

宗亚楠, 张强, 洪朝鹏, 等. 北京市燃煤源排放控制措施的污染物减排效益评估[J]. 环境科学研究, 2017, 30(10): 1645-1652.

ZONG Ya'nan, ZHANG Qiang, HONG Chaopeng, *et al.* Assessment of the benefits of emission reductions from coal-fired source emission control measures in Beijing[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(10): 1645-1652.

北京市燃煤源排放控制措施的污染物减排效益评估

宗亚楠¹, 张强², 洪朝鹏², 贺克斌^{1*}

1. 清华大学环境学院, 北京 100084

2. 清华大学地球系统科学系, 北京 100084

摘要: 为分析北京市燃煤源排放控制措施的污染物减排效益, 基于 MEIC(中国多尺度排放清单模型), 采用情景分析法, 评估了北京市电厂能源清洁化与末端治理、燃煤锅炉改造和城区平房区居民采暖改造等措施的污染物减排效益。结果表明, 相对于无控情景, 2013年北京市电厂能源清洁化与末端治理减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量为 1.28×10^4 、 2.10×10^4 、 5.13×10^4 和 4.98×10^4 t, 分别占无控情景的 85%、86%、87%、74%; 北京市燃煤锅炉改造减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量为 1.09×10^4 、 2.68×10^4 、 11.64×10^4 和 5.81×10^4 t, 分别占无煤改气情景的 83%、89%、83%、83%; 北京市老旧平房区的居民采暖改造减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量分别为 630、870、2 070 和 790 t, 均占无煤改电情景的 8%。研究显示, 北京市从 1998 年开始采取的各种减排措施有效地减少了污染物的排放, 对北京市空气质量改善具有重要意义。

关键词: 燃煤源; 能源结构; 末端治理; 减排效益

中图分类号: X51

文章编号: 1001-6929(2017)10-1645-08

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.02.67

Assessment of the Benefits of Emission Reductions from Coal-Fired Source Emission Control Measures in Beijing

ZONG Ya'nan¹, ZHANG Qiang², HONG Chaopeng², HE Kebin^{1*}

1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2. Department of Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract: To analyze the benefits of emission reductions from coal-fired source emission control measures, this work employed scenario analysis to quantify emission reductions from replacing coal-fired power with clean energy and application of end-of-pipe control technologies in power plants, comprehensive control on coal-fired boilers and residential heating renovation based on the model of Multi-resolution Emission Inventory for China (MEIC). The results showed that the emissions of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 and NO_x from power plants in Beijing were estimated to have been reduced 1.28×10^4 , 2.10×10^4 , 5.13×10^4 and 4.98×10^4 t in 2013, representing reductions of 85%, 86%, 87% and 74%, respectively. 1.09×10^4 , 2.68×10^4 , 11.64×10^4 and 5.81×10^4 t of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 and NO_x emissions were mitigated due to the comprehensive control measures for coal-fired boilers in 2013, representing reductions of 83%, 89%, 83% and 83%, respectively. Residential heating renovation projects by replacing coal with electricity in Beijing's conventional old house areas contributed to emission reductions of 630, 870, 2070 and 790 t for $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 and NO_x , representing reductions of 8%. The study showed that the emission reduction measures have reduced pollutant emissions effectively since 1998 and have significance for improving air quality in Beijing.

Keywords: coal-fired source; energy structure; end-of-pipe control; emission reduction benefits

收稿日期: 2017-03-31

修订日期: 2017-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(21521064)

作者简介: 宗亚楠(1990-), 女, 河北张家口人, zongyn14@mails.tsinghua.edu.cn.

* 责任作者, 贺克斌(1962-), 男, 四川成都人, 教授, 博士, 博导, 主要从事大气污染与控制研究, hekb@tsinghua.edu.cn

近年来,我国雾霾天气频发,空气污染给人们的生活和健康带来了严重危害^[1-3],引起了社会公众的广泛关注和各级政府的高度重视。煤炭长期以来都是北京市能源消费的重要部分,主要用于供热、发电、工业生产和居民炊事取暖等与居民生产生活息息相关的行业,以煤为主的能源结构是造成大气污染的重

要原因^[4-6]。

燃煤源的污染控制一直以来都是我国大气污染控制政策的重点^[7-10]。SO₂、NO_x、PM等大气污染物的末端控制技术能够有效减少污染物的排放,如静电除尘器对颗粒物的去除效率能达到99.5%^[11-12]。对燃煤源控制措施的研究可分为定性和定量两种,前者通过分析能源消费趋势及空气质量趋势等历史数据,揭示燃煤源控制与空气质量改善的相关性^[13-15]。LIU等^[16]通过对历史文献的分析,探讨了京津冀地区为改善空气质量的相关措施。对燃煤源控制措施的定量研究可分为两种:①对过去已实施的减排措施的评估,②对未来可能实施的措施的减排效果预测。Corvalan等^[17]基于排放因子法,对智利圣地亚哥地区实施天然气替代煤的减排效果的评估结果显示,可减少61%的PM、91%的SO₂、40%的NO_x和10%的VOCs。庞军等^[18]利用等热值替代方法计算2010年在我国15个重点城市以天然气替代煤炭的污染物减排效果,PM、SO₂、NO_x排放量分别可减少734.24×10⁴、40.21×10⁴、22.56×10⁴t。Fujii等^[19]应用分解分析法研究了1998—2009年中国工业部门末端控制措施对减少污染物排放的作用,结果显示,PM排放减少了近65%。Kadian等^[20]应用LEAP模型预测分析印度德里地区能源替代政策在民用部门可减少36%的NO_x、49%的SO₂、57%的TSP。冯悦怡等^[21]通过构建LEAP模型预测北京市2007—2030年的碳排放趋势,低碳情景碳排放总量比基准情景低62.22%。薛亦峰等^[22]采用排放因子法估算北京市能源结构调整可使PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂和NO_x的排放量分别减少2 032.94、1 183.53、6 265.30和7 220.90 t;并利用ADMS-Urban模型模拟该措施对环境空气质量的改善,ρ(PM_{2.5})下降0.27~6.77 μg/m³。陈潇君等^[23]采用WRF-CAMx空气质量模型研究了空气质量改善需求对地区大气污染物排放总量与煤炭消费总量的约束作用,为实现2030年空气质量改善阶段性目标,全国煤炭消费总量应控制在37.7×10⁸t左右。MAO等^[24]分析了天然气替代措施的成本效益,并提出了发展天然气行业的政策建议。

1998年以来,北京市为改善城市空气质量,针对不同阶段的污染特征开展了大规模防治工作,分16个阶段密集采取了包括改善能源结构、综合治理机动车污染、调整产业结构、加强生态保护与公众环境教育等在内一系列的具体措施。在能源结构调整与燃煤源排放控制方面,北京市一方面持续加严燃煤锅炉

排放标准,通过低硫煤供应保障、末端治理设施改造和污染物在线排放监管,使得燃煤电厂排放控制水平走在世界前列;另一方面利用天然气和电力等清洁能源,分阶段、分区域推进燃煤锅炉的能源结构转型。在居民采暖污染治理上,北京市针对城市中心老旧平房区和城郊居民区的建筑特点,分别进行“煤改电”和“煤改气”(集中供热)的治理措施。2013年,国务院发布的《大气污染防治行动计划》^[25]明确规定,到2017年,煤炭占能源消费总量比重降到65%以下,而京津冀、长三角、珠三角等区域则力争实现煤炭消费总量负增长。《北京市2013—2017年清洁空气行动计划》^[26]提出,到2017年,北京市煤炭占能源消费比重降至10%以下,优质能源消费比重提高到90%以上。

该研究基于中国多尺度排放清单模型(MEIC, multi-resolution emission inventory for China),采用情景分析法,评估了1998—2013年北京市燃煤源排放控制措施的减排效益,主要包括电厂能源清洁化与末端治理、燃煤锅炉改造和城区平房区居民采暖改造三部分,以期为燃煤源污染治理提供定量依据。

1 数据与方法

1.1 情景设定

该研究涉及评估的燃煤源排放控制措施主要包括电厂能源清洁化与末端治理、燃煤锅炉改造和城区平房区居民采暖改造三部分,为了分析各部门的大气污染减排效益,对这三部分分别进行情景设定。

作为煤炭的消费大户,北京市燃煤电厂从2005年起开始实施“煤改气”,并逐步加大天然气使用量,在全市发电总量上升情况下,实现了电力行业煤炭消费负增长。除了能源结构调整,北京市还对燃煤电厂同步采取了严格的末端治理措施,包括除尘升级改造、烟气脱硫工程的实施和烟气脱硝治理。此外,北京市进一步实施了世界上最严格的燃煤电厂排放标准,北京市新建电厂锅炉烟尘排放限值为10 mg/m³, NO_x排放限值为100 mg/m³, SO₂排放限值为20 mg/m³,均严于当前欧美新建电厂的烟尘排放限值要求^[27]。为了分析燃煤电厂末端治理和“煤改气”的大气污染减排效益,设置无控情景、末端治理情景与实际情景3个情景。无控情景是指在1998年基础上,假设已有的天然气发电机组采用燃煤发电,并且不实施任何末端治理措施;末端治理情景是指在无控情景的基础上,实施末端治理措施;实际情景是指电厂的实际排放状况,即实施了“末端治理+煤改气”。

从 1998 年起,北京市积极开展无煤区建设,决定无煤区内不再批准建设燃煤炉灶。随后,北京市逐步改造了不同地区所有餐饮业的炉灶和各单位茶炉、大灶,凡是燃煤的均被要求逐步改用清洁燃料,并不准再建新的燃煤设施。燃煤锅炉多数改造为天然气,少数采用改电、改燃油、并入市政热力管网等方式。对于顺义、平谷等 10 个郊区县,北京市于 2006—2009 年实施了集中供热工程,主要是新建装机容量较大、燃烧效率较高和后处理设施完善的大型锅炉,拆除分散型燃煤锅炉。如在 2007 年通州区运河以西实施的供热中心工程,新建 9 台 58 MW、5 台 46 MW 和 1 台 29 MW (共 781 MW) 燃煤锅炉,拆除区域内 303 台 (共计 1 216 MW) 小型燃煤锅炉。北京市 10 个郊区县集中供热中心现状及拆除锅炉情况见表 1。为评估燃煤锅炉改造的减排效益,设置了无煤改气情景和实际情景,无煤改气情景是指已经完成天然气替代改造的锅炉继续以煤为能源,实际情景是指锅炉的实际排放状况,即实施了“煤改气”。此外,对部分区县郊区集中供热工程的减排效益进行了评估。

表 1 2006—2009 年北京市郊区县集中供热工程实施情况

Table 1 Centralized heating projects in Beijing suburban districts/counties, 2006-2009

年份	改造地区	拆除锅炉数/台	新建锅炉数/台
2006	顺义、怀柔、密云	110	32
2007	平谷、密云、房山、昌平、通州	640	53
2008	顺义、怀柔、延庆、大兴	249	20
2009	顺义、房山、门头沟	212	25

自 1998 年起,北京市开始针对核心区基础设施比较落后、道路狭窄的平房区进行居民采暖改造。由于这些平房区不具备集中采暖或天然气采暖管线建设条件,最终确定主要以电采暖方式进行燃煤替代。为评估城区平房区居民采暖改造的减排效益,设置了无煤改电情景和实际情景,无煤改电情景是指已经完成采暖改造的平房继续以煤采暖,实际情景是指民用部门的实际排放状况,即实施了“煤改电”。

1.2 数据来源

各部门的污染物排放量基于排放因子法计算:

$$E = A \times EF \times (1 - \eta)$$

式中: E 为污染物排放量, t ; A 为排放源的活动水平,即能源消费量, t ; EF 为污染物排放系数, g/kg ; η 为污染控制措施对污染物的去除效率, %。

所需参数主要来自 MEIC 模型, MEIC 模型是基

于动态清单技术和统一数据来源建立的中国排放清单模型,各主要排放源排放因子基于国内大量实测结果的调研选取^[28-29]。对于电厂,活动水平、排放因子等参数数据来自 MEIC 模型,去除效率参数采用北京市环境保护局调研数据,对 MEIC 模型进行本地化处理;对于燃煤锅炉、城区平房区居民采暖,活动水平、排放因子、去除效率等参数来自 MEIC 模型,改造完成情况来自北京市十六阶段大气污染治理措施实施情况统计资料^[30]。污染物减排量评估的不确定性主要来自活动水平、去除效率的不确定性,电厂的去除效率取决于末端控制设施的投运率,而末端控制设施的历年投运率基于线性推测,燃煤锅炉、居民采暖改造减少的煤炭消费量基于锅炉、居民采暖燃煤的平均水平。

2 结果与分析

1998—2013 年,北京市电厂能源清洁化与末端治理、燃煤锅炉改造和城区平房区居民采暖改造等能源结构调整措施累计减少的 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量为 27.14×10^4 、 43.19×10^4 、 168.99×10^4 和 $87.13 \times 10^4 t$ 。

2.1 电厂能源清洁化与末端治理

北京市电力部门年煤炭消费总量从高峰时期的 $900 \times 10^4 t$ 削减到 2013 年的 $644 \times 10^4 t$;用于发电的天然气消费量则攀升到 2013 年的 $18.5 \times 10^8 m^3$ ^[31],天然气可替代 $365 \times 10^4 t$ 煤。2013 年,天然气消费已占电力部门一次化石能源消费总量的 35%。在无控情景和末端控制情景中,2013 年电厂煤炭消费量比实际情景增加了 $365 \times 10^4 t$ 。除了能源结构调整,北京还对燃煤电厂同步采取了严格的末端治理措施,包括除尘升级改造、烟气脱硫工程的实施和烟气脱硝治理。从 1998 年起,北京市各大电厂陆续开始除尘升级改造,主要采用静电除尘器、布袋除尘工艺、电除尘器、电袋复合式除尘器等多种除尘技术;电厂的烟气脱硫治理是从 2000 年开始进行的,均采用了石灰石/石膏湿法脱硫技术 (FGD);而电厂的烟气脱硝治理是最晚开展的,2007 年开始进行了脱硝设施的建设,采用了 SNCR + SCR 联合脱硝工艺、SCR 脱硝工艺。

尽管电力需求持续增长,但由于电厂实施严格的末端治理和“煤改气”措施,1998—2013 年,北京市电厂 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放总量持续下降,而 SO_2 和 NO_x 排放量出现先升后降趋势 (见图 1)。与 1998 年相比,2013 年北京市电厂 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量分别下降了 1.45×10^4 、 2.37×10^4 、 4.50×10^4 和

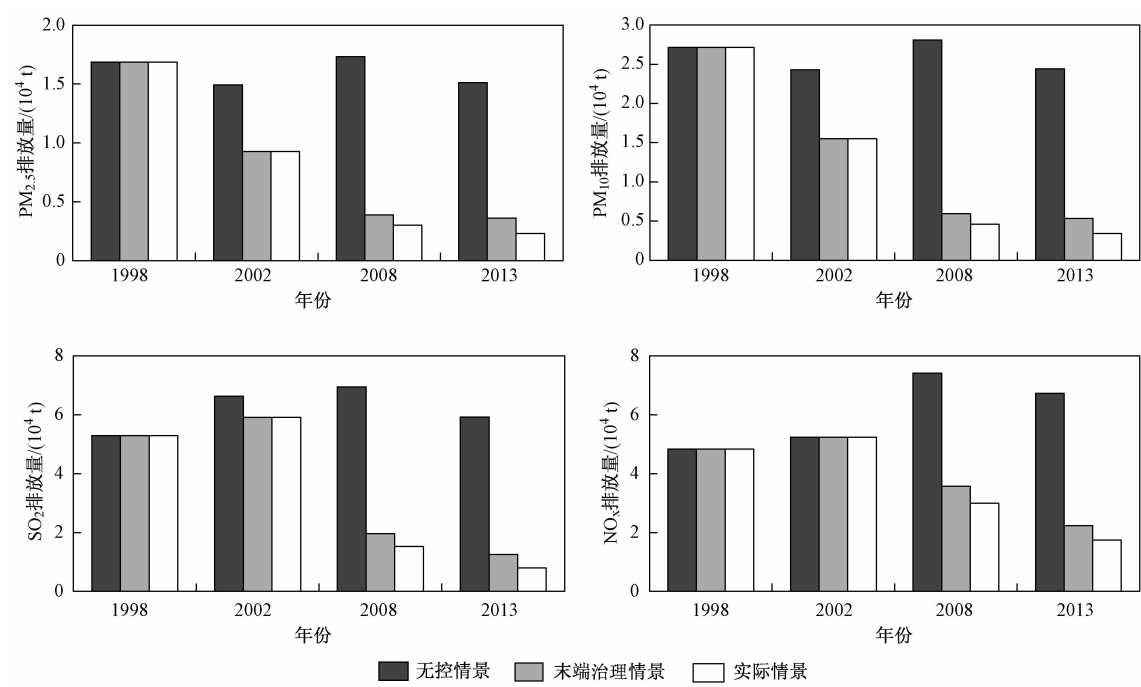


图 1 1998—2013 年北京市电厂主要大气污染物减排效益

Fig. 1 Emission reduction benefits of major air pollutants on power plants in Beijing, 1998-2013

3.09×10^4 t, 削减比例分别为 86%、87%、85% 和 64%。1998—2013 年,末端治理 + 煤改气措施 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 的排放量分别累计减少 14.77×10^4 、 23.97×10^4 、 39.11×10^4 和 30.49×10^4 t,其中末端控制措施累计减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 的排放量分别为 14.03×10^4 、 22.85×10^4 、 36.03×10^4 和 26.38×10^4 t,“煤改气”措施累计减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 的排放量分别为 0.75×10^4 、 1.12×10^4 、 3.07×10^4 和 4.11×10^4 t。由于针对 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 的排放控制历史相对 NO_x 较长,因此 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 控制效益也相对更加突出。包括电除尘/布袋除尘、石灰石湿法脱硫和选择性催化还原等末端治理设施的投运,对电厂污染物的减排发挥了关键作用。

在 2013 年,末端治理 + 煤改气措施共减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量为 1.28×10^4 、 2.10×10^4 、 5.13×10^4 和 4.98×10^4 t,分别削减了 85%、86%、87%、74%;其中末端控制措施减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、

PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 的排放量分别为 1.15×10^4 、 1.91×10^4 、 4.67×10^4 和 4.49×10^4 t,占削减总量的 90%、91%、91%、90%。电厂“煤改气”对进一步削减污染物起着不可忽视的作用。在 2013 年,“煤改气”措施减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 的排放量分别为 0.13×10^4 、 0.19×10^4 、 0.45×10^4 和 0.49×10^4 t,占当年末端控制情景排放的 36%、36%、36% 和 22%。

2.2 燃煤锅炉改造

1998—2013 年北京市共改造燃煤锅炉 17 149 台,总计 53 746 蒸吨(燃煤锅炉功率单位,1 蒸吨 = 0.7 MW)。北京市城六区的燃煤锅炉改造主要分三个阶段分区域、分重点推进,各阶段燃煤锅炉改造的完成情况如表 2 所示。1998—2002 年为第一阶段,主要改造核心区 1 蒸吨以下小锅炉及茶炉大灶;2003—2008 年为第二阶段,主要改造核心区 20 蒸吨以下燃煤锅炉;2009—2013 年为第三阶段,主要改造城六区 20 蒸吨及以上燃煤锅炉。

表 2 北京市三个阶段的燃煤锅炉改造的实施情况

Table 2 The renovation implementation of coal-fired boilers in three phases in Beijing

阶段	地区	治理重点	改造实施情况
第一阶段(1998—2002 年)	核心区 ¹⁾	1 蒸吨以下小锅炉	淘汰 1 蒸吨以下小锅炉共计 10 633 台,22 410 蒸吨
第二阶段(2003—2008 年)	核心区	20 蒸吨以下燃煤锅炉	淘汰 20 蒸吨以下燃煤锅炉共计 5 704 台,22 141 蒸吨
第三阶段(2009—2013 年)	城六区 ²⁾	20 蒸吨及以上燃煤锅炉	淘汰 20 蒸吨及以上燃煤锅炉共计 812 台,9 195 蒸吨

注:1)核心区指现东城区与西城区;2)城六区包括朝阳、海淀、丰台、石景山、东城和西城。

如图 2 所示,与 1998 年相比,2013 年北京市燃煤锅炉 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量分别下降了 0.45×10^4 、 1.02×10^4 、 2.07×10^4 和 0.98×10^4 t,削减比例分

别为 66%、76%、46% 和 45%。16 a 间,燃煤锅炉“煤改气”措施共减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量 12.09×10^4 、 30.92×10^4 、 128.96×10^4 、 56.27×10^4 t。

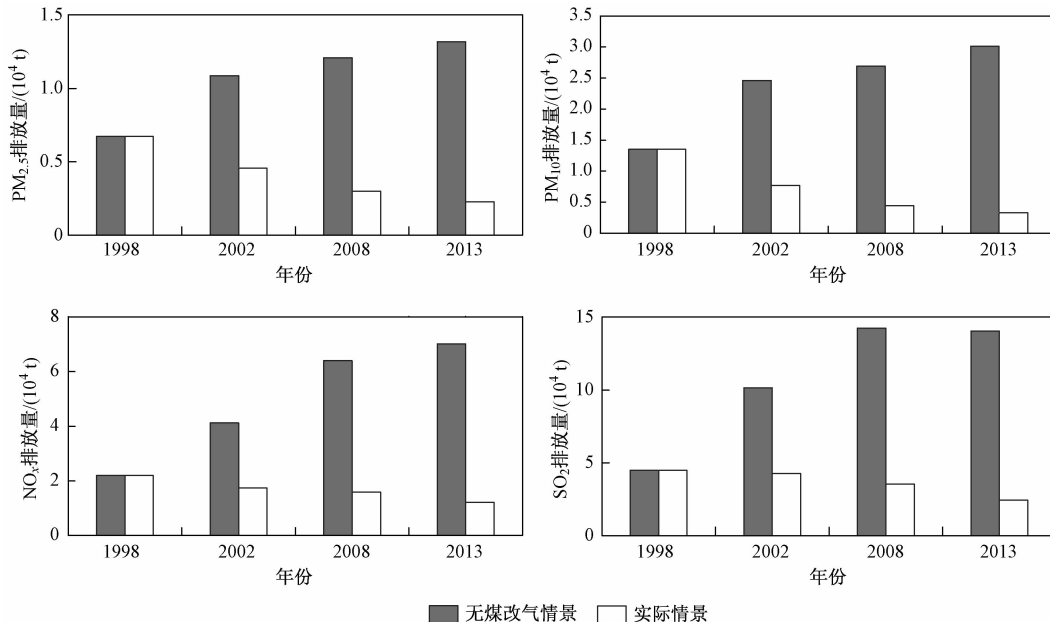


图 2 1998—2013 年北京市燃煤锅炉改造主要大气污染物减排效益

Fig. 2 Emission reduction benefits of major air pollutants on the renovation of coal-fired boilers in Beijing, 1998-2013

在 2013 年,北京市燃煤锅炉“煤改气”措施减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量分别为 1.09×10^4 、 2.68×10^4 、 11.64×10^4 和 5.81×10^4 t,占无煤改气情景的 83%、89%、83%、83%。其中各阶段燃煤锅炉改造污染物减排量贡献如图 3 所示,第一阶段减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量为 0.51×10^4 、 1.34×10^4 、 4.42×10^4 和 2.38×10^4 t,分别占 2013 年燃煤锅炉减排量的 47%、50%、38%、41%;第二阶段减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量为 0.44×10^4 、 1.04×10^4 、 5.47×10^4 和 2.38×10^4 t,分别占 40%、39%、47%、41%;第三阶段减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量为 0.14×10^4 、 0.29×10^4 、 1.75×10^4 和 1.05×10^4 t,分别占 13%、11%、15%、17%。与电厂的大气污染物排放治理工作相比,燃煤锅炉的能源结构调整所取得的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 减排效益与电厂控制措施取得的效益相当,而 SO_2 和 NO_x 的减排效益则更高。主要是由于燃煤锅炉的末端控制去除效率低,燃煤时排放的污染物多,因此燃煤锅炉改造的减排效益较为显著。

2006—2010 年,北京市郊区县建设的集中供热中心也对污染物减排起到了重要作用。然而,由于北京城市规模不断扩大,特别是在五环外新建了不少大

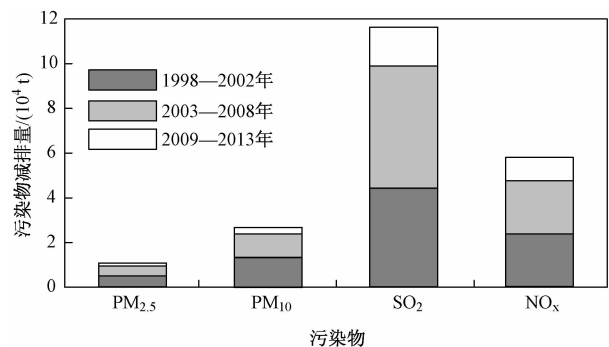


图 3 北京市燃煤锅炉改造各阶段的污染物减排贡献

Fig. 3 Emission reduction contribution of all phases on the renovation of coal-fired boilers in Beijing

型住宅小区,导致部分区县(如昌平)用煤需求持续上升,改造后集中供热中心容量远高于改造前的分散式燃煤锅炉总和,导致这些区县 SO_2 和 NO_x 排放削减效益不明显,因此该研究仅对顺义区的集中供热工程的减排效益进行了评估。2006—2010 年顺义区共拆除分散式燃煤小锅炉约 1 950 蒸吨,新建集中供热中心燃煤锅炉近 1 600 蒸吨。上述改造共减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量分别为 18、88、925 和 895 t。

2.3 平房区居民采暖改造

按照锅炉改造划分阶段,将北京市城区老旧平房

区采暖改造分为三个阶段. 1998—2002 年为第一阶段,在核心区试点改造老旧平房 256 户;2003—2008 年为第二阶段,主要改造核心区部分街道老旧平房 9.35×10^4 户;2009—2013 年为第三阶段,改造核心区老旧平房 15×10^4 户. 其中核心区是指现东城区与西城区,包括原崇文区和宣武区. 三个阶段共改造老旧住宅超过 24×10^4 户.

与 1998 年相比,2013 年北京市城镇民用部门

$\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 排放量分别下降了 0.47×10^4 、 0.66×10^4 t (见图 4), 削减比例均为 44%; 而 SO_2 、 NO_x 则分别上升了 0.23×10^4 和 0.30×10^4 t, 增加比例分别为 12% 和 50%, 这主要是由于民用炉型的变化, 导致 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 的排放因子大幅下降, 对 SO_2 、 NO_x 的改善效果不明显. 16 a 间, 居民采暖“煤改电”措施累计减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量分别为 0.28×10^4 、 0.39×10^4 、 0.92×10^4 、 0.37×10^4 t.

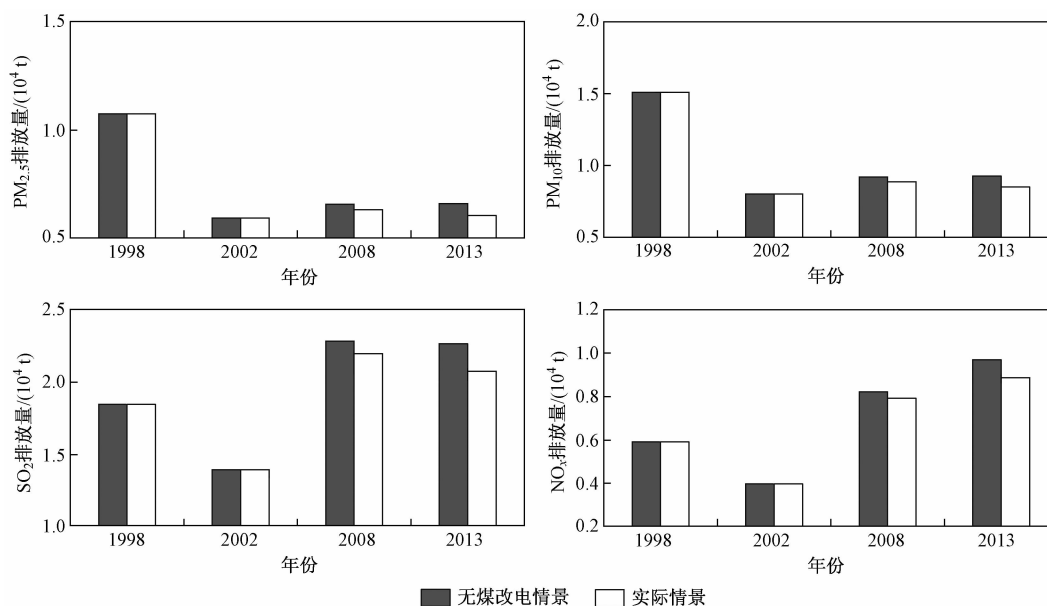


图 4 1998—2013 年北京市城区老旧平房区居民采暖改造主要大气污染物减排效益评估

Fig. 4 Emission reduction benefits of major air pollutants from residential heating renovation in Beijing's conventional old house areas, 1998-2013

在 2013 年,北京市城区老旧平房区的居民采暖“煤改电”措施减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量分别为 630、870、2 070 和 790 t, 均占无煤改电情景的 8%. 居民采暖改造实质性的工作主要集中于 2003—2008 年和 2009—2013 年两个阶段, 各阶段减排贡献如图 5 所示. 2003—2008 年减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量为 261、361、892 和 292 t, 分别占 2013 年居民采暖改造减排量的 42%、41%、43%、37%; 2009—2013 年减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量为 364、509、1176 和 495 t, 分别占 58%、59%、57%、63%.

与电厂污染排放治理和燃煤锅炉改造相比,城区老旧平房区居民采暖“煤改电”的效益相对较小. 但是, 由于老旧平房区建筑密集、居民众多, “煤改电”工作能够显著改善老旧平房区在采暖季的小区空气质量, 降低室内污染物的暴露水平, 提高了老旧平房区的居住水平和安全水平. 因此, 城区老旧平房区居

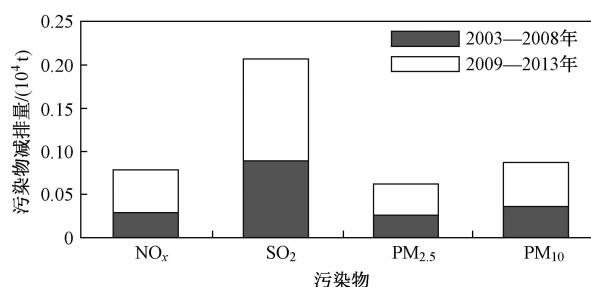


图 5 北京市城区老旧平房区居民采暖“煤改电”各阶段污染物减排贡献

Fig. 5 Emission reduction contribution of all phases from residential heating renovation by replacing coal with electricity in Beijing's conventional old house areas, from 1998 to 2013

民采暖改造这一项能源结构调整措施所带来的环境与健康效益是不容忽视的.

3 结论

a) 2013 年,北京市电厂能源清洁化与末端治理减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 的排放量分别为 $1.28 \times$

10^4 、 2.10×10^4 、 5.13×10^4 和 4.98×10^4 t, 削减了 85%、86%、87%、74%。北京市燃煤锅炉“煤改气”减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 排放量为 1.09×10^4 、 2.68×10^4 、 11.64×10^4 和 5.81×10^4 t, 分别占无煤改气情景的 83%、89%、83%、83%。北京市老旧平房区的居民采暖“煤改电”减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量为 630、870、2 070 和 790 t, 均占无煤改电情景的 8%。

b) 16 a 间, 北京市电厂能源清洁化与末端治理累计减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_x 的排放量分别为 14.77×10^4 、 23.97×10^4 、 39.11×10^4 和 30.49×10^4 t, 燃煤锅炉“煤改气”累计减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量分别为 12.09×10^4 、 30.92×10^4 、 128.96×10^4 、 56.27×10^4 t, 北京市老旧平房区的居民采暖“煤改电”减少 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 排放量分别为 0.28×10^4 、 0.39×10^4 、 0.92×10^4 、 0.37×10^4 t。

c) 北京市电厂能源清洁化与末端治理、燃煤锅炉改造和城区老旧平房区居民采暖改造等措施均能有效减少污染物排放。燃煤锅炉“煤改气”措施所取得的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 减排效益与电厂控制措施取得的效益相当, 而 SO_2 和 NO_x 的减排效益则更高, 主要是由于燃煤锅炉的末端控制去除效率低, 燃煤时排放的污染物多, 因此燃煤锅炉改造的减排效益较为显著。与电厂污染排放治理和燃煤锅炉改造相比, 城区老旧平房区居民采暖“煤改电”的效益相对较小。但老旧平房“煤改电”能够显著改善老旧平房区在采暖季的小区空气质量, 降低室内污染物的暴露水平, 因此, 城区老旧平房区居民采暖改造这一项能源结构调整措施所带来的减排效益不容忽视。

参考文献 (References):

- [1] BURNETT R T, POPE C A, EZZATI M, *et al.* An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2014, 122(4):397-403.
- [2] CHAN Changchuan, CHUANG Kaijen, CHIEN Lungchang, *et al.* Urban air pollution and emergency admissions for cerebrovascular diseases in Taipei, Taiwan[J]. *European Heart Journal*, 2006, 27(10):1238-1244.
- [3] JIANG Xujia, HONG Chaopeng, ZHENG Yixuan, *et al.* To what extent can China's near-term air pollution control policy protect air quality and human health? a case study of the Pearl River Delta region[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(10):104006.
- [4] ZHANG Qiang, HE Kebin, HUO Hong. Policy: Cleaning China's air[J]. *Nature*, 2012, 484(7393):161-162.
- [5] ZHAO Bin, XU Jiayu, HAO Jiming. Impact of energy structure adjustment on air quality: a case study in Beijing, China[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2011, 5(3):378-390.
- [6] 郑洪澍, 倪维斗, 李政. 中国城市能源利用现状和政策分析[J]. *中国能源*, 2003, 25(4):13-17.
ZHENG Hongtao, NI Weidou, LI Zheng. Energy utilization in China's cities and energy policy analysis[J]. *Energy of China*, 2003, 25(4):13-17.
- [7] 赵宗燠. 改革能源结构, 消灭大气污染[J]. *环境保护*, 1978(5):3-6.
- [8] 白莹莹. 煤炭“双控”措施在大气污染减排中的作用[J]. *低碳世界*, 2016(6):7-8.
- [9] LI Li, TAN Zhongfu, WANG Jianhui, *et al.* Energy conservation and emission reduction policies for the electric power industry in China[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(6):3669-3679.
- [10] 雷宇, 陈潇君. 基于大气环境质量改善的能源供给侧改革分析[J]. *环境保护*, 2016, 44(16):25-28.
LEI Yu, CHEN Xiaojun. Analysis on energy supply-side reform from perspective of air quality improvement[J]. *Environmental Protection*, 2016, 44(16):25-28.
- [11] XU Xuchang, CHEN Changhe, QI Haiyin, *et al.* Development of coal combustion pollution control for SO_2 and NO_x in China[J]. *Fuel Processing Technology*, 2000, 62(2/3):153-160.
- [12] YOU C F, XU X C. Coal combustion and its pollution control in China[J]. *Energy*, 2010, 35(11):4467-4472.
- [13] TIAN Hezhong, HAO Jiming, HU Manyin, *et al.* Recent trends of energy consumption and air pollution in China[J]. *Journal of Energy Engineering*, 2007, 133(1):4-12.
- [14] ZHENG Shiming, YI Hongtao, LI Hui. The impacts of provincial energy and environmental policies on air pollution control in China[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2015, 49:386-394.
- [15] HOMER J. Natural gas in developing countries: evaluating the benefits to the environment[R]. Washington DC: World Bank Discussion Papers, 1993.
- [16] LIU Gengyuan, YANG Zhifeng, CHEN Bin, *et al.* Prevention and control policy analysis for energy-related regional pollution management in China[J]. *Applied Energy*, 2016, 166:292-300.
- [17] CORVALAN R M, GALECIO J I, SALIM J A. Effectiveness in the use of natural gas for the reduction of atmospheric emissions: case study-industrial sector in the metropolitan region of Santiago, Chile[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, 53(8):971-975.
- [18] 庞军, 吴健, 马中, 等. 我国城市天然气替代燃煤集中供暖的大气污染减排效果[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(1):55-61.
PANG Jun, WU Jian, MA Zhong, *et al.* Air pollution abatement effects of replacing coal with natural gas for central heating in cities of China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(1):55-61.
- [19] FUJII H, MANAGI S, KANEKO S. Decomposition analysis of air pollution abatement in China: empirical study for ten industrial

- sectors from 1998 to 2009 [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 59(18):22-31.
- [20] KADIAN R, DAHIVA R P, GARG H P. Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(12):6195-6211.
- [21] 冯悦怡, 张力小. 城市节能与碳减排政策情景分析:以北京市为例[J]. *资源科学*, 2012, 34(3):541-550.
- FENG Yueyi, ZHANG Lixiao. Scenario analysis of urban energy saving and carbon emission reduction policies: a case study of Beijing[J]. *Resources Science*, 2012, 34(3):541-550.
- [22] 薛亦峰, 闫静, 魏小强. 燃煤控制对北京市空气质量的改善分析[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(3):253-258.
- XUE Yifeng, YAN Jing, WEI Xiaoqiang. Impact on air quality of Beijing City by controlling the consumption of coal-fired [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(3):253-258.
- [23] 陈潇君, 金玲, 雷宇, 等. 大气环境约束下的中国煤炭消费总量控制研究[J]. *中国环境管理*, 2015, 7(5):42-49.
- CHEN Xiaojun, JIN Ling, LEI Yu, *et al.* Study on China coal consumption control under air quality constraints [J]. *Chinese Journal of Environmental Management*, 2015, 7(5):42-49.
- [24] MAO Xianqiang, GUO Xiurui, CHANG Yongguan, *et al.* Improving air quality in large cities by substituting natural gas for coal in China: changing idea and incentive policy implications[J]. *Energy Policy*, 2005, 33(3):307-318.
- [25] 国务院. 关于印发大气污染防治行动计划的通知[EB/OL]. 北京:国务院, 2013[2013-09-13]. http://www.gov.cn/jzhengce/content/2013-09/13/content_4561.htm.
- [26] 北京市人民政府. 关于印发北京市 2013—2017 年清洁空气行动计划的通知[EB/OL]. 北京:北京市人民政府, 2013[2013-09-12]. <http://zhengwu.beijing.gov.cn/gzdt/gggs/t1324560.htm>.
- [27] 北京市环境保护局. GB 11/139—2007 锅炉大气污染物排放标准[S]. 北京:北京市环境保护局, 2007.
- [28] ZHANG Qiang, 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.
- [29] LEI Yu, ZHANG Qiang, HE Kebin, *et al.* Primary anthropogenic aerosol emission trends for China, 1990-2005 [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2011, 11(3):17153-17212.
- [30] 北京市人民政府. 关于发布本市第十六阶段控制大气污染措施的通告[EB/OL]. 北京:北京市人民政府, 2010[2010-04-13]. <http://govfile.beijing.gov.cn/Govfile/ShowNewPageServlet?id=5796>.
- [31] 北京市统计局. 北京统计年鉴 2014[M]. 北京:中国统计出版社, 2014.