

2010~2015年中国燃煤电厂NO_x排放特征

蒋春来,宋晓晖,钟悦之,王彦超,雷宇* (环境保护部环境规划院,北京 100012)

摘要: 基于中国2011~2015年发电企业逐台燃煤机组基础信息、活动水平及控制技术等,建立了燃煤电厂NO_x排放量计算方法和排放数据库.利用该方法,计算了2011~2015年逐台机组NO_x排放量,分析了2010~2015年中国燃煤电厂NO_x排放特征.结果表明:中国燃煤电厂NO_x排放量自2010年的1073万t增加到2011年的1132万t,达到排放峰值,随后逐年下降,到2015年下降到522万t.燃煤电厂NO_x排放地区分布不均衡,2015年内蒙、山东、江苏、江西、河南、河北、辽宁是排放量最大的省份,占中国燃煤电厂排放总量的48.8%.上海、江苏、天津、宁夏、山东、浙江和山西是排放强度最大的省份.从机组规模来看,单台容量在300~<600MW之间的燃煤机组是NO_x排放的主要来源,当机组成容量从100MW提高到1000MW时,NO_x平均排放绩效从2.91g/kWh降至0.48g/kWh,下降了近84%,这主要是由于装机容量越大的燃煤发电机组,电力工业技术水平和污染治理水平越高,NO_x平均绩效越低,环境行为越好.

关键词: 电厂; NO_x; 排放特征; 排放清单; 中国

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2018)08-2903-08

Characteristics of NO_x emissions from coal-fired power plants in China from 2010 to 2015. JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, WANG Yan-chao, LEI Yu* (Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2018,38(8): 2903~2910

Abstract: The activity data and technical information of coal-fired power units in China from 2011 to 2015 were collected. A NO_x emission calculating model and an emission database was developed for coal-fired power plants. And the NO_x emissions characteristics of coal-fired power plants in China from 2011~2015 were analysed. NO_x emissions increased from 10.73million tons in 2010 to 11.32million tons in 2011, then decreased in the following 4years, to 5.22million tons in 2015. The layout of NO_x emissions is uneven. Inner Mongolia, Shandong, Jiangsu, Jiangxi, Henan, Hebei and Liaoning contributed 48.8% of total NO_x emissions from Chinese coal-fired power plants in 2015. Shanghai, Jiangsu, Tianjin, Ningxia, Shandong, Zhejiang and Shanxi ranked top 7by emission intensity. Units with capacity between 300MW and 600MW contribute the largest part of NO_x emissions. The average NO_x emission performance of 100MW level units was 2.91g/kWh, and which of 1000MW level units was 0.48g/kWh. The larger units performs better in terms of emissions because they apply better technology and install more advanced pollution abatement facilities.

Key words: power plant; NO_x; emission characteristics; emission inventory; China

一次颗粒物和二次颗粒物前体物(SO₂、NO_x、VOCs、NH₃)的大量排放是造成我国PM_{2.5}、臭氧等区域复合型污染的主要原因,其中NO_x排放负荷巨大、活性强、具有跨区域的环境影响特征,既是衡量全国空气质量的重要指标,也是导致区域复合型污染的关键因子^[1-2].十二五期间中国对导致区域复合型污染的关键因子NO_x进行了总量控制,其中电厂、机动车及工业行业是减排重点.燃煤电厂是中国最大的煤耗部门,根据全国污染源普查数据统计,2010年NO_x排放约占中国的47%,且具有远距离传输的特点,研究燃煤电厂NO_x的排放特征,对评估控制成效,制订科学、合理的NO_x排放控制政策具有重要的意义.

高精度的燃煤电厂排放清单是评估NO_x排放控

制成效的基础,目前中国基于逐台机组的燃煤电厂NO_x排放研究很少,大部分排放是采用逐省的煤炭消耗量进行宏观估算或者基于排放系数和污染源重点调查相结合的方法进行估算,研究以全国尺度和区域尺度(京津冀、长三角以及珠三角)居多,在重点地区以地级市研究居多^[3-7].以机组为单元的自下而上的全国燃煤电厂排放量估算很少,Zhao等^[8]估算了中国燃煤电厂2000年和2005年逐台机组的NO_x排放清单,其他研究者采用类似的方法分别编制了中国燃煤电厂2005~2010年的机组水平的NO_x

收稿日期: 2018-01-05

基金项目: 国家重点研发计划大气污染成因与控制技术研究专项(2016YFC0208400)

* 责任作者, 研究员, leiyu@caep.org.cn

排放清单^[9-14],但由于基于单位机组的研究对数据的可靠性和精确度要求很高,现有的大部分研究难以准确获取每个机组的全部影响因素,对于缺失的信息,采用综合评估等方法进行补充,造成误差较大.因此,笔者基于2011~2015年全国火电厂上报的逐台的火电机组基本信息、活动水平、控制技术 etc 数据,并结合历年现场调研对数据的校验,测算了全国燃煤电厂 NO_x 的排放量,分析了燃煤电厂 NO_x 的时空分布特征等,以期为中国燃煤电厂 NO_x 排放控制提供决策依据.

1 方法与数据

1.1 计算方法

本研究基于中国2011~2015年大陆地区31个省(区、市)(不含西藏)总量减排数据中每台发电机组的基本信息、工艺类型、活动水平、排放因子、控制水平 etc 数据,并结合历年现场调研,建立了涵盖所有燃煤机组的(包括独立火电厂机组、自备电厂的纯凝燃煤发电机组和热电联产机组)的排放数据库,测算了逐台机组(2010年在役5798台燃煤机组,2015年在役6029台燃煤机组)的 NO_x 排放量.燃煤电厂 NO_x 2010年排放量采用中国第一次污染源普查更新数据.2011~2015年机组 NO_x 排放量主要根据燃煤消耗量、排污系数和治理工程运行情况等进行测算.

未采取任何措施的燃煤机组 NO_x 排放量测算公式为:

$$E_i = M_i \times pf_i \times 10 \quad (1)$$

式中: E_i 为第 i 台机组以 NO₂ 计算的 NO_x 年排放量, t/a; M_i 为第 i 台机组煤炭消耗量,万 t; pf_i 为第 i 台机组产污强度, kg/t, 主要为2010年全国污染源普查该机组采用的系数.对于新建的燃煤机组,按照《“十二五”主要污染物总量减排核算细则》^[15](环发[2011]148号)新建机组排放系数取值;对于2010年底前未安装脱硝设施的机组,按照2010年该机组单位煤炭 NO_x 排放强度取值.

采取治理措施的燃煤机组 NO_x 排放量,应根据治理措施改造前后分时间段进行测算,治理措施包括进行低氮燃烧技术改造、新建脱硝设施、既有低氮燃烧改造又新建脱硝设施等,按照对应消耗的煤量、NO_x 去除率、脱硝效率分时间段测算.对于实施脱硝设施改造的机组,应根据脱硝设施改造前、后的

实际脱硝效率分别测算 NO_x 排放量.采取治理措施的燃煤机组 NO_x 排放量测算公式为:

$$E_{电i} = M_i \times pf_i \times (1 - \xi_i) \times (1 - \eta_i) \times 10 \quad (2)$$

式中: M_i 为核算期第 i 台机组不同时段煤炭消耗量,万 t,应根据治理措施的稳定运行时间分段选取; pf_i 意义同公式(1).对于2010年底前已安装脱硝设施的机组,按以下公式确定:

$$pf_i = \frac{E_{2010i}}{M_{2010i} \times 10} \div (1 - \eta_{2010i}) \quad (3)$$

η_{2010i} 为2010年第 i 台机组综合脱硝效率,%.对于2010年新投运的脱硝设施,需按全年折算综合脱硝效率, ξ_i 为低氮燃烧改造后相对低氮改造前提高的 NO_x 去除率,按下列公式确定:

$$\xi_i = \frac{C_{改造前} - C_{改造后}}{C_{改造前}} \quad (4)$$

式中: $C_{改造前}$ 为第 i 台机组进行低氮燃烧技术改造前的氮氧化物平均浓度, mg/Nm³; $C_{改造后}$ 为第 i 台机组进行低氮燃烧技术改造后的氮氧化物平均浓度, mg/Nm³; η_i 为核算期第 i 台机组脱硝设施稳定运行后综合脱硝效率, %.

1.2 数据获取

测算 NO_x 排放时需要确定的参数包括2011~2015年每台机组的排污系数、燃煤消耗量、燃煤挥发分、采取的污染治理技术及对应的综合去除效率 etc 数据.机组排污系数主要是采用污染源普查数据库中该锅炉类型对应的系数.本研究主要分析参与计算的燃煤消耗量、燃煤挥发分、控制技术 etc 控制水平.

1.2.1 火电厂燃煤消耗量 2010~2015年中国燃煤火电厂煤炭消耗量分别为18.6, 21.1, 20.9, 21.7, 21.5, 20.1 亿 t. 汇总数据与中电联公布的统计数据中的 ≥6MW 电厂燃煤消耗量相比高5%~9%左右^[16], 占全国煤炭消耗量的50%左右, 十二五期间年均增速约1.58%, 2011年较2010年的增长幅度较大, 为13.58%, 而2015年较2014年的降幅最大, 为6.40%, 与全国发电量的变化趋势基本一致. 2010~2015年中国大部分省份煤炭消耗量呈增长趋势(图1), 其中兵团、新疆、海南、宁夏、内蒙5省增幅最大, 分别为286.1%、235.8%、84.1%、52.2%和39.3%. 陕西、北京、云南、四川和湖南降幅最大, 分别为74.7%、70.5%、55.4%、45.6%和19.1%.

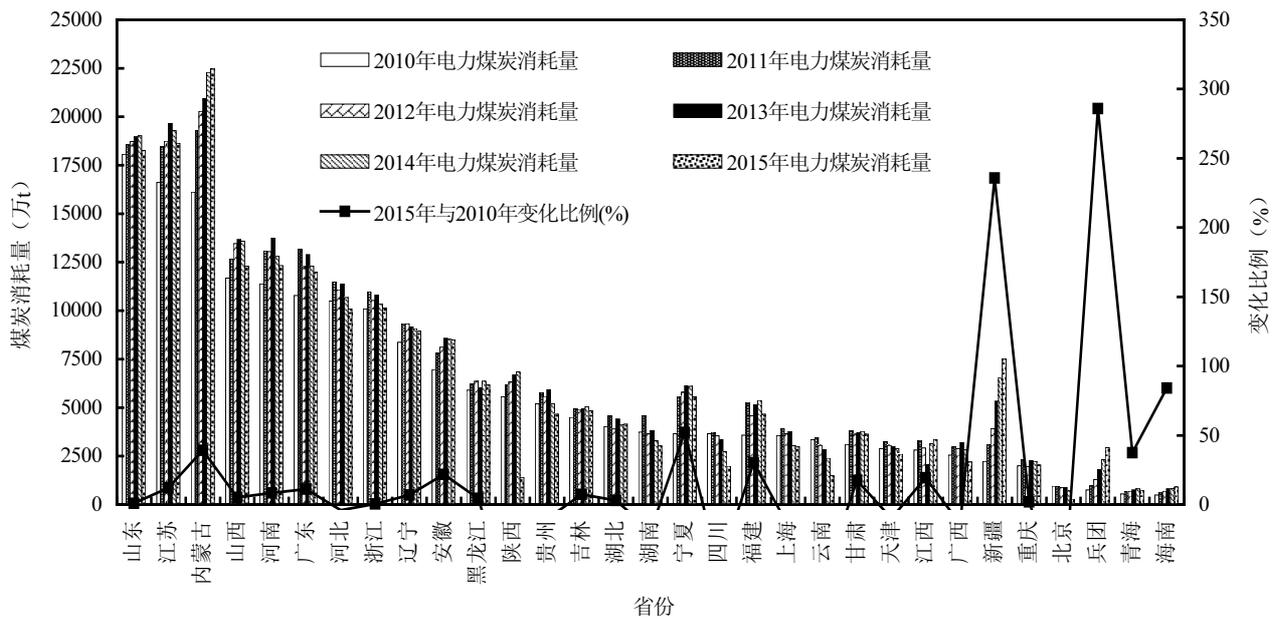


图 1 2010~2015 年中国各省(区、市)燃煤电厂煤炭消耗量
Fig.1 Coal consumption of coal-fired power units in China from 2010 to 2015

1.2.2 火电厂燃煤挥发份分布情况 燃煤电厂历年使用的煤种一般比较稳定,因此,本研究以 2015 年为例分析了燃煤挥发份分布情况.参与统计的 2015 年在役的 5059 台机组中,燃烧煤种的机组台数占比和燃煤量占比大小和顺序基本一致,从大到小顺序分别为烟煤($20% < V_{daf} \leq 37%$)、褐煤($V_{daf} > 37%$)、贫煤($10% < V_{daf} \leq 20%$)和无烟煤($V_{daf} \leq 10%$)(图 2),其中燃烧烟煤的机组台数和燃煤量占比均为 48%,平均装机容量约 150MW,其次为燃烧褐煤的机组,机组台数和燃煤量占比分别为 30%和 36%,平均装机容量最大,约 250MW,占比最小的为无烟煤,机组台数和燃煤量占比分别为 8%和 3%,平均装机容量仅为 60MW.

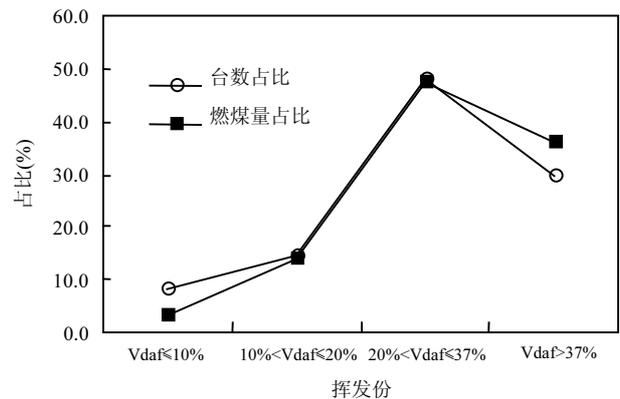


图 2 2015 年中国燃煤机组燃煤挥发份分布情况
Fig.2 The volatile level of coal used in power units in China in 2015

1.2.3 NO_x 排放控制技术及其 NO_x 的去除率 2010~2015 年,燃煤机组脱硝装机容量由 89×10^3 MW 增加到 83×10^4 MW,占全国燃煤机组的比例由 2%增加到 90%,已建脱硝设施的平均脱硝效率为 62%,其中约 95%的燃煤机组采用选择性催化还原(SCR)脱硝工艺,平均脱硝效率约为 64%左右,只有 4%的机组采用选择性非催化还原(SNCR)脱硝工艺,平均脱硝效率仅为 45.7%.此外,还有少量机组采用 SNCR/SCR 脱硝工艺.

全国各省十二五期间脱硝机组呈快速增长趋势(图 3),截至 2015 年底,北京、江苏、浙江、天津、贵州、安徽、江西、甘肃、河北、河南、湖北 11 省市脱硝机组占比达 95%以上,其中北京市燃煤机组全部安装了脱硝设施.新疆、海南、四川、重庆、黑龙江、青海、吉林 7 省的脱硝机组占比在 80%以下.从脱硝效率的情况来看(图 4),北京、重庆、天津、青海、海南、湖北、山东 7 省市脱硝效率较高,在 70%以上,其中北京最高达 90%.部分省份脱硝效率较低,其中宁夏最低,仅 40%.

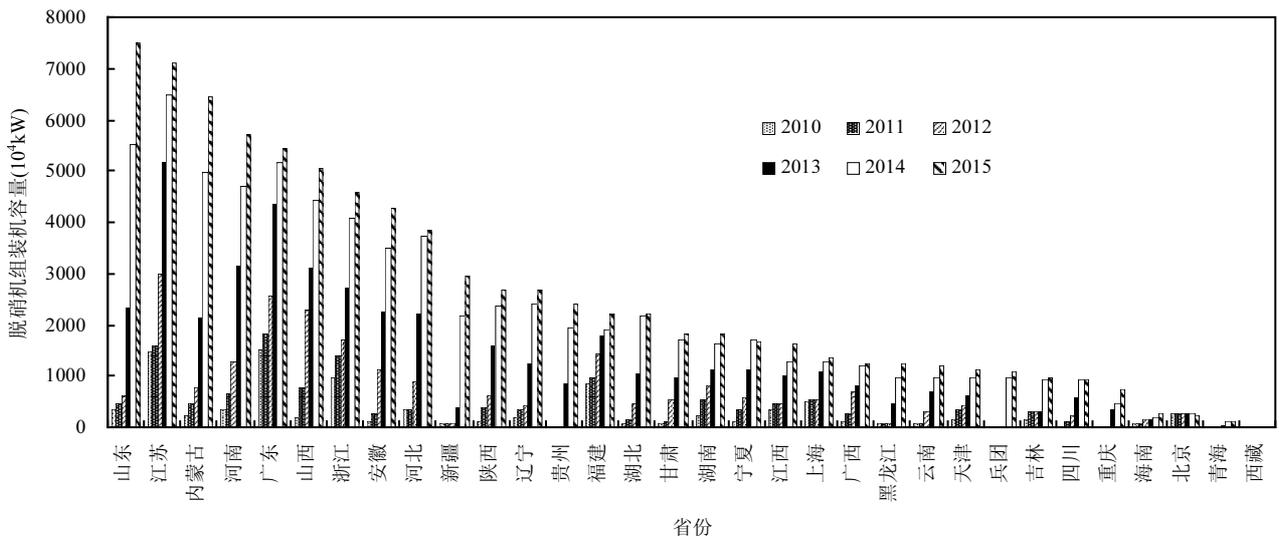


图3 2010~2015年中国各省(区、市)燃煤电厂脱硝装机容量变化

Fig.3 Total capacity of coal-fired power units installed with NO_x control facilities in China from 2010 to 2015

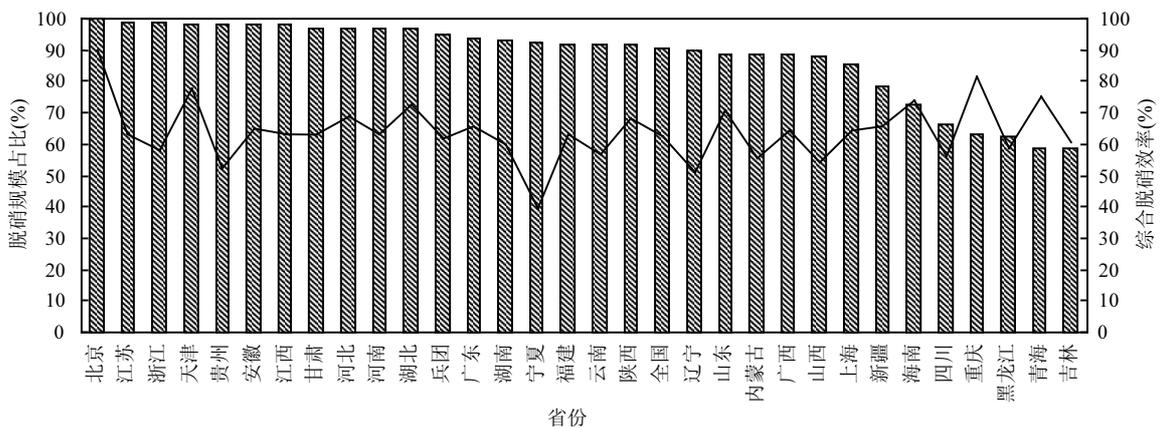


图4 2015年中国各省(区、市)燃煤机组占比及脱硝效率

Fig.4 Ratio of coal-fired power units with NO_x control facilities, and the NO_x removal efficiency by province in China in 2015

▨ 2015年脱硝燃煤机组占比 ——— 2015年燃煤机组综合脱硝效率

2 结果与讨论

2.1 2010~2015年NO_x的排放量

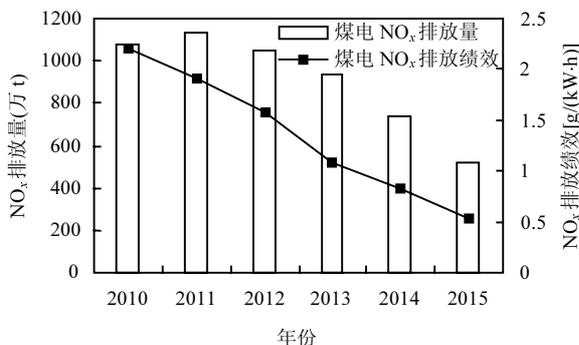


图5 2010~2015年中国燃煤电厂NO_x排放量变化趋势

Fig.5 NO_x emission volume from coal-fired power units in China from 2010 to 2015

2010~2015年中国煤电行业NO_x排放量为522~1132万t,自2010年的1073万t增加到2011年的1132万t,达到排放峰值,随后逐年下降,到2015年较2010年下降了51.3%。由于统计口径等的差异,本研究测算的历年全国电厂NO_x测算值与环境统计相比高2%~5%^[17]。煤电行业的排放绩效呈逐年下降趋势,其中2010年为2.21g/kWh,至2015年降至0.53g/kWh,较2010年降低76%。

煤电行业是中国NO_x排放控制的重点,2012年前中国燃煤电厂执行的NO_x排放标准较为宽松,GB 13223-2011^[18]对燃煤电厂NO_x排放控制提出了更高要求,与此同时,十二五节能减排综合性

工作方案也将 NO_x 排放列为约束性控制指标,要求电力行业开展减排工作.十二五期间新建机组全部采用低氮燃烧技术和安装脱硝设施,同时大批现役机组开展了低氮燃烧技术及脱硝技术改造,脱硝机组安装比例大幅提高(图 4),到 2015 年底,煤电脱硝比例达 90%,其中煤电机组超低排放改造完成 1.9 亿 kW.另一方面,十二五期间排放控制技术落后的小火电机组被大量淘汰,电力工业技术水平也显著提升^[11],能源利用效率提高,这也是燃煤电厂 NO_x 排放量下降、排放绩效水平不断提升的一个重要原因.

2.2 中国煤电行业 NO_x 排放的空间分布

2.2.1 排放的地区分布

中国燃煤电厂 NO_x 排放的地区分布不平衡,这与刁贝娣等^[19]研究的中国工业 NO_x 排放的空间分布相似.2015 年内蒙、山东、江苏、山西、河南、河北、辽宁是排放量最大的

省份,占全国排放总量的 48.8%,年排放量均在 25 万 t 以上.燃煤电厂 NO_x 年排放量最低的省份为北京、海南、青海和天津,年排放量均在 5 万 t 以下.虽然山东、江苏、河南、河北、辽宁五省面积仅占国土面积的 9%(不计算水域面积),但却集中了中国 28%的人口和 33%的 GDP.山西和内蒙是 2015 年全国原煤产量最大的 2 个省份,原煤产量占 2015 年中国总产量的 50%.由此可见,人口密度、经济发展水平、煤炭资源禀赋等对燃煤电厂的布局影响很大.

由图 6 还可见,相比于 2010 年,所有省份 NO_x 排放量均呈下降趋势,其中降幅最大的为北京、天津、湖北、云南、重庆、四川、湖南、上海、河南,下降比例均在 65%以上.各省的煤电消耗量、机组脱硝比例以及脱硝设施运行情况是影响 NO_x 排放量变化的主要因素.

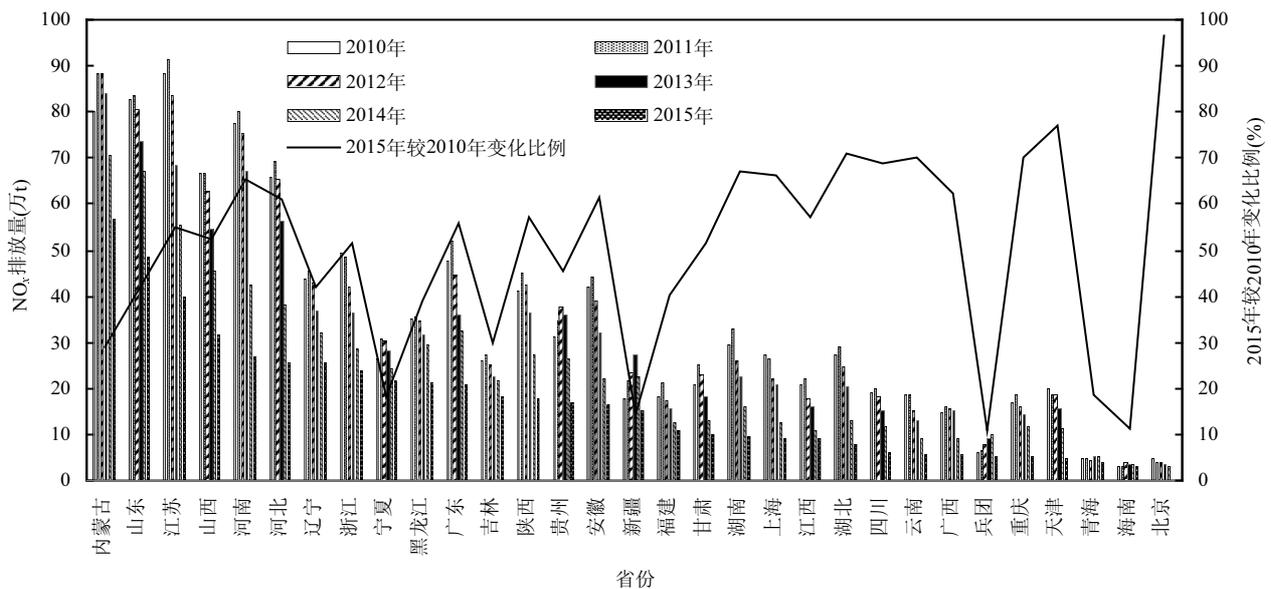


图 6 2010~2015 年中国各省(区、市)煤电机组 NO_x 排放量的变化趋势

Fig.6 Historical NO_x emissions from coal-fired power units by provinces, 2010~2015

2.2.2 NO_x 排放强度的空间分布

中国大陆地区 NO_x 排放强度(不计算水域面积)呈现逐年下降的趋势(图 7),2010 年燃煤电厂 NO_x 排放强度在 20kg/hm² 以上的省份有 15 个,到 2015 年减少到 7 个,NO_x 排放强度在 40kg/hm² 以上的省份则由 2010 年的 8 个下降到 2015 年的 1 个.排放强度空间差异很大,有从内陆到沿海逐渐增加的趋势,这与李艳新等^[3,20]研究

的中国大气 NO_x 排放强度的空间分布趋势基本一致.以 2015 年为例,NO_x 排放强度最高的是上海,达到了 143.2kg/hm²,其次是江苏(38.7kg/hm²)、天津(38.3kg/hm²)、宁夏(32.7kg/hm²)、山东(30.7kg/hm²)、浙江(23.4kg/hm²)和山西(20.2kg/hm²),排放强度最低的是青海(0.52kg/hm²)、新疆(0.96kg/hm²)、北京(0.97kg/hm²)、四川(1.23kg/hm²)和云南(1.42kg/hm²).

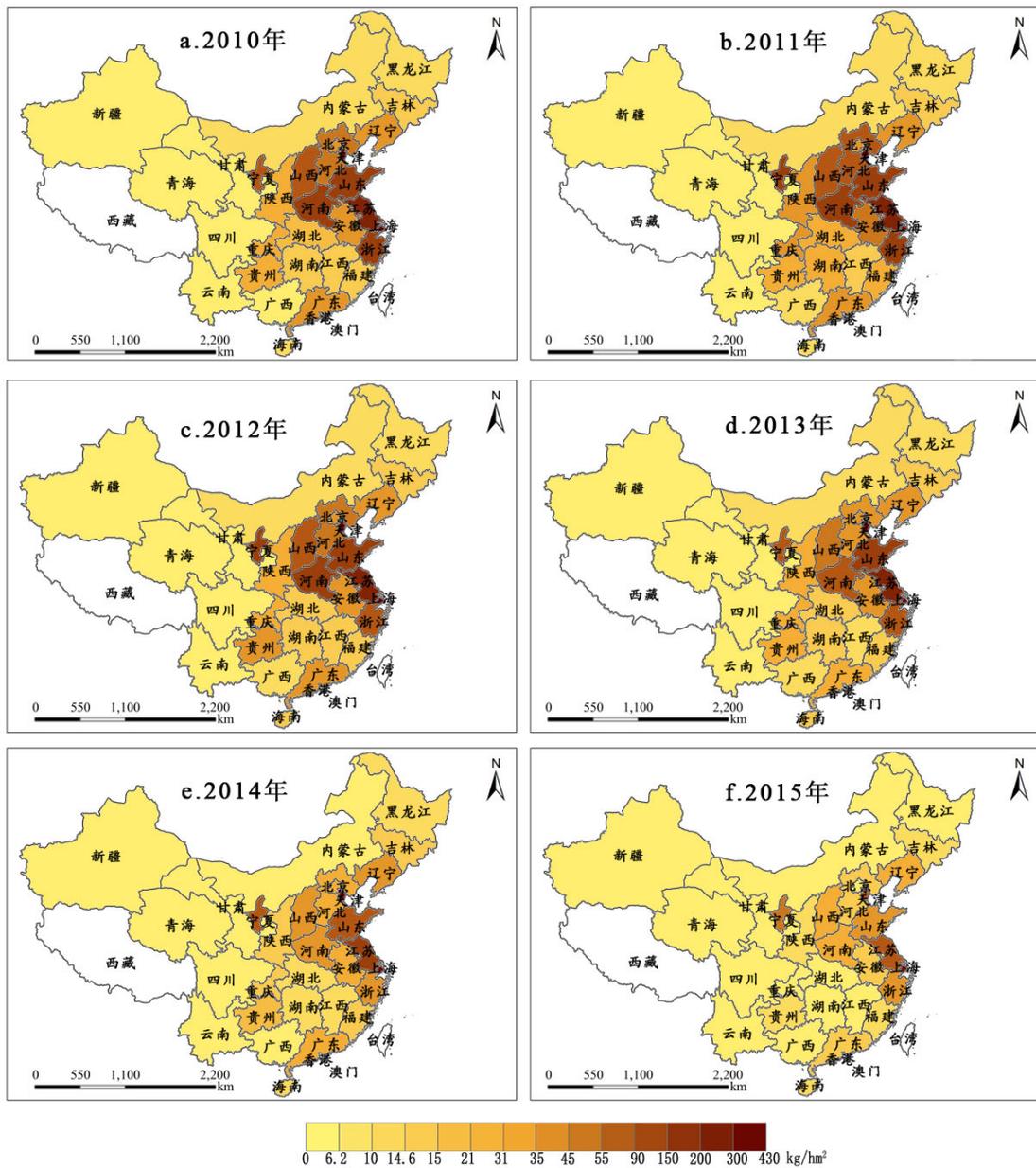


图7 2010~2015年中国各省(区、市)燃煤电厂NO_x年排放强度的时空分布

Fig.7 Historical layout of NO_x emission intensity from coal-fired units by province, 2010 to 2015

2.3 中国煤电行业NO_x排放规模分布

如图8所示,单台容量≤100、100~<200、200~<300、300~<600和>600MW燃煤机组的NO_x排放量分别为136,77,79,165,65万t.燃煤电厂NO_x排放主要集中在300~<600MW和<100MW的机组上,分别占比32%和26%.其中<100MW的机组装机容量占比和发电量占比最小,均约8%左右,燃煤量约消耗了17%,NO_x排放量却占了总排放量的1/4左右.对2749台,总装机容量约76×10⁴MW的机组的脱硝效率进行了分析,发现单台容量≤100、100~<200、

200~<300、300~<600和>600MW燃煤机组的综合脱硝效率分别为42%、57%、60%、63%和66%,其中机组装机容量越大,脱硝设施运转越好.选取925台装机容量为100,200,300,600,1000MW的燃煤发电机组,发现装机容量越大的燃煤发电机组,NO_x平均绩效越低,环境行为越好(图9).当机组装机容量从100MW提高到1000MW时,NO_x平均排放绩效从2.91g/kWh降至0.48g/kWh,下降了近84%.综合以上结果来看,装机容量大的燃煤发电机组,电力工业技术水平和污染治理水平较高,环境行为较好.

朱法华等^[21]通过对江苏省电力行业 SO₂ 等其他污染物排放绩效的研究,也得出类似结论,认为大容量机组在提高发电效率、减少污染物排放方面具有显著的优越性。

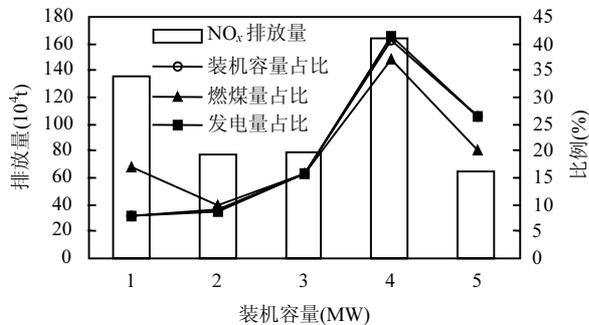


图8 2015年不同规模燃煤机组 NO_x 排放量、装机容量占比、燃煤量占比以及发电量占比

Fig.8 NO_x emissions, total capacity, coal consumption and electricity generation by capacity group in 2015

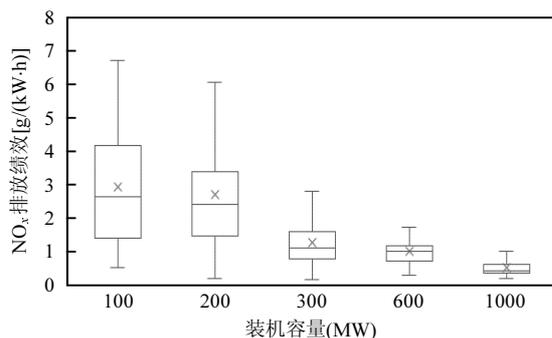


图9 2015年不同规模的燃煤机组 NO_x 排放绩效值

Fig.9 NO_x emission performance of Chinese coal-fired power units by capacity group in 2015

2.4 不确定性分析

排放量测算的相关参数的准确性给排放量的估算带来了不确定性.本研究的不确定性有:

(1)现场调研和文献调研发现,十二五期间中国燃煤电厂烟气排放连续在线监测系统(CEMS)烟道的取样布点的规范性较差,直接影响烟气流量流速测定结果的准确性^[22],只有少量安装规范的机组可以采用在线监测直接测量法测算 NO_x 排放量,为了结果具有系统可比性,所有机组 NO_x 排放量均采用排污系数法进行测算.由于排污系数是根据大量实测数据得到的经验系数,但具体到各个火电机组还受到生产工况、企业管理水平、原材料及清洁生产水平等因素的影响,排放因子与实际排放仍存在差

异,存在一定的不确定性.

(2)2010年以前的机组排污系数采用的是污染源普查数据库中机组对用的系数,2010年以后新建机组主要采用环保部发布的《“十二五”主要污染物总量减排核算细则》^[15]推荐的系数.由于近年电力工业技术发展迅速,推荐的系数可能高于近年实际排放情况^[23].

(3)该研究所采用的脱硝效率大部分是采用总量核查核定的效率,由于核查过程中部分企业不完全符合总量减排要求,包括减排台账的规范性、治污设施的运转稳定性较差等,综合脱硝效率的认定可能过于严格,部分机组 NO_x 排放量测算会有一定的偏差.

2.5 建议

通过对中国燃煤电厂 NO_x 排放特征的分析,今后 NO_x 排放控制应集中在以下几个方面.

(1)从煤电行业 NO_x 排放规模分布来看,环境行为较差的小容量的机组仍具有较大的减排潜力

(2)从煤电行业 NO_x 综合去除效果来看,仍有大部分地区整体综合脱硝效率较低,今后应加强脱硝设施的运行管理,使已有的治污设施切实发挥减排效益.

(3)从煤电行业 NO_x 排放的区域特征来看,东南沿海经济发达地区应作为下一步控制的重点.

3 结论

3.1 中国燃煤电厂 NO_x 排放量在2011年达到最高值(1132万t),此后逐年降低,2015年燃煤电厂 NO_x 排放量降为522万t.脱硝设施安装比例的大幅提高、小火电机组淘汰和电力工业技术水平的提高,是燃煤电厂 NO_x 排放量下降的主要原因.

3.2 中国燃煤电厂 NO_x 排放的地区分布很不均衡,内蒙、山东、江苏、山西、河南、河北、辽宁七省是我国燃煤电厂 NO_x 排放量最大的省份,占全国排放总量的48.8%.各省燃煤消耗量、装机容量、NO_x 控制技术水平等是排放量影响的主要因素.十二五期间,随着国家减排力度的加大、脱硝补贴电价的实施,脱硝机组占比逐渐加大,各省 NO_x 排放强度逐渐降低,2010年燃煤电厂 NO_x 排放强度在20kg/hm²以上的省份有15个,到2015年减少到7个,NO_x 排放强度在40kg/hm²以上的省份则由2010年的8个下降

到2015年的1个。

3.3 中国燃煤电厂 NO_x 排放主要集中在 300~ $\leq 600\text{MW}$ 和 $\leq 100\text{MW}$ 的机组上,其中装机容量占比 7.9%的 $\leq 100\text{MW}$ 的机组, NO_x 排放占比达到 26%,这主要是由于装机容量越小的燃煤发电机组,电力工业技术水平和污染治理水平越差, NO_x 平均绩效越高,环境行为较差。

参考文献:

- [1] 我国 NO_x 污染状况与环境效应及综合控制策略 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2008,44:323-330.
- [2] 卫星遥感观测中国 1996-2010 年氮氧化物排放变化 [J]. 科学通报, 2012,57(16):1446-145.
- [3] 李新艳,李恒鹏.中国大气 NH_3 和 NO_x 排放的时空分布特征 [J]. 中国环境科学, 2012,32(1):37-42.
- [4] 张 辉,贾思宁,范箴箴.燃气与燃煤电厂主要污染物排放估算分析 [J]. 环境工程, 2012,30(3):59-62.
- [5] 王志轩,赵 毅,潘 荔,等.中国燃煤电厂 NO_x 排放估算方法及排放量研究 [J]. 中国电力, 2009,42(4):59-62.
- [6] 王书肖,邱雄辉,张 强,等.我国人为源大气污染物排放清单编制技术进展及展望 [J]. 环境保护, 2017,45(21):21-26.
- [7] 李文青,郑新梅,谢放尖,等.南京市电力行业大气污染物排放清单建立及校验分析 [J]. 农业与生态环境, 2017,14:92-93.
- [8] 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.
- [9] 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 and Physics, 2012,12(10):4429-4447.
- [10] 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(408):320-325.
- [11] Liu F, Zhang Q, Tong D. High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015,15(23): 13299-13317.
- [12] 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 and Physics, 2013,13(2):487-508.
- [13] 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.
- [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] 环境保护部.关于印发《“十二五”主要污染物总量减排核算细则》的通知(环发[2011]148号)[EB/OL]. http://www.njhb.gov.cn/43188/43189/43197/201401/t20140102_2431620.html, 2014-01-01.
- [16] 电力工业统计资料汇编 [R]. 北京:中国电力企业联合会, 2011-2015.
- [17] 中华人民共和国环境保护部.2015年中国环境统计年报 [M]. 北京:中国环境出版社, 2016.
- [18] GB 13223-2011 火电厂大气污染物排放标准 [S].
- [19] 刁贝娣,曾克峰,苏攀达,等.中国工业氮氧化物排放的时空分布特征及驱动因素分析 [J]. 资源科学, 2016,38(9):1768-1779.
- [20] 王丽琼.中国氮氧化物排放区域差异及减排潜力分析 [J]. 地理与地理信息科学, 2010,26(4):95-103.
- [21] 朱法华,薛人杰,朱庚富,等.利用排放绩效分配电力行业 SO_2 排放配额的研究 [J]. 中国电力, 2003,36(12):76-79.
- [22] 殷晓红,陈 峰,佟 瑶,等.燃煤电厂脱硫烟气在线监测系统烟气流速测点的选择 [J]. 黑龙江电力, 2012,4(6):462-466.
- [23] Ma Zizhen, Deng Jianguo, Li Zhen, et al. Characteristics of NO_x emission from Chinese coal fired power plants equipped with new technologies [J]. Atmospheric Environment, 2016,131:164-170.

作者简介: 蒋春来(1979-),女,黑龙江绥化人,副研究员,博士,主要从事大气污染防治研究.发表论文 30 余篇。