] 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.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/W020151215366215476108.pdf, 2015-12-11.

[5] 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.

[6] 中华人民共和国生态环境部. 2018 中国生态环境状况公报[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201905/P020190619587632630618.pdf, 2019-05-22.

[7] 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 and Physics, 2013, **13**(21): 11019-11058.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.
Bo X, Wang G, Wen R, *et al*. Air pollution effect of the thermal power plants in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(2): 364-373.

[11] Zhao Y, Wang S X, 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.

[12] 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.
Zhang Y J, Kong S F, Tang L L, *et al*. Analysis on emission inventory and temporal-spatial characteristics of pollutants from key coal-fired stationary sources in Jiangsu province by on-line monitoring data[J]. Environmental Science, 2015, **36**(8): 2775-2783.

[13] 伯鑫, 赵春丽, 吴铁, 等. 京津冀地区钢铁行业高时空分辨率排放清单方法研究[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(8): 2554-2560.
Bo X, Zhao C L, Wu T, *et al*. Emission inventory with high temporal and spatial resolution of steel industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. China Environmental Science, 2015, **35**(8): 2554-2560.

[14] 伯鑫, 何友江, 商国栋, 等. 基于 CEMS 全国污染源清单数据库系统开发与应用[J]. 环境工程, 2014, **32**(8): 105-108, 113.
Bo X, He Y J, Shang G D, *et al*. Development and application of the national pollutant emission inventory database system with CEMS[J]. Environmental Engineering, 2014, **32**(8): 105-108, 113.

[15] 崔建升, 屈加豹, 伯鑫, 等. 基于在线监测的 2015 年中国火电排放清单[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(6): 2062-2074.
Cui J S, Qu J B, Bo X, *et al*. High resolution power emission inventory for China based on CEMS in 2015[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(6): 2062-2074.

[16] 阚慧, 伯鑫, 屈加豹, 等. 2015 年海南省火电行业大气环境影响研究[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(1): 428-439.
Kan H, Bo X, Qu J B, *et al*. Air quality impacts of power plant emissions in Hainan Province, 2015[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(1): 428-439.

[17] Tang L, Qu J B, Mi Z F, *et al*. Substantial emission reductions from Chinese power plants after the introduction of ultra-low emissions standards[J]. Nature Energy, 2019, **4**(11): 929-938.

[18] 伯鑫, 屈加豹, 田军, 等. 全国火电排放清单研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.

[19] Zhang Y, Bo X, Zhao Y, *et al*. Benefits of current and future policies on emissions of China's coal-fired power sector indicated by continuous emission monitoring[J]. Environmental Pollution, 2019, **251**: 415-424.

[20] Liu X, Gao X, Wu X B, *et al*. Updated hourly emissions factors for Chinese power plants showing the impact of widespread ultralow emissions technology deployment[J]. Environmental science & technology, 2019, **53**(5): 2570-2578.

[21] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准[S].

[22] 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 = A01, 2019-12-15.

[23] 赵雪, 程茜, 侯俊先. 脱硫脱硝行业技术发展综述[J]. 中国环保产业, 2018, (9): 14-22.

[24] Zheng B, Tong D, Li M, *et al*. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, **18**(19): 14095-14111.

[25] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2018[M]. 北京: 中国市场出版社, 2018.

HUANJING KEXUE Vol. 41 No. 9
Environmental Science (monthly) Sep. 15, 2020

CONTENTS