

我国大气细颗粒物污染防治目标和控制措施研究

王书肖^{1,2}, 赵斌¹, 吴烨^{1,2}, 郝吉明^{1,2}

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100084; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

摘要 我国面临着严重的细颗粒物(PM_{2.5})污染问题, PM_{2.5}对人体健康、能见度、气候变化、生态系统等均产生了不良影响。本文旨在提出我国PM_{2.5}污染防治目标和控制措施, 为从根本上改善空气质量提供科学依据。首先, 本文提出了2020年和2030年我国PM_{2.5}污染防治目标。其次, 采用能源和污染排放技术模型, 分情景预测了我国未来一次大气污染物排放量的变化趋势。基于情景预测结果和此前研究建立的一次污染物排放与PM_{2.5}浓度间的非线性关系, 确定了2020年—2030年与PM_{2.5}浓度改善相适应的全国和重点区域大气污染物减排目标。最后, 利用能源和污染排放技术模型, 提出了实现大气污染物减排的技术措施和对策建议。研究表明, 2030年全国二氧化硫、氮氧化物、一次PM_{2.5}和挥发性有机物的排放量应分别比2012年至少削减51%、64%、53%和36%, 氨排放量也要略有下降。对于污染严重的重点区域, 必须采取更严格的控制力度。要实现上述减排, 应加快能源结构调整, 推进煤炭清洁高效集中可持续利用, 建立“车-油-路”一体的移动源控制体系, 并强化多源多污染物的末端控制。

关键词 PM_{2.5}; 空气质量达标; 减排目标; 控制措施

中图分类号: X51

文献标识码: A

文章编号: 1674-6252(2015)02-0037-07

Target and Measures to Prevent and Control Ambient Fine Particle Pollution in China

Wang Shuxiao^{1,2}, Zhao Bin¹, Wu Ye^{1,2}, Hao Jiming^{1,2}

(1. State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084)

Abstract: China is facing with severe fine particle (PM_{2.5}) pollution, which has adverse effect on human health, visibility, climate change, and ecological system. This study aims to propose the target and measures to prevent and control ambient PM_{2.5} pollution in China. Firstly, we proposed China's PM_{2.5} pollution control targets for 2020 and 2030. Then, we projected the future emissions of primary air pollutants in China for six control scenarios with an energy utilization and pollution control technology model. Based on the projection results and the non-linear relationship between emissions of primary air pollutants and ambient PM_{2.5} concentrations established in previous studies, we determined the emission reductions required for the mitigation of ambient PM_{2.5} pollution in 2020 and 2030 for both whole China and key regions. Finally, the technical measures and related policies were advanced using previous model. The results indicated that the national emissions of sulfur dioxide, nitrogen oxides, primary PM_{2.5}, and volatile organic compounds should be reduced by 51%, 64%, 53%, and 36%, respectively, by 2030 from the 2012 levels. The ammonia emissions should also be reduced slightly. More stringent emission controls should be enforced in heavy-pollution regions. To achieve such emission reductions, we should accelerate energy structure adjustment, promote the clean, efficient, centralized, and sustainable utilization of coal, establish the “vehicle-fuel-road” integrated control system for mobile sources, and tighten the end-of-pipe control measures for multiple sources and multiple pollutants.

Keywords: PM_{2.5}; air quality attainment; emission reduction; control measures

基金项目: 国家环保公益行业专项“京津冀细颗粒物相互输送及对空气质量的影响研究”(201409002)。

作者简介: 王书肖, (1974—), 女, 教授, 清华大学, 主要研究方向为大气污染防治。

前言

当前,我国大气污染形势严峻,以细颗粒物($PM_{2.5}$)为特征污染物的区域性大气环境复合污染突出,已成为许多地区的重大民生问题之一。中国环境监测总站2013年空气质量监测结果表明:首批开展 $PM_{2.5}$ 监测的74个城市中,有71个不达标;74个城市的 $PM_{2.5}$ 浓度年均值高达 $72\mu g/m^3$,是世界卫生组织空气质量导则值的7倍,超过我国环境空气质量标准限值一倍多;京津冀地区 $PM_{2.5}$ 年均浓度高达 $115\mu g/m^3$,是全球 $PM_{2.5}$ 污染最严重的地区之一。此外,我国大气 $PM_{2.5}$ 中二次成分占30%~70%;重污染过程中,这一比例高达80%以上,复合型污染特征突出^[1-2]。

$PM_{2.5}$ 对人体健康、能见度、气候变化、生态系统等都能产生不良影响。联合国开发计划署的研究表明,我国高污染地区肺癌导致的死亡率是其他拥有较好空气质量的地区的4.7-8.8倍^[3]。“2010年全球疾病负担评估”表明大气 $PM_{2.5}$ 污染每年在中国导致123万人过早死亡及超过2500万健康生命年的损失^[4]。因此,大气 $PM_{2.5}$ 污染已经成为影响我国公众健康和国计民生的重大环境问题。开展我国大气 $PM_{2.5}$ 污染防治目标和控制措施研究,对实现我国社会经济的可持续发展具有重要意义。

本研究将确定“十三五”及至2030年的 $PM_{2.5}$ 污染防治目标,进而确定要实现这一目标所需的多污染物减排量及控制措施,为从根本上改善我国主要城市的空气质量提供科学依据。

1 我国2020年及2030年环境空气质量改善目标

依据《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)、国务院《大气污染防治行动计划》、世界卫生组织(WHO)《空气质量准则(2005年更新版)》、中国工程院和环境保护部《中国环境宏观战略研究》^[5],并参考发达国家和地区的空气质量改善历程,提出适合我国的环境空气质量改善目标。本研究建议我国中长期大气污染防治目标为:2020年全国地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 浓度比2012年下降15%以上,京津冀和长三角区域 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降35%和30%以上,珠三角区域 $PM_{2.5}$ 年均浓度基本达标;2030年全国大多数地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度达标(GB 3095—2012)。

2 与空气质量改善目标相适应的分阶段主要大气污染物减排目标

我国2020年及2030年的空气质量改善目标,需要一次PM以及 SO_2 、 NO_x 、NMVOC、 NH_3 等气态前体物的同时大幅削减才能实现^[6]。为确定实现空气质量目标所需的大气污染物减排量,本研究首先在2012年全国分省、分部门多污染物排放清单基础上,采用能源和污染排放技术模型^[7-8],预测了未来中国人为源一次PM以及 SO_2 、 NO_x 、NMVOC、 NH_3 可能的排放情况,评估未来可能的节能和污染控制政策措施对污染物排放趋势的影响。排放预测的模型和方法已在作者此前的论文中进行了详细说明^[7-8],下面扼要进行介绍:首先,为了给未来预测提供一个可靠的基准,我们采用自下而上的方式,由服务量需求(如发电量、工业产品产量、交通周转量、采暖能量需求等)、能源技术分布和能源效率计算了基准年的能源消费量,并利用能源统计资料对自下而上的计算结果进行了校准。在校准基准年数据后,即开始未来预测的工作。我们首先预测了未来人口、GDP、城市化率等驱动力的变化趋势,进而据此预测了未来能源服务量的需求。接下来,我们考虑未来可能的节能政策,假设了能源技术参数和能源技术构成的变化,从而预测了未来的能源消费量。进一步,我们考虑了未来污染控制技术去除率和装配率的变化,最终预测了主要污染物排放量。

研究设置了两个能源情景,分别是趋势照常情景(Business-as-usual, BAU)和新政策情景(New Policy, PC)。BAU情景假定未来继续采用现有的政策和现有的执行力度(到2010年年末),如根据国家规划,到2020年单位GDP的 CO_2 排放量应比2005年降低40%~45%。PC情景假设未来国家采取可持续的能源发展战略,改变生产生活方式,改善能源结构和工业结构、提高能源利用效率,政府制定的方针路线、法律法规都得到了充分执行。

在两个能源情景的基础上,分别设置三个污染控制策略即基准策略([0]策略)、循序渐进策略([1]策略)和最大减排潜力策略([2]策略)。^[0]策略假定未来继续采用现有的政策和现有的执行力度(到2010年年末),新的减排政策没有出台。^[1]策略假定在2011—2015年,“十二五”规划中的控制措施得到执行,在2015年后,我国污染控制政策持续缓慢加严,先进的控制技术循序渐进地推广。^[2]策略假定技术上可

表 1 能源和污染控制情景的名称和描述

能源情景	情景描述	污染控制策略	污染控制策略描述	污染控制情景
趋势照常情景（BAU 情景）	现有的政策和现有的执行力度（到 2010 年年末）	基准策略（[0] 策略）	现有的政策和现有的执行力度（到 2010 年年末）	BAU[0]
		循序渐进策略（[1] 策略）	未来循序渐进地出台新的污染控制政策	BAU[1]
		最大减排潜力策略（[2] 策略）	技术上可行的减排措施均得到了最大限度的应用	BAU[2]
政策情景（PC 情景）	假设未来国家采取更加可持续的能源发展战略	基准策略（[0] 策略）	现有的政策和现有的执行力度（到 2010 年年末）	PC[0]
		循序渐进策略（[1] 策略）	未来循序渐进地出台了新的污染控制政策	PC[1]
		最大减排潜力策略（[2] 策略）	技术上可行的减排措施均得到了最大限度的应用	PC[2]

行的减排措施均得到了最大限度的应用，是通过各种污染控制措施可以实现的最大限度的减排策略。两个能源情景和三个污染控制策略进行组合，构成了六个污染控制情景（BAU[0]、BAU[1]、BAU[2]、PC[0]、PC[1]、PC[2]），如表 1 所示。污染物排放预测的详细结果请参见作者此前的论文^[7-8]。

在此前的研究中^[9]，我们采用响应表面模拟技术（Response Surface Modeling, RSM），基于数百个控制情景的 CMAQ（Community Multi-scale Air Quality Model）模拟结果建立了中国各地一次污染物排放量与 PM_{2.5} 浓度之间的快速响应关系。为确定实现空气质量目标所需的污染物减排量，我们在 BAU[0] 情景（代表污染物排放的最大增长潜力）和 PC[2] 情景（代表污染物排放的最大减排潜力）之间，变动各污染物的排放量，利用上次快速响应关系，预测相应的 PM_{2.5} 浓度。如果目标城市 PM_{2.5} 浓度接近但不超过目标限值，说明该控制策略是较合理的；如果超过限值，应加严控制；如果明显低于限值，应减弱控制。为确保减排方案科学合理，我们还设定了以下原则：①各区域、各污染物的控制措施，不得弱于 BAU[1] 情景下的控制措施。BAU[1] 情景假设在 2011—2015 年，“十二五”规划中的污染控制措施得到执行，在 2015 年后，我国污染控制政策逐渐缓慢加严，先进的控制技术循序渐进的推广。由于我国目前已全面实施“十二五”规划，且出于改善空气质量的民生需求，未来污染控制政策缓慢加严也是顺理成章，因此，本研究制定的减排方案应与 BAU[1] 情景相当或比它更严格。② PM_{2.5} 浓度对一次 PM 排放，特别是本地一

次 PM 排放最为敏感，因此，BAU[1] 情景不能满足达标要求时，应优先加严一次 PM 的控制措施；其次是 NO_x 和 SO₂；在仍不能达标的情况下，应对管理难度大的 NH₃ 实施控制措施。

采用上述方法，本研究确定了使目标城市 PM_{2.5} 浓度达标所需的分省份、分污染物减排率，如表 2 所示。概括地说，在京津冀地区，对 PM_{2.5}、NO_x 和 SO₂ 实施“准最大减排”措施（PC[2] 情景中除少数实施难度极大的措施外，其他措施均得到充分实行），NH₃ 小幅削减 15% 左右，其中，北京一次 PM_{2.5}、NO_x 和 SO₂ 实施“最大减排”措施，NH₃ 削减 35%。在长三角地区，对一次 PM_{2.5}、NO_x 实施“准最大减排”措施，SO₂ 的控制力度介于 BAU[1] 情景和“准最大减排”之间，NH₃ 小幅削减 10%。山东、陕西、湖北、辽宁、湖南、山西、福建 7 省 SO₂、NO_x、NH₃ 实施 BAU[1] 的控制措施，一次 PM_{2.5} 的控制力度在 BAU[1] 和“准最大减排”之间。珠三角和其他非重点省份实施 BAU[1] 的控制措施。该控制情景综合考虑了各排放源控制的敏感性、控制技术的可行性、各区域达标难度的差异以及污染物减排的多重环境影响，是本研究推荐采用的控制策略。

具体到减排率，2030 年全国 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 VOC 排放量应分别比 2012 年至少削减 51%、64%、53% 和 36%，NH₃ 排放量也要略有下降。对于污染严重的重点区域，必须采取更严格的控制力度，如京津冀地区 2030 年 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5}、VOC 和 NH₃ 的排放量应分别比 2012 年至少削减 59%、71%、70%、45% 和 21%；山东、山西、内

蒙古削减比例较京津冀稍低。应编制实现分阶段环境目标的全国中长期减排规划，并建立规划编制阶段的预评估制度和实施阶段的跟踪评估制度，确保减排规划的执行力度和阶段环境目标的实现。

3 我国 2020 年及 2030 年大气污染物减排措施和建议

在确定了各区域、各污染物的减排量后，本研究进一步利用能源和污染排放技术模型^[7-8]分析了实现上述减排目标可能的技术措施，确定了实现污染物减排的技术途径和对策建议。确定减排技术措施的方法

是：首先确定各污染物的目标减排量介于本研究建立的 BAU[0]、BAU[1]、BAU[2]、PC[0]、PC[1] 和 PC[2] 六个情景的哪两个之间；其次，在这两个情景之间调整减排措施，使各污染物排放量达到目标排放量。要实现本研究的环境目标，所需的减排措施可分为能源结构调整、煤炭清洁高效集中可持续利用、“车一油一路”一体的移动源排放控制体系、强化多源多污染物末端控制四大类，下面分别进行介绍。

3.1 推进能源生产和消费革命，控制煤炭消费总量，提升清洁能源比例

我国能源战略应从保证供给为主，开始向控制能

表2 各省份主要污染物分阶段目标排放系数（2012=1.0）

污染物	PM _{2.5}		SO ₂		NO _x		NH ₃		VOC	
年份	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
全国	0.73	0.47	0.67	0.49	0.67	0.36	1.07	1	0.9	0.64
北京	0.57	0.31	0.49	0.29	0.48	0.19	0.96	0.65	0.78	0.56
天津	0.58	0.27	0.53	0.36	0.53	0.24	1.04	0.85	0.89	0.64
河北	0.6	0.3	0.65	0.46	0.56	0.32	1.04	0.85	0.78	0.52
山西	0.69	0.43	0.74	0.55	0.67	0.35	1.08	1	0.76	0.51
内蒙古	0.72	0.46	0.65	0.51	0.72	0.37	1.08	1	0.74	0.48
辽宁	0.77	0.44	0.83	0.6	0.72	0.36	1.08	1	1	0.76
吉林	0.74	0.48	0.67	0.5	0.59	0.34	1.08	1	0.93	0.67
黑龙江	0.66	0.38	0.59	0.47	0.67	0.35	1.08	1	0.82	0.55
上海	0.65	0.45	0.61	0.47	0.64	0.32	1.05	0.9	1.07	0.85
江苏	0.64	0.4	0.66	0.48	0.65	0.33	1.05	0.9	0.89	0.6
浙江	0.61	0.39	0.52	0.38	0.65	0.31	1.05	0.9	0.84	0.61
安徽	0.79	0.52	0.75	0.61	0.73	0.43	1.08	1	0.89	0.6
福建	0.82	0.56	0.67	0.47	0.85	0.48	1.08	1	1.06	0.84
江西	0.79	0.48	0.66	0.49	0.77	0.44	1.08	1	1	0.77
山东	0.67	0.47	0.64	0.42	0.68	0.35	1.08	1	0.98	0.71
河南	0.85	0.51	0.78	0.55	0.73	0.41	1.08	1	0.91	0.65
湖北	0.74	0.49	0.56	0.41	0.6	0.35	1.08	1	0.92	0.67
湖南	0.79	0.55	0.69	0.5	0.69	0.42	1.08	1	0.91	0.71
广东	0.69	0.45	0.66	0.48	0.69	0.39	1.05	0.9	0.96	0.69
广西	0.93	0.71	0.75	0.49	0.7	0.41	1.08	1	0.92	0.62
海南	0.82	0.67	0.64	0.48	0.71	0.37	1.08	1	1.15	0.92
重庆	0.8	0.54	0.68	0.46	0.66	0.4	1.08	1	0.85	0.57
四川	0.76	0.45	0.67	0.43	0.69	0.39	1.08	1	0.86	0.53
贵州	0.96	0.77	0.85	0.75	0.7	0.44	1.08	1	0.97	0.65
云南	0.75	0.54	0.82	0.59	0.65	0.37	1.08	1	0.82	0.58
西藏	0.71	0.49	0.79	0.69	0.68	0.34	1.08	1	0.79	0.57
陕西	0.72	0.41	0.72	0.57	0.69	0.37	1.08	1	0.84	0.58
甘肃	0.76	0.45	0.82	0.64	0.73	0.39	1.08	1	0.88	0.63
青海	0.64	0.35	0.64	0.49	0.57	0.31	1.08	1	0.9	0.63
宁夏	0.73	0.51	0.66	0.48	0.66	0.33	1.08	1	0.79	0.52
新疆	0.74	0.46	0.6	0.4	0.61	0.33	1.08	1	0.88	0.61

源消费总量转变，使实施煤炭消费总量控制、提高终端能源消费中清洁能源比重成为必然。

到 2017 年，煤炭占能源消费总量比重降低到 65% 以下，京津冀、长三角、珠三角等区域力争实现煤炭消费总量负增长；2020 年全国煤炭消费总量达到拐点，电煤占煤炭消费总量比重提高至 60%；到 2030 年，全国煤炭占能源消费比例降至 50% 左右，电煤占煤炭消费总量比重提高至 70%，基本消除原煤散烧。

加快清洁能源利用，2030 年天然气、核能、可再生能源（不包括生物质）占比应达到 25%。加大天然气供应，提高天然气干线管输能力，优化天然气使用方式，新增天然气应优先保障居民生活或用于替代中小锅炉燃煤；鼓励发展天然气分布式能源等高效利用项目，限制发展天然气化工项目；有序发展天然气调峰电站，原则上不再新建天然气发电项目。积极有序发展水电，开发利用地热能、风能、太阳能、生物质能，安全高效发展核电。

3.2 实现煤炭的清洁高效集中可持续利用

优化煤炭消费结构，提高终端能源消费中清洁能源比重。除必要保留的以外，地级及以上城市建成区基本淘汰 10 蒸吨 / 小时及以下的燃煤锅炉，禁止新建 20 蒸吨 / 小时以下的燃煤锅炉；其他地区原则上不再新建 10 蒸吨 / 小时以下的燃煤锅炉。在供热供气管网不能覆盖的地区，改用电、新能源或洁净煤，推广应用高效节能环保型锅炉。

通过创新驱动持续推动用能行业节能减排和清洁生产。在电力、钢铁、水泥、等重点用能行业进一步发展和推广先进生产工艺，如超临界发电机组、整体煤气化联合循环发电机组、电炉炼钢、干熄焦、大型新型干法水泥等，逐步实现工业生产设备大型化。加快落后产能淘汰，逐步淘汰 200MW 以下的火电机组，400 立方米及以下炼铁高炉，30 吨及以下转炉、电

炉，水泥立窑，土焦和炭化室高度小于 4.3 米的焦炉等。燃煤电厂的平均热效率由 2010 年的 40.5% 提高到 2030 年的 46.5%。工业锅炉、炼铁高炉、水泥生产、炼焦炉和砖瓦窑单位产品的能耗 2010 年—2030 年分别降低 24%、13%、16%、44% 和 27%。

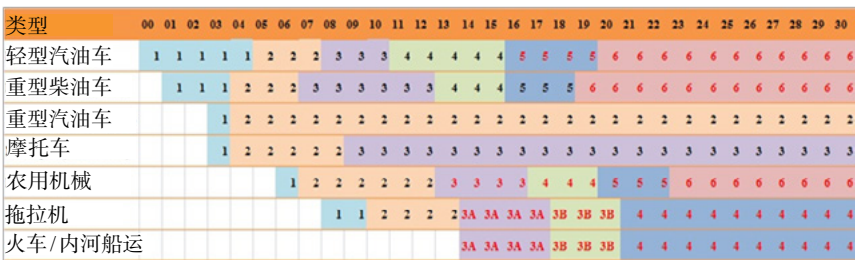
大力发展污染物控制技术，推动污染物超低排放和协同控制技术的研发，优先在电力、钢铁、水泥等典型用煤行业和重点区域进行示范和推广。推进对空气污染控制和温室气体排放控制同时有效的政策和技术应用。

3.3 构建“车—油—路”一体化的移动源排放控制体系

重塑城市低碳低排的绿色可持续公共交通体系，对轨道交通和地面公交进行优化和精细化管理，充分发挥高速铁路在城际出行的重要作用，实现城际高铁—市内轨道—地面公交的无缝连接。大力改善城市慢行交通的出行条件，增加自行车道和步行道。充分利用交通管理和经济政策调控重点区域和特大城市的汽车使用总量，到 2030 年，全国千人机动车保有量控制在 325 辆。

建立车辆排放—燃油质量一体化的标准体系。主要排放标准的应用时间框架如图 1 所示，具体来说，力争全国范围 2020 年左右（东部地区 2018 年左右）轻型车和重型车同步过渡到国六排放水平，并逐步统一相同车型的汽油车和柴油车新车排放标准。基于实际道路检测和大数据监控等高科技手段，构建立体监控体系，实现车辆在全生命使用周期内的排放控制和监管。推动工程机械、船舶等非道路移动源的排放标准和燃油质量与道路机动车控制水平接轨。持续推进燃油的低硫化进程并改善非硫组分。到 2030 年，达到欧洲现有最严格排放标准的车辆比例接近 100%。

实施发达国家先进的燃油经济性标准，2030 年轿车和重型车的新车燃油经济性将分别比 2010 年提高 33% 和 57%。大力发展能实现能源和环境双赢的新能源车辆技术，并特别重视电动车推广过程中排放向上游发电过程的转移，确保在生命周期全过程中对污染排放的有效控制。对于重点区域和大城市，适时推动包括车辆总量调控、低排放区、拥堵收费、提高停车收



注：黑色的数字表示 2010 年年末前颁布的标准，红色的数字表示未来假定出台的标准。重型柴油车欧 4 和欧 5 标准的实施时间由于技术原因与原计划相比有所推迟。

图 1 本研究提出的机动车排放标准实施时间框架

费和尾号限行等交通经济调控措施。

3.4 以区域环境空气质量改善为目标，强化多源、多污染物的区域协同控制

为实现多污染物减排目标，需坚持“协同”、“综合”、“联动”的战略思路：在控制对象上，要对二氧化硫、氮氧化物、一次颗粒物、挥发性有机物等多污染物协同控制；在控制污染源类型上，要对工业源、

面源、移动源综合控制；在控制策略上，要实现区域和城市之间的联防联控。

燃煤电厂和工业企业应大力推广烟气脱硫（FGD）、烟气脱硝和高效除尘装置（HED，包括布袋除尘、电袋复合除尘等）。对于燃煤电厂，2030 年全国 FGD 和选择性催化还原技术（SCR）的安装比例均应达到 100%；HED 的安装比例应达到 50% 以上，在京津冀、长三角等重点地区应达到 80% 左右。对于

表 3 主要固定源关键控制技术的应用比例（%）

年份		2012 年				2020 年				2030 年			
能源技术	控制技术	京津冀	长三角	珠三角	全国	京津冀	长三角	珠三角	全国	京津冀	长三角	珠三角	全国
电厂煤粉炉	WET (PM)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ESP (PM)	80.0	80.0	80.0	87.7	45.8	48.3	50.0	68.8	13.3	23.3	20.0	51.3
	HED (PM)	20.0	20.0	20.0	12.3	54.2	51.7	50.0	31.2	86.7	76.7	80.0	48.7
	FGD (SO ₂)	100	96.6	100	94.3	100	100	100	100	100	100	100	100
	LNB (NO _x)	41.9	42.8	33.6	56.9	7.5	7.5	7.5	13.3	0.0	0.0	0.0	0.0
	LNB+SNCR (NO _x)	0.3	1.0	2.2	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	LNB+SCR (NO _x)	51.8	50.1	59.4	34.2	92.5	92.5	92.5	86.7	100	100	100	100
工业层燃炉	CYC (PM)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	WET (PM)	80.0	95.0	80.0	93.1	42.5	43.3	46.3	67.9	0.0	3.3	5.0	46.9
	ESP (PM)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.7	0.0	0.0	0.0	15.5
	HED (PM)	20.0	5.0	20.0	6.9	57.5	56.7	53.8	22.5	100.0	96.7	95.0	37.6
	FGD (SO ₂)	40.0	40.0	40.0	32.3	85.0	85.0	77.5	55.7	100.0	100.0	100.0	76.8
	LNB (NO _x)	20.0	20.0	20.0	18.5	60.0	67.5	60.0	63.6	0.0	30.0	30.0	37.7
	LNB+SCR (NO _x)	10.0	10.0	10.0	6.1	40.0	32.5	40.0	24.8	100.0	70.0	70.0	62.3
民用锅炉	CYC (PM)	10.0	10.0	10.0	13.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	WET (PM)	80.0	85.0	85.0	84.5	56.3	59.6	58.8	75.0	0.0	13.3	10.0	41.6
	HED (PM)	10.0	5.0	5.0	1.6	43.8	40.4	41.3	25.0	100	86.7	90	58.4
	DC (SO ₂)	15.0	15.0	15.0	15.0	35.0	35.0	35.0	27.3	50.0	50.0	50.0	42.3
燃煤炉灶	STV_ADV_C	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	20.0	20.0	12.3	100	100	100	76.8
生物质炉灶	STV_ADV_B	0.0	0.0	0.0	0.0	20.0	20.0	20.0	12.3	50.0	50.0	50.0	34.5
	STV_PELL	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	50.0	50.0	30.6

注：CYC，旋风除尘；WET，湿法除尘；ESP，电除尘；HED，高效除尘；FGD，烟气脱硫；LNB，低氮燃烧技术；SCR，选择性催化还原；SNCR，选择性非催化还原，DC，燃用低硫型煤；STV_ADV_C，先进燃煤炉灶；STV_ADV_B，先进生物质炉灶，如改进燃烧条件，催化型炉灶等；STV_PELL，生物质型煤炉灶。

工业锅炉, 2030 年全国平均 FGD、SCR 和 HED 应用比例应分别达到 75%、60% 和 40% 左右; 重点区域的应用比例应显著高于上述水平, 例如, 在京津冀, FGD、SCR 和 HED 的应用比例均应接近 100%。对于其他工业部门, 2010—2013 年出台的一系列新排放标准应逐渐实施, 包括《炼铁工业大气污染物排放标准》等 6 项钢铁工业排放标准, 《炼焦化学工业污染物排放标准》《水泥工业大气污染物排放标准》《平板玻璃工业大气污染物排放标准》《陶瓷工业污染物排放标准》《砖瓦工业大气污染物排放标准》《铝工业污染物排放标准》《铅、锌工业污染物排放标准》《硫酸工业污染物排放标准》和《硝酸工业污染物排放标准》等; 在重点区域, 应在上述标准的基础上实施更严格的控制措施, 如在京津冀地区, 大部分的工业企业都应充分装配最先进的脱硫、脱硝和除尘技术。

对于民用部门, 在城区应推广热电联产供热, 大力推广天然气、电等清洁能源; 在农村地区推广大型沼气设施的建设和利用, 无法用清洁能源替代的, 逐步采用先进低排炉灶, 到 2030 年占居民炉灶总量的 70% 以上。在重点地区采取有效措施, 使生物质开放燃烧降低 50% 以上。主要固定源的关键控制技术的应用比例如表 3 所示。

针对挥发性有机物排放, “十三五”期间, 颁布并执行新的挥发性有机物排放标准(相当于欧盟 1999/13/EC 和 2004/42/EC), 2020 年之后逐步加严。针对农业氨排放, 应在京津冀、长三角等重点地区采取有效的控制措施, 包括调整农业化肥使用构成, 增加硝态氮肥比例, 变革农业生产方式, 推广环保农业和生态农业, 实行种养一体, 逐步消除养殖废弃物处理和运输过程中的氨排放。

总之, 应综合考虑各类排放源控制的敏感性、控制技术的可行性、各区域达标难度的差异以及污染物减排的多重环境影响, 制定适合区域特点的差异化大气污染防治策略。

最后, 本研究提出的控制措施具有较强的可行性。首先, 本研究提出的能源结构调整目标与 2014 年中美双方达成的《中美气候变化联合声明》有较好的一致性, 后者规定 2030 年非化石能源(包括核能、可再生能源)占一次能源消费的比重达到 20%。可见, 前面提出的能源结构调整措施基本反映了最新的国家战略走向, 具有较强的可行性。其次, 研究提出的煤炭清洁高效集中可持续利用、“车—油—路”一体化的

移动源排放控制措施, 以及多源多污染物末端治理措施, 均为目前技术上可行的控制措施, 其中绝大部分已在发达国家有应用的经验, 未考虑未来可能研发出的新的控制技术。最后, 对于因监管困难而难以充分实施的控制措施(如推广先进低排炉灶、禁止生物质开放燃烧、牲畜养殖 NH_3 排放控制等), 本研究均留有余地, 未假定 100% 实施, 从而确保了措施的可行性。

参考文献

- [1] Yang F, Tan J, Zhao Q, et al. Characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ speciation in representative megacities and across china[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11: 5207–5219.
- [2] Ji DS, Li L, Wang YS, et al. The heaviest particulate air-pollution episodes occurred in northern china in January, 2013: Insights gained from observation[J]. Atmospheric Environment, 2014, 92: 546–556.
- [3] 联合国开发计划署驻华代表处. 中国人类发展报告 2002: 绿色发展必选之路[M]. 北京: 中国财经出版社, 2002.
- [4] Lim SS, Vos T, Flaxman AD, et al. A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990 – 2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010[J]. The Lancet, 2012, 380(9859): 2224–2260.
- [5] 中国工程院, 环境保护部. 中国环境宏观战略研究: 环境要素保护战略卷[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [6] Wang SX, Hao JM. Air quality management in china: Issues, challenges, and options[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(1): 2–13.
- [7] Wang SX, Zhao B, Cai SY, et al. Emission trends and mitigation options for air pollutants in East Asia[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14: 6571–6603.
- [8] Zhao B, Wang SX, Xu JY, et al. NO_x emissions in China: historical trends and future perspectives[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13: 16047–16112.
- [9] 邢佳. 大气污染排放与环境效应的非线性响应关系研究[D]. 北京: 清华大学, 2011.

(责任编辑: 李晨曦)