

新中国成立70年来我国大气污染防治历程、成就与经验

王文兴^{1,2}, 柴发合¹, 任阵海¹, 王新锋², 王淑兰¹, 李红¹, 高锐¹, 薛丽坤²,
彭良^{1,3}, 张鑫^{1,2}, 张庆竹²

1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

2. 山东大学环境研究院, 山东 青岛 266237

3. 西南石油大学化学化工学院, 四川 成都 610500

摘要: 自20世纪70年代以来,我国在经济持续增长、能源消耗不断增加的同时,及时缓解了各类主要的大气环境问题,有效避免了欧美发达国家曾经出现的严重大气污染灾害。然而,目前我国仍然面临着大气污染尤其是二次污染的严峻挑战。为此,非常有必要全面梳理与分析新中国成立70年以来,特别是自20世纪70年代至今,我国大气污染防治的历程、成就与经验。结果表明:我国在各阶段的大气污染防治过程中均取得了较为明显的环境空气质量改善成就与较为丰富的污染防控经验,并在此过程中形成了具有中国特色的大气污染防治理论与管理模式,构建了系统科学的大气污染综合防控体系。今后我国大气污染治理工作应进一步明确各级政府主体责任,强化重点污染源治理,继续调整优化四大结构,统筹兼顾,强化区域联防联控,强化科技能力建设,注重大气环境问题预测,加强环境科学与技术研究,共同推进大气污染防治,打赢蓝天保卫战。

关键词: 大气污染; 历程; 成就; 经验; 启示

中图分类号: X513

文章编号: 1001-6929(2019)10-1621-15

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2019.09.15

Process, Achievements and Experience of Air Pollution Control in China Since the Founding of the People's Republic of China 70 Years Ago

WANG Wenxing^{1,2}, CHAI Fahe¹, REN Zhenhai¹, WANG Xinfeng², WANG Shulan¹, LI Hong¹, GAO Rui¹,
XUE Likun², PENG Liang^{1,3}, ZHANG Xin^{1,2}, ZHANG Qingzhu²

1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. Environment Research Institute, Shandong University, Qingdao 266237, China

3. College Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

Abstract: Since 1970s, the major atmospheric environmental problems have been mitigated in time, severe atmospheric pollution disasters have been avoided efficiently, and the air quality has been improved significantly along with China's rapid economic growth and sustained increase in energy consumption. However, at present, China still faces serious challenges of air pollution, especially secondary pollution. Therefore, the process, achievements and experience of China's air pollution prevention and control since the founding of the People's Republic of China, especially since the 1970s, were combed and analysed comprehensively. The achievements of air quality improvement, new theory and new management modes with Chinese characteristics were highlighted and a control system was established in the process of prevention and control of atmospheric pollution and the systematic scientific air pollution prevention. China's future air pollution control work should further clarify the main responsibilities of governments at all levels, strengthen the management of key pollution sources, continue to adjust and optimize the four major structures, make overall plans, strengthen regional joint defense and control, strengthen scientific and technological capacity building, pay attention to the prediction of atmospheric environmental problems, and strengthen research in environmental science and technology. In this way, the prevention and control of atmospheric pollution will be promoted together, so that the three-year plan on defending the blue sky will be completed satisfactorily.

收稿日期: 2019-08-21 修订日期: 2019-09-10

作者简介: 王文兴(1927-),男,安徽萧县人,研究员,中国工程院院士,山东大学讲席教授、博导、环境研究院院长,中国环境科学研究院学术顾问,主要从事大气环境化学、大气污染与控制、环境量子化学等研究,wxwang@sdu.edu.cn.

基金项目: 北京市科委首都蓝天行动培育专项(No.Z181100005418015); 国家重点研发计划项目(No.2016YFC0200500)

Supported by Capital Blue Sky Action Training Project from Beijing Municipal Science & Technology Commission's, China (No.Z181100005418015); National Key Research and Development Program, China (No.2016YFC0200500)

Keywords: air pollution; process; achievements; experience; enlightenment

大气污染是指由于人类活动或自然过程引起某些物质进入大气中,当污染物含量达到有害程度以致破坏生态系统和人类正常生存与发展时,对人或物造成危害的现象^[1];其本质是大气污染物通过一系列复杂的物理、化学和生物过程,对人体健康和人类生存环境造成不利影响^[2]。随着工业化及城市化的快速发展,大气污染已成为世界各国面临的重大环境挑战之一^[3]。大气污染严重危害人体健康,并会对生态环境、气候变化等造成不利影响^[4-5],已引起各国政府的高度重视,我国政府一直高度重视大气污染防治。

自新中国成立以来,我国大气污染防治历经风雨,从蹒跚起步、探索前行直至稳步发展、成绩卓越^[6-12]。近年来,一些学者梳理了我国大气污染防治的历程,从不同角度对我国大气污染防治经验进行了总结^[3,6,13]。然而,如果说我国大气污染治理犹如一列启动后未曾停止过的列车,那么自2013年以后,这趟列车则是进入了高速铁路轨道,高速前进^[14]。因此,有必要再次梳理我国大气污染防治的发展历程与成就,特别是自党的十八大以来所开展的大气污染防治实践,从中总结优秀经验,以期为我国乃至世界的大气污染防治提供参考。

该研究对我国大气污染防治工作进行了回顾分析,梳理了我国大气污染防治历程、成绩与经验,重点阐述了我国在大气污染防治过程中所取得的环境空气质量改善成就,以及在此过程中形成的具有中国特色的新理论与新的管理模式,并总结其对今后我国大气污染防治工作的启示,研究成果不仅可以为我国下一阶段的大气污染治理提供经验借鉴与决策参考,也可供其他面临大气重污染问题的国家借鉴。该研究目的在于宣传我国大气污染防治成就,促进我国大气污染防治工作再上新台阶,以及为深入开展“不忘初心,牢记使命”主题教育,践行习近平生态文明思想,推动我国大气污染防治事业,改善我国大气环境质量贡献力量。

1 我国大气污染防治历程

我国大气污染防治工作主要开始于20世纪70年代^[3],我国大气污染的防治历程大体可以分为4个阶段,即起步阶段(1972—1990年)、发展阶段(1991—2000年)、转型阶段(2001—2010年)与攻坚阶段(2011年至今),各阶段的环境保护组织结构、防治对象、工作重点、法律法规、行动计划、污染物排放与

空气质量标准等均有明显变化^[11](见表1)。

1.1 起步阶段(1972—1990年)

1972—1990年是我国大气污染防治的起步阶段。1972年我国组织代表团参加了联合国人类环境会议,开启了我国环境保护的征程。该阶段我国大气污染防治对象以烟尘和悬浮颗粒物为主,空气污染范围主要限于城市局地(如太原市煤烟型大气污染、兰州市光化学烟雾污染、天津市工业烟气污染),控制重点是工业点源,空气质量管理以属地管理为主,主要任务包括排放源监管、工业点源治理、消烟除尘等。

1973年第一次全国环境保护会议召开,确定了环境保护“32字方针”,通过了《关于保护和改善环境的若干规定》。随后,国务院成立了原国务院环境保护领导小组(下设环境保护办公室,后升级为原国家环境保护局),为我国重大大气污染问题的调查和决策起到了重要的领导、支撑和推动作用。环境保护立法对我国大气污染防治工作具有里程碑的意义,1978年第五届全国人民代表大会将“保护环境和自然资源,防治污染和其他公害”写入《宪法》,1979年颁布了第一部综合性的环境保护基本法——《中华人民共和国环境保护法(试行)》,其中包括建立中国环境科学研究院和中国环境监测总站。1987年《大气污染防治法》出台,为大气污染治理提供了法律保障和执法依据,起到了重要的指导性作用。环境保护标准的发布对大气污染治理有重要的引导和推动作用:1973年我国发布了第一个国家环境保护标准——GBJ 4—1973《工业“三废”排放试行标准》,规定了工业废气中一些污染物的容许浓度和排放量;1982年制定了GB 3095—1982《大气环境质量标准》,划分环境空气功能区,规定了空气污染物3个级别标准浓度限值。这些标准使得大气污染防治和监测可操作化。

1.2 发展阶段(1991—2000年)

1991—2000年是我国大气污染防治的发展阶段。1992年我国派员参加了联合国环境与发展会议,会议通过了《关于环境与发展的里约热内卢宣言》和《21世纪议程》,对各国保护环境与生态、谋求社会经济可持续发展提出了更高要求,我国积极履行约定和承诺,相继做出重大决策并采取积极行动。这一阶段的主要防治对象为SO₂和悬浮颗粒物,空气污染的范围由城市局地污染向区域性污染发展,出现了大面积的酸雨污染,控制重点为燃煤锅炉与工业排放。

此前,我国已经实施了一些以消烟除尘为目的的

表 1 我国不同时期大气污染防治工作的特点

Table 1 Characteristics of air pollution prevention in China during different periods

项目	起步阶段(1972—1990年)	发展阶段(1991—2000年)
大事记	1972年我国组团参加联合国人类环境会议,1973年第一次全国环境保护会议召开,筹建中国环境科学研究院	1992年我国参加联合国环境与发展会议,1994年发布《中国21世纪议程》
污染特征	逐渐出现局地大气污染	出现区域性大气污染,酸雨问题突出
环保机构	原国务院环境保护领导小组	原国家环境保护局
防治对象	烟尘、悬浮颗粒物	酸雨、SO ₂ 、悬浮颗粒物
工作重点	排放源监管,工业点源治理,消除烟尘	燃煤锅炉与工业排放治理,重点城市和区域污染防治
法律法规与规划方案	<ul style="list-style-type: none"> • 《关于保护和改善环境的若干规定》 • 《宪法》(1978年修订) • 《中华人民共和国环境保护法(试行)》 • 《大气污染防治法》 	<ul style="list-style-type: none"> • 《大气污染防治法实施细则》 • 《大气污染防治法》(1995年和2000年两次修订) • 《酸雨控制区和二氧化硫污染控制区划分方案》 • 《征收工业燃煤二氧化硫排污费试点方案》 • 《汽车排气污染监督管理办法》 • 《机动车排放污染防治技术政策》
排放与空气质量标准	<ul style="list-style-type: none"> • GBJ 4—1973《工业“三废”排放试行标准》 • GB 3095—1982《大气环境质量标准》 	<ul style="list-style-type: none"> • GB 13271—1991《锅炉大气污染物排放标准》 • GB 3095—1996《环境空气质量标准》 • GB 13223—1996《火电厂大气污染物排放标准》
项目	转型阶段(2001—2010年)	攻坚阶段(2011年至今)
大事记	我国举办2008年北京奥运会,为保障城市空气质量,试点实施大气污染的区域联防联控	2013年我国东部遭遇连续的灰霾污染、PM _{2.5} “爆表”,出台《大气污染防治行动计划》,开展中央环保督查
污染特征	大气污染呈现区域性、复合型的新特征	区域性、复合型大气污染
环保机构	原国家环境保护总局,原环境保护部	原环境保护部,生态环境部
防治对象	SO ₂ 、NO _x 和PM ₁₀	霾、PM _{2.5} 、PM ₁₀
工作重点	实行污染物总量控制,实施区域联防联控	多种污染源综合控制,多污染物协同控制,重污染预报预警
法律法规与规划方案	<ul style="list-style-type: none"> • 《两控区酸雨和二氧化硫污染防治“十五”计划》 • 《现有燃煤电厂二氧化硫治理“十一五”规划》 • 《二氧化硫总量分配指导意见》 • 《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》 	<ul style="list-style-type: none"> • 《大气污染防治行动计划》 • 《大气污染防治法》(2015年和2018年两次修订) • 《重点区域大气污染防治“十二五”规划》 • 《“十二五”主要污染物总量减排目标责任书》 • 《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》 • 《“十三五”生态环境保护规划》 • 《打赢蓝天保卫战三年行动计划》
排放与空气质量标准	<ul style="list-style-type: none"> • GB 13271—2001《锅炉大气污染物排放标准》 • GB 13223—2003《火电厂大气污染物排放标准》 	<ul style="list-style-type: none"> • GB 3095—2012《环境空气质量标准》

排放源管控措施,但由于经济发展迅速,大气污染防治执行力度有限,大气污染物特别是SO₂的排放量持续增长.这一时期,长江以南的广大地区降水酸度迅速升高,我国酸雨面积超过300×10⁴ km²,继欧洲、北美之后形成世界第三大酸雨区.酸雨污染影响作物生长,腐蚀建筑材料,破坏生态系统,造成巨大经济损失.国务院高度重视酸雨污染问题,把环保工作从城乡建设部独立出来,成立原国家环境保护局(副部级),将酸雨和SO₂污染控制纳入修订的《大气污染防治法》,并颁布了《征收工业燃煤二氧化硫排污费试点方案》和《酸雨控制区和二氧化硫污染控制区划分方案》,对SO₂实行排污收费和总量控制,开展了大规模的重点城市和区域的污染防治及生态建设和保护工程,对我国大气污染防治具有重要意义.

1994年国务院批准《中国21世纪人口、环境与发展白皮书》,成为我国实施可持续发展战略的行动纲领.我国进一步加强环保立法,颁布了《大气污染防治法实施细则》,并于1995年和2000年对《大气污染防治法》进行两次修订,强调经济与社会的可持续发展,修改了落后工艺和设备、煤炭洗选、立法目的、防治主体、法律责任等问题和条目,法律条文数目显著增加,惩罚力度大幅提高.这一时期,我国开始关注机动车的污染物排放,先后发布了《汽车排气污染监督管理办法》和《机动车排放污染防治技术政策》,对汽车及其发动机产品提出环保要求.1996年修订了GB 3095—1982《环境空气质量标准》,对总悬浮颗粒物等14种环保术语、环境质量分区分级有关内容进行修改,调整补充了污染物项目、取值时间、浓度限

值和数据统计有效性等规定,进一步完善了空气质量标准.

1.3 转型阶段(2001—2010年)

2001—2010年是我国大气污染防治的转型阶段. 举办2008年北京奥运会对环境空气质量提出更高要求,奥运会期间的空气质量保障与污染物减排、控制取得了显著成效,对我国大气污染防治工作的深入推进具有特殊意义. 该阶段的主要防治对象转变为 SO_2 、 NO_x 和 PM_{10} ,大气污染初步呈现出区域性、复合型特征,煤烟尘、酸雨、 $\text{PM}_{2.5}$ 和光化学污染同时出现,京津冀、长三角、珠三角等重点地区大气污染问题突出,控制重点为燃煤、工业源、扬尘、机动车尾气污染,开始实施污染物总量控制和区域联防联控.

这一时期,我国工业化、城镇化进程加快,能源消耗尤其是煤炭消耗量快速增加,钢铁、水泥等高污染行业规模不断扩大,汽车保有量迅速增长,对环境空气质量带来巨大挑战. 我国大气污染形势严峻,已影响到中国的国际形象及重大国际活动的申请和举办,北京奥运会、上海世博会和广州亚运会期间的空气质量保障极其重要. 为推动我国大气污染防治工作进入政府的综合决策,原国家环境保护总局进一步升格为原环境保护部,成为国务院组成部门,在京津冀、长三角、珠三角等重点地区试点实施了大气污染防治联防联控,环境空气中一次污染物的浓度得到初步控制,国际重大赛事期间的空气质量得到基本保障,为之后我国更大范围的大气污染防治提供了宝贵的经验和借鉴.

为进一步控制酸雨和城市空气污染,我国将酸雨和 SO_2 污染防治纳入国家“十五”计划和“十一五”规划,先后颁布了《“两控区”酸雨和二氧化硫污染防治“十五”计划》和《现有燃煤电厂二氧化硫治理“十一五”规划》;开始实施大气污染物总量控制,2001年修订了GB 13271—1991《锅炉大气污染物排放标准》,并于2002年出台了《二氧化硫总量分配指导意见》,2003年又修订了GB 13223—1996《火电厂大气污染物排放标准》. 该阶段,我国启用大气污染防治的区域联防联控机制,2010年出台《关于推进大气污染防治联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》,规定了大气污染防治联防联控工作的重点区域、重点污染物、重点行业、重点企业和重点问题等,开展多种污染物协同控制,建立区域空气环境质量评价体系.

1.4 攻坚阶段(2011年至今)

2011年至今是我国大气污染发展的攻坚阶段. 2013年1月,我国东部出现跨区域、大范围的连续多

天灰霾天气, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 一度“爆表”^[15-17],更加复杂的污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 被提上议程,我国大气污染防治工作开始了长期的攻坚战. 该阶段我国大气污染防治的主要对象为灰霾、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} ,VOCs和臭氧逐渐受到关注^[18-23],控制目标转变为关注排放总量与环境质量改善相协调,控制重点为多种污染源综合控制与多污染物协同减排,全面开展大气污染的联防联控^[24-25].

该阶段初期,我国 SO_2 的排放量已有明显削减,但是其他主要大气污染物排放量很大,仍呈增长趋势或未有明显下降,区域性 $\text{PM}_{2.5}$ 污染严重^[25-26],特别是2013年初我国整个东部地区出现了长时间、大面积的灰霾污染过程,其影响波及我国东北、华北、华中和四川盆地的大部分地区,受影响人口数超过 6.0×10^8 人^[27],引起了社会和政府的高度重视. 随后,我国迅速出台了史上最为严格的《大气污染防治行动计划》,进一步加快产业结构调整、能源清洁利用和机动车污染防治. 2018年国务院机构改革中,原环境保护部调整为生态环境部,对环境保护职责进行整合,从此告别多头管理的不利局面. 至今,我国主要大气污染物的排放量与浓度已有明显降低,重点区域、主要城市的环境空气质量明显改善^[28].

这一时期,我国修订了多个大气环境保护法律和标准,对《环境保护法》《大气污染防治法》《防沙治沙法》《节约能源法》进行了修改、完善和补充,为大气污染治理提供了坚实的法律保障;另外,修订了GB 3095—1996《环境空气质量标准》,新增CO、臭氧、 $\text{PM}_{2.5}$ 三项污染物监测项目,将空气污染指数改为空气质量指数. 我国针对重点区域和城市制定了大气污染防治专项政策,先后发布《重点区域大气污染防治“十二五”规划》《“十二五”主要污染物总量减排目标责任书》,同时发布了《关于进一步做好重污染天气条件下空气质量监测预警工作的通知》及《关于加强环境空气质量监测能力建设的意见》,进一步落实主体责任. 2018年全国生态环境保护大会通过了《中共中央国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》,明确打好蓝天保卫战等污染防治攻坚战标志性战役的路线图、任务书、时间表,为我国大气污染防治工作的顺利开展提供了重要保障.

2 我国大气污染防治成就

新中国成立70年以来,特别是自20世纪70年代至今,我国在成立环境保护组织机构、颁布大气污染防治法律法规、制定污染物排放与空气质量标准、研究大气污染来源与成因、发展大气污染治理技术等

方面开展了大量的工作、做出了巨大的努力,取得了令人瞩目的效果和成就^[7,12],有效避免了发达国家曾经出现的伦敦硫酸烟雾、洛杉矶光化学烟雾、欧洲和北美酸雨等重大环境污染与生态破坏事件,阻止了可导致大范围人类伤亡与动植物死亡的大气污染灾害。目前,我国主要大气污染物的排放量与浓度显著下降,空气质量明显好转^[29],煤烟型大气污染、酸雨污染问题基本解决,局地光化学烟雾得以消除,产生了显著的健康、社会经济和环境生态效益,同时也促进了温室气体的减排和臭氧层消耗物质的淘汰。

2.1 大气污染物排放量的历史演变

大气污染伴随着经济发展、城市化建设、人类活动规模的扩大而产生,当生产活动对环境的影响超出大气的自净能力时,就会形成大气污染。新中国成立 70 年以来,我国经济总体上经历了改革开放前的曲折前进阶段和改革开放后的迅速发展阶段^[30],国内生产总值由 1978 年的 $3\ 678 \times 10^8$ 元迅速增至 2018 年的 90.03×10^{12} 元,经济年均增长速度高达 14.74%。五年计划(规划)的实施大幅推进了我国重工业的发展,截至 2018 年我国钢铁产量已达 11.06×10^6 t。自 2000 年起,我国汽车拥有量迅速增长,2018 年我国汽车生产量高达 $2\ 781.90 \times 10^4$ 辆。然而,我国经济的高速发展仍然带来了环境污染的巨大代价,以粗放型发展为主的经济模式造成资源投入高、能源消耗多、污染物排放量大,大气环境污染问题严重^[27]。尽管我国不断加大大气污染防治力度,空气污染在较短时间内有一定的改善^[10],但总体而言,我国主要大气污染物(如 SO_2 、 NO_x 、颗粒物)的排放量自新中国成立以来呈显著增加的趋势,到 2000 年以后才陆续开始下降(见图 1)。

自新中国成立至 1996 年,我国 SO_2 排放量总体呈上升趋势。1996 年我国进行工业结构调整^[11],工业和居民煤炭消耗量下降且煤炭含硫量降低, SO_2 排放量第一次出现比较明显的下降。2000 年以后,城市化进程加快、经济发展迅速,尤其是一大批燃煤电厂的投入使用,导致 SO_2 排放量再次升高。至 2006 年,我国 SO_2 排放量增至 $2\ 588.8 \times 10^4$ t,较 2000 年增长了 29.8%。2006 年之后,我国逐步淘汰中小型发电机组并全面推行高效的烟气脱硫技术, SO_2 排放量开始下降。“十二五”期间,受益于严格的 SO_2 减排措施(特别是燃煤电厂的超低排放)与能源结构及能源消耗量的变化, SO_2 排放量持续下降^[20],2017 年我国 SO_2 排放量降低至 875.4×10^4 t,在 SO_2 减排方面取得了显著成效。我国 NO_x 排放量的变化趋势与 SO_2 类

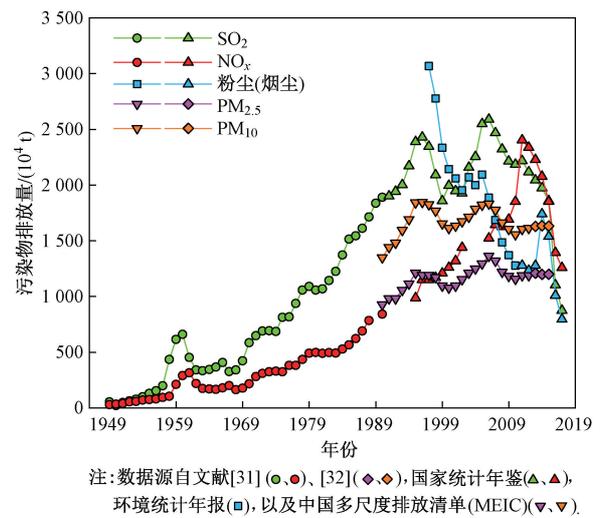


图 1 1949—2017 年我国主要大气污染物排放量的变化趋势

Fig.1 Variation trends of major air pollutants in China during 1949-2017

似,主要与能源消费变化有关,不过由于机动车保有量迅速增加,1996 年之后 NO_x 的排放量仍逐年升高,直到“十二五”期间,我国推行了严格的脱硫脱硝措施及机动车尾气排放标准的不断提升, NO_x 开始呈现显著下降的态势,到 2017 年, NO_x 排放量已降至 $1\ 258.83 \times 10^4$ t。

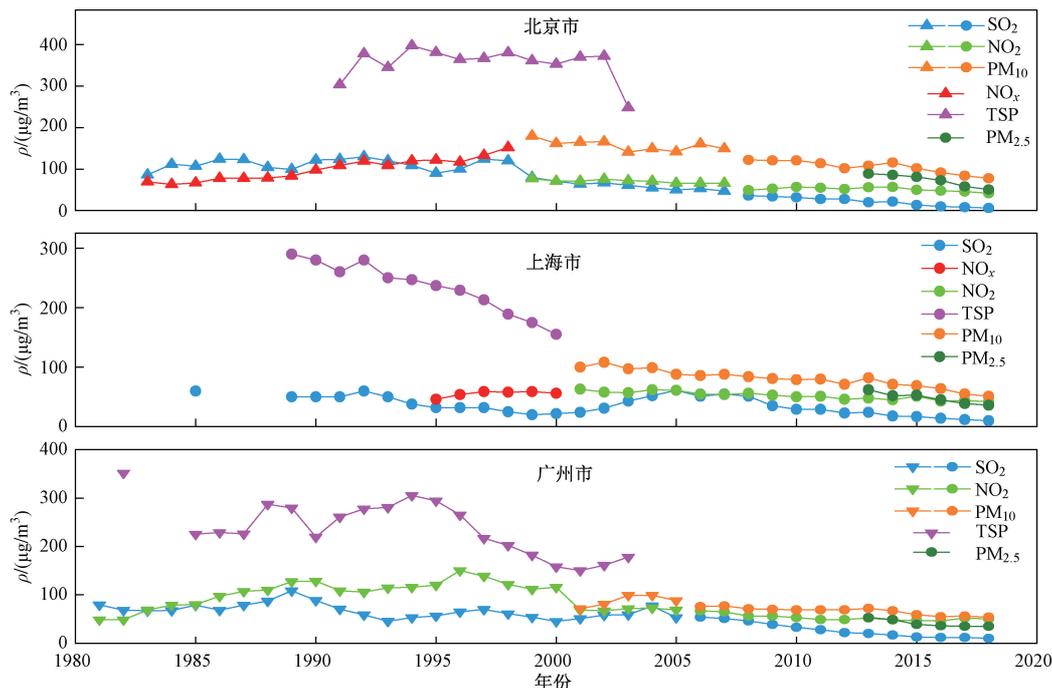
颗粒物排放量数据早期非常缺乏,直到 1990 年才有相对连续的统计或估算的数据。从 1990 年起,随着我国经济的快速发展与能源消费的不断增长, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放量迅速上升。1996—2000 年,我国能源消费和工业生产增速减缓且排放标准进一步提高,颗粒物排放量有所下降。根据中国多尺度排放清单(MEIC)的统计结果,我国 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放量 2000 年之后再次上升,在 2006 年达峰值,分别为 $1\ 363 \times 10^4$ 和 $1\ 833 \times 10^4$ t。“十一五”期间,严格实施各项除尘、抑尘措施, $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 排放量再次下降。2011 年颗粒物排放量有所反弹,但总体平稳,2015 年与 2011 年基本持平。工业粉尘(烟尘)排放量的变化趋势与 SO_2 有相似之处,1997 年出现最高值,工业结构调整之后迅速下降,2005 年再次出现峰值,随后因全面实施高效除尘技术而再次迅速降低,2014 年短暂升高后继续快速降低,到 2017 年已经降至 796.26×10^4 t,我国工业粉尘(烟尘)的减排对控制和降低 $\text{PM}_{2.5}$ 及 PM_{10} 的排放量做出了重要贡献。综上,自 1997 年起,我国颗粒物的排放量呈下降态势或保持平稳,颗粒物控制取得一定成效,但由于大气颗粒物来源广、涉及面多,目前仍然是大气污染控制的重点

对象^[33-34].

2.2 环境空气质量的历史演变

我国大气污染物的大量排放,导致环境空气中污染物浓度长期处于较高水平,经常出现较为严重的大气污染过程. 1980年,我国加入了联合国环境规划署成立的全球环境监测系统,之后陆续在重点城市建立环境空气质量监测站,逐渐形成了覆盖全国的空气质量监测网络,长期观察我国大气污染水平和空气质量

的变化趋势. 该研究选择北京市、上海市、广州市分别作为京津冀地区、长三角地区、珠三角地区3个重点区域的代表性城市,分析主要大气污染物质量浓度的变化趋势(见图2). 近年来北京市、上海市、广州市3个城市的 SO_2 、 NO_x (NO_2)和颗粒物(TSP、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$)的质量浓度较20世纪80年代显著降低,空气质量总体好转,但不同城市、不同污染物的质量浓度变化趋势有一定差异.



注:数据源自文献[35](▲、△、▲、▲、▲)、[36](▼、▼、▼、▼、▼),以及地方环境状况公报(●、●、●、●、●).

图2 1981—2018年我国重点区域主要大气污染物平均浓度的变化趋势

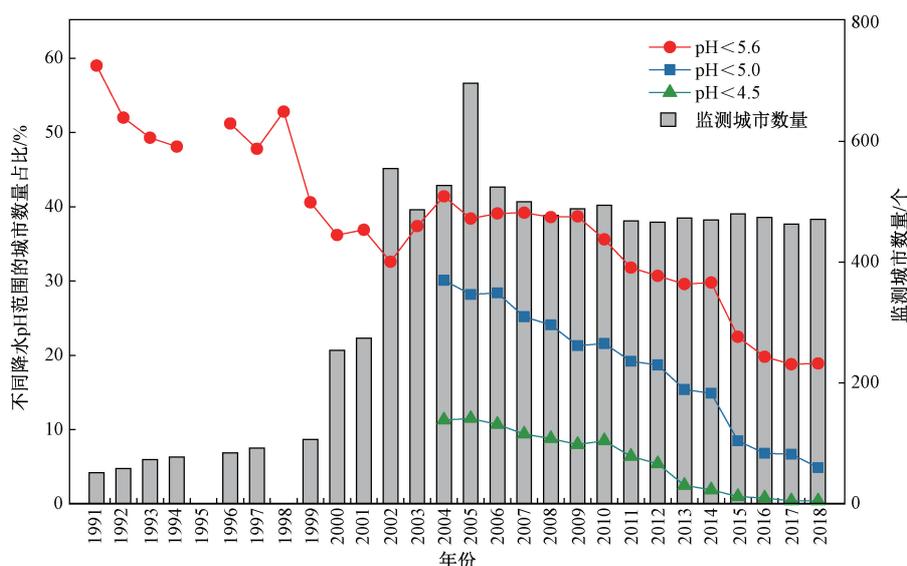
Fig.2 Variation trends of average concentrations of major air pollutants in key regions of China during 1981-2018

由图2可见:北京市各污染物的平均质量浓度在1998年之前总体呈上升趋势,在1998年之后呈下降趋势^[12];上海市 $\rho(\text{SO}_2)$ 自1992年起有所下降,2000年随着宝山钢铁股份有限公司三期等重点工程建成投产, $\rho(\text{SO}_2)$ 再次回升,直到2005年之后逐年下降, $\rho(\text{NO}_x)$ 从2001年起持续降低,而颗粒物质量浓度自1989年开始呈明显的下降趋势;广州市 $\rho(\text{SO}_2)$ 在1989年达最高值,之后在波动中降低,直到2004年开始连续下降, $\rho(\text{NO}_x)$ 从1996年起逐年降低,颗粒物质量浓度自1994年开始显著下降. 3个城市大气污染物的变化趋势与城市发展和污染控制密切相关,实施的产业结构调整、工厂搬迁、工业能耗降低、重点污染源整治、清洁能源使用、机动车尾气排放标准及油品标准提升等一系列措施对近20年来我国空气质量的好转起了关键作用^[37],确保我国没有发生类似

伦敦硫酸烟雾、洛杉矶光化学烟雾等引起大量人类伤亡的严重大气污染事件.

2.3 酸雨的历史变化特征

20世纪70年代末,我国贵州省松桃苗族自治县和湖南省长沙市、凤凰县等地区首先发现酸雨,之后又相继在南方多个地区监测到酸雨,我国出现酸雨的区域逐渐发展成为继欧洲、北美之后世界第三大酸雨区^[38-39]. 我国酸雨污染问题发生较晚,但国家对酸雨危害高度重视,从“七五”到“九五”科技攻关及“973”计划都给予了大力支持,建成了覆盖全国的酸雨监测网络^[40],查明了我国酸雨污染形成的独特原因^[41]. 回顾过去40年我国酸雨的演变历程,大体上经历了恶化、改善、再次恶化、再次改善的变化趋势^[11](见图3),未曾出现欧洲和北美地区曾经发生的大面积森林死亡、鱼虾绝迹的现象,避免了生态灾难和严重



注: 数据来源于 1991—2016 年的《中国环境状况公报》, 2017—2018 年的《中国生态环境状况公报》。

图 3 1991—2018 年全国降水不同 pH 范围的城市数量占比

Fig.3 Proportion of cities with different pH ranges for precipitation in China from 1991 to 2018

经济损失。

从 20 世纪 80 年代中期至 90 年代中期, 我国酸雨污染日趋严重, 在部分南方省市出现年均降水 pH 小于 4.0 的地区, 酸雨出现的频率也逐年上升^[42-43]。从酸雨强度(降水酸度、酸雨频率及酸雨区面积)来看, 1993—1998 年我国酸雨强度最大, 1998 年全国实行“两控区”政策之后酸雨强度有所减弱, 2003—2007 年随大气污染物排放量增加酸雨强度又有所增强, 2008 年以后 SO₂ 排放量显著下降, 酸雨污染状况逐年改善, 呈降水酸度减弱、酸雨频率下降、酸雨区范围缩小的良好趋势^[38], 到 2015 年我国酸雨问题基本得到解决。近 10 年来, 以贵州省为主体的强酸雨区, 以及华北、黄淮、江淮地区的酸雨区明显缩小, 出现酸雨的城市比例下降了 28.8%, 年均降水 pH 小于 4.5 的重酸雨区逐渐消失, 降水中 SO₄²⁻/NO₃⁻ (离子当量浓度之比, 下同) 逐年下降^[44]。至 2018 年, 我国酸雨面积约 53×10⁴ km², 主要分布在长江以南、云贵高原以东地区, 出现酸雨的城市比例为 37.6%, SO₄²⁻/NO₃⁻ 为 2.09, 降水中的酸雨类型总体仍为硫酸型^[45]。

2.4 协同减排效应

在大气污染防治、温室气体减排、臭氧层消耗物质淘汰的多重压力下, 我国越来越重视多种污染源综合控制与多污染物协同减排。大气污染物和温室气体均有一部分产生于含碳燃料燃烧, 北京市的“煤改电”工程, 宁波市港口清洁能源应用, 攀枝花市和湘潭市“十一五”总量减排措施分别削减 SO₂ 排放 2.1×10⁴、5.9×10⁴ t, 同时分别减少 CO₂ 排放 113.4×10⁴、

215.2×10⁴ t^[46-49]。大气污染物的减排、控制措施对降低温室气体排放有显著的协同减排效果^[50], 2018 年我国单位 GDP 的 CO₂ 排放较 2005 年降低 45.8%, 提前完成《巴黎协定》约定的目标, 为减缓全球气候变化做出了重要贡献。截至 2016 年, 我国累计淘汰臭氧层消耗物质约 25×10⁴ t, 占发展中国家的 1/2 左右, 实现了《蒙特利尔议定书》规定的各阶段履约目标, 全球共淘汰约 100×10⁴ t 臭氧层消耗物质, 臭氧层耗损和臭氧层空洞得到有效遏制, 取得了明显环境健康效益。

2.5 健康、社会经济及环境生态效益

我国自 20 世纪 70 年代以来开展的大气污染防治工作, 不仅有效缓解了大气污染, 提高环境空气质量, 还产生了良好的健康、社会经济、环境生态效益, 改善了人们生活和生产的环境条件, 有利于居民身心健康, 减少了大气污染带来的经济损失, 促进了社会经济的可持续发展和生态环境的良性循环^[51]。

据估计, 自我国《大气污染防治行动计划》实施以来, 我国城市地区由于环境大气 PM_{2.5} 暴露所导致的过早死亡人数每年约减少 8.9×10⁴ 人, 公众呼吸系统和循环系统疾病的发病率显著减低, 由于这类疾病导致的住院治疗每年减少约 12×10⁴ 人次, 由于各类疾病产生的门诊/急诊每年减少约 941×10⁴ 人次; 有效改善了公众的身心健康^[52-53], 也在很大程度上减轻了卫生系统和医疗部门的负担。根据估算结果, 《大气污染防治行动计划》的实施每年将为我国带来约 867×10⁸ 元的健康效益, 其中约 94% 来自于过早死亡人数的减少, 约 6% 来自于各类疾病发病率的

降低^[51]。

据统计,2013—2017年我国大气污染防治行动拉动我国GDP累计增加 $20\,570\times 10^8$ 元(5年合计,下同),非农就业岗位累计增加 260×10^4 个,起到刺激经济发展、促进社会就业等作用,产生了显著的社会经济效益。另外,我国大气污染防治工作的不断推进,还直接带动环保装备制造、建筑安装、综合技术服务、锅炉改造及新能源汽车等相关行业的发展,同时通过产业链关联间接带动金属冶炼压延加工业、化学工业(不含塑料和橡胶)、非金属矿物制品业、电力、热力的生产和供应业等传统高耗能高污染产业的转型升级^[54]。

此外,我国在大气污染防治方面的投入和所取得的成就,避免了重大环境生态灾害的发生,减少了人为活动引发的环境污染与生态破坏。我国酸雨污染的缓解与解决,及时避免我国遭受欧洲和北美地区曾经出现的严重酸雨危害和灾难,我国的建筑、土壤、植被、水体、水生生物等未出现大面积腐蚀、酸化、死亡的现象,为我国环境生态的可持续发展做出了巨大贡献。截至2018年,我国大气 $PM_{2.5}$ 污染已得到初步控制,大气能见度明显提升,霾污染天数显著下降,沙尘暴频率大幅降低,削弱了大气颗粒物污染对太阳辐射、大气温度、大气环流及成云降雨的影响。

2.6 环境空气质量现状

根据2018年《中国生态环境状况公报》^[45],全国338个地级及以上城市(含直辖市、地级市、自治州和盟)中,121个城市的环境空气质量达到GB 3095—2012《国家环境空气质量》二级标准,其余217个城市环境空气质量超标。338个地级及以上城市平均优良天数占比为79.3%,平均超标天数占比为20.7%。338个地级及以上城市发生重度污染1 899天次,严重污染822天次,其中,以 $PM_{2.5}$ 为首要污染物的天数占重度及以上污染天数的60.0%,以 PM_{10} 为首要污染物的占比为37.2%,以臭氧为首要污染物的占比为3.6%。

一次气态污染物 $\rho(SO_2)$ 年均值和 $\rho(CO)$ 日均值第95百分位数在达标的基础上进一步下降, $\rho(NO_2)$ 年均值继续达标。2018年338个地级及以上城市的 $\rho(SO_2)$ 和 $\rho(NO_2)$ 平均值分别为14和29 $\mu g/m^3$, $\rho(CO)$ 日均值第95百分位数为1.5 mg/m^3 ,均明显低于GB 3095—2012二级标准限值,几乎所有城市的 $\rho(SO_2)$ 年均值和 $\rho(CO)$ 日均值第95百分位数均达到GB 3095—2012二级标准,大部分城市的 $\rho(NO_2)$ 年均值达到GB 3095—2012二级标准。与

2017年相比,2018年京津冀地区、长三角地区和汾渭平原 $\rho(SO_2)$ 、 $\rho(NO_2)$ 年均值和 $\rho(CO)$ 日均值第95百分位数的降幅分别为26.7%~36.8%、4.4%~8.5%、7.3%~24.1%。

近年来,我国338个地级及以上城市 $\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(PM_{10})$ 年均值的平均值继续下降,但仍然超过GB 3095—2012二级标准限值。2018年全国338个地级及以上城市的 $\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(PM_{10})$ 年均值的平均值分别为39和71 $\mu g/m^3$,略高于GB 3095—2012二级标准限值,约有1/2的城市达到GB 3095—2012二级标准。与2017年相比,2018年京津冀地区、长三角地区和汾渭平原 $\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(PM_{10})$ 的年均值分别下降了10.2%~11.8%和7.0%~10.3%。

二次气态污染物 ρ (臭氧)仍在整体上升^[55],是我国环境空气质量6个评价指标中唯一上升的指标。2018年338个地级及以上城市的 ρ (臭氧)日最大8h平均值第90百分位数为151 $\mu g/m^3$,达到GB 3095—2012二级标准,达标城市比例为65.4%,其中,京津冀地区、长三角地区和汾渭平原的 ρ (臭氧)日最大8h平均值第90百分位数分别为199、167、185 $\mu g/m^3$,均超过GB 3095—2012二级标准限值,与2017年相比无显著下降。

综上,近年来我国城市环境空气质量取得明显改善。从2015—2018年338个城市的主要污染物质量浓度年评价来看, $\rho(SO_2)$ 和 $\rho(CO)$ 在达标的基础上进一步大幅降低; $\rho(NO_2)$ 略有降低; $\rho(PM_{2.5})$ 和 $\rho(PM_{10})$ 虽然呈明显下降趋势,但仍然普遍超标; ρ (臭氧)逐年上升,并且超标城市数量由2015年的54个增至117个,超标天数占比由4.6%增至8.4%。因此,目前我国臭氧污染形势凸显,臭氧成为影响我国空气质量的重要污染物。

3 我国大气污染防治经验

3.1 逐步完善大气污染防治的法律法规

法律法规在大气污染防治中起指导作用。我国《宪法》是现有国家和地方大气污染防治法律法规体系的依据和基础。在这个体系中,法律层次不管是综合法、单行法还是相关法,对环境保护的要求、法律效力是一样的,如果法律规定中有不一致的,应遵循后法低于《宪法》的原则。国务院环境保护行政法规的法律地位仅次于法律,部门行政规章、地方环境法规均不得有违背法律和行政法规的规定。地方性法规和地方政府规定只在制定法规、规章的辖区内有效,我国大气污染防治法规体系的建立与执行程序如图4所示。

保护环境是国家的基本国策。我国《宪法》规定:



图 4 我国大气污染防治法规体系的建立与执行程序

Fig.4 Establishment and implementation of laws and regulations on air pollution control in China

国家保护和改善生活环境和生态环境,防止污染和其他公害.自新中国成立以来,通过颁布《环境保护法》与《大气污染防治法》等相关法律法规约束环境污染行为,并赋予环保部门强制执法权,加大对生态环境污染犯罪的惩治力度.先后修订了《环境保护法》与《大气污染防治法》,针对环境违法的处罚内容进行了系统更新,不仅增加了处罚方式,民事赔偿责任和刑事责任的划分也更加细致,处罚力度也大力加码,有效地提高了工业企业的废气排放达标率,推动了对我国大气污染防治进程.我国大气污染防治法律法规体系如图 5 所示.

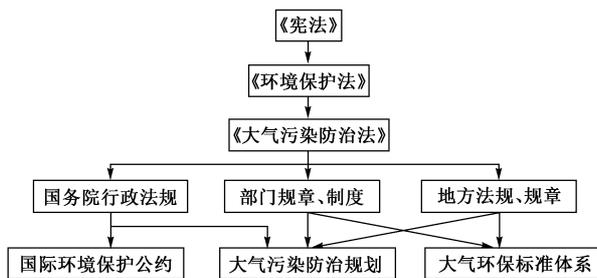


图 5 我国大气污染防治法律法规体系

Fig.5 China's system of laws and regulations on air pollution prevention and control

以《大气污染防治法》为基础,我国确立了大气污染防治的基本原则^[11],健全了地方政府对大气环境质量负责的监督考核机制,创建了“重点区域大气污染联合防治”的机制,完善了总量控制制度,改革了大气排污许可证制度,建立了机动车船污染防治的监管思路,提出了多种污染物协同控制的新要求,加强了有毒有害物质排放控制,强化了大气污染事故和突发性事件的预防,加强了对违法行为的处罚力度,增加了企业的违法成本,并有针对性的制定了应对气

候变化的相关条款,为大气污染管理与防治提供更加详细健全的法律规定^[56].

3.2 不断创新大气环境管理机制

新中国成立以来,我国的环境管理机构经历了多次调整和变革升级,先后经历了从原国务院环境保护领导小组,到原城乡建设环境保护部环境保护局,再到原国家环境保护局(副部级)、原国家环境保护总局(正部级)和原环境保护部,2018年4月16日,生态环境部正式揭牌,至今已形成了一个能适应环境规划与管理需要的完整体系.

我国不断调整环境保护部门以适应新需求.自1974年国务院成立原环境保护领导小组以来,历经30余年的发展、变迁,到目前的生态环境部,我国不仅有专门针对大气污染防治的大气环境司,还加强了区域污染的防治,如京津冀及周边地区大气环境管理局,承担各项空气质量保障工作.

在发展过程中,创新性地建立了适合我国大气环境问题的区域联防联控机制.1998年,为了解决SO₂污染和酸雨问题,国务院批准了关于“两控区”的划分方案,进行分区域管理.经过大气污染治理的实践和探索,国家进一步认识到以行政区划为界限、各地方单独治理的模式已经难以解决现今的大气污染问题,只有在一定区域内开展联合治理才能有效改善空气质量.在总结国内实践经验和借鉴国外有效措施的基础上,我国开始构建大气污染联防联控制度.2010年,国务院办公厅转发的《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》,是该制度第一个国家层面的规范性文件.2014年修订的《环境保护法》明确规定要建立跨行政区域的联合防治协调机制,这是我国首次在法律层面对区域污染的联合治理做出规定.随后在修订《大气污染防治法》时,大气污染联防联控的工作机制被以法律的形式确定下来,包括定期召开联席会议、划定重点防治区、制定区域联合防治行动计划、重要项目环评会商、信息共享、联合执法等.在大气联防联控制度的实施中,京津冀地区、长三角地区、珠三角地区作为跨区域大气污染的典型地区,形成了各具特点的联防联控模式^[57-58].

《大气污染防治行动计划》强化了中央政府空气质量目标管理,创新建立了中央和省级两级环保督察制度,中央政府检查省级政府,省级政府检查地市政府,通过自上而下的方式动员、调动各种资源,以上级权威强力推进环保监督管理工作,既要检查污染企业,更要检查地方政府,在短期内取得了明显效果.

中央政府在逐级分解目标任务之后,通过强化督查的工作机制,建立了可量化的大气污染防治重点任务完成情况指标体系,通过分数权重的设置,突出了考核重点污染源的措施落实情况;量化问责机制将大气污染防治任务与市县各级政府责任捆绑在一起,问题数量与需要问责的领导层级挂钩,推动了地方政府切实履行大气污染防治责任。

3.3 建立完善的大气环境标准体系

大气环境保护工作的高效有序开展,需要以科学、完善的法律法规体系作为保障与支持。因此,在我国环境保护事业开展过程中,也制定了许多相关的大气环境保护法律法规,以期保护和改善生活环境与

生态环境,防治大气污染,保障人体健康,促进社会主义现代化建设的发展。

我国环境空气质量标准的形成、制定、实施及发展与大气污染状况的变化形势、控制目标和国情相适应,并且是与我国环境立法与环境事业同步发展的^[11]。1972年我国参加联合国第一次人类环境会议标志着我国环境保护事业的开始,此后国家开始加强环境立法和环境标准的建设,从1982年发布第一个GB 3095—1982《大气环境质量标准》开始,经过30余年的发展和完善,我国已形成了“两级五类”环境保护标准体系^[11],其中我国空气质量标准和相关法律法规发展历程如图6所示。



注:蓝字为标准中原有的评价项目,红字为标准修订版中新增或更改的评价项目。

图6 我国空气质量标准和相关法律法规发展历程

Fig.6 Development process of ambient air quality standard system in China

我国环境空气质量标准经过30多年的发展演变,由于经济的发展、污染状况的改变和监测技术的进步、公众环保意识的增强等因素,标准的污染物项目、标准形式、浓度阈值等随着国际标准的升级而不断更新^[59];标准修订的依据和程序更加科学和完善。从“九五”规划首次实施污染物总量控制策略起到

“十二五”的20年间,空气污染的防治目标已从污染排放量总量控制发展到同时关注排放总量与空气质量,管理的模式也从属地管理开始向区域管理及联防联控过渡,而治理对象从工业企业的“达标排放”扩展到机动车、船舶、面源等污染,减排措施也从倚重末端减排向结构减排及能源清洁化发展。

大气污染物排放标准是根据环境质量标准、污染控制技术和经济条件,对排入环境有害物质和产生危害的各种因素所做的限制性规定,是对大气污染源进行控制的标准,它直接影响到我国大气环境质量目标的实现.科学合理的大气污染物排放标准体系,有助于全面系统地控制大气污染源,从而提高大气环境保护工作效力,改善整体大气环境质量.

1973 年我国发布第一个环境标准 GBJ 4—1973《工业“三废”排放试行标准》,规定了废气中 13 类有害物质的排放标准;1996 年发布的 GB 16297—1996《大气污染物综合排放标准》为代表,形成了“以复合型排放标准为主体,行业型排放标准为补充,二者不交叉执行,行业型排放标准优先”的排放标准格局.以 2000 年的《大气污染防治法》修订为契机,“超标违法”新制度被提出,这赋予了污染物排放标准极高的法律地位,成为判断“合法”与“非法”的界限.以 GB 3095—2012《环境空气质量标准》发布为标志,我国环境管理开始由以控制环境污染为目标导向,向以改善环境质量为目标导向转变.按照《国家环境保护标准“十三五”发展规划》,到“十三五”末期,我国将在“十二五”47 项大气固定源标准的基础上制定和制修订形成由约 70 项大气固定源标准构成的覆盖全面、重点突出的大气污染物排放标准体系.

目前,我国各项污染源排放标准不断健全,污染物排放指标增多、排放限值趋于严格^[60],代表着我国经济和技术水平不断强化的结果.通过不断加严的排放标准,我国电厂的超低排放已经达到国际领先水平.统计显示:2005—2012 年,全国燃煤机组脱硫比例由 14% 升至 92%;在发电量增长 90%、发电用煤量增长 80% 的情况下,SO₂ 排放量降低了 40%.

3.4 定期更新五年计划(规划)纲要中对大气污染物的减排要求

在我国五年计划(规划)纲要中,环境保护越来越受到重视.在每个五年计划(规划)中,均会有具体的大气污染物减排目标.

1982 年,环境保护作为一个独立篇章首次被纳入“六五”计划,这标志着我国的环境保护工作被提上了议事日程;“六五”以后,大气污染防治工作在环境保护中的地位越来越突出;“九五”计划中,制定了主要污染物排放总量控制计划;“十五”计划中进一步确定了 6 项主要污染物排放总量控制指标,并将指标分级下达到了各省、自治区、直辖市及计划单列城市;“十一五”计划中,重点布局 SO₂ 的减排,相继出台一系列措施,取得了良好的成效,2010—2015 年,

SO₂ 排放总量下降了 11.03%;“十二五”SO₂ 继续减排 8.00%;“十三五”将继续加大减排力度,预期减排 15%.一系列的五年计划(规划)为我国大气污染防治工作提供了切实可行的发展目标.国务院在《“十三五”生态环境保护规划》中继续对京津冀、长三角和珠三角等重点地区提出煤炭消费减量目标,其中要求 2015—2020 年,京津冀及周边地区的北京市、天津市、河北省、山东省、河南省五省(直辖市)煤炭消费总量下降 10% 左右,长三角地区的上海市、江苏省、浙江省、安徽省三省一市的煤炭消费总量下降 5% 左右,珠三角地区煤炭消费总量下降 10% 左右.同时要求大幅削减 SO₂、NO_x 和颗粒物的排放量,全面启动 VOCs 污染防治,开展大气 NH₃ 排放控制试点,实现全国地级及以上城市 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{CO})$ 全部达标, $\rho(\text{PM}_{2.5})$ 和 $\rho(\text{PM}_{10})$ 明显下降, $\rho(\text{NO}_2)$ 继续下降, $\rho(\text{臭氧})$ 保持稳定、力争改善;在重点地区、重点行业推进 VOCs 总量控制,全国排放总量下降 10% 以上.

3.5 构建强有力的科技支撑体系

根据国情,我国在不同时期都会针对不同的空气污染物进行科技攻关,通过设立酸雨污染的研究专项,逐渐摸清了我国酸雨地域分布、变化趋势及成因并划定“两控区”,实施严格的 SO₂ 控制措施,使我国酸雨污染得到有效遏制,到 2015 年,我国基本消灭了严重酸雨污染.近年来,颗粒物和臭氧污染逐渐突出^[55,61-62],以科技部“大气污染成因与控制技术研究”为代表的各种项目为我国大气污染防治工作提供强有力的科技支撑;同时,为创新科研管理机制,加强大气重污染成因与治理攻关的组织实施,成立了国家大气污染防治攻关中心作为大气重污染成因与治理攻关的组织管理和实施机构,为我国大气重污染应对提供了重要科技支撑.

目前,在我国共布局了超过 5 000 个环境空气质量监测站,堪称世界之最,监测预报预警、信息化能力与保障水平也都走到了世界前列.并且,我国已经布局了颗粒物组分的监测,并正在布局光化学监测,为我国中长期精细化污染成因分析提供数据支撑.

我国成功运用新技术将企业的排污行为变得易于管理.重点污染源企业全部安装了在线监控系统,并与环保部门联网,实时向社会公开企业的排污信息,接受全社会的监督.遥测技术的应用能够发现隐蔽性强的偷排企业,完成常规人力无法完成的检查.相比过去单纯的人力监管,应用新技术服务于污染源监管真正实现了事半功倍.

3.6 采用经济手段约束大气污染物排放

税收政策作为国家宏观经济调控的重要手段,具有经济调节的职能,是大气污染防治的主要对策之一。经济手段约束污染物的排放是我国的特色,通过各项税收及罚款政策等措施约束污染物的排放。

经过不断的发展,我国在大气污染防治方面的税收政策体系不断完善,我国2018年1月1日正式实施的《环境保护税法》,标志着税收征管水平不断合理和科学,从源头出发,加强对污染源的控制,通过税收政策调整微观主体的行为,提高能源使用效率,减少污染物排放。同时不断加大大气污染防治税收的执法力度,使得有法可依、有法必依、执法必严、违法必究。同时为加强地方大气污染防治力度,中央财政设立大气污染防治专项资金,用于支持地方开展大气污染防治工作;财政部、生态环境部制定《大气污染防治资金管理使用办法》,以加强大气污染防治资金管理使用,提高财政资金使用效率。

3.7 提升社会公众对大气环境保护的参与度

治理大气污染是为了保护公众健康。信息公开和公众参与是大气污染治理的必要环节。过去5年,我国出台了五部与环境信息公开相关的法律法规,《环境保护法》《大气污染防治法》等法律的修订也细化了信息公开和公众参与的内容、方式和罚则。与公众健康密切相关的信息,如实时空气质量、空气质量预报预警、污染源信息等,均是信息公开的重要内容,这些信息可以通过电视广播等传统媒体进行传播,还通过手机应用等新媒体手段推动信息获取。我国一些城市的重污染预警机制都经过几轮的修改,每一轮修订都充分考虑了社会公众对预警启动条件、应急措施的意见。因信息公开力度的加大,公众参与环保的积极性空前高涨。在环保举报方面,2010年原环境保护部开放了“12369”环保举报热线,畅通群众举报渠道,方便公众举报环境污染或者生态破坏事项。然而公众反映举报热线这一渠道有时存在问题描述不清楚的情况,因此2015年原环境保护部开通了微信举报这一新媒体方式,公众在举报时可以提交污染源的照片和位置,使得举报案件的办理效率也大幅提升。如今,随着公共交通的发展,更多市民出行方式从私家车出行转变为公共交通出行,“同呼吸、共奋斗”逐渐成为全社会的行为准则。

4 对我国未来大气污染防治的启示

我国大气污染防治历经近半个世纪,通过法制建设、科技支撑、综合减排、管理创新、社会共治等5个方面的努力和创新,构建了系统科学的大气污染综合防治体系^[14];开展了大量的科学探索和持续的治理

实践,取得了各阶段空气质量改善成效,积累了诸多成功经验,为我国下一阶段空气质量持续改善指引了方向:

a) 推行目标管理制度和环保督察制度,确保地方政府履行责任。首先应继续坚持科学发展观和习近平生态文明思想,提高政治站位。应进一步健全大气污染防治目标管理制度,中央政府签订责任书,逐级分解目标和任务,层层落实,推进各地政府主要领导亲自抓大气污染防治工作;深入开展中央和地方两级环保督查制度,在重点地区开展大气污染强化督查,督促地方政府履行责任;细化考核和问责办法,强化责任监督检查体系。立法支撑信息公开和公众参与;以公众感受为出发点,持续完善环境信息公开。

b) 政府部门协调与协作,共同推进大气污染治理。立法支持区域协作机制,建立区域协作机制,制定区域协作方案,自上而下推动形成区域协作机制,财政支持倾斜区域内落后省市。同级政府横向分解目标、任务及责任,创新执法合作,打击环境违法行为。

c) 强化重点污染源治理措施,加大减排力度。强化源头防治、标本兼治、全民共治理念,加快产业结构、能源结构、运输结构和用地结构优化调整,加强清洁能源替代及配套措施。加快淘汰落后产能,严控高能耗、高排放行业产能;严控煤炭消费总量,发展清洁、高效、低污染的燃煤燃气技术,提高工业燃煤锅炉排放标准,加强煤质管理,监督燃煤电厂超低排放。加强源头减排,升级末端治理措施,全面管控VOCs污染。完善大气污染物排放标准体系,运用新技术监管污染源,立法提高企业环境违法成本。健全机动车排放控制管理体系,调整车辆和运输结构,降低源头污染;创新监管模式与手段,加大监管投入;加严新车管理,推广新能源汽车,推动在用机动车达标排放,加快燃油品质升级,开展柴油车专项整治。

d) 强化科学技术能力建设,保障科学决策。修订、提高、评估各类大气污染物排放标准,分阶段发布环境空气质量标准和阶段性大气质量目标;推进国家监测网络扩建升级,针对建设全过程的各环节发布技术指南,国家牵头保障资金与人员能力建设,严肃惩处违规行为。推动源清单编制工作,国家层面提供技术指南,城市依规打造本土化方法,编制指南为城市大气污染治理提供指导,试点推动更多城市开展源解析。城市管理单位与科研机构密切合作,建立专业团队和多部门协作机制,保障跨部门协作长效性。

e) 注重大气环境问题预测,未雨绸缪。总结国内

外区域性大气环境问题的发生与发展,均是伴随着特定的经济、社会发展阶段产生的。如欧洲、北美与中国都曾经经历的煤烟型大气污染(包括伦敦硫酸型烟雾)、光化学氧化剂污染(包括洛杉矶光化学烟雾型)、酸雨危害,以及目前许多国家仍在遭受的大气细颗粒物污染(包括霾)危害。

f) 加强环境科学与技术研究,勇于创新。当今世界已经进入第四次工业革命时代,科学技术飞速发展,我国应该抓住这个历史机遇,在科学技术研究的道路上可以弯道超车,有一些领域可能处在同一个起跑线上。当今我国大气环境领域已拥有世界上最庞大的科技队伍,需要加强环境科学基础和前沿工程技术研究,确保满足我国现在和未来经济社会快速发展大气环境保护的需要。

虽然我国在各阶段大气污染防治工作中都取得了重大成就,但是随着经济社会发展和科学技术的进步,除继续大力控制大气细颗粒和光化学氧化剂污染外,还要关注大气环境可能出现的新问题。我国大气污染防治工作关乎 14 亿人的健康,任重而道远。为了全国人民的健康,各级政府、科技界、企业界、公众应当共同参与到大气污染防治中来,同呼吸共奋斗,全力以赴打赢蓝天保卫战,让人民群众获得或拥有更加强烈的“蓝天幸福感”。

参考文献(References):

- [1] 黄顺祥. 大气污染与防治的过去、现在及未来[J]. 科学通报, 2018, 63(10): 895-919.
HUANG Shunxiang. Air pollution and control: past, present and future[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(10): 895-919.
- [2] BILDE M, BARSANTI K, BOOTH M, *et al.* Saturation vapor pressures and transition enthalpies of low-volatility organic molecules of atmospheric relevance: from dicarboxylic acids to complex mixtures [J]. Chemical Reviews, 2015, 115(10): 4115-4156.
- [3] 郝吉明, 李欢欢. 中国大气污染防治进程与展望[J]. 世界环境, 2014(1): 58-61.
HAO Jiming, LI Huanhuan. Process and prospects of China air pollution control[J]. World Environment, 2014(1): 58-61.
- [4] ZHANG Daisheng, AUNAN K, SEIP H M, *et al.* The assessment of health damage caused by air pollution and its implication for policy making in Taiyuan, Shanxi, China [J]. Energy Policy, 2010, 38(1): 491-502.
- [5] HOLLAND M R. Assessment of the economic costs of damage caused by air-pollution[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 1995, 85(4): 2583-2588.
- [6] 郝吉明. 穿越风雨任重道远: 大气污染防治 40 年回顾与展望[J]. 环境保护, 2013(14): 28-31.
HAO Jiming. Crossing the storm and shouldering the heavy road: review and prospect of 40 years of prevention and control of atmospheric pollution[J]. Environmental Protection, 2013(14): 28-31.
- [7] Clean Air Asia. Breakthroughs; China's path to clean air 2013-2017 [R/OL]. Beijing: Clean Air Asia, 2018 [2019-07-20]. <http://www.allaboutair.cn/a/reports/2018/1227/527.html>.
- [8] FU G Q, XU W Y, RONG R F, *et al.* The distribution and trends of fog and haze in the North China Plain over the past 30 years [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(11): 11949-11958.
- [9] 国务院. 国务院关于印发打赢蓝天保卫战三年行动计划的通知 [R]. 北京: 国务院, 2018: 1-2
- [10] Anon. Cleaner air for China [J]. Nature Geoscience, 2019, 12(7): 497.
- [11] 王文兴, 魏复盛, 丁一汇, 等. 中国大气污染防治历史回顾、挑战与应对策略研究总结报告 [R]. 北京: 中国工程院, 2017: 8.
- [12] 联合国环境规划署. 北京二十年大气污染治理历程与展望 [R]. 内罗毕: 联合国环境规划署, 2019: 6-33.
- [13] 解振华. 中国改革开放 40 年生态环境保护的历史变革: 从“三废”治理走向生态文明建设 [J]. 中国环境管理, 2019, 11(4): 5-10.
XIE Zhenhua. China's historical evolution of environmental protection along reform and opening-up over the last forty years [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(4): 5-10.
- [14] 生态环境部. 中国空气质量改善报告(2013—2018 年) [R]. 北京: 生态环境部, 2019: 1-5.
- [15] ZHAO P S, DONG F, HE D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(9): 4631-4644.
- [16] YANG F, TAN J, ZHAO Q, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} speciation in representative megacities and across China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(11): 5207-5219.
- [17] YAN Renchang, YU Shaocai, ZHANG Qingyu, *et al.* A heavy haze episode in Beijing in February of 2014: characteristics, origins and implications [J]. Atmospheric Pollution Research, 2015, 6(5): 867-876.
- [18] 蒋美青, 陆克定, 苏蓉, 等. 我国典型城市群 O₃ 污染成因和关键 VOCs 活性解析 [J]. 科学通报, 2018, 63(12): 1130-1141.
JINAG Meiqing, LU Keding, SU Rong, *et al.* Ozone formation and key VOCs in typical Chinese city clusters [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(12): 1130-1141.
- [19] WANG Qiaoli, LI Sujing, DONG Minli, *et al.* VOCs emission characteristics and priority control analysis based on VOCs emission inventories and ozone formation potentials in Zhoushan [J]. Atmospheric Environment, 2018, 182: 234-241.
- [20] WANG M, SHAO M, CHEN W, *et al.* Trends of non-methane hydrocarbons (NMHC) emissions in Beijing during 2002-2013 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(3): 1489-1502.
- [21] TAN Zhaofeng, LU Keding, JIANG Meiqing, *et al.* Exploring ozone pollution in Chengdu, southwestern China: a case study from radical chemistry to O₃-VOC-NO_x sensitivity [J]. Science of the Total Environment, 2018, 636: 775-786.
- [22] LIU N, LIN W, MA J, *et al.* Seasonal variation in surface ozone and

- its regional characteristics at global atmosphere watch stations in China [J]. *Journal of Environmental Science*, 2019, 77(3): 294-305.
- [23] LI Bowei, HO S S H, GONG Sunling, *et al.* Characterization of VOCs and their related atmospheric processes in a central Chinese city during severe ozone pollution periods [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(1): 617-638.
- [24] WANG Lili, LIU Zirui, SUN Yang, *et al.* Long-range transport and regional sources of PM_{2.5} in Beijing based on long-term observations from 2005 to 2010 [J]. *Atmospheric Research*, 2015, 157: 37-48.
- [25] HU Jianlin, WU Li, ZHENG Bo, *et al.* Source contributions and regional transport of primary particulate matter in China [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 207: 31-42.
- [26] CHEN Yang, TIAN Mi, HUANG Ru'in, *et al.* Characterization of urban amine-containing particles in southwestern China: seasonal variation, source, and processing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, 19(5): 3245-3255.
- [27] 蔡文清. 今年年初雾霾一度覆盖四分之一国土影响6亿人[N/OL]. 北京: 北京晚报, 2013-10-29 [2019-07-30]. <http://www.people.com.cn/24hour/n/2013/1029/c25408-23365750.html>.
- [28] 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.
- [29] LIN Boqiang, ZHU Junpeng. Changes in urban air quality during urbanization in China [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 188: 312-321.
- [30] 姚灵丽. 建国以来我国的经济状况 [J]. *环球市场*, 2016(9): 13.
YAO Lingli. China's economic development since the founding of the People's Republic of China [J]. *Global Market*, 2016(9): 13.
- [31] 王文兴, 王纬, 张婉华, 等. 我国 SO₂ 和 NO_x 排放强度地理分布和历史趋势 [J]. *中国环境科学*, 1996(3): 161-167.
WANG Wenxing, WANG Wei, ZHANG Wanhua, *et al.* Geographical distribution of SO₂ and NO_x emission intensities and trends in China [J]. *China Environmental Science*, 1996(3): 161-167.
- [32] LI Meng, LIU Huan, GENG Guannan, *et al.* Corrigendum to Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, 4(6): 834-866.
- [33] HUANG Rujin, ZHANG Yanlin, BOZZETTI C, *et al.* High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. *Nature*, 2014, 514(7521): 218-222.
- [34] 柴发合. 中国未来三年大气污染治理形势预判与对策分析 [J]. *中国环境监察*, 2019(1): 29-31.
CHAI Fahe. Analysis of control situation prediction and countermeasures of China's air pollution in the next three years [J]. *China Environmental Monitoring*, 2019(1): 29-31.
- [35] ZHANG Ju, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, *et al.* Ambient air quality trends and driving factor analysis in Beijing, 1983-2007 [J]. *Journal of Environmental Science*, 2011, 23(12): 2019-2028.
- [36] ZHOU Kai, YOUHUA Y E, LIU Qiang, *et al.* Evaluation of ambient air quality in Guangzhou, China [J]. *Journal of Environmental Science (English Edition)*, 2007, 19(4): 432-437.
- [37] ZHANG Hefeng, WANG Shunxiao, HAO Jiming, *et al.* Air pollution and control action in Beijing [J]. *Journal Cleaner Production*, 2016, 112: 1519-1527.
- [38] 张新民, 柴发合, 王淑兰, 等. 中国酸雨研究现状 [J]. *环境科学研究*, 2010, 23(5): 527-532.
ZHANG Xinmin, CHAI Fahe, WANG Shulan, *et al.* Research progress of acid precipitation in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(5): 527-532.
- [39] WANG Wenxing, WANG Tao. On the origin and the trend of acid precipitation in China [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1985, 85: 2295-2300.
- [40] WAN Yushan, WANG Wanmeng. Analysis on current situation, formation causes and control countermeasures of acid rain pollution in China [J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2010, 1(10): 92-95.
- [41] WANG Wenxing, WANG Tao. On acid rain formation in China [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(23): 4091-4093.
- [42] 王文兴, 丁国安. 中国降水酸度和离子浓度的时空分布 [J]. *环境科学研究*, 1997, 10(2): 1-7.
WANG Wenxing, DING Guo'an. The geographical distribution of ion concentration in precipitation over China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 1997, 10(2): 1-7.
- [43] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析 [J]. *应用气象学报*, 2004(15): 85-94.
DING Guoan, XU Xiaobin, WANG Shufeng, *et al.* Database from the acid rain network of China meteorological administration and its preliminary analyses [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2004(15): 85-94.
- [44] 罗璇, 李军, 张鹏, 等. 中国雨水化学组成及其来源的研究进展 [J]. *地球与环境*, 2013, 41(5): 566-574.
LUO Xuan, LI Jun, ZHANG Peng, *et al.* Advances in research on the chemical composition of precipitation and its sources in China [J]. *Earth and Environment*, 2013, 41(5): 566-574.
- [45] 生态环境部. 2018 年中国生态环境状况公报 [R]. 北京: 生态环境部, 2019: 7-16.
- [46] 李丽平, 周国梅, 季浩宇. 污染减排的协同效应评价研: 以攀枝花市为例 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(5): 91-95.
LI Liping, ZHOU Guomei, JI Haoyu. Study of co-benefits assessment of pollution reduction: a case study in Panzhihua [J]. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(5): 91-95.
- [47] 李丽平, 姜莘红, 李雨青, 等. 湘潭市“十一五”总量减排措施对温室气体减排协同效应评价研究 [J]. *环境与可持续发展*, 2012, 37(1): 36-40.
LI Liping, JIANG Pinghong, LI Yuqing, *et al.* Study of co-benefits assessment of pollution reduction on greenhouse gas reduction in Xiangtan during 11th Five-Year Plan [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2012, 37(1): 36-40.
- [48] 邢有凯. 北京市“煤改电”工程对大气污染物和温室气体的协同减排效果核算 [C]//中国环境科学学会. 中国环境科学学会学术年会论文集. 北京: 中国环境科学学会, 2016: 3186-3191.

- [49] 朱利,秦翠红.基于清洁能源替代的港口 SO₂ 和 CO₂ 协同减排研究[J].中国水运,2018,18(10):136-137.
ZHU Li, QIN Cuihong. Research on synergistic emission reduction of SO₂ and CO₂ in ports based on clean energy substitution [J]. China Water Transport, 2018, 18(10): 136-137.
- [50] TAO Minghui, CHEN Liangfu, LI Rong, *et al.* Spatial oscillation of the particle pollution in eastern China during winter: implications for regional air quality and climate [J]. Atmospheric Environment, 2016, 144: 100-110.
- [51] 雷宇,薛文博,张衍桑,等.国家《大气污染防治行动计划》健康效益评估[J].中国环境管理,2015,7(5):50-53.
LEI Yu, XUE Wenbo, ZHANG Yansheng, *et al.* Health benefit evaluation for air pollution prevention and control action plan in China [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2015, 7(5): 50-53.
- [52] LIN Hualiang, LIU Tao, XIAO Jianpeng, *et al.* Quantifying short-term and long-term health benefits of attaining ambient fine particulate pollution standards in Guangzhou, China [J]. Atmospheric Environment, 2016, 137: 38-44.
- [53] LIN Hualiang, LIU Tao, XIAO Jianpeng, *et al.* Mortality burden of ambient fine particulate air pollution in six Chinese cities: results from the Pearl River Delta study [J]. Environment International, 2016, 96: 91-97.
- [54] 张伟,王金南,蒋洪强,等.《大气污染防治行动计划》实施对经济与环境的潜在影响[J].环境科学研究,2015,28(1):1-7.
ZHANG Wei, WANG Jinnan, JIANG Hongqiang, *et al.* Potential economy and environment impacts of China's *National Air Pollution Control Action Plan* [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(1): 1-7.
- [55] LI Ke, JACOB D J, LIAO Hong, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(2): 422-427.
- [56] 张国宁,周扬胜.我国大气污染防治标准的立法演变和发展研究[J].中国政法大学学报,2016(1):97-115.
ZHANG Guoning, ZHOU Yangsheng. Research on the legislation evolution and development of air pollution prevention and control in China [J]. Journal of China University of Political Science and Law, 2016(1): 97-115.
- [57] WU Ping, DING Yihui, LIU Yanjun. Atmospheric circulation and dynamic mechanism for persistent haze events in the Beijing-Tianjin-Hebei Region [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2017, 34(4): 429-440.
- [58] WANG Hongbo, ZHAO Laijun. A joint prevention and control mechanism for air pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in china based on long-term and massive data mining of pollutant concentration [J]. Atmospheric Environment, 2018, 174: 25-42.
- [59] HU J, YING Q, WANG Y, *et al.* Characterizing multi-pollutant air pollution in China: comparison of three air quality indices [J]. Environment International, 2015, 84: 17-25.
- [60] LIU Xueyan, GAO Xiaolong. A new study on air quality standards: air quality measurement and evaluation for Jiangsu Province based on six major air pollutants [J]. Sustainability, 2018, 10(10): 1-16.
- [61] DING A J, FU C B, YANG X Q, *et al.* Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the SORPES station [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, 13(11): 5813-5830.
- [62] SUN J, LIANG M, SHI Z, *et al.* Investigating the PM_{2.5} mass concentration growth processes during 2013-2016 in Beijing and Shanghai [J]. Chemosphere, 2019, 221: 452-463.

(责任编辑:刘 方)