

# 北京二十年大气污染治理 历程与展望



本出版物由联合国环境规划署于 2019 年 3 月出版

联合国环境规划署 2019 年版权

ISBN: 978-92-807-3749-3

Job No.: DTI/2235/PA

#### 转载说明：

在注明出处的前提下，可以采用任何形式转载本出版物的全部或部分內容，用于教育或非盈利目的。如蒙惠寄使用本出版物作为资料来源的出版物副本，联合国环境规划署将不胜感激。

未经联合国环境规划署事先书面许可，不得转售本出版物或者将之用于商业目的。

#### 免责声明：

本出版物中引用的数据和信息来自于公开数据库和公开出版资料，仅代表本书作者的观点，不代表联合国环境规划署、北京市生态环境局或其他参与机构的任何观点。本出版物中使用的标识和说明，凡涉及到任何国家法律地位、领土、城市、当局或疆域划界的内容，不代表联合国环境规划署的任何观点。此外，本出版物中提到的任何商业公司或产品不代表联合国环境规划署的推荐，引用任何商标或标识不涉及侵权。

#### 引用说明：

本出版物可以按如下格式引用：

联合国环境规划署 2019, 北京二十年大气污染治理历程与展望, 联合国环境规划署, 内罗毕, 肯尼亚。

#### 图片来源：

除序言配图外，封面及正文配图均来自北京市环境保护宣传中心。

联合国环境规划署在全球范围内倡导保护环境并身体力行。本出版物是采用来自可持续森林的可再生纤维纸张、植物性油墨和其他生态友好的方式印刷。我们的发行政策旨在减少联合国环境规划署的碳足迹。

# 致谢

联合国环境规划署和北京市生态环境局对为本报告内容和出版发行付出辛勤工作的主要作者、审阅人、编辑和工作人员表示感谢。

以下个人对本出版物的内容和发行作出了贡献。本出版物的主要作者、审阅人和编辑均以个人身份参与工作，他们的工作单位信息如下：

## 主要作者：

贺克斌（清华大学）、张强（清华大学）、明登历（北京市生态环境局）、吴烨（清华大学）、Catherine Witherspoon、Valentin Foltescu（联合国环境署）、韩玉花（北京市环境保护科学研究院）、程静（清华大学）、瞿艳芝（北京市环境保护科学研究院）

## 审阅人：

Michael Benjamin、Dale Evarts、Michael Walsh、Stephen Inch、Ivo Allegrini、王军玲、李莹、嵯壮、李巍、李霞、毛博阳、Ravi Shankar Narasimhan

联合国环境规划署团队：涂瑞和、Valentin Foltescu、Tiy Chung

北京市生态环境局团队：李晓华、于建华、明登历、李翔、李昆生、郭萌、陈琦、谢金开、高杰、刘保献、李云婷

# 序言



一些年来北京被认为是一个受到污染的城市，但形势变化的速度往往会超出人们的预期。在 2013 至 2017 年的短短五年间，北京空气中的细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）年均浓度下降了约 35%，京津冀地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降了 25%。世界上还没有其他任何一个城市或地区做到了这一点。

当然这不是偶然发生的，这是投入了大量的时间、资源和政治意愿的结果，包括中国国家主席习近平的生态文明思想、国务院发布的污染防治攻坚战、新修订的大气污染防治法、更严格的违法处罚措施、各地清洁空气行动计划和北京市的前沿性举措。这是一段漫长而艰苦的过程，期间积累了许多重要的经验与教训。

了解北京的大气污染治理故事对于任何一个想要实现类似成就的国家、地区或城市都会有所帮助。可以说，北京的治理经验在很多情境下都能适用：

- 过度发展工业会留下长期难以治理的污染，包括水、土壤和空气污染。无论当前处于哪种发展阶段，发展多元化的本地经济都是明智之举。
- 机动车污染防治对于清洁空气行动至关重要。其中，老旧客车和货车排放的污染物在城市空气污染中的占比尤为突出。
- 企业不会主动采取污染治理措施，需要政府通过立法和经济激励手段，规范和引导企业走上污染治理的正确道路。
- 信息就是力量，数据的公开透明是全社会共同参与环境治理的重要保障。
- 大气污染治理无国界，它是国际事务、国家大事，也是地方关切。跨越行政边界的合作对于保证环境问题得到长期有效解决至关重要。
- 世界各地都有丰富的科学知识和空气质量管理经验，愿意学的人总能找到它们。

这是联合国环境署第三次对北京的大气污染治理工作开展评估。2009年，我们发布了针对北京2008年夏季奥运会环境工作的独立评估报告，客观解读了北京在保障奥运会期间优良空气质量的行动和成效。2016年，我们评估了北京市1998至2013年间的大气污染治理措施和成效，并对下一步行动提出了一些建议。我们很高兴地看到，这其中不少建议得到了采纳和落实。

这一版的报告与之前的报告都有所不同，时间跨度也更大。报告的第一部分讲述了北京的空气质量管理体系在过去近四分之一世纪的演进过程，包括其探索与尝试，本地化措施、落实和成效、经验与教训，这些适合公共政策专业的学生学习。第二部分主要分析了未来的挑战，并为北京实现最终的清洁空气目标，即拥有真正健康并符合全球标准的空气，提出了短期、中期和长期的建议。我们相信北京的经验会对许多遭受空气污染困扰的城市有所裨益。

尤其重要的是，联合国环境署与原北京市环境保护局过去数十载间有长期愉快的合作；面向未来，期盼与新设立的北京市生态环境局继续保持这份源远流长的合作和友谊，实现我们共同的零污染地球目标。

联合国环境署代理执行主任

乔伊斯·姆苏亚

# 序言



(摄影：刘嘉伟)

2017年的冬季，北京市取得了大气污染攻坚战的一个里程碑性的胜利，经过二十多年的持续努力和巨大投入，实现了空气质量的显著提升。在2013年到2017年的五年里，北京市环境空气中细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）的年均浓度从89.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降到了58 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，圆满完成了国家要求的60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右的目标。并且，整个京津冀区域实现了PM<sub>2.5</sub>浓度较2013年降低25%的整体目标。1998年，北京正式打响了治理大气污染的战斗，分阶段采取了数百项具体措施实现了空气质量的持续改善，2013-2017这五年是成效最显著的五年。

我们为能够参与其中并取得这样的成绩感到自豪。更让我们感到欣慰的是，空气质量的持续改善是伴随着北京这座首都城市社会经济的持续飞速发展实现的。20年里，北京的地区生产总值（GDP）保持了6.5%及以上的增长速度，增长了10.8倍，2017年人均GDP超过了2.0万美元。同时，单位GDP的能源消耗强度和二氧化碳排放强度持续下降。清洁空气行动为推动社会经济的高质量可持续发展

展做出了积极的贡献。环保产业是北京市鼓励发展的行业，也是新的就业增长领域。

我们十分清楚，北京市大气污染防治工作还有很长的路要走。目前，北京市  $PM_{2.5}$  的浓度仍然没有达到国家的环境空气质量标准，距离世界卫生组织推荐的安全水平还有很大的差距。同时，北京大气环境中臭氧 ( $O_3$ ) 的浓度并未实现与  $PM_{2.5}$  相应幅度的降低，这一定程度上是由于臭氧在大气中的复杂生成机理，更是由于生成臭氧的前体污染物还没有得到有效控制。并且，北京在秋冬季节重污染过程仍然时有发生，很大程度上应归因于本地污染物排放量仍然较大。解决这些空气污染问题仍需要一个长期的过程。

习近平生态文明思想为推进美丽中国建设、实现人与自然和谐共生的现代化提供了方向指引。良好的生态环境是最普惠的民生福祉，北京市将蓝天作为市民幸福生活的标志之一。国务院在 2018 发布了《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，要求北京市到 2020 年明显降低  $PM_{2.5}$  浓度、明显减少重污染天数、明显改善大气环境质量。北京市也发布了《北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划》，做出了更具体的安排。

感谢联合国环境署对北京市空气污染治理工作的持续深入关注，这份报告和我们之前共同发布的多份报告就是最好的体现。在气候与清洁空气联盟的支持下，这份报告总结回顾了北京市在过去 20 年治理大气污染方面的努力。我们很高兴能够通过联合国环境署的平台与世界其他正在努力控制大气污染的城市分享实践经验，并希望能对他们的工作有所帮助。

北京案例中的空气污染问题复杂性跟北京特殊的发展阶段有关，一些措施的有效性也得益于中国的治理模式，但其中也有很多有共性的经验。从北京自己总结来看，实现地方环境质量改善和可持续发展的关键在于政府坚定的决心，清晰的目标，制定有力的法规、计划和政策，有效的落实，以及执法监察。在这个过程中，公众的积极参与对于推动环境改善和促进社会的和谐都是至关重要的。

最近，原北京市环境保护局经过改革重组，成立了北京市生态环境局，整合了新的职责，以更好地承担促进生态文明建设的任务。我们将继续为实现北京的蓝天梦想努力，为市民提供良好的环境、健康和福祉，推动城市的可持续发展，为实现全球 2030 年可持续发展目标做出应有的贡献。

北京市生态环境局局长

陈添

# 执行摘要

## 北京二十年大气污染治理历程与展望

作为中国的首都、国际化现代大都市，北京市在近 20 年来经历了飞速的发展。与 1998 年相比，到 2017 年末北京的地区生产总值增长了 1078%、人口和机动车保有量分别增长了 74% 和 335%。

社会经济的快速发展带来了巨大的环境压力，生态环境质量退化，大气煤烟 - 机动车复合污染特征愈加显著，空气重污染时有发生，对公众健康

带来负面的影响。为应对严峻的空气污染问题，自 1998 年始，北京市连续实施了多个阶段有力的大气污染综合治理措施，污染物排放强度逐年下降，空气质量明显改善，二氧化硫（SO<sub>2</sub>）、二氧化氮（NO<sub>2</sub>）和可吸入颗粒物（PM<sub>10</sub>）年均浓度较 1998 年分别下降了 93.3%，37.8% 和 55.3%。

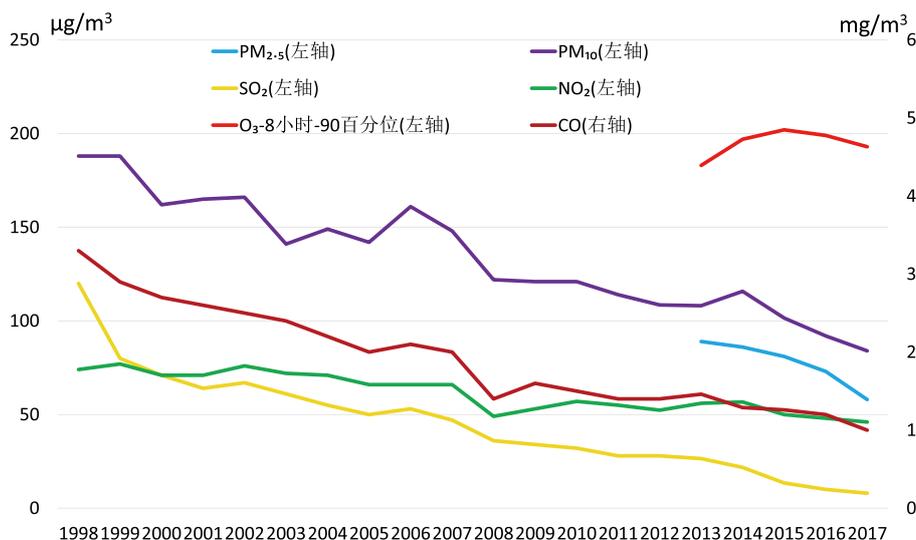


图 1 北京市主要空气污染物年均浓度变化，1998-2017 年

来源：原北京市环境保护局

为更好地总结北京市的实践历程和经验，联合国环境规划署（简称“联合国环境署”）发起开展了对北京近 20 年空气治理历程的系统回顾，对关

键的措施和效果进行评估分析，以便分享给面临相似挑战的发展中国家城市。

## 有效的空气质量管理体系

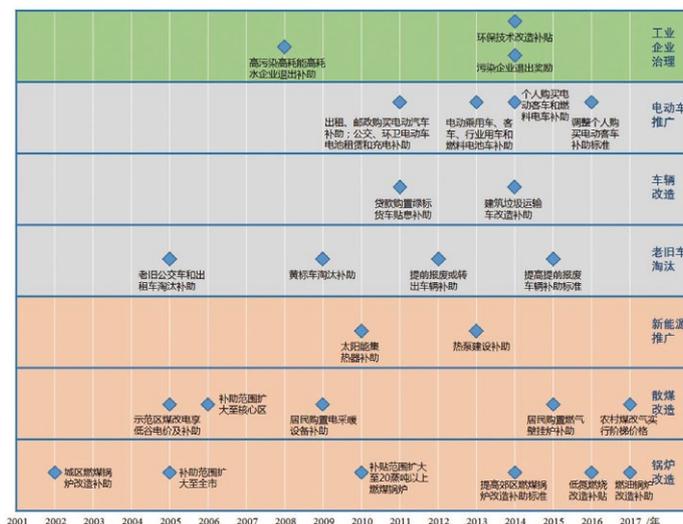
北京市在 20 年的大气污染治理过程中逐步形成了一套有效的空气质量管理体系，其特点包括：  
1) 完善的法规和有效的执法；2) 系统的规划；3)

严格的地方标准；4) 完善的监测系统；5) 高涨的公众环境意识。

## 经济政策和财政支持

近 20 年间，北京市逐步建立起了包括补贴、收费、奖励、价格、金融等多种手段的地方环境经济政策体系（图 2a），政府在大气污染治理领域

的财政投入也逐年增长（图 2b），为有效实施各项污染治理措施提供了经济激励手段和资金保障。



(a)



(b)

图 2 北京市大气污染防治的经济政策 (a) 与资金投入 (b)

来源：北京市环境保护科学研究院，北京市财政局

## 完善的监测体系

北京市自上世纪 80 年代起开始建设空气质量监测系统，2013 年建成了可全面监测细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>) 和臭氧 (O<sub>3</sub>) 等 6 项污染物、覆盖全市的 35 个自动监测站；2016 年结合新一代高时空分辨率卫星遥感、激光雷达等技术，建设了“天地空”一体化空气质量监测网络。2016 年以来，在全市布设了 1000 余个 PM<sub>2.5</sub> 传感器 (图 3)，形成了高密度 PM<sub>2.5</sub> 监测网络，精准识别高排放区域和时段，为高效治污提供了科学支持。

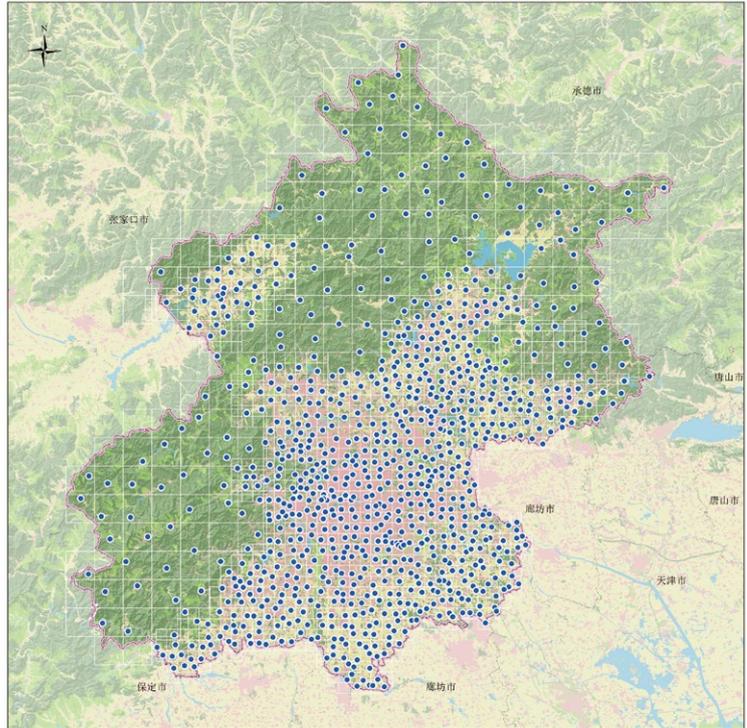


图 3 北京市高密度 PM<sub>2.5</sub> 传感器监测网络

来源：北京市环境保护监测中心

## 燃煤源污染控制

煤炭燃烧长期以来是北京市空气污染的主要来源之一。在过去 20 年间，北京市不断推进末端治理技术升级和能源结构调整 (图 4)，从燃煤电厂、锅炉和民用散煤三方面入手，同时加强对源头和末端的治理管控，取得了显著成效。

以燃煤电厂为例，北京市从 2005 年起实施“煤改气”政策，至 2017 年末削减年燃煤量近 1100 万吨；并不断推动安装高效末端处理设施、逐步完成了超低排放改造。2017 年燃煤电厂 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 和氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 的排放较 20 年前分别削减了 97%、98% 和 86% (图 5)，实现了显著的环境和健康效益。

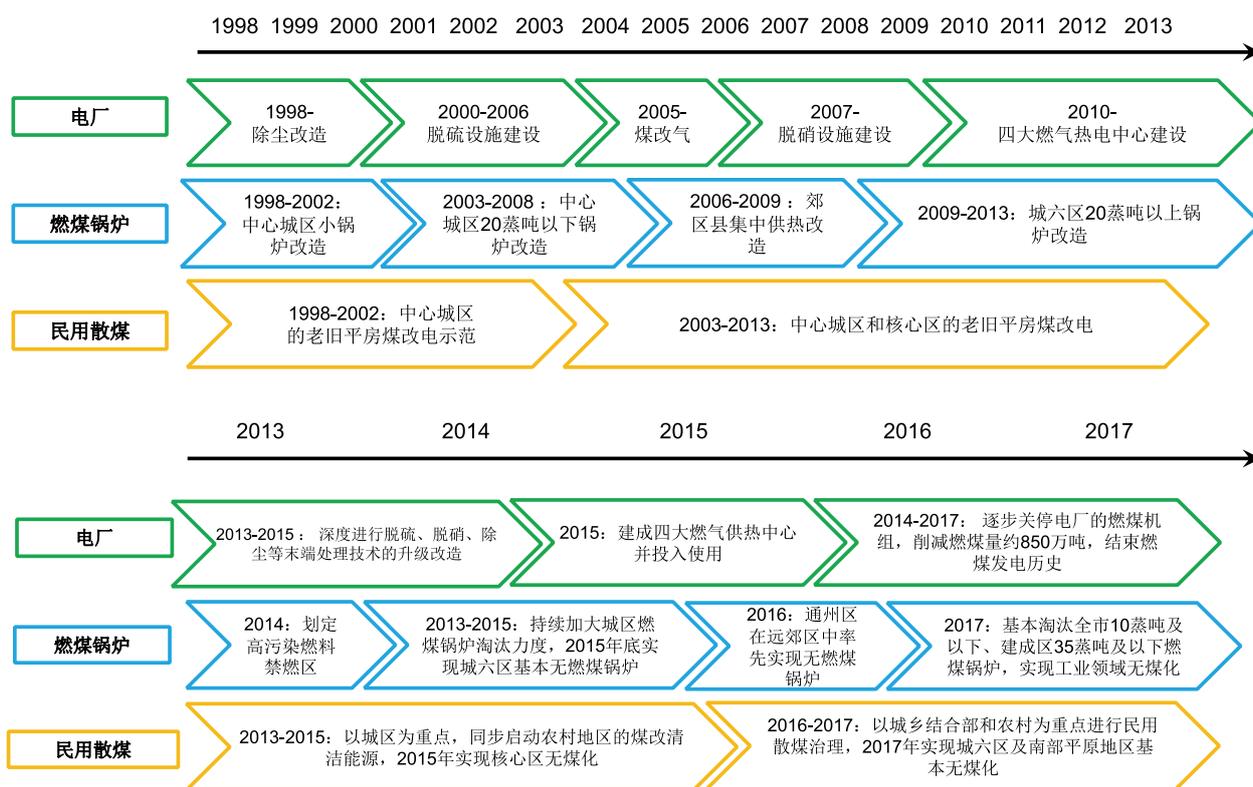


图 4 1998-2017 年期间北京市燃煤源污染控制过程及措施

来源：原北京市环境保护局，清华大学

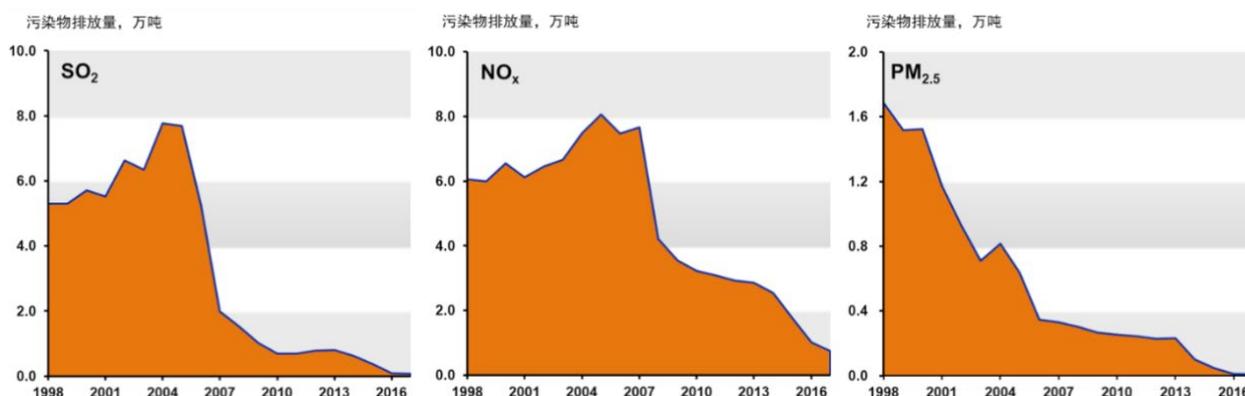


图 5 北京市电厂的污染控制成效，1998-2017 年

来源：清华大学

## 机动车污染控制

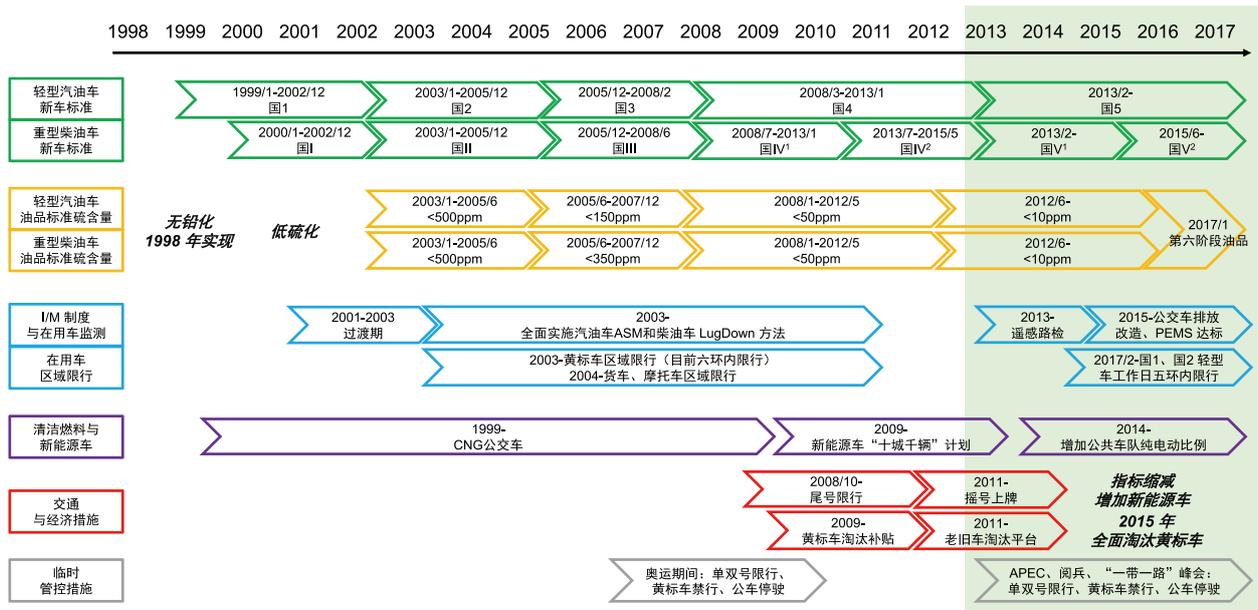
机动车污染排放控制一直是北京市空气污染治理的重点任务。1998 年以来，北京市制定和实施了针对新车和在用车排放管理，以及油品质量等

多个方面的严格地方标准，采取综合性治理措施，不断加强交通管控和经济激励（图 6），逐渐形成了“车 - 油 - 路”一体化的城市机动车排放综合控

制体系（图 7）。同时，全市大力发展大运量的公共交通，推动公众选择绿色低碳出行方式。

20 年间，北京市在机动车保有量增加了超过 3 倍的情况下，实现了污染物排放量显著下降（图 8）。与 1998 年相比，2017 年北京市机动车排

放的一氧化碳（CO）、总碳氢化合物（THC）、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> 分别削减了 110.5 万吨、9.4 万吨、7.1 万吨和 0.6 万吨（图 8 绿色部分），减排率分别达到 89%、64%、55% 和 81%，其中淘汰老旧车辆的减排效益最为显著。



<sup>1</sup> 仅在公交、环卫和邮政等城市公共车队中实施；<sup>2</sup> 对于货运、旅游等长途社会车队中实施。

图 6 1998-2017 年期间北京市机动车污染控制过程和措施

来源：原北京市环境保护局，《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》



图 7 “车 - 油 - 路”一体化的北京机动车排放综合控制体系

来源：清华大学

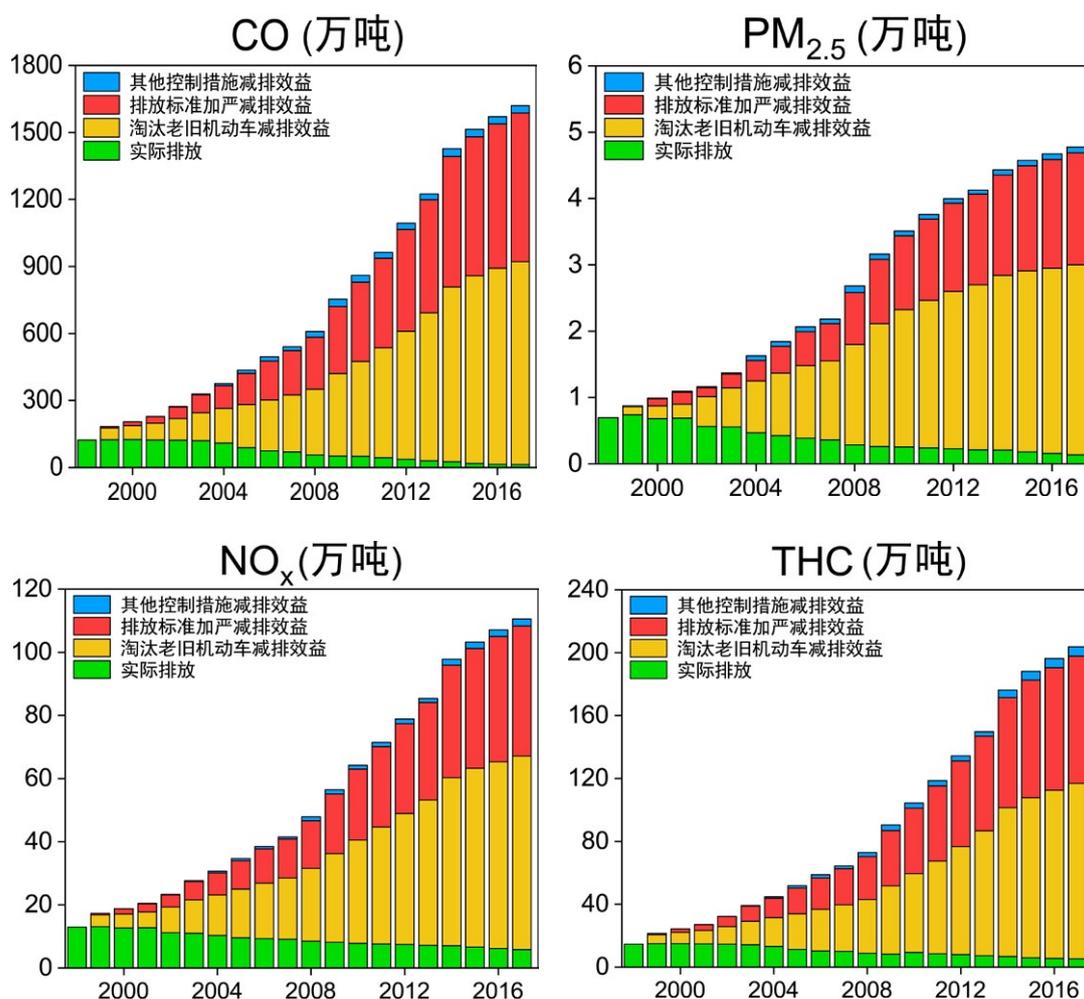


图 8 北京市机动车污染物排放控制措施效益

来源：清华大学

## 2013–2017 年的五年强化控制

2013-2017 年是北京市大气污染控制历程中措施最系统、力度最大的五年。2017 年北京市空气中的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度下降到 58 微克 / 立方米 (μg/m<sup>3</sup>)，比 2013 年下降了 35.6%，实现了国内外普遍认为难以完成的目标，为世界其他城市的空气污染治理提供了宝贵经验。

图 9a 量化了该时段主要控制措施的减排效果，燃煤锅炉治理、民用燃料清洁化、产业结构调整的贡献最为显著；五年间北京市的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、挥发性有机物 (VOCs)、PM<sub>2.5</sub> 年排放量分别下降了 83%、43%、42% 和 55% (图 9b)。

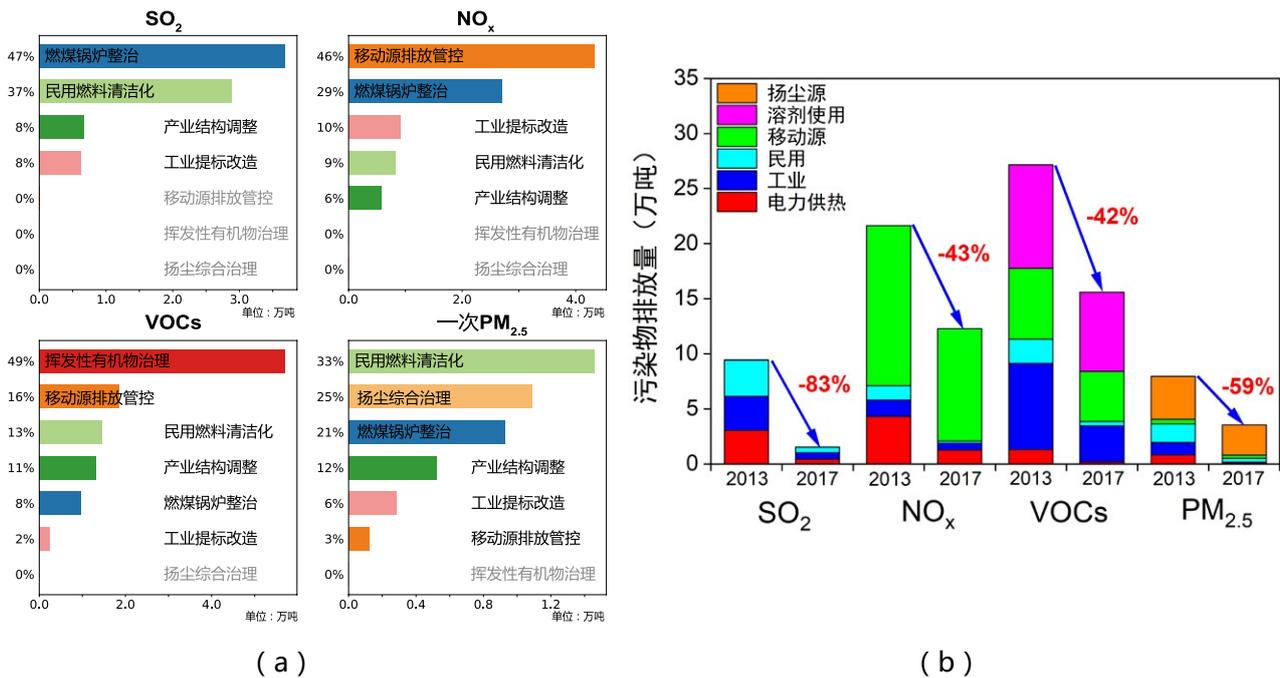


图9 北京 2013-2017 年间减排措施的减排量与相对贡献 (a) , 主要污染物的排放变化情况 (b)

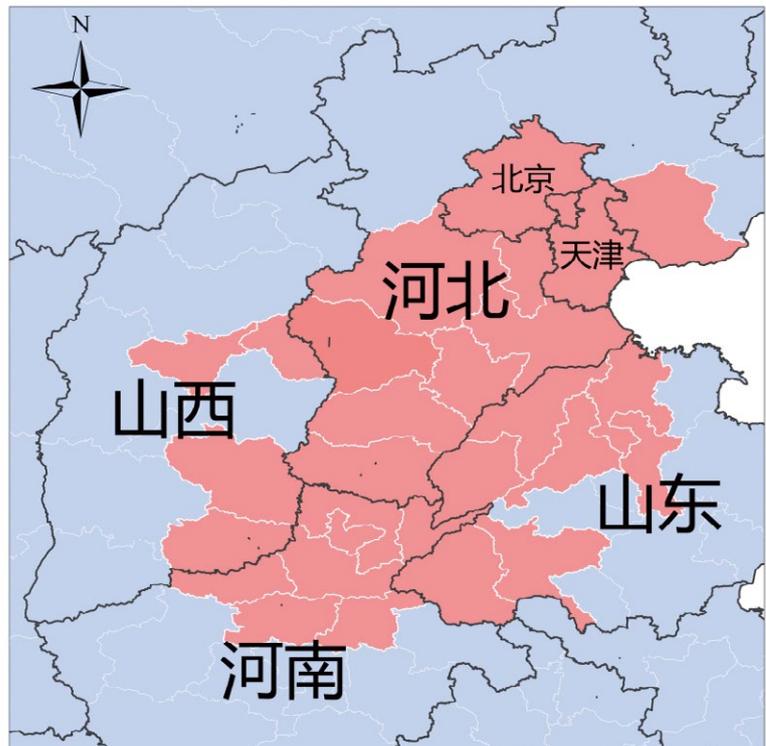
来源: 清华大学; Cheng J et al., 2019, ACPD

## 北京市与周边地区的协同控制

在不断强化大气污染防治的同时,北京也积极寻求与周边区域开展污染协同治理。2013 年底,在国务院的支持下,北京市牵头建立了京津冀及周边地区大气污染防治协作机制;2017 年原环境保护部进一步确立了京津冀及周边地区 2+26 个大气污染传输通道城市(图 10),通过协同规划、统一标准、应急联动、信息共享等政策措施,整个区域的空气质量得到显著改善,PM<sub>2.5</sub> 浓度在 2013-2017 年间下降了 25% 左右(图 11)。

图 10 京津冀及周边地区“2+26”大气污染传输通道城市(图中红色部分)分布图

来源: 原北京市环境保护局



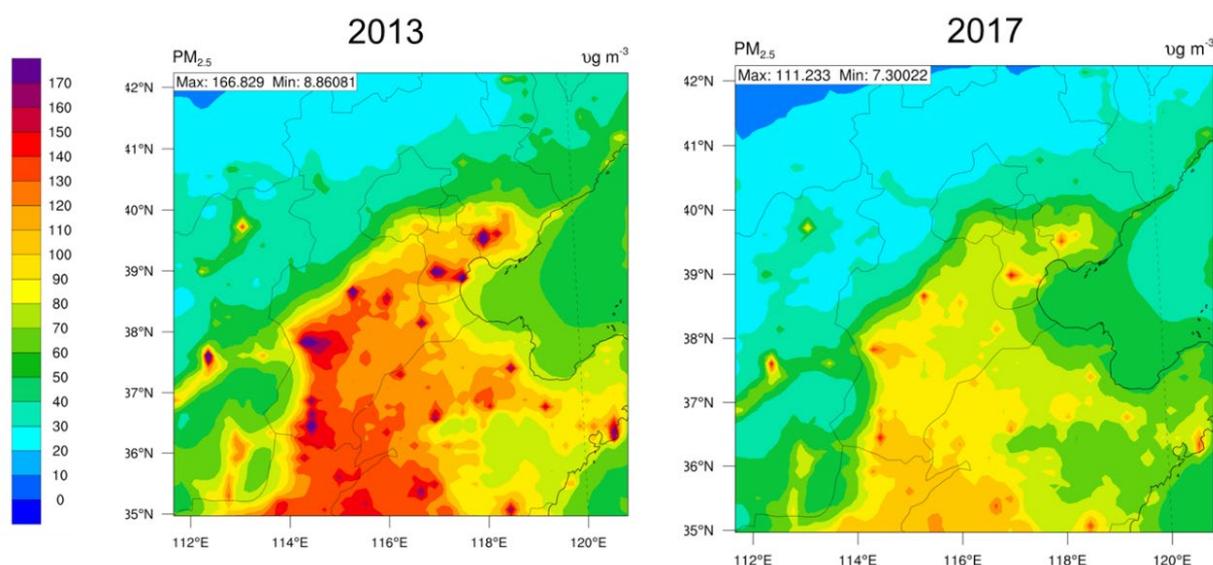


图 11 2013-2017 年北京市及周边地区的 PM<sub>2.5</sub> 污染显著改善

来源：清华大学

## 挑战与展望

空气质量的持续改善是伴随着北京这座首都城市社会经济的持续飞速发展实现的。20 年里，北京市的 GDP 保持了年均 6.5% 及以上的增长速度，增长了 10.8 倍，2017 年人均 GDP 超过了 2.0 万美元。同时，单位 GDP 的能源消耗强度和二氧化碳排放强度持续下降。清洁空气行动为推动社会经济的可持续高质量发展做出了积极的贡献。中国的环保产业随着污染治理的推进不断壮大，截至 2017 年底，中国环保产业产值达到 13500 亿元人民币，在北京市注册的环保企业年产值占比超过了 20%（中国环境保护产业协会，2018）。包括污染治理及咨询服务等业务活动的环保产业也是北京市重点支持发展的行业，已经成为新的就业增长领域。

北京案例中的空气污染问题，其复杂性跟北京特殊的发展阶段有关，一些措施的有效性也得益于中国的治理模式，其中也有很多共性的经验。总结来看，实现地方环境质量改善和可持续发展的关键在于政府坚定的决心，清晰的目标，制定能够提供有效支撑的法规、计划和政策，以及有

效的实施安排和执法监察。在这个过程中，公众的积极参与对于推动环境改善和促进社会的和谐都是至关重要的。

尽管多年来北京市空气质量改善成效显著，但空气污染形势依然严峻，2017 年 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度距离 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的国家空气质量标准要求仍超标 66%，与世界卫生组织推荐的 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  更有较大差距；此外，O<sub>3</sub> 污染近年来仍未得到有效控制。大气环境质量的持续稳定改善依然任重道远，仍需未来进行不懈的努力。

长远来看，建议北京市可从以下几方面继续推进空气污染治理：（1）PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 协同治理，强化 VOCs 治理；（2）调整能源结构和提升能源利用效率并重，推动能源低碳化，统筹考虑空气质量改善和温室气体减排目标；（3）移动源排放控制和交通结构优化并重，建设低排放高效率运输系统；（4）强化非点源治理；（5）继续深化区域协同；（6）将城市环境改善目标与联合国 2030 年可持续发展目标更好地结合起来。

# 目录

1	致谢
2	序言
6	执行摘要
16	缩略词表
17	第一章 背景
19	第二章 北京市 20 年空气质量改善情况
19	2.1 环境空气质量变化趋势
20	2.2 PM <sub>2.5</sub> 源解析结果
22	第三章 北京市空气质量管理体系建设综述
22	3.1 空气质量管理规划
22	(1) 大气污染防治规划
23	(2) 规划的任务措施
23	(3) 科技支撑
23	3.2 法规标准
23	(1) 大气污染防治法律法规
23	(2) 地方排放标准
24	(3) 环境执法
24	3.3 经济政策
24	(1) 经济政策
26	(2) 财政资金投入
26	3.4 监测能力建设
27	3.5 空气重污染应急
28	3.6 信息公开和公众参与
28	(1) 公开空气质量和预报信息
29	(2) 环保理念传播和公众参与
31	第四章 北京市空气污染治理措施效果量化评估
31	4.1 能源结构调整与燃煤源排放控制

32	(1) 电厂超低排放改造及清洁能源替代
32	(2) 燃煤锅炉污染治理
32	(3) 民用散煤污染治理
33	4.2 移动源排放控制与交通结构调整
34	(1) 地方排放标准加严与在用车改造
34	(2) 老旧车辆淘汰与区域限行
34	(3) 其他控制措施
35	4.3 北京市 1998-2017 空气污染治理措施效果
35	(1) 燃煤源排放控制措施的减排效果
36	(2) 移动源排放控制措施的减排效果
38	4.4 其他领域大气污染控制
38	(1) 产业结构调整 and 工业污染治理
38	(2) 扬尘污染治理
39	<b>第五章 北京市与周边区域的大气污染协同治理</b>
39	5.1 北京市与周边区域大气协同治理机制
39	(1) 协调机构
40	(2) 统一规划和政策
40	(3) 合作机制
40	5.2 北京市周边地区大气污染物排放变化趋势
44	<b>第六章 北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划效果评估</b>
44	6.1 主要措施的减排效果
46	6.2 主要措施对空气质量改善的贡献
47	6.3 气象条件的影响分析
47	6.4 小结
49	<b>第七章 经验总结与未来展望</b>
49	7.1 北京市空气污染治理经验总结
50	7.2 北京市下一步空气污染治理展望与建议
52	<b>参考文献</b>

# 缩略词表

AQI	环境空气质量指数
BCM	十亿立方米
BEE	北京市生态环境局
BRT	快速公交系统
CNG	压缩天然气
CO	一氧化碳
DPF	柴油车颗粒捕集器
ESP	静电除尘器
FGD	烟气脱硫
GDP	国内生产总值
HDDV	重型柴油车
LNG	液化天然气
MEIC	中国多尺度大气污染排放清单模型
NAAQS	国家环境空气质量标准
NO <sub>2</sub>	二氧化氮
NO <sub>x</sub>	氮氧化物
O <sub>3</sub>	臭氧
PEMS	车载排放测试系统
PM <sub>2.5</sub>	细颗粒物
PM <sub>10</sub>	可吸入颗粒物
QA/QC	质量保证 / 质量控制
SCR	选择性催化还原
SNCR	选择性非催化还原
SO <sub>2</sub>	二氧化硫
tce	标准煤当量
THC	总碳氢化合物
TSP	总悬浮颗粒物
UN Environment	联合国环境规划署
VOCs	挥发性有机物
WHO	世界卫生组织

# 第一章 背景

北京市是中国的首都，一座快速发展中的特大城市，地域面积 1.64 万平方公里。截至 2017 年底，常住人口达到 2170.7 万人，人均地区生产总值超过了 2.0 万美元，机动车保有量达到 590.9 万辆，年能耗达到 7100 万吨标煤（见图 1.1）。与 20 年

前的 1998 年相比，2017 年北京市的经济总量增长了 1078%、人口增长了 74%、机动车保有量增长了 335%、能耗增长了 86%。这些数字代表了 this 最大的发展中国家首都城市的经济腾飞，也承载着巨大环境压力。

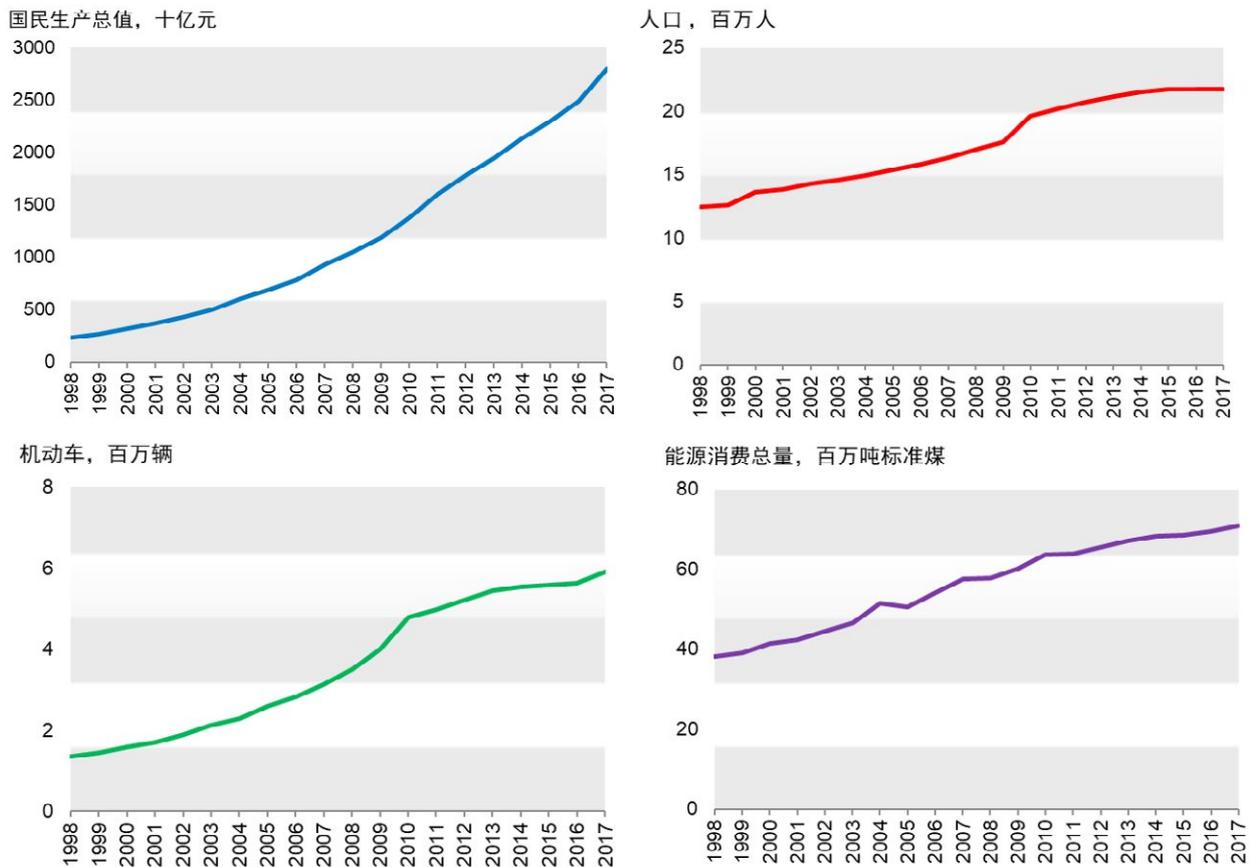


图 1.1 北京市 20 年间社会经济发展状况 (1998-2017)

数据来源：北京统计年鉴

与伦敦、洛杉矶、东京等世界其他工业化国家大城市一样，迅速的城市化和经济增长，不可避免地给北京这座城市带来了严重的大气污染。在“中国速度”的发展背景下，北京市的大气污染发展迅速，引起了政府、公众和全社会的关注。自上世纪70年代建立环境保护机构到1997年左右，北京市主要按照国家的有关法规，以末端治理手段为主治理工业排放的粉尘和其他大气污染物。

1998年，鉴于SO<sub>2</sub>、总悬浮颗粒物（TSP）等污染物浓度严重超过了国家环境空气质量标准，并且有进一步恶化的趋势，北京市首次发布了《北京市人民政府关于采取治理大气污染措施的紧急通知》，该份文件开启了北京积极治理大气污染的历程，这是中国地方政府首次向空气污染宣战。至今已过去20年，回顾北京市的大气污染治理大致可以分为三个阶段。

第一个阶段从1998到2008年，北京市在地方层面启动大气污染治理专项行动，按照从内及外的原则，针对城区内的燃煤、工业和扬尘排放的污染以及机动车排放连续采取了数百项治理措施，取得了明显的成效，在社会经济迅速发展的背景下扭转了空气质量恶化的趋势，大幅度降低了SO<sub>2</sub>、TSP、PM<sub>10</sub>、CO等污染物浓度。2008年在北京举办的第29届夏季奥运会起到了催化剂的作用，北京市以此为契机提前实施了一批空气污染治理措施，取得了良好的效果，也标志了第一阶段的结束。

第二个阶段从2009到2012年，“后奥运”时期，也是一个相持中前进的过渡阶段，采取的污染治理措施逐步从末端治理向结构调整过渡。污染治理措施实现的减排效益抵消了经济社会快速发展产生的污染增量，空气质量持续向好。

上述两个污染治理阶段的主要特征为：1）聚焦于SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>和CO等一次污染物减排；2）政府在污染治理中起主导作用；3）2008年北京奥运会期间，首次尝试了与周边的联防联控，北京奥运也被视作是中国开展大气污染区域协同治理的成功案例。

第三个阶段从2013到2017年，二次污染物成为了该阶段污染控制的首要目标，污染治理也从一个城市的努力升级为区域协同共治。2012年底，

北京及周边区域在秋冬季连续发生空气重污染，引发了公众和媒体的广泛关注和担忧。国务院高度重视空气污染带来的严峻挑战，原环境保护部（后改组为生态环境部）修订了国家环境空气质量标准，将PM<sub>2.5</sub>列为控制指标。2013年，按照国家《大气污染防治行动计划》要求，北京市制定实施了以防治PM<sub>2.5</sub>污染为重点的《北京市2013-2017清洁空气行动计划》。五年中，以减轻PM<sub>2.5</sub>污染为目的，综合运用法律、经济、技术、行政等手段，在减少燃煤、移动源排放控制、工业污染减排、减少降尘等重点领域采取了持续的治理措施。

2017年北京市年均PM<sub>2.5</sub>浓度从2013年的89.5μg/m<sup>3</sup>下降到58μg/m<sup>3</sup>，空气重污染过程频次和受影响天数同步减少，周边地区同步实现了空气质量的大幅度改善。

在20年的大气污染治理过程中，北京市逐步建成了一套适应北京情况的空气质量管理体系，通过规划和实施改善能源结构、综合治理机动车污染、调整产业结构、提高城市精细化管理水平、加强生态保护以及提升公众环境意识等一系列措施，在社会经济空前发展的背景下实现了空气质量连续20年改善。20年间，北京市SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>年均浓度分别下降了93.3%、37.8%和55.3%，SO<sub>2</sub>、CO等污染物已经能够稳定达到现行国家标准，PM<sub>2.5</sub>在有监测数据的5年里浓度下降了35.6%。

联合国环境署与北京市开展了长期富有成效的合作，先后对北京实现2008年北京奥运会的“绿色奥运”承诺和1998-2013年大气污染防治措施开展了评估。上述2份评估报告在国际上取得了很好的反响，也为开展北京20年大气污染治理评估奠定了很好的基础。持续量化更新评估北京的大气污染治理经验，可以给中国及其他国家的新兴大城市提供最新的经验借鉴。为此，联合国环境署邀请国际专家和清华大学专家团队，开展了此项量化评估工作。

本报告总结梳理了北京市逐步建立起来的空气质量管理体系，量化评估了重点措施的减排效果，分析了北京市下一步大气污染治理面临的新问题和挑战，为北京市提出了具体的意见和建议。

# 第二章 北京市 20 年空气质量改善情况

## 2.1 环境空气质量变化趋势

1998 年，北京市全年的煤炭消耗量为 2800 万吨（折合约 2000 万吨标煤），以煤为主的能源消费结构造成了北京严重的煤烟型大气污染。另一方面，1990 年开始北京市机动车保有量急剧增长，但污染物排放控制技术仅达到欧美发达国家 1970 年左右的水平，机动车排放造成的污染问题逐步凸显。如图 2.1，1998 年北京市环境空气中 CO、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的年平均浓度分别为 3.3 mg/m<sup>3</sup>、120 μg/m<sup>3</sup> 和 74 μg/m<sup>3</sup>。而颗粒物，采暖季和非采暖季 TSP 浓度分别高达 431 μg/m<sup>3</sup> 和 348 μg/m<sup>3</sup>。

北京市在 1998 年印发《北京市人民政府关于采取治理大气污染措施的紧急通知》，开启了全面应对空气污染治理的历程，至今已历时 20 年。从监测数据看，北京市主要大气污染物年均浓度呈持续下降趋势（图 2.1）：SO<sub>2</sub>、CO 和 NO<sub>2</sub> 除在 2005-2007 年间有所波动外，20 年间呈线性下降，PM<sub>10</sub> 浓度在波动中下降，CO 浓度一直稳定达标，SO<sub>2</sub> 年均浓度在 2004 年达到国家空气质量标准后处于稳定达标状态，2017 年 CO 和 SO<sub>2</sub> 年均浓度分别下降至 1.0 mg/m<sup>3</sup> 和 8 μg/m<sup>3</sup>，PM<sub>2.5</sub> 在 2013 年有监测数据以后保持持续下降趋势。

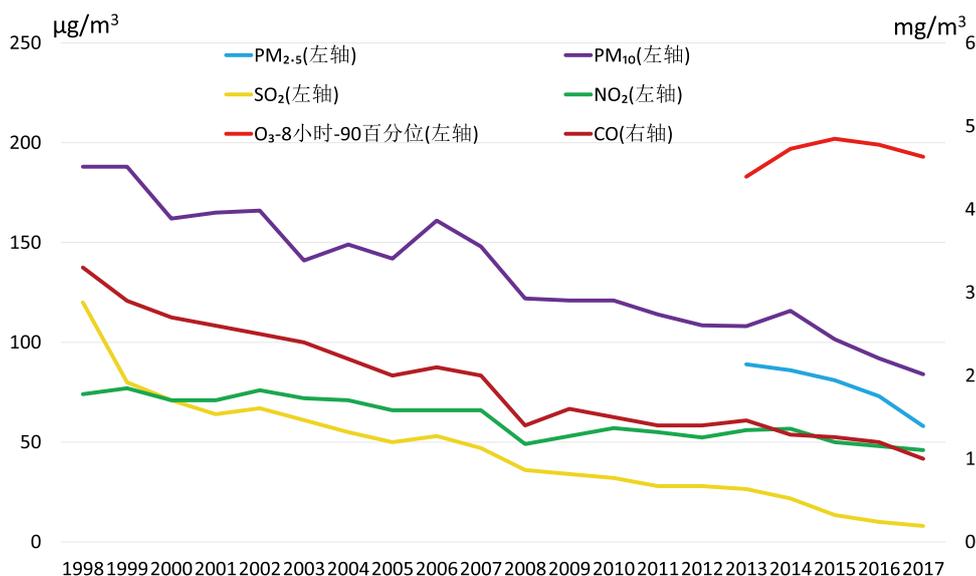


图 2.1 北京市主要大气污染物年均浓度变化趋势，1998-2017

数据来源：原北京市环境保护局

在 2013-2017 的 5 年间，北京市空气质量改善步伐加快，优良达标天数增加，重污染频次减少，主要污染物浓度下降明显（图 2.2），SO<sub>2</sub>、CO、

NO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 年均浓度下降了 70.4%、38.2%、17.9%、35.6%、22.2%，O<sub>3</sub> 浓度小幅上升后开始回落。

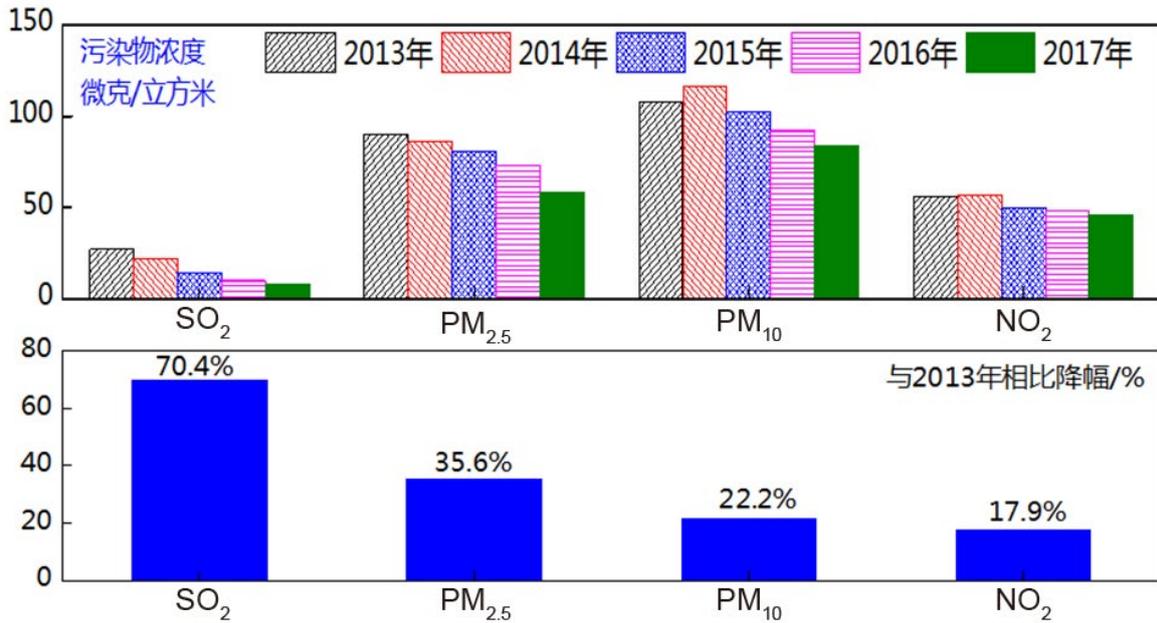


图 2.2 2013-2017 年北京市各项污染物年均浓度及下降幅度

数据来源：原北京市环境保护局

## 2.2 PM<sub>2.5</sub> 源解析结果

2012 年中国新修订的国家环境空气质量标准颁布以后，为了有针对性地治理以 PM<sub>2.5</sub> 为重点的空气污染问题，北京市组织开展了 PM<sub>2.5</sub> 源解析工作。2014 年北京市首次发布了 PM<sub>2.5</sub> 源解析结果，研究表明：区域传输对北京空气中 PM<sub>2.5</sub> 的贡献约

占 28%-36%，本地污染排放贡献占 64%-72%。在本地污染贡献中，机动车、燃煤、工业生产、扬尘为主要来源，分别占 31%、22%、18% 和 15%，餐饮、汽车修理、畜禽养殖、建筑涂装等其他排放约占 14%。

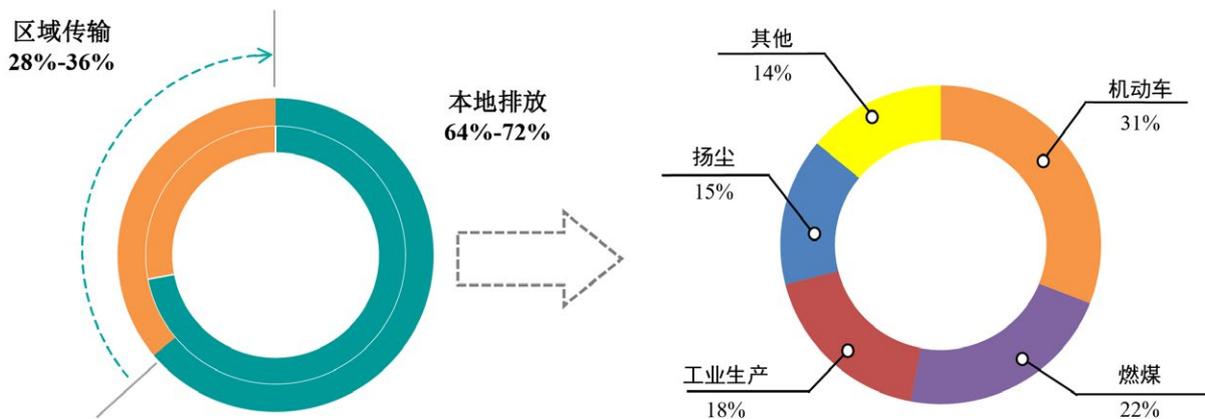


图 2.3 2013 年北京市大气中 PM<sub>2.5</sub> 的源解析结果

数据来源：原北京市环境保护局

2017 年，北京市综合最新的监测数据、研究成果及技术方法，再次系统开展了 PM<sub>2.5</sub> 源解析工作，并于 2018 年 5 月发布了结果。新的源解析结果表明，2017 年北京市 PM<sub>2.5</sub> 主要来源中本地排放约占三分之二，移动源、扬尘源、工业源、生活面源和燃煤源分别占 45%、16%、12%、12% 和 3%，农业及自然源等其他约占 12%（见图 2.4）；区域传输贡献约占三分之一，且随着污染级别的增大，区域传输贡献呈明显上升趋势，重污染日（PM<sub>2.5</sub> 日均浓度 > 150μg/m<sup>3</sup>）区域传输占 55%-75%（见图 2.5）。

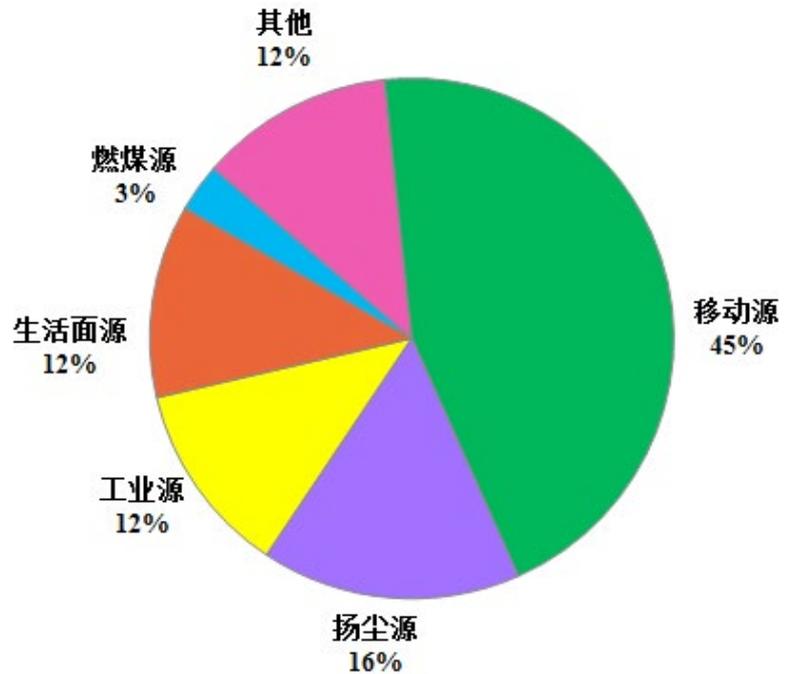


图 2.4 2017 年北京市大气 PM<sub>2.5</sub> 来源解析结果—本地来源

数据来源：原北京市环境保护局

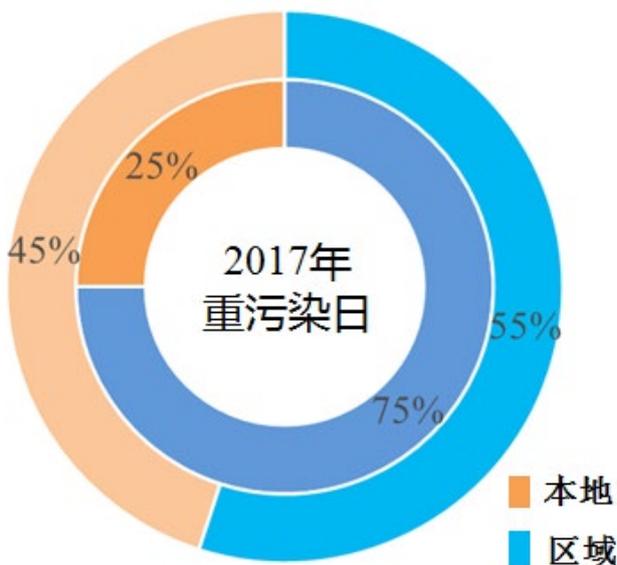


图 2.5 2017 年北京市重污染日大气 PM<sub>2.5</sub> 本地和区域贡献

数据来源：原北京市环境保护局

与 2013 年相比，2017 年北京市本地排放来源贡献发生较大变化。首先，各主要源对 PM<sub>2.5</sub> 的绝对浓度贡献全面明显下降，燃煤源下降幅度最为显著；其次，PM<sub>2.5</sub> 各主要来源中，移动源、扬尘源贡献率上升，燃煤和工业源贡献率下降，生活面源贡献率进一步凸显。其中，移动源中在京行驶的柴油车贡献最大，扬尘源中建筑施工和道路扬尘并重，工业源中石油化工、汽车制造和印刷等挥发性有机物排放重点行业的贡献较为突出，生活面源中生活溶剂使用等约占四成。

虽然北京市空气质量得到了明显的改善，但对健康影响较大的标志性污染物 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度仍然超过国家标准 66%，NO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 也未达到国家标准，秋冬季重污染发生频次仍较高，夏季 O<sub>3</sub> 污染逐渐显现，大气污染治理仍然是北京将长期面临的巨大挑战，需要继续付出艰苦的努力。

# 第三章 北京市空气质量管理体系建设综述

## 3.1 空气质量管理规划

### (1) 大气污染防治规划

自上世纪 50 年代以来，中国从中央到地方政府均以五年为期制定国民经济和社会发展规划，到 90 年代，环境保护成为五年发展规划中的一个部分，大气污染治理是其中的重要内容。因此，在 2000-2020 年期间，北京市发布的五年规划中均有专门的环境保护内容，并制定了五年环境保护专项规划，其中都包含了大气污染防治的目标和措施。

1998-2010 年期间，北京连续制定并实施了 16 个阶段的大气污染控制措施（部分年度分采暖季和非采暖季两个阶段），2011-2012 年的大气污染防治计划按年度发布实施。

2013 年，原环境保护部发布了《大气污染防治行动计划》，首次提出聚焦 PM<sub>2.5</sub> 开展大气治理，

要求到 2017 年，北京市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度在 2012 年的基础上下降 25%，控制在 60μg/m<sup>3</sup> 左右。为此，当年北京市发布了《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》（以下简称“五年清空计划”），并在这个 5 年内每年制定实施年度清洁空气计划。

2015 年，中国中央政府发布了《京津冀协同发展规划纲要》。原环境保护部组织对京津冀区域实施《大气污染防治行动计划》进展情况进行评估后，为确保加护目标实现，要求区域内各省市制定强化的措施。随后，北京市发布了《北京市贯彻落实〈京津冀大气污染防治强化措施(2016-2017年)〉实施方案》、《〈京津冀及周边地区 2017-2018 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案〉北京市细化落实方案》等文件，在年度措施的基础上，提出了“加强版”的措施。

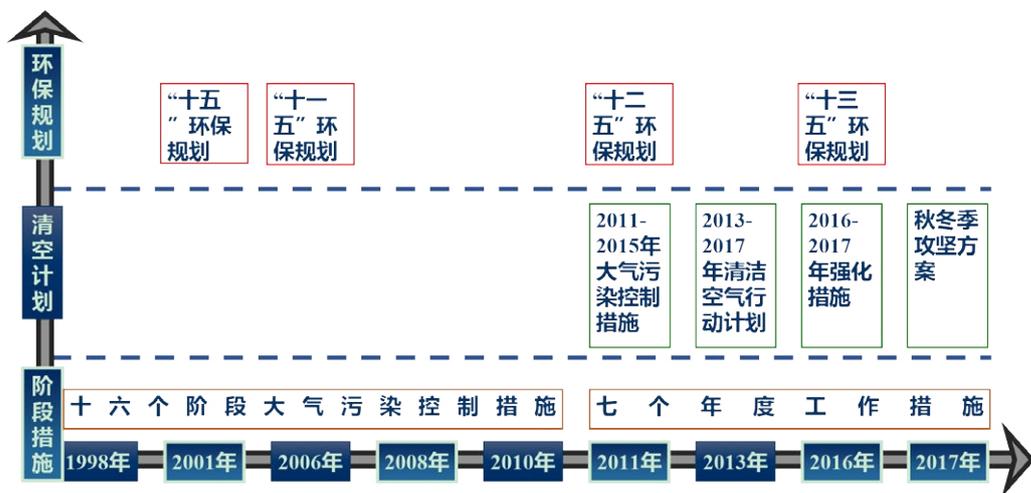


图 3.1 1998-2017 年期间北京市各项大气污染治理规划

数据来源：北京市环境保护科学研究院

## （2）规划的任务措施

与其他大城市一样，北京市主要的大气污染源包括燃煤、机动车、工业排放和扬尘。20多年来，北京市的大气污染治理措施围绕这四类污染源逐步深入，治理的重点由单项末端治理逐步升级为多领域综合治理和多项污染物协同控制。在燃煤污染控制方面，从安装脱硫除尘设施等末端治理和使用低硫煤转变为使用天然气、电能等清洁燃料替代燃煤的源头治理；移动源污染防治从油品质量和排放标准同步升级、淘汰老旧车、发展公共交通等多领域着手形成了一套“车-油-路”一体化的综合管理体系，后期将重点推广新能源车、治理重型柴油车和非道路移动机械污染，优化城市和区域交通结构；工业污染防治措施从推进工业企业污染治理升级改造、加严排放标准向淘汰污染产能、优化产业结构转换；扬尘污染治理措施包括从推广治理技术和加强监管两个方面向推动施工工地、道路和裸地扬尘的管理和控制转变。近年来，餐饮、汽修等生活来源的挥发性有机物治理也被纳入大气污染控制范围。

## （3）科技支撑

大气污染相关的科学研究和新技术研发为北京市制定和实施大气污染治理计划提供了重要的支撑。北京市依靠在京科研单位、大学和环保系统自身的技术力量系统地开展了科学研究和技术研发。主要涉及：大气科学及污染形成机理，空气质量监测、预报、预警技术，污染源清单编制和PM<sub>2.5</sub>来源解析，颗粒物和O<sub>3</sub>污染控制战略和技术措施，污染治理技术研发和示范应用等。

## 3.2 法规标准

### （1）大气污染防治法律法规

北京市在大气污染防治方面主要遵从国家的大气污染防治法律，包括《中华人民共和国环境保护法》

（1979年发布，2014年修订）、《中华人民共和国大气污染防治法》（1987年发布，2015年修订）。为应对严峻的大气污染形势，在总结15年地方大气污染防治经验的基础上，北京市于2014年发布实施了《北京市大气污染防治条例》。作为地方法规，更加具体地确定了北京市大气污染防治的方向、模式和要求。该部条例是中国首部以PM<sub>2.5</sub>防治为主要目标的地方大气污染防治法规，针对PM<sub>2.5</sub>来源广泛的特点，确定了系列综合治理对策。从法规上推动了北京市的大气污染治理对策从末端治理向全过程管控转变，由浓度控制为主向浓度与总量控制并重转变，由注重企业治理向企业治理与区域和行业治理并重转变，由注重政府管控向注重全社会参与治理转变。

### （2）地方排放标准

中国的国家法律允许地方政府根据需要制订严于国家标准的地方环境标准。北京市自2000年开始加快制定发布地方大气污染控制标准。截至2017年底，在用的北京地方大气污染物控制排放

### 北京市锅炉大气污染物排放标准

1998年，为适应燃煤锅炉污染治理的需要，北京市首次制订了《锅炉大气污染物排放标准》。该标准先后于2002年、2007年、2015年进行了修订，这些修订包括增加控制的污染物种类和加严排放限值。1998、2002和2007年版的标准主要通过不断加严SO<sub>2</sub>排放限值推进燃煤锅炉的末端治理，2015年版的标准中将新建燃气锅炉和在用锅炉的NO<sub>x</sub>排放浓度加严至30mg/m<sup>3</sup>和80mg/m<sup>3</sup>，达到国际先进水平。在该标准的支持下，北京市于2016年在全国率先启动了燃气锅炉低氮改造工作，主要方式是更换低氮燃烧器或直接更换低氮燃气锅炉，通过采取控制NO<sub>x</sub>产生源头的手段，有效保证了控制效果。为鼓励企业积极开展改造，2016年北京市出台了燃气（油）锅炉低氮改造奖励政策，实施燃气（油）锅炉改造可获得市区两级财政补贴，比例最高可达改造总投资的三分之二。新的排放标准和配套财政奖励政策有力促进了燃气锅炉的氮氧化物减排，通过改造可以使单台锅炉氮氧化物排放减少50%以上。2016-2017年2年中，全市有3.4万蒸吨燃气锅炉实施了低氮改造，每年可削减氮氧化物近5000吨。

标准已达 42 项，涵盖燃烧源、移动源和工业污染源等方面。形成了一套国内领先的地方大气污染物排放标准体系，为北京市实施各项大气污染治理措施提供了重要的支持。

### (3) 环境执法

环境执法是保证各项法规标准政策落实的手段，北京市设有市区两级环境执法队伍，分工合作开展环境监察执法工作。固定源的执法监管包括日常监管、专项执法检查、自动在线监控监管、热点网格监管等，建立了“一厂一档”工业污染源数据库，并定期开展随机抽查；移动源监管主要包括新车抽检、在用车定期检测、路检路查以及针对非道路移动机械的入户抽查和专项执法等。

2017 年，北京市在公安局设立了环保警察队伍，环保、公安两部门建立了联合执法工作机制，环保部门可以将涉嫌环境犯罪的环境违法案件移送公安局，大大增强了环境执法的威慑力。

## 3.3 经济政策

### (1) 经济政策

为推动大气污染治理措施的有效实施，北京市逐步建立起了包括补贴、收费、奖励、价格、金融等多种手段的地方环境经济政策体系，为实施针对燃煤源、机动车、工业和扬尘等各项污染源的治理措施提供资金支持。

在燃煤污染治理方面，主要使用财政资金为实施燃煤锅炉清洁能源改造、城区平房采暖煤改电、农村散煤改造等工程的用户提供资金补贴。比如，城区平房煤改电的用户可得到相当于采暖设备购置费用的 2/3 的补贴资金，并且采暖用电的电价最高优惠 78%。

### 北京市环保、公安联合执法案例

2017 年 1 月，北京市建立首支环保警察队伍以后，环保、公安两部门加强了合作，开展了贯穿全年的“严厉打击环境违法犯罪行为专项行动”。截至 2017 年底，共查处适用行政拘留环境违法案件 135 起，涉嫌环境污染犯罪案件 44 起。

典型案例：2017 年 4 月，通州区环境保护局对某印刷公司进行执法检查时，发现该公司的两套印刷废气净化设施处在维修保养状态。但是，该公司为赶工期，在废气净化设施未运行的情况下继续生产，印刷废气未经处理直接排放。根据《中华人民共和国大气污染防治法》的规定，通州区环保局责令该公司限期改正违法行为，对其处以罚款，同时将案件移送至警方。因该行为符合《行政主管部门移送适用行政拘留环境违法案件暂行办法》第七条规定的“在生产经营或者作业过程中，停止运行污染物处理设施的”情形，环保警察依法对该单位相关负责人采取了行政拘留措施。

淘汰老旧车辆、改造重型柴油车和购买新能源车的车主也能够得到财政补助或奖励。2008-2014 年，北京市按改造总费用的 50% 对实施颗粒物排放控制改造的重型柴油车车主进行补贴（每辆车补贴最高不超过 1.5 万元）；2014-2017 年期间，国家和北京市对购置新能源小客车提供总额不超过车辆销售价格 60% 的财政补助。

对工业污染源中主动退出或实施工艺废气改造的高污染企业，给予奖励或补助，同时根据废气排放浓度实施差别化的排污收费政策。比如：2008 年起，北京市对高能耗、高资源消耗、高污染的企业整体关闭退出，以及工业企业关闭退出部分生产工艺和设备进行补助，最高补贴标准为 300 万元人民币。

### 农村散煤清洁能源改造经济政策

为推动农村地区的散煤污染治理，2014年起，北京市陆续出台了多项针对农村散煤清洁能源改造的政策，覆盖“煤改电”“煤改气”、太阳能利用、农宅抗震节能保温改造等主要改造类型。补贴范围包含外部管（电）网建设、清洁采暖系统购置、日常使用等全环节，涵盖居民住宅、公用建筑、设施农业和畜禽舍等主要散煤使用对象。

案例：一个房屋采暖面积 120m<sup>2</sup>、采暖期 120 天的农户，由燃烧散煤采暖改为分户式燃气壁挂炉采暖，户主可得到的设备购置补贴为燃气壁挂炉购置费的三分之二（平均补贴为 8000 元 / 户）。同时，采用燃气供暖壁挂炉供暖的居民用户在采暖季可享受居民用户天然气阶梯价格的最低档（目前为 2.28 元 / m<sup>3</sup>）。实施煤改气采暖改造后，居民用户每年的采暖费比改造前减少约 30%。

2014-2017 年，北京在全市范围内完成了 2000 余个村、约 90 万户农户的“无煤化”采暖改造，并同步完成全市 1514 个村委会、村民公共活动场所和 94.6 万平方农业设施的燃煤采暖替代改造工作，每年供暖季可减少散煤燃烧约 200 多万吨。

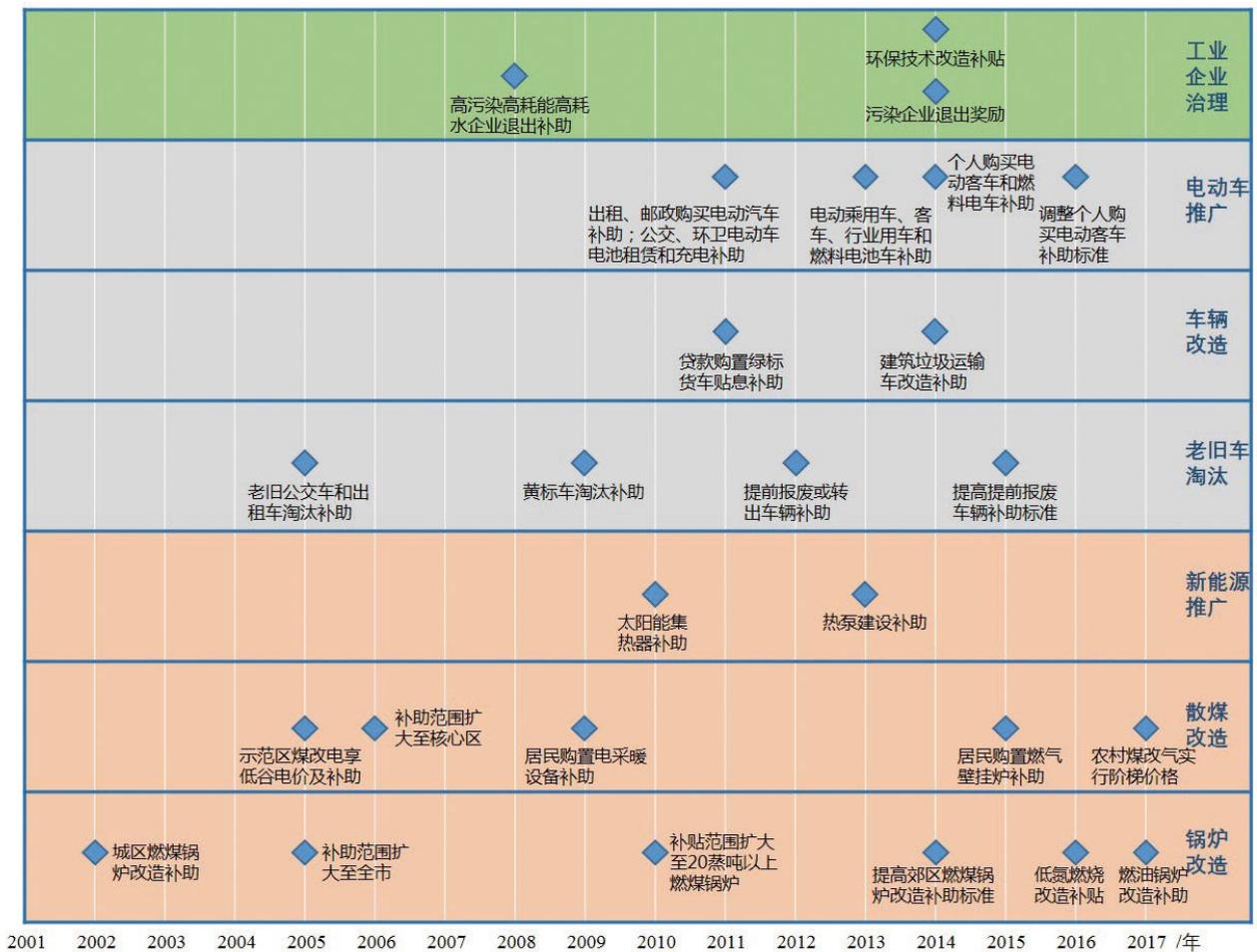


图 3.2 北京市主要大气污染治理经济政策

数据来源：北京市环境保护科学研究院

## (2) 财政资金投入

北京市一方面不断加大财政资金对大气污染治理领域的投入，同时带动了全社会环保投资，为治理措施的落实和空气质量改善奠定了坚实基础。2009年北京市投入大气污染治理的财政资金为17

亿元，2017年达到182.2亿元，8年间增长了近10倍（图3.3）。财政资金主要用于燃煤锅炉和散煤清洁能源改造补贴、老旧车淘汰补贴、企业调整退出补贴、绿色建筑和生态示范区建设补贴等。

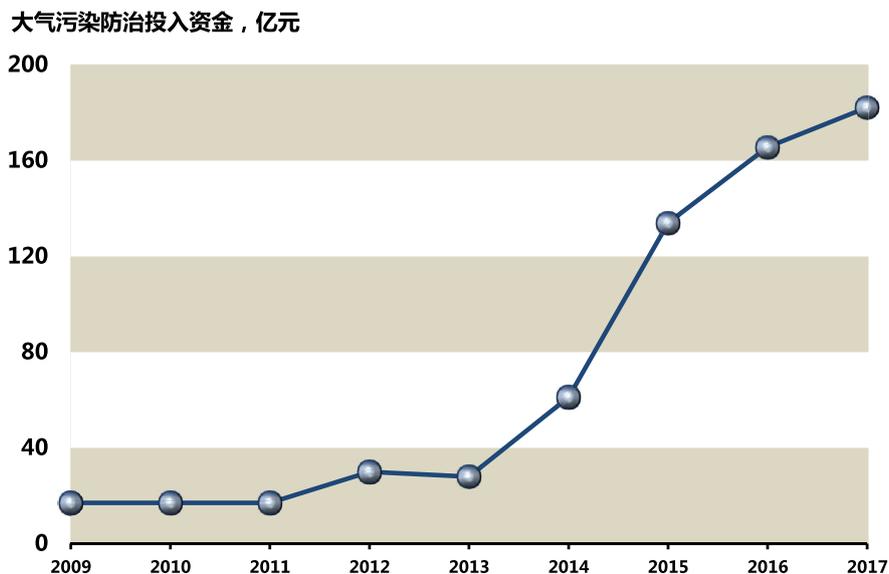


图 3.3 北京市近年来的大气污染防治资金投入情况

数据来源：北京市财政局

## 3.4 监测能力建设

上世纪80年代初，北京市建成了中国首个环境空气质量自动监测系统，由8个监测子站组成，用于监测北京环境空气质量状况及长期变化趋势，监测项目包括SO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>2</sub>和TSP等污染物。1999年，监测项目增加PM<sub>10</sub>。2012年进一步扩充并新增了PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>的监测能力。目前，该系统的35个自动监测子站（图3.4）覆盖了北京市全境，包括城市环境评价点、城市清洁对照点、交通污染监控点、区域背景传输点等。全部监测站点使用国家标准方法自动监测PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>等6项污染物，监测数据对社会实时公开发布。

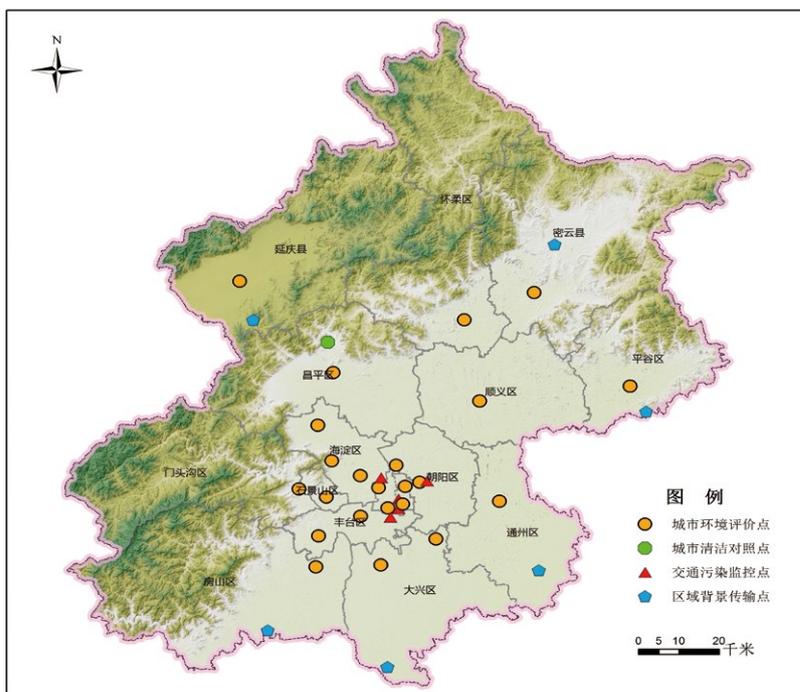


图 3.4 北京市现有空气质量自动监测网络

数据来源：北京市环境保护监测中心

2016年，北京市空气质量监测手段进一步升级，并结合新一代高时空分辨率卫星遥感、激光雷达垂直网络、高精度气象观测等技术，建设了“天地空”一体化空气质量监测网络，提高了监测和分析水平。同时，借助大数据技术，自主研发智能传感器设备，开发网络运行和质量控制新模式，在全市网格化布设了1000余个PM<sub>2.5</sub>传感器监测站，建立起低成本、高密度网格监测体系。该系统可精准识别北京市范围内PM<sub>2.5</sub>的高排放区域和时段，并为评价北京325个街乡镇空气质量提供了支持。

### 3.5 空气重污染应急

为应对秋冬季节较为频繁的空气重污染问题，北京市于2012年发布实施《北京市空气重污染日应急方案（暂行）》，属全国首例。该方案在2014、2015、2016、2017年历经4次修订，预警机制不断完善，预警分级和启动条件更加科学。同时，在预警期间采取应急减排措施有效降低了不利天气条件下的污染水平。《北京市空气重污染应急预案（2017年修订）》包括了预警分级、应急措施、应急响应和组织保障等四部分内容。

北京市依靠其成熟的大气环境质量监测网络，

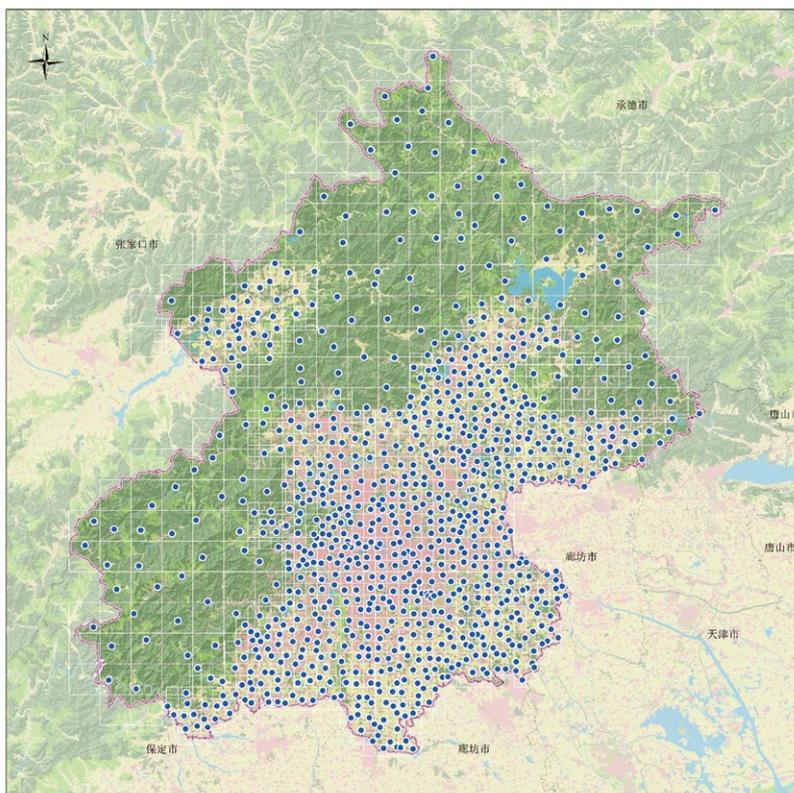


图 3.5 2017年建成的北京市高密度PM<sub>2.5</sub>传感器监测网络

数据来源：北京市环境保护监测中心

对未来空气质量状况进行预报。遇重污染过程，至少提前24小时发布预警。预警信息通过广播、电视、报纸等传统媒体，和微博、微信以及手机应用程序等新媒体及时发布，确保信息能够覆盖各个社会群体。通过媒体提前向社会发布预警服务及健康风险提示，一方面方便公众加强自身健康防护，同时也为启动应急污染控制措施预留了准备时间。



冬日颐和园（照片来源：北京市环境保护宣传中心）

### 空气重污染应急典型案例

2016年12月，空气质量预报显示16-22日北京市及周边地区将遭遇一次持续时间较长的空气重污染过程。经市政府批准，北京市空气重污染应急指挥部于15日12时（提前32小时）发布了预警通告，通知将于16日20时至21日24时期间实施2016年首个空气重污染红色预警。按照应急预案规定的方案，全市实施了机动车限行与管控、燃煤和工业企业停限产、工地停工、加密全市道路保洁和错峰调休等重污染红色预警（一级）响应措施，同时公交地铁增加运行车次，小学及幼儿园停课，中学弹性教学，有关部门按照职责加大对应急措施落实情况的检查。在污染过程结束后按计划解除了应急措施。北京周边的22个城市也同步启动了红色预警减排措施。

经测算，采取上述应急措施后，红色预警期间 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和VOCs排放量平均削减30%左右，其中机动车限行与管控措施对污染物削减贡献较大。不采取控制措施和采取措施两种情景下的空气质量模拟结果显示，北京及周边地区预警措施的实施使北京市的 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度平均下降了23%，应急措施的实施有效地降低了污染过程的浓度峰值。

### 3.6 信息公开和公众参与

#### (1) 公开空气质量和预报信息

1998年起，北京市开始通过电视等媒体向社会发布空气质量周报，并且在不断完善的空气质量监测网络支持下，逐步提升空气质量监测数据的发布频率和质量。2001年开始向社会发布空气质量日报和预报，对 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 等三项主要污

染物污染指数范围和污染级别进行预测，并发布预报结果。在筹办2008年奥运会期间，空气质量预报已经成为一项重要的工作内容。以此为契机，北京市大幅扩建了空气质量监测网络，提升了监测能力、数据利用及分析能力。空气质量预报技术系统升级为包括统计预报模式、数值预报模式和专家诊断订正三部分组成的完整系统。

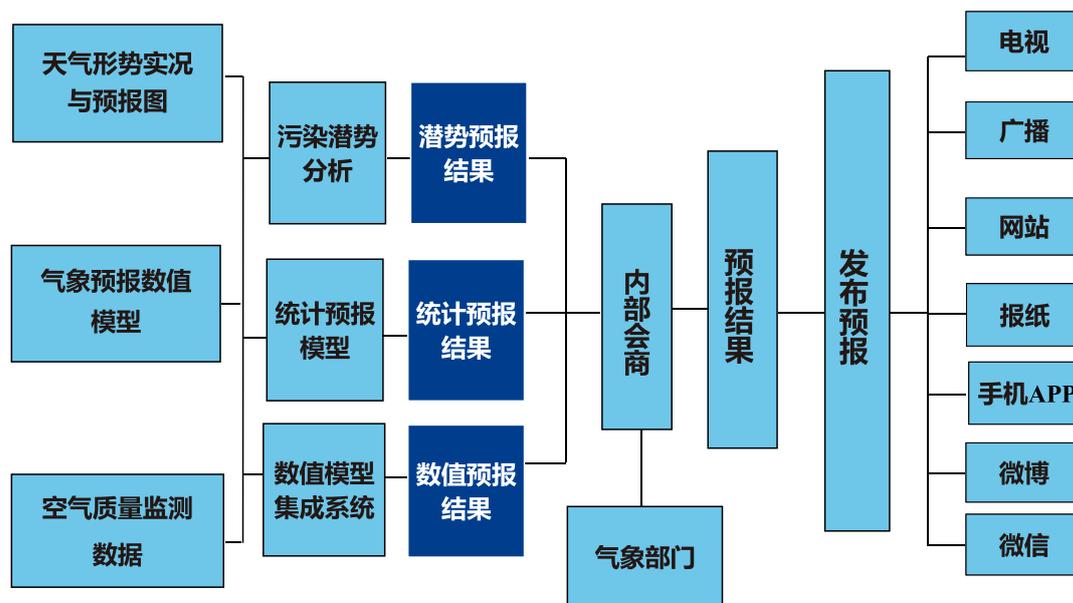


图 3.6 北京环境空气质量预报技术体系和业务组成

数据来源：北京市环境保护监测中心



自 2013 年开始,北京市 35 个空气质量自动监测站的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{O}_3$  等六项污染物实时浓度、评价结果、健康提示和空气质量预报信息全部公开发布。除了电视、广播等传统媒体,北京的空气质量信息发布渠道也拓展到网站、微博、微信以及手机应用软件等新媒体。

## (2) 环保理念传播和公众参与

北京市充分认识到公众参与环境保护工作的重要性,加强了环保宣传教育机构建设,搭建了包含报纸、广播、电视等传统媒体,和网络、微博、微信等新媒体的全媒体环境信息和知识传播平台。在全市建成了 38 家对公众开放的环境教育基地。理念传播方式包括发布新闻信息、宣讲环保知识、出版科普读物,播放专题节目,创作播出环保动画、

环保话剧等形式。通过这些活动向公众报道环保工作动态、解读环保政策、普及环保知识、传播绿色理念,公众的环境意识明显提高。

针对不同目标人群,北京市还组织开展了形式多样的环保公众参与活动。比如,面向青少年,多年持续开展环保主题的中小學生“我爱地球妈妈”演讲比赛、北京环保儿童艺术节等;邀请摄影和动漫爱好者参加“携手蓝天”环保摄影大赛和环保主题动漫设计大赛;针对私家车主推出了绿色驾驶一系列主题活动;为社区居民开展了环境科普宣讲活动等等。北京市从 2013 年开始邀请社会知名人士担任北京环保公益大使,截至目前已有 10 位知名人士主动受聘成为公益大使,男性和女性各占 5 位,协助向公众传播环保知识、倡导绿色生活方式。



图 3.7 北京环保公益大使, 2013-2017 年

聂一菁、郭川、蔡祥麟、李莉、马布里、海清、李晨、杨扬、徐春妮、白岩松

图片来源:北京市环境保护宣传中心

### 顺义区巾帼志愿者宣传大气污染防治

北京市顺义区拥有超过 8000 人的巾帼志愿服务队。巾帼志愿服务队通过社区活动、入户走访等开展环保宣传倡导改善社区环境。近年来，围绕“大气污染防治”“农村煤改气煤改电”等工作，巾帼志愿服务队通过发放倡议书等形式，鼓励和支持农村妇女参与和支持社区环境治理，收到了良好效果。

**积极宣传普及政策。**巾帼志愿服务队利用宣传栏、电子屏等为居民普及环保小知识，宣传绿色生活理念。深入居民家中，向女性居民宣传农村煤改气煤改电政策，帮助居民详细了解政策，积极配合开展散煤改造工作。

**主动作为做表率。**志愿者们定期在居住的社区（村）内开展环境大扫除活动。倡导居民养成环保的生活习惯，开展“变废为宝”闲置废旧物品置换活动，使社区环境得到极大改善，得到居民的称赞和认可。

**定巡查保整洁。**志愿者们定期开展社区巡查，对发现的破坏环境设施、污染环境的行为进行及时劝导，使环境变得更加干净整洁，社区 / 乡村更加健康和谐。

北京市建立了环境信访和投诉举报制度，开通了 12369 环保举报热线、建立网上投诉举报信箱，实施“有奖举报”，鼓励公众积极举报大气污染违法行为，最高奖励金额达 5 万元。

### 公众环保意识不断提升

第三方调查机构自 2013 年以来持续开展北京公众环境意识调查，结果显示：北京公众的环境意识、环保科学认知能力、环保责任意识以及环保参与度都有所提升。

首先，北京市公众对与自身关系密切的环保知识的认知度持续提高，其中对 PM<sub>2.5</sub> 的知晓度从 2013 年的 86.6% 提升至 2016 年的 93.8%，2017 年公众对 PM<sub>2.5</sub> 的来源认知已达到较高的水平，受访者中有 73.6% 的男性受访者和 70.66% 的女性受访者认为主要是机动车尾气排放，50.73% 的男性受访者和 49.40% 的女性受访者认为是扬尘，而这些都是 PM<sub>2.5</sub> 的主要来源之一。

其次，公众的环保责任意识不断提升。公众认为自身应发挥重要作用的人数比例有很大提升，2013 年为 65.3%，2017 年上升到 80.86% 的男性受访者和 80.17% 的女性受访者。公众环保活动参与度也从 2013 年的 30% 提升至 2016 年的 48.5%，参与的形式也越来越丰富，公众从“身边小事做起”逐步发展到“参与政策制定讨论”、“举报环境违法行为”。比如，对环保投诉举报热线 12369 的知晓度从 2013 年的 38.3% 提升至 2016 年的 59.0%，2017 年有 43.3% 的受访者表示“主动举报过环境违法行为”。

# 第四章 北京市空气污染治理措施效果量化评估

在 1998-2017 这段 20 年的时间尺度上，本次评估选择了主要污染源中最具有代表性的两类，即燃煤源和移动源，量化分析了北京市采取的污染控制措施减排效果。

主要用于发电、供热、工业生产和居民炊事取暖等与社会生产和居民生活相关的领域。从 1998 年开始，北京市大力推进了燃煤设施末端治理和能源结构调整两项主要措施，后者包括强制推广低硫煤、加快发展天然气、电力等清洁能源措施。1998 年至 2017 年间各类燃煤源污染控制措施的实施历程如图 4.1 所示。

## 4.1 能源结构调整与燃煤源排放控制

煤炭长期以来都是北京能源消耗的重要部分，

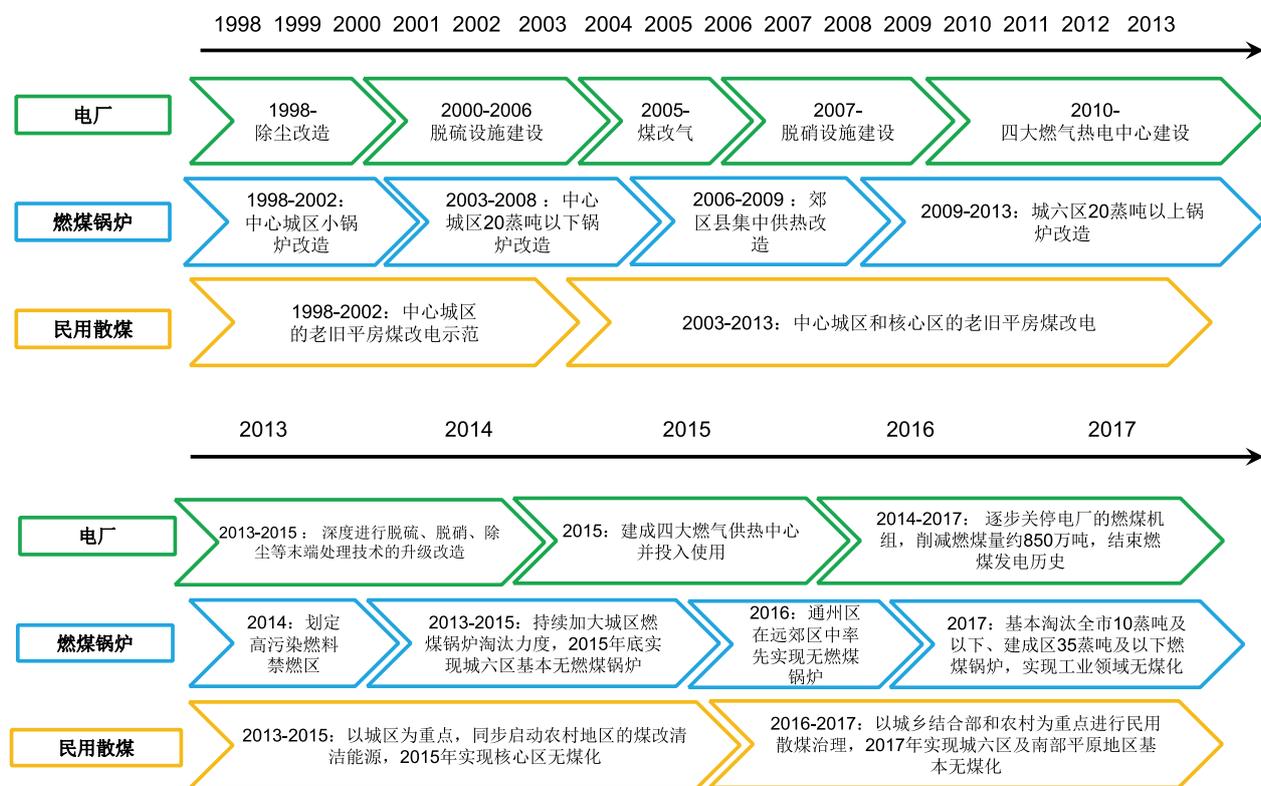


图 4.1 1998-2017 期间北京市采取的燃煤污染治理措施清单

来源：原北京市环境保护局，清华大学

通过这一系列措施，北京市在能源消费总量高速增长的情况下实现了能源结构质的飞跃。煤炭消费量由 1998 年的 2800 万吨下降至 2017 年的 500 万吨以内，燃煤占全市能源消费的比重由 2013 年的 23.3% 下降到 2017 年的 5.7% 左右；截至 2017 年底，全市优质能源（指非煤能源）比重提高到 90% 以上。

### （1）电厂超低排放改造及清洁能源替代

作为煤炭消费大户，北京市燃煤电厂在 2005 年以前主要依靠末端治理改造降低 SO<sub>2</sub>、粉尘等污染物排放。从 2005 年起，北京市开始在电厂实施“煤改气”工程，逐步加大天然气使用量，在全市发电总量上升的情况下，实现了电力行业煤炭消费负增长。北京市电力行业年煤炭消费总量在 2005 年达到峰值后开始下降。到 2013 年，燃煤量削减至 643 万吨，共削减了 250 万吨左右；用于发电的天然气消费量则上升至 18.5 亿立方米，占电力部门一次化石能源消费总量的 35%。

在 2013 年启动“北京市 2013-2017 清洁空气

行动”以后，北京市加大了电力行业能源结构的调整力度。2013-2017 年间，北京市相继建成了四大燃气热电中心，替代燃煤电厂，电力行业五年间共削减燃煤量约 850 万吨。到 2017 年，北京市基本实现了无燃煤发电，用于发电的天然气消费量攀升至 74 亿立方米，占电力部门一次化石能源消费总量的 85%。

### （2）燃煤锅炉污染治理

燃煤锅炉污染治理是北京长期以来控制大气污染的重要工作内容。北京市从 1998 年起开始建设“无煤区”，在实施 2013-2017 年清空计划期间进一步加大对燃煤锅炉治理力度，共完成 3.9 万蒸吨的燃煤锅炉改造或淘汰，削减燃煤约 850 万吨。

北京市的燃煤锅炉改造按照由内到外、由集中到分散的原则开展，主要分成四个阶段分区域、分重点推进，各阶段燃煤锅炉改造的完成情况如表 4.1 所示，到 2017 年基本淘汰全市 10 蒸吨及以下、建成区 35 蒸吨及以下燃煤锅炉。

表 4.1 北京市 1998-2017 期间分四个阶段开展的燃煤锅炉改造

阶段	地区	治理重点	改造实施情况
第一阶段 (1998-2002)	核心区 <sup>1</sup>	1 蒸吨以下小锅炉	淘汰 1 蒸吨以下小锅炉共计 10633 台，22410 蒸吨 <sup>2</sup>
第二阶段 (2003-2008)	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 5704 台，22141 蒸吨
第三阶段 (2009-2012)	城六区 <sup>3</sup>	20 蒸吨及以上燃煤锅炉	淘汰 20 蒸吨及以上燃煤锅炉共计 598 台，5769 蒸吨
第四阶段 (2013-2017)	全市	10 蒸吨及以下燃煤锅炉	淘汰燃煤锅炉共计 8312 万台（不含 2.7 万台小煤炉），39166 蒸吨

注：<sup>1</sup>核心区指现东城区与西城区；<sup>2</sup>蒸吨为燃煤锅炉功率单位，1 蒸吨=0.7MW；<sup>3</sup>城六区包括东城区、西城区、朝阳区、海淀区、丰台区和石景山区等 6 个位于城区的行政区。

### （3）民用散煤污染治理

1998 至 2017 年间，北京市依据“宜气则气、宜电则电”的原则不断推进采暖改造，减少散煤使用，共完成约 70 万户居民的民用燃料清洁化改造，至 2015 年底基本实现城市核心区（东城区和西城

区）无煤化。2015-2017 年间继续在城乡结合部和农村地区推进散煤治理工作，在农村平原地区实施煤改清洁能源工程，实现燃煤量削减近 100 万吨/年，至 2017 年底城六区和南部农村平原地区基本无煤化。

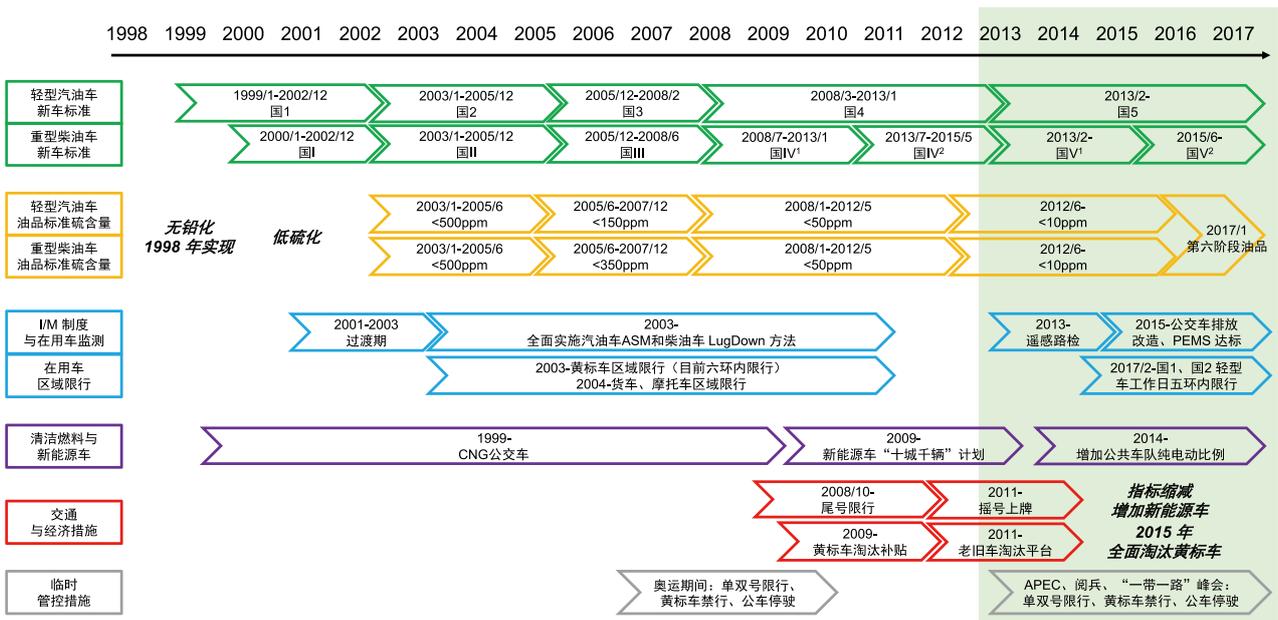
## 4.2 移动源排放控制与交通结构调整

机动车排放控制始终是北京市空气污染治理的重点工作。从1998年至今，北京市制定和修订了30余项地方排放标准，涉及新车、在用车、油品等多个方面。2008年以后，更多地运用了交通管控和经济鼓励等方式，逐渐形成了“车-油-路”一体化的城市机动车排放综合控制体系，并在2013-2017年期间不断得到完善（图4.2）。采取的主要机动车排放控制措施及实施时间如图4.3所示。



图 4.2 “车-油-路”一体化的北京机动车排放控制体系

来源：原北京市环境保护局，清华大学



<sup>1</sup> 仅在公交、环卫和邮政等城市公共车队中实施；<sup>2</sup> 对于货运、旅游等长途社会车队中实施。

图 4.3 1998-2017 年期间北京市机动车污染排放控制主要措施

来源：原北京市环境保护局，清华大学

### (1) 地方排放标准加严与在用车改造

1999年1月，北京市成为中国第一个实施轻型汽油车国1排放标准的城市。到2013年2月，北京率先实施与欧洲第5/V阶段标准相当的京5/V排放标准，进一步缩小了与欧美发达国家机动车排放控制水平的差距。过去20年间，北京市实现了新车排放控制的跨越式发展，通过标准引领了中国汽车行业节能环保的技术进步。

除了加严排放标准外，北京市还实施了系列控制措施减轻机动车污染。20年以来，北京市进行了4次较大规模在用车改造。1999年，北京市开展了汽油车尾气治理改造工作，削减在用车排放的一氧化碳(CO)、总碳氢化合物(THC)和NO<sub>x</sub>，全年共改造近20万辆轻型小客车。2008年，北京市要求在用柴油车加装颗粒物过滤器，削减在用车排放的颗粒物，全年改造近1万辆。2015年，北京市对在用的8800辆选用SCR系统的国IV、国V排放标准柴油公交车进行排放改造，解决车辆在排放认证与实际道路排放不一致，尤其是低速低工况时氮氧化物排放较高问题。自2016年1月起，北京市要求新增公交、环卫、邮政、班车、校车、旅游、机场巴士、渣土车共8类车辆要安装颗粒捕集器，截至2017年底，改造完成1.7万辆。

### (2) 老旧车辆淘汰与区域限行

北京市自2003年开始对黄标车在二环路内限行，2008年奥运期间全市禁止黄标车行驶，2010年限行范围扩大到六环路内，2015年12月全市域内禁行。对轻型汽油车，2017年起国1、国2

标准轻型汽油车五环路内限行；对重型柴油车，2017年国III排放标准柴油载货车六环路内限行。

在限制的同时，为鼓励高排放车辆提前淘汰，北京市自2009年开始对淘汰高排放老旧车辆实施政府补助的经济政策。在2013-2017年期间，北京市累计淘汰老旧机动车约170万辆，超额完成预期目标。

### (3) 其他控制措施

北京市在移动源排放管控方面的其他措施还包括提升油品质量标准、积极发展新能源车、优化交通结构等。

**提升油品质量：**北京市1997年率先在全国使用无铅汽油、2004年制定并实施了严于国家标准的车用燃油第二阶段地方标准，此后北京市油品标准持续领先全国一至两个阶段。北京市分别在2005年、2008年、2012年、2016年出台第三、四、五和六阶段的油品地方标准，持续加严汽油和柴油中的主要环保指标。

**积极发展新能源车：**北京市从1999年起在公交车队中引入压缩天然气(CNG)公交车，逐步推广清洁燃料和新能源车。比如：2016年更新的2306辆公交车中，1368辆为电动车，占59.3%。

**优化交通结构：**近年来通过优化城市布局，大力发展地铁、公交等公共交通，北京的交通出行结构(图4.4)大幅优化，有效减少了机动车排放，也缓解了出行高峰时段的交通拥堵。

蓝蓝的天上白云飘(图片来源:北京市环境保护宣传中心)



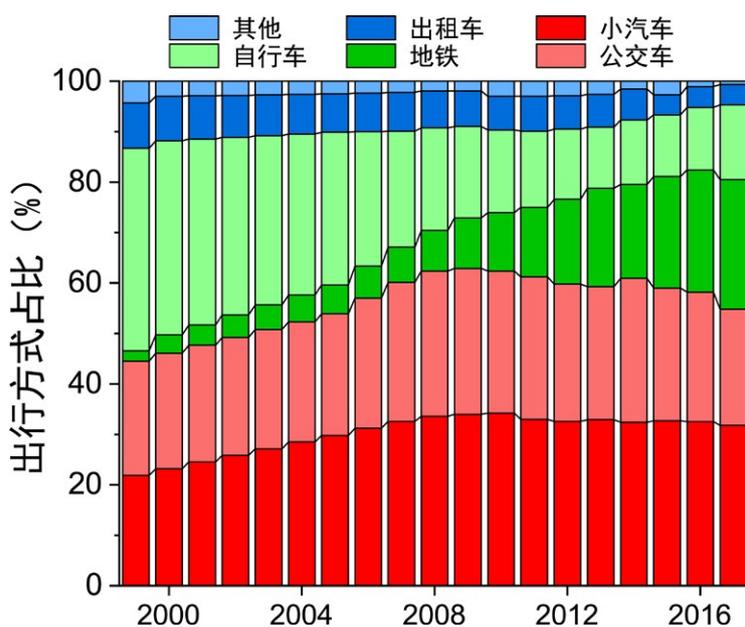


图 4.4 北京历年交通出行方式构成，1998-2017

数据来源：北京交通发展研究院

为进一步调控小客车数量高速增长、使用频率高且集中的特征，北京市在 2008 年北京奥运会期间试点实施了单双号限行临时交通管控措施。取得经验后从 2008 年 10 月起实施小客车按车牌尾号工作日高峰时段区域限行的交通管理措施。2011 年起，北京市采取“新车限购”措施，将每月新增小客车牌照指标上限设置为 2 万个；2014 年进一步收紧新车上牌配额，年度配置指标总量从 24 万减少至 15 万。上述常态化限行 / 限购措施扭转了北京机动车数量过快增长的局面，并对缓解城市交通运行压力起到了作用。

### 4.3 北京市 1998-2017 空气污染治理措施效果

#### (1) 燃煤源排放控制措施的减排效果

在电厂控制方面，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 至 2017 年间，北京市电厂  $PM_{2.5}$  排放总量持续下降，而  $SO_2$  和  $NO_x$  排放量出现先上升后下降的趋势，2004-2007 年和 2013-2017 年是电力部门各类污染物下降最明显的两个时段（见图 4.5）。

与 1998 年相比，2017 年北京市电厂  $PM_{2.5}$ 、 $SO_2$  和  $NO_x$  排放量分别下降了 1.68 万吨、5.23 万吨和 5.30 万吨，削减比例分别为 97%、98% 和 86%。在 1998 至 2013 年间，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，对电厂污染物的减排发挥了关键作用。在 2013 至 2017 年间，“煤改气”等能源结构调整措施贡献了电厂污染物进一步下降。

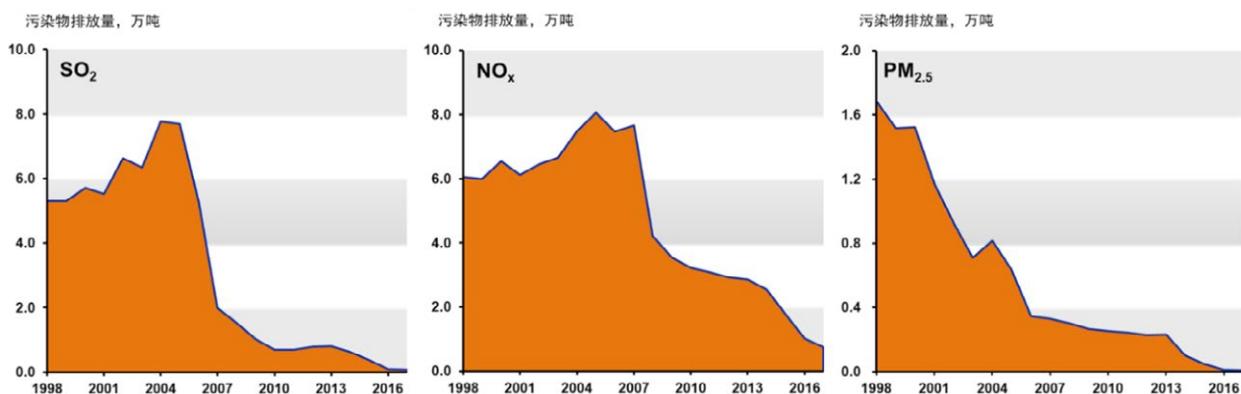


图 4.5 北京市 1998-2017 年间电厂主要大气污染物排放情况

数据来源：清华大学

在燃煤锅炉控制方面，与 1998 年相比，2017 年北京燃煤锅炉改造共减少  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$ 、 $NO_x$  年排放量 2.1 万吨、3.5 万吨、16.5 万吨和 5.6 万吨，其中各阶段燃煤锅炉改造污染物减排量情况如图 4.6 所示。

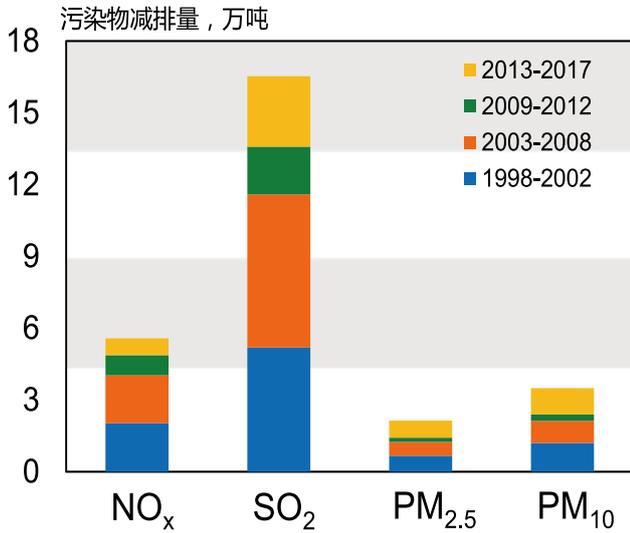


图 4.6 北京市 1998-2017 年间燃煤锅炉改造污染物减排量

数据来源：原北京市环境保护局，清华大学

在民用散煤控制方面，在 1998-2017 年间，优质煤替换和煤改电、煤改气等措施的实施共分别减少了  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $SO_2$  和  $NO_x$  年排放量 2.1 万吨、3.2 万吨、4.6 万吨和 1.6 万吨。与电厂和燃

煤锅炉治理相比，民用散煤整治的污染物减排绝对数量较小。但由于散煤原来主要在城区建筑密集、居民众多的老城中心和乡村使用，通过煤改清洁能源显著改善了采暖季城区老旧平房区和乡村居民局地空气质量、有效降低了室内污染物浓度，提高了老旧平房区的居住水平和安全水平，所带来的环境与健康效益更为显著。

### (2) 移动源排放控制措施的减排效果

过去 20 年间，北京市机动车保有量增加了 3 倍，在实施了一系列移动源排放控制措施后，移动源的污染物排放总量显著下降。与 1998 年相比，2017 年移动源排放的 CO、THC、 $NO_x$ 、 $PM_{2.5}$  削减了 110.5 万吨、9.4 万吨、7.1 万吨和 0.6 万吨，减排率分别为 89%、64%、55% 和 81%，上述污染物的逐年排放情况如图 4.7 中绿色部分所示。CO 和 THC 排放削减主要得益于针对轻型汽油车排放的严格控制， $PM_{2.5}$  排放削减效益主要来自于重型柴油车的排放控制措施， $NO_x$  排放削减幅度低于其他污染物。

在无控情景下，机动车保有量将不断上升，交通运行状况持续恶化。测算结果表明，2017 年无控情景下 CO、THC 和  $NO_x$  的排放将是实际排放的 100 倍以上、 $PM_{2.5}$  的排放将是实际排放的 80 倍左右。相对无控情景，北京机动车排放控制措施对于 CO、THC、 $NO_x$  和  $PM_{2.5}$  的减排控制效果（图 4.7 中蓝色、红色和黄色部分总和）达到 99% 以上。



2008 年停产后的首钢新貌（照片来源：北京市环境保护宣传中心）

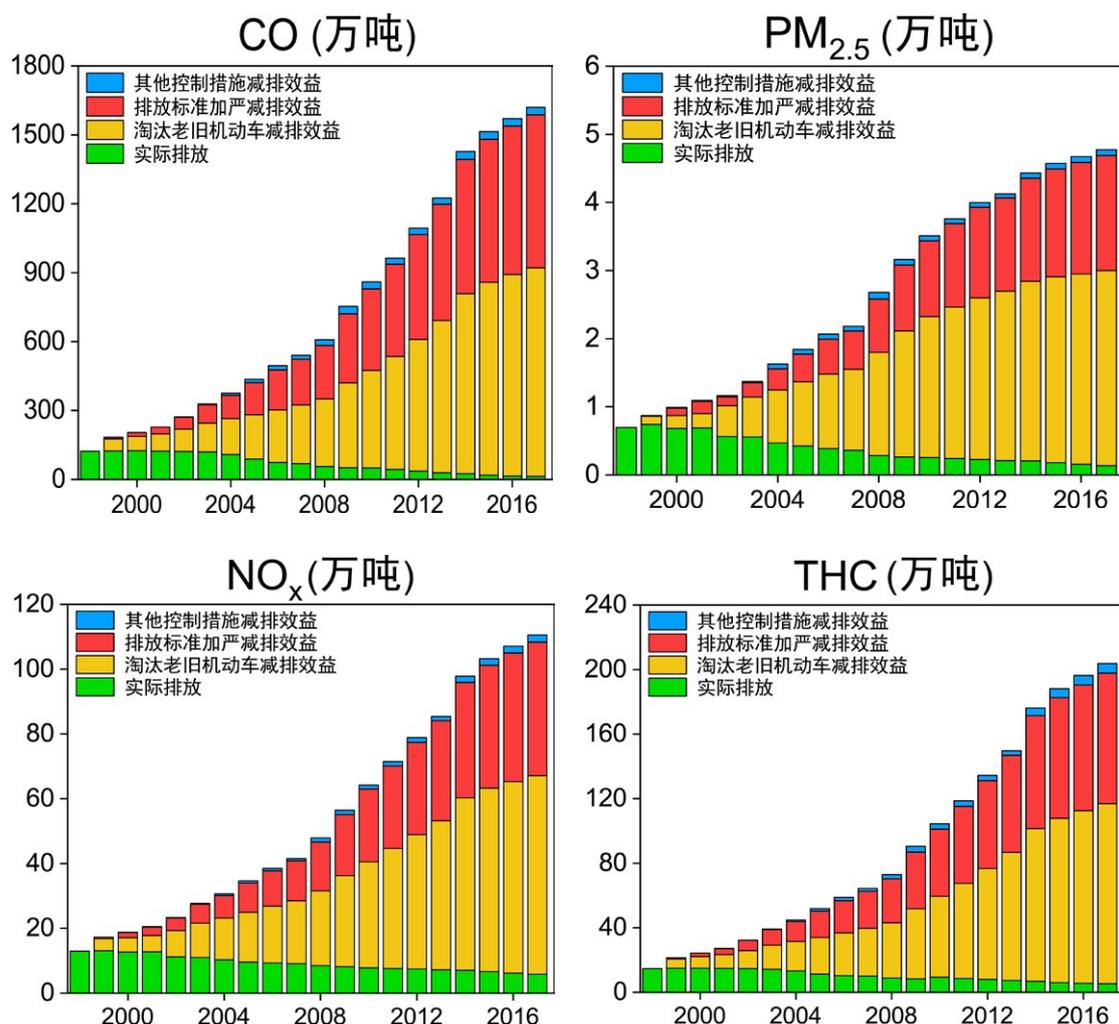


图 4.7 北京市 1998-2017 年间移动源实际排放及管控措施减排效益

数据来源：清华大学

老旧车辆淘汰是多项措施综合的效果，区域限行和鼓励淘汰等系列措施显著加速了老旧车辆的更新，是北京市实施的所有移动源排放控制措施中减排效果最为突出的一项。相对无控情景，车辆淘汰在 1998-2017 年期间累积对于 CO、THC、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的总量减排贡献分别达 56%、56%、59% 和 63%（图 4.7 中红色部分）。

在排放标准控制方面，北京市一直以来是中国提升机动车排放标准进程的引领者。分析结果表明，

不断提升车辆排放标准对北京市移动源的减排效果突出，仅次于老旧车辆淘汰。相对无控情景，该措施在 1998-2017 年期间累积对于 CO、THC、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的总量减排贡献分别达 42%、41%、39% 和 34%（图 4.7 中黄色部分）。

相对无控情景，其他控制措施在 1998-2017 年期间累积对于 CO、THC、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> 的总量减排贡献分别达 3%、3%、2% 和 2%（图 4.7 中蓝色部分）。

#### 4.4 其他领域大气污染控制

##### (1) 产业结构调整和工业污染治理

围绕首都城市功能定位，北京市通过严格新建项目环境准入、淘汰落后产能、整治“散乱污”企业，以及推行清洁生产、强化末端治理等方式，推动产业结构优化升级，削减工业污染。从2006年起，北京焦化厂、首钢北京石景山厂区、东方化工厂等一批大型工业企业相继关停或搬迁，水泥生产企业由最多时的19家压缩至2家，保留产能仅用于协同处置危险废物。2013年以来，调整退出印刷、铸造、家具等行业一般制造业污染企业1900余家，完成1.1万家“散乱污”企业分类处置。以氮氧化物、挥发性有机物治理为重点，组织实施了400多项环保技改工程。同时，积极发展高新技术产业、服务业等，第三产业比重由2001年的67.4%提高至2017年的80.6%，与发达国家平均水平基本一致。

##### (2) 扬尘污染治理

过去20年间，北京市一直处于城市快速发展阶段，施工工地数量多、规模大、范围广，扬尘污染问题突出。扬尘污染控制重点包括裸地、施工工地和道路。主要控制措施包括：对于施工工地，要求大型工地和混凝土搅拌站安装视频监控系统，推广高效洗轮设施及抑尘新技术，关闭不符合要求的搅拌站，推行绿色文明施工；对道路扬尘，2013年以来对8000多辆渣土运输车进行密闭化改造，每月对主要道路进行尘土残存量检测并对外公布，全市“吸、扫、冲、收”道路清扫保洁新工艺作业覆盖率达到88%以上，有效降低了道路扬尘。

此外，北京市还实施生态环境建设工程，扩大生态环境容量，在平原地区实施了百万亩造林工程，全市林木绿化率达到60%以上，扩大了永定河、潮白河、北运河系等水域面积，构建山区绿屏、平原绿海、城市绿景的生态景观。

#### 北京市扬尘污染控制

为了控制施工扬尘污染，北京市为施工工地设定了“六个百分百”的扬尘控制要求（包括施工工地周边100%围挡、物料堆放100%覆盖、出入车辆100%冲洗、施工现场地面100%硬化、土方开挖100%湿法作业、渣土车辆100%密闭运输）。为控制道路扬尘污染，北京市2014年发布了城市道路清扫的质量和运营要求，规范了城市道路的清洁管理。要求城市主要道路每天清洗两次以上，二级道路要每天进行机械冲刷和清洗，并在冬季加强清洗。至2017年，北京市道路的机械清扫率和新工艺保洁率分别达到89%和88%。

为严格控制运输垃圾产生的扬尘污染，北京市于2014年发布了“密封建筑垃圾运输车辆技术要求”。同时，垃圾运输车辆必须符合北京市的机动车排放控制标准，即达到第四阶段国家排放标准及以上标准。截至2017年，已有4216辆渣土运输车辆安装了卫星定位装置并实现了密闭运输。

# 第五章 北京市与周边区域的大气污染协同治理

## 5.1 北京市与周边区域大气协同治理机制

### (1) 协调机构

2013年底,在国务院的支持下,北京市牵头,中国国家发展改革委、财政部、原环境保护部、工业和信息化部、住房和城乡建设部、中国气象局以及国家能源局等七部委和北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区、山东省六省(区、市)

共同建立了京津冀及周边地区大气污染防治协作机制。2015年5月,河南省、交通运输部加入协作机制,协作机制成员单位扩大到8个中央部委和7个省区市。2017年,根据京津冀大气污染传输规律,原环境保护部将北京市、天津市以及河北省、山西省、山东省和河南省的26个城市(“2+26”城市)确定为京津冀大气污染传输通道城市,作为区域大气污染治理的重点。

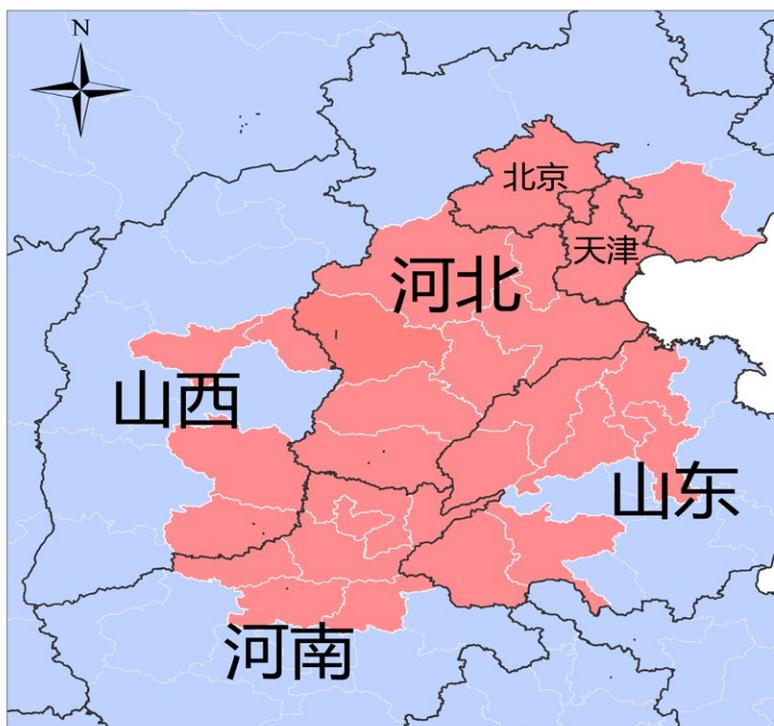


图 5.1 京津冀及周边地区“2+26”城市(图中红色区域)分布图

数据来源:原北京市环境保护局,清华大学

### (2) 统一规划和政策

从 2013 年开始，京津冀及周边地区大气污染防治协作小组及原环境保护部、发展改革委等中央有关部委先后发布了针对区域大气污染防治的多项规划方案和年度措施，对冬季采暖清洁化、工业污染综合治理、机动车污染控制、重污染天气应对等重点工作提出区域统一的要求。2015 年，京津冀及周边地区深化大气污染防治中长期规划研究项目启动，于 2017 年完成。该成果为区域重污染过程分析预报与预警、秋冬季大气污染防治攻坚行动及相关省区市“十三五”大气污染防治规划的编制提供了重要支撑。

2016 年京津冀三地统一实施机动车国 5/V 排放标准和油品质量标准，2017 年“2+26”传输通道城市全面供应符合国 6/VI 标准的车用油品，2017 年京津冀三地联合发布《建筑类涂料与胶粘剂挥发性有机化合物含量限值标准》，对推动区域大气环境质量整体改善发挥了重要的作用。

### (3) 合作机制

**城市结对：**在京津冀区域，城市之间建立了“结对合作”机制。2015 年，北京市与河北省的保定市和廊坊市建立了大气污染防治“结对合作”关系，北京市对上述 2 个城市在小型燃煤锅炉淘汰、大型燃煤锅炉污染治理等方面给予资金和技术支持，为区域合作治理大气污染做出示范。

**联合应对空气重污染：**2016 年，京津冀区域各地统一了空气重污染应急预案分级标准，2017 年进一步在“2+26”城市范围统一了空气重污染预警分级标准，规范了预警发布、调整和解除程序，为京津冀及周边地区统一应对区域性重污染天气、协同采取减排措施奠定了基础。

**机动车污染治理专项协作：**区域内各地共同开展新车一致性检查，实施机动车排放违法行为异地处罚；建成京津冀及周边地区大气污染防治信息共享平台，实现七省（区、市）空气质量、重点污染源排放等信息实时共享。

## 5.2 北京市周边地区大气污染物排放变化趋势

根据 MEIC 模型测算，1998 年北京周边的天津、河北、河南、山东、山西、内蒙古等省市共计排放  $\text{SO}_2$  623.4 万吨、 $\text{NO}_x$  323.8 万吨、 $\text{PM}_{2.5}$  349.0 万吨、VOCs 373.5 万吨。此后的 20 年中，区域内的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  的排放均呈现出先上升后下降的趋势，VOCs 的排放持续上升，近年来逐步平稳。图 5.2 显示了 1998 年、2013 年及 2017 年北京周边地区主要污染物排放的空间分布及变化情况，图 5.3 进一步显示了过去 20 年间北京周边区域分行业主要污染物的排放变化趋势。

蓝天白云中国尊（图片来源：北京市环境保护宣传中心）



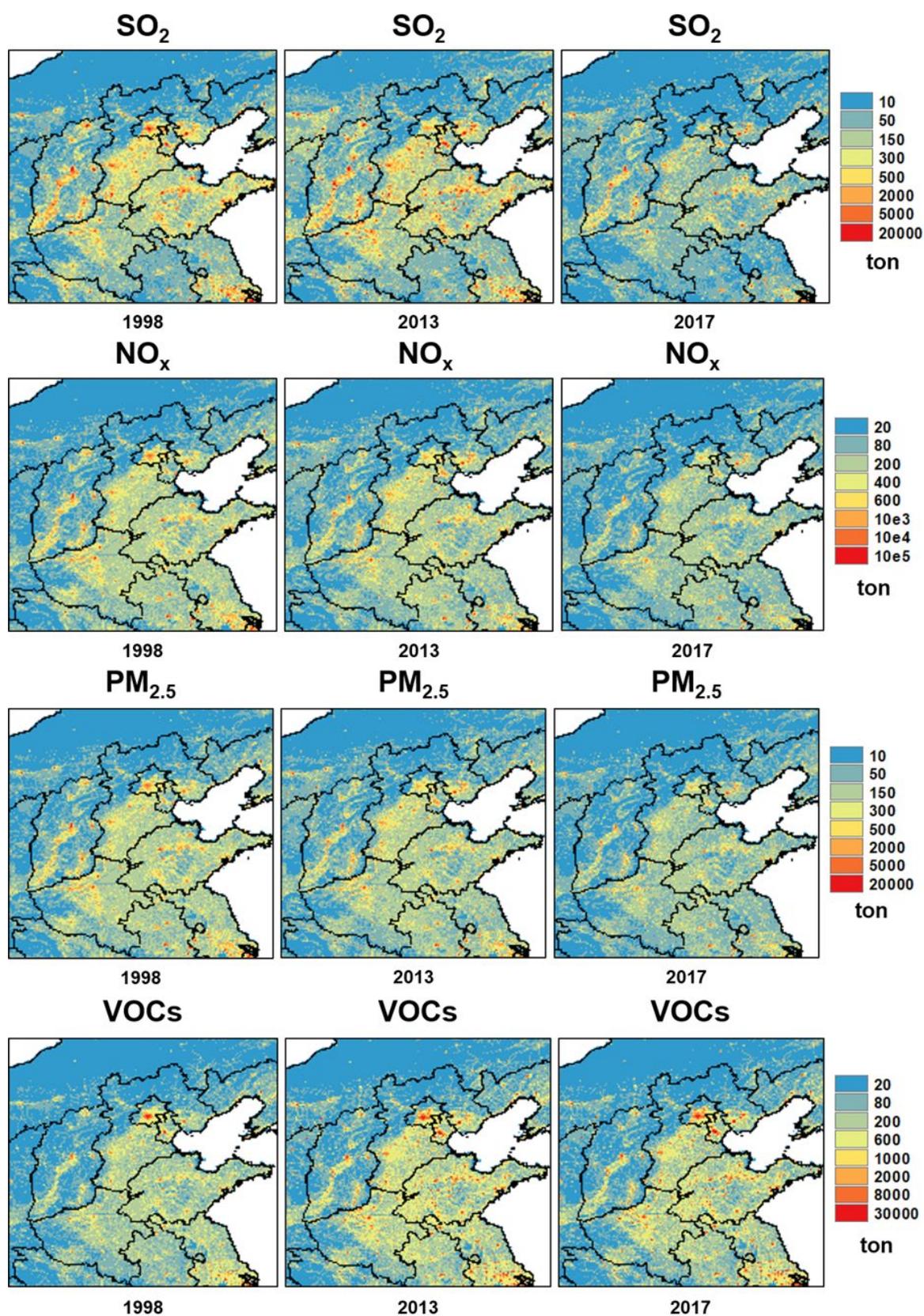


图 5.2 北京市及周边地区 1998、2013 及 2017 年主要污染物排放空间分布

数据来源：中国多尺度人为源排放清单模型 MEIC (<http://www.meicmodel.org/>)

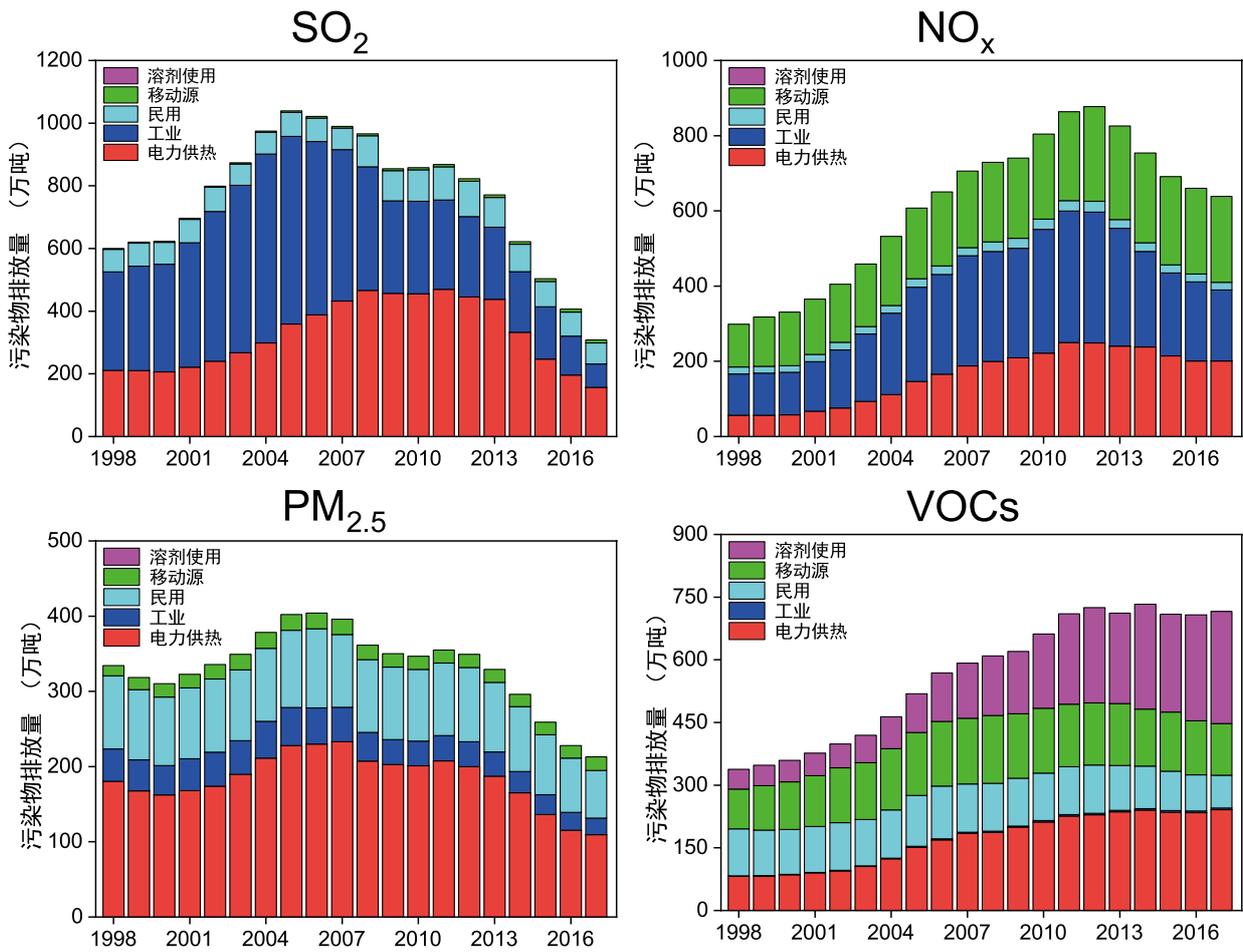


图 5.3 北京周边地区（含天津、河北、河南、山东、山西、内蒙古）1998-2017 年间主要污染物排放变化趋势

数据来源：中国多尺度人为源排放清单模型 MEIC (<http://www.meicmodel.org/>)

2013 年中国实施国家《大气污染防治行动计划》以来，北京周边地区的主要大气污染物排放量显著下降，变化特征如图 5.4 所示。除 VOCs 外，其它污染物 2017 年排放量与 2013 年相比均

显著下降，SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的降幅分别达到 60.1%、22.2% 和 42.2%。2017 年 VOCs 排放量与 2013 年基本持平，略微增长 0.2%。



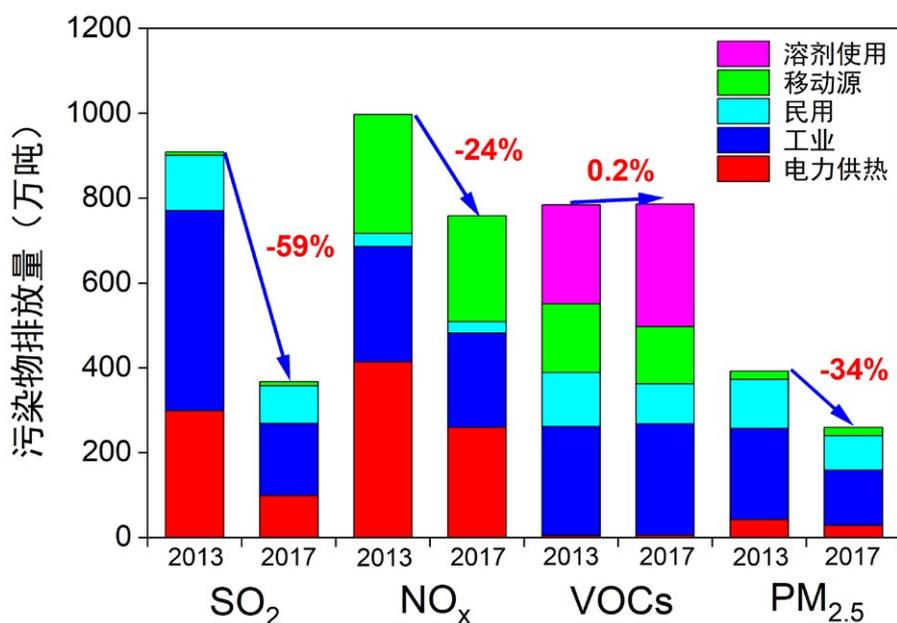


图 5.4 2013-2017 年北京市周边（含天津、河北、河南、山东、山西、内蒙古）主要大气污染物排放变化特征

数据来源：原北京市环境保护局，清华大学

2013-2017 年，北京市周边地区电力和工业部门 SO<sub>2</sub> 排放量大幅削减，分别减少 122.1 万吨和 314.5 万吨，表明国家《大气污染防治行动计划》中的燃煤电厂超低排放、燃煤锅炉整治、重点工业行业提标改造等措施对 SO<sub>2</sub> 减排效果显著。NO<sub>x</sub> 的减排主要来自电力行业，2013-2017 年期间排放量减少了 120.2 万吨。对 PM<sub>2.5</sub> 减排而言，贡献

最大的两个来源依次为扬尘源和工业部门，分别减少了 93.7 万吨和 60.8 万吨 PM<sub>2.5</sub> 排放。与 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 不同，北京周边地区 2013-2017 年期间 VOCs 排放量略微增长，主要原因在于电力、民用及移动源等行业的累计减排量不足以抵消溶剂使用源贡献的排放增长量。



# 第六章 北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划效果评估

“北京市 2013-2017 清洁空气行动计划”（五年清空计划）是北京市最重要的大气污染防治工作计划之一，该计划的实施显著提升了北京的空气质量。2017 年北京市空气中的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度下降到 58μg/m<sup>3</sup>，比 2013 年下降了 35.6%，实现了国内外普遍认为难以完成的指标。因此，本报告重点分析评估了该项五年计划的执行效果。

## 6.1 主要措施的减排效果

通过梳理北京市对五年清洁空气计划的自查报告及措施清单，提取出 7 项共 32 条定量措施。针对每类措施，以 2013 年为基准年，依托 MEIC 模型逐类核算上述 7 项措施的减排量，分析各措施对污染物的减排贡献。

北京市 2013 年 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的排放量分别为 9.5 万吨、21.8 万吨、27.3 万吨、8.1 万吨、26.6 万吨。其中，SO<sub>2</sub> 的排放主要来自民用源、工业源、和电力生产和供热；NO<sub>x</sub> 的排放主要来自移动源、和电力生产和供热；VOCs 的排放主要来自溶剂使用源、移动源和工业源；一次颗粒物主要来自扬尘和民用源。

五年清空计划措施主要包括治理燃煤锅炉、民用燃料清洁化、调整产业结构、管控移动源排放、综合治理扬尘、工业提标改造、挥发性有机物治理等七类措施，该计划的实施使北京市 2013-2017 年间主要大气污染物排放量显著下降。基于上述

七类措施的落实情况，测算出北京市 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs、一次 PM<sub>2.5</sub>、一次 PM<sub>10</sub> 五年间的减排量分别达到 7.9 万吨、9.3 万吨、11.6 万吨、4.4 万吨和 13.9 万吨，减排幅度分别为 83.2%、42.9%、42.4%、54.7% 和 52.4%。

分解各措施对主要污染物减排量的贡献，如图 6.1 所示。对 SO<sub>2</sub> 减排效果最明显的措施是治理燃煤锅炉和民用燃料清洁化，两项措施在 2013-2017 年间分别减排 SO<sub>2</sub> 3.7 万吨和 2.9 万吨，贡献了减排量的 46.7% 和 36.6%。对 NO<sub>x</sub> 减排效果最显著的是移动源排放管控，减排量达 4.3 万吨，占比 46.3%；治理燃煤锅炉和工业提标改造对 NO<sub>x</sub> 的减排效果次之，分别减排 2.7 万吨和 0.9 万吨，占比 28.9% 和 9.8%。挥发性有机物治理对 VOCs 的减排贡献最大，减排了 5.7 万吨，占减排总量的 49.3%；移动源排放管控和产业结构调整对 VOCs 减排的贡献次之，占比分别为 16.1% 和 12.7%。对于一次 PM<sub>2.5</sub>，减排效果明显的措施有民用燃料清洁化、扬尘综合治理、燃煤锅炉治理和产业结构调整，这些措施使一次 PM<sub>2.5</sub> 分别减排 1.5 万吨、1.1 万吨、0.9 万吨和 0.5 万吨，对减排总量的贡献分别为 33.0%、24.8%、21.1% 和 11.9%。

总体而言，燃煤锅炉治理、民用燃料清洁化、产业结构调整、移动源综合治理等措施对北京 2013-2017 年间的污染物减排量整体贡献显著，挥发性有机物治理、扬尘综合治理分别对 VOCs 和一次 PM<sub>2.5</sub> 的减排有突出贡献。

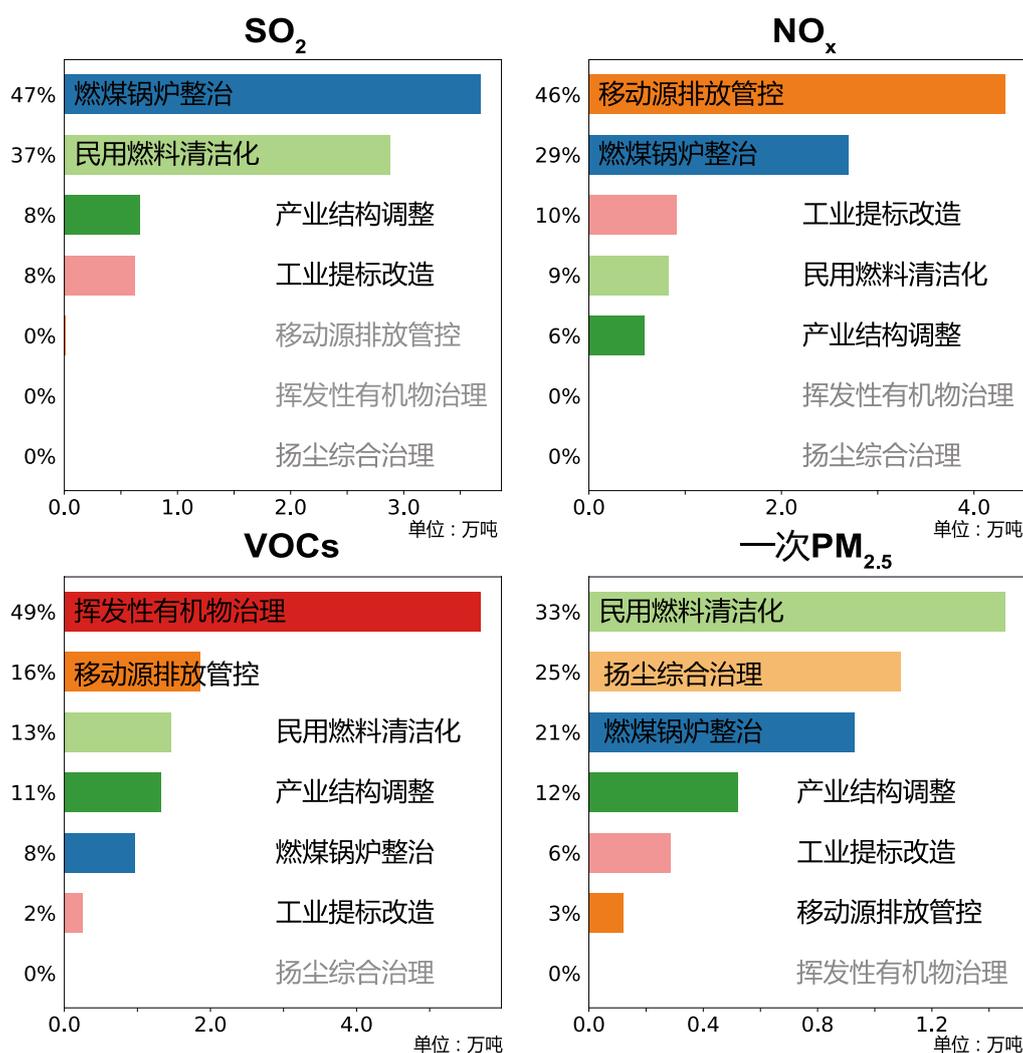


图 6.1 主要措施对 2013-2017 年间北京市主要污染物的减排贡献

数据来源：清华大学；J Cheng et al., ACPD, 2019

从排放源看，2013-2017 年间，主要污染物的排放变化情况如图 6.2 所示。SO<sub>2</sub> 排放量的下降主要来自电力生产及供热、工业和民用源；NO<sub>x</sub> 排放量的下降主要来自移动源、电力生产和供热；

VOCs 排放量的下降主要来自工业、民用、溶剂使用和移动源；PM<sub>2.5</sub> 排放量的下降主要来自民用、工业、扬尘、电力生产和供热等领域。

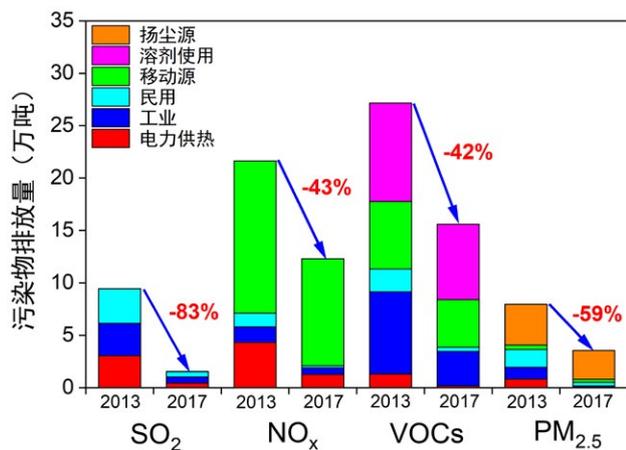


图 6.2 2013-2017 年间北京市主要污染物的排放变化情况

数据来源: 清华大学; J Cheng et al., ACPD, 2019

至 2017 年, 北京市 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、VOCs、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 的排放量分别为 1.6 万吨、12.4 万吨、15.7 万吨、3.5 万吨、12.7 万吨。SO<sub>2</sub> 排放主要来自电力生产和供热、工业和民用源, 基本由燃烧排放产生。NO<sub>x</sub> 排放主要来自移动源、电力生产和供热; VOCs 排放主要来自溶剂使用源、移动源和工业源; 一次颗粒物主要来自扬尘和民用源。

## 6.2 主要措施对空气质量改善的贡献

利用三维大气化学模型 WRF-CMAQ 模拟再现了北京及周边地区 2013 年和 2017 年的空气质量, 分析“五年清空计划”中主要减排措施及周边区域污染物减排对空气质量改善的贡献, 以及气象条件变化对北京市空气质量的影响。

2013-2017 年间, 北京周边的天津、河北、山西、山东、河南等省市通过实施国家《大气污染防治行动计划》要求的相关措施, 共计分别减排 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 771.0 万吨、186.8 万吨和 116.3 万吨。空气质量模型的模拟结果显示, 在 2013-2017 年间, 北京周边地区的污染减排对北京市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度下降贡献了 7.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降总量的 23%。

北京市本地的减排措施在 2013-2017 年间对 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度下降贡献了 20.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 占 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降总量的 65.4%。各项减排措施对北京市 2013-2017 年期间 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降的贡献如图 6.3 所示。

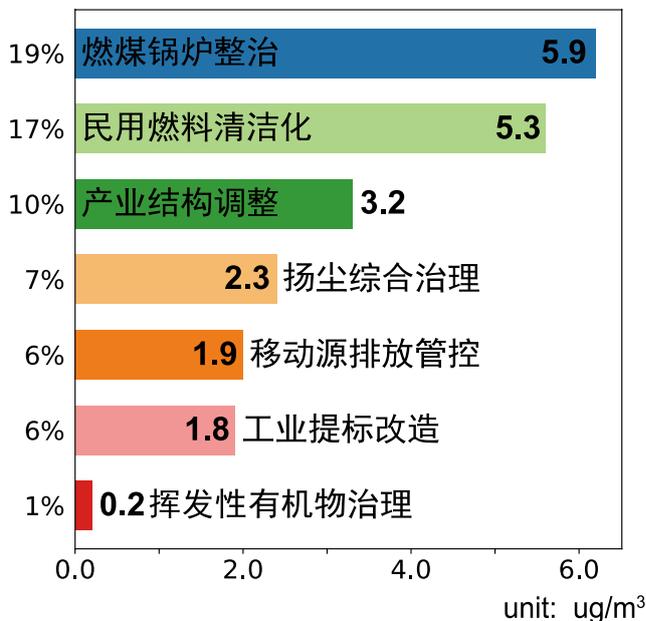


图 6.3 本地减排措施对北京市 2013 至 2017 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降的贡献

数据来源: 清华大学; J Cheng et al., ACPD, 2019

北京市实施完成的五年清洁空气计划行动中, 各项措施中对北京市 2017 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降贡献最大的是燃煤锅炉治理, 贡献了 5.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  下降幅度, 占 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降总量的 19%。民用燃料清洁化和产业结构调整对 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降的贡献也较为显著, 分别贡献了 5.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 3.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  下降幅度, 占浓度下降总量的 16% 和 11%。扬尘污染治理、移动源排放管控、工业提标改造和挥发性有机物治理等措施对北京市的 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降的贡献相对较小, 分别贡献了 7%、6%、6% 和 1% 的下降量。

从排放源分类的角度看, 北京市本地燃烧源、工业源、扬尘源、移动源的减排对 2017 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降分别贡献了 11.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、5.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  下降量, 分别占 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降总量的 35%、19%、7%、6%。

### 6.3 气象条件的影响分析

2013-2017 年期间北京市气象条件呈现出波动性变化特征。本研究分别采用 2013 年和 2017 年的气象条件,使用 2017 年的污染物排放水平,对北京市的  $PM_{2.5}$  浓度的按月进行了模拟,结果如图 6.4 所示。模拟结果表明,与 2013 年相比,北京市 2017 年的气象条件全年平均好转 6%,气象条件好转主要体现在冬季,而春夏季的四月、五月

和七月的气象条件较 2013 年变差。与 2013 年相比,北京市 2017 年  $PM_{2.5}$  平均浓度下降总量中,气象条件转好贡献了  $3.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,占 12%。根据模型模拟结果与实际观测浓度推算,如果按照 2013 年的气象条件,北京市 2017 年  $PM_{2.5}$  年均浓度将从 2013 年的  $89.5\mu\text{g}/\text{m}^3$  下降到  $62\mu\text{g}/\text{m}^3$  左右,略高于 2017 年实际情况 ( $58\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。

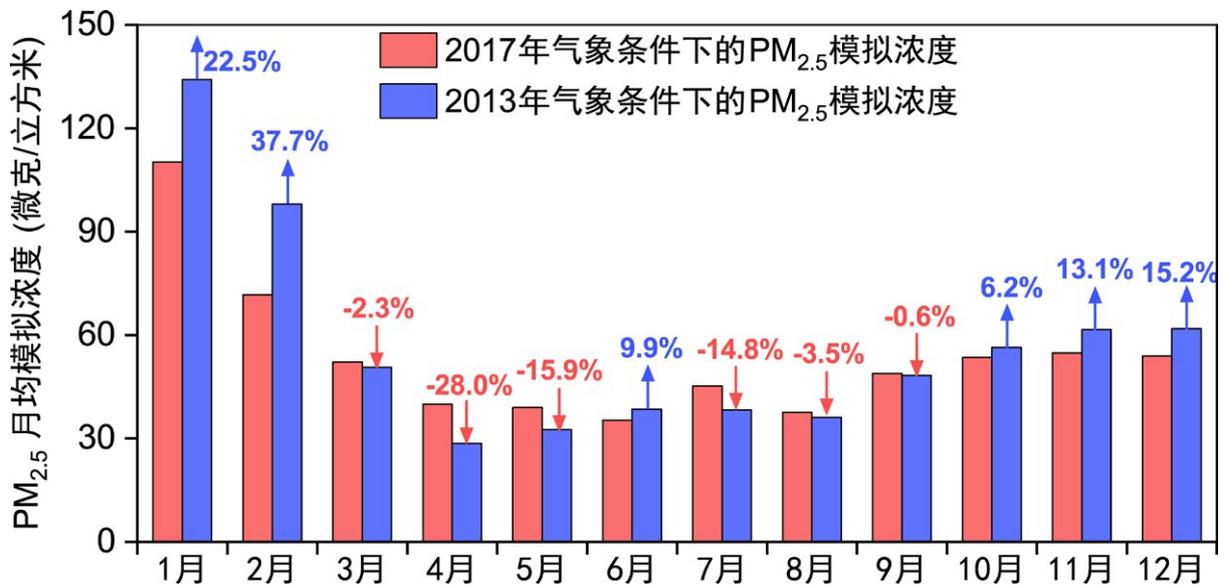


图 6.4 北京市 2017 年排放水平在 2013、2017 年气象条件下的逐月  $PM_{2.5}$  浓度模拟结果

数据来源: 清华大学; J Cheng et al., ACPD, 2019

### 6.4 小结

北京市五年清空计划的实施取得了显著的空气质量改善效果。与 2013 年相比,北京市 2017 年  $PM_{2.5}$  年均浓度下降了  $31.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,其中本地污染减排、周边区域污染减排和气象条件变化分别贡献了  $20.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $7.1\mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $3.8\mu\text{g}/\text{m}^3$  降低幅度,贡献占比分别为 65%、23% 和 12%。在本地各污染减排措施中,燃煤锅炉治理、民用燃料清洁化、产业结构调整对  $PM_{2.5}$  浓度改善效果显著,对

$PM_{2.5}$  浓度下降总量的贡献分别为 19%、16% 和 11%。从排放源分类来看,北京本地燃烧源、工业源、扬尘源、移动源的减排对 2017 年实现的  $PM_{2.5}$  浓度下降分别贡献了  $11.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $5.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2.3\mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $2.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,分别占  $PM_{2.5}$  浓度下降总量的 35%、19%、7% 和 6%。2013 年和 2017 年北京市及周边地区  $PM_{2.5}$  年均浓度的空间分布如图 6.5 所示。

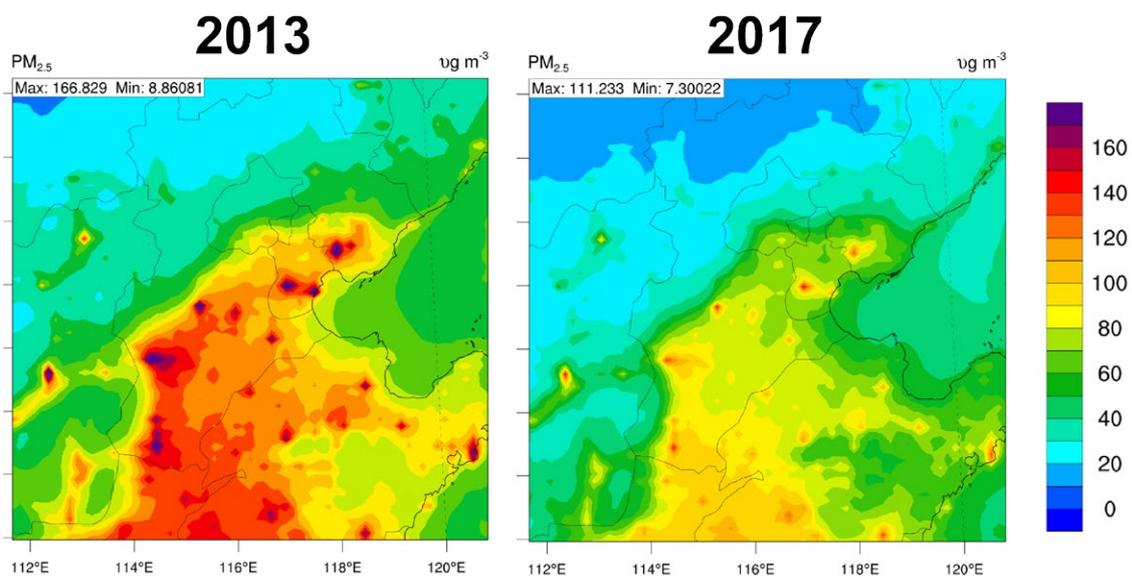


图 6.5 北京及周边地区 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度的空间分布 (2013, 2017)

数据来源: 清华大学



# 第七章 经验总结与未来展望

## 7.1 北京空气污染治理经验总结

在1998至2017年的20年间，北京城市规模、人口总量、能源消费总量和机动车保有量等方面均保持了快速增长。由于综合采取了法律、政策、经济和技术手段，不断强化大气污染治理，北京市在能源结构调整、产业结构调整、移动源排放控制，以及空气质量监测技术能力建设等方面取得了巨大的成绩，实现了空气质量的持续改善。北京市制定和实施空气污染治理政策和计划的经验在中国国内得到许多城市的效仿，也为国家制定大气污染物排放标准和建立空气质量管理体系做出了积极的贡献。北京的经验总结起来有以下几个方面：

(1) 北京市在20年的大气污染治理过程中逐步形成了一套完善的空气质量管理体系，其特点包括：

1) 完善的法规和执法安排：法规包括国家和地方两个层级的法律，并建立和完善监察执法机制。这套体系明确规定了市区两级政府在制定和实施大气污染防治计划的责任，并提供了有效的保障和指导。

2) 系统的规划：建立了循环制定空气质量改善中长期规划、年度规划和临时性强化规划措施的机制，各项规划有效衔接，确保年度目标和中长期目标的实现。

3) 严格的标准：北京市结合本地实际情况制定了一系列地方排放标准、产品（油品）质量标准，为本市的空气质量改善提供了有力的支撑。

4) 完善的监测系统：北京市充分利用大数据

等创新技术，结合传统空气质量监测技术建立了天地空一体化的空气监测网络和污染源监管技术体系。

5) 高涨的公众环境意识：通过发布空气质量信息、开展不同形式的公众参与活动大大促进和提升了全社会的环境意识，公众对空气污染治理的关注和参与程度空前提高。

(2) 持之以恒地推动城市能源结构调整，在能源消费总量增长的情况下实现了能源结构质的变化，对空气质量的持续改善起到了至关重要的作用。北京市在20年的时间里实现了发电及城市集中供暖燃气化，做到了城市平房和农村地区居民供暖也采用燃气或用电设施。截至2017年，电力、天然气等优质能源比重提高到90%以上，在城区和平原地区大部实现“无煤化”。

(3) “车-油-路”一体化的机动车排放控制管理体系是中国城市的榜样，也可以是国际城市的榜样。中国机动车排放管理起步较晚，北京市吸收借鉴国际经验，结合自身情况创造性建立的“车-油-路”一体化机动车排放管理模式在中国许多城市中得到推广，也为完善国家层面的管理体系提供了实践经验。从国际上看也是一个很好的范例。

(4) 成功的区域协作机制发挥了重要的作用。区域合作机制的建立和有效运行为2013-2017年间北京及周边区域空气质量的跨越式改善提供了根本保障。

空气质量的持续改善是伴随着北京这座首都城市社会经济的持续飞速发展实现的。20年里，北京的GDP保持了年均6.5%及以上的增长速度，

增长了 10.8 倍，2017 年人均 GDP 超过了 2.0 万美元。同时，单位 GDP 的能源消耗强度和二氧化碳排放强度持续下降。清洁空气行动为推动社会经济的高质量可持续发展做出了积极的贡献。中国的环保产业随着污染治理的推进不断壮大，截至 2017 年底，中国环保产业产值达到 13500 亿元人民币，在北京市注册的环保企业产值占比超过了 20%。包括污染治理及咨询服务等业务活动的环保产业也是北京市优先发展的行业，已经成为新的就业增长领域。

北京案例中的空气污染问题，其复杂性跟北京特殊的发展阶段有关，一些措施的有效性也得益于中国的治理模式，其中也有很多共性的经验。总结来看，实现地方环境质量改善和可持续发展的关键在于政府坚定的决心，清晰的目标，制定能够提供有效支撑的法规、计划和政策，以及有效的实施安排和执法监察。在这个过程中，公众的积极参与对于推动环境改善和促进社会的和谐都是至关重要的。

## 7.2 北京市下一步空气污染治理展望与建议

尽管北京市空气质量改善成效显著，北京市及周边地区的空气污染形势依然严峻，特别是 2017 年北京市  $PM_{2.5}$  年均浓度仍然超过  $35\mu g/m^3$  的国家环境空气质量标准 66%，与世界卫生组织的推荐值  $10\mu g/m^3$  的差距更大。此外， $O_3$  污染近年来仍未得到有效控制。北京及周边的空气质量管理已经进入需要协同治理  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  的深水区。

从长远来看，建议北京在推进近期及中长期空气污染治理中要考虑以下几个方面：

### (1) $PM_{2.5}$ 和 $O_3$ 治理并重，强化挥发性有机物治理

环境空气中的  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  对人体健康有直接的危害，并且治理的复杂性高、难度大。挥发性有机物 (VOCs) 是大气环境中  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  的重要前体物，科学管控 VOCs 的排放对协同防控这两项污染物有重要作用。对 VOCs 的管控需要从监测能力、排放清单到“一行一策”逐步建立排放管理体系；管控对象也需要从石油化工、印染喷涂、家具制造等重点行业逐步扩展向汽修、餐饮、

干洗等生活面源。

### (2) 调整能源结构和提升能源利用效率并重，推动能源低碳化协同控制温室气体排放

北京市一方面要继续推进无煤化战略，建设真正的无煤城市。同时，借助新能源技术迅猛发展的机会，尽快显著提升可再生能源比例，建设低碳能源结构，协同减少化石能源消费产生的空气污染物和温室气体排放。同时，在供暖、空调、交通、工业等主要耗能行业大力推动节约能源、提升能源效率。通过节能和清洁能源替代，从源头降低对化石能源的需求，实现经济社会持续发展与化石能源消耗增长脱钩。

### (3) 移动源排放控制和交通结构优化并重，建设低排放高效运输系统

将有效的“车-油-路”一体化的排放控制体系扩展到非道路机械污染治理。在技术成熟可行的情形下，大规模地增加公交、出租及小客车的电动化比例，建设超低排放公共交通车辆结构。借助日趋成熟的大数据和智能化技术，强化对在京行驶的高排放柴油车的管控，推动城市大宗货物由公路运输为主转向铁路货运为主，建设低排放高效货物运输系统。

### (4) 加强对非点源治理的管控

在对点源进行了有效的治理后，要实现空气质量的进一步改善，必须将非点源纳入治理视野。非点源包括不同类型的城市生活服务业，比如餐饮业、汽车修理等，以及农药化肥使用等农业活动。非点源的治理需要有针对性的为每一个小型污染源类别制订相应的治理方案。对许多城市环境管理者来说这都是一个很大的挑战。

### (5) 继续推动深化区域协同治理

北京市应更加地积极参与和配合中央政府主导的区域大气协同治理，并在其中做出重要的贡献，包括推动从区域层面进行能源结构、产业结构、交通运输（特别是货物运输）结构等方面的宏观优化。这些重要领域在区域层面统筹规划，并推动区域内城市协调一致采取措施，将从源头上减少区域内大气污染物的总排放量，为实现北京市和区域的空气质量全面改善提供保障。

(6) 将城市环境目标融入 2030 可持续发展目标

2015 年，联合国发布了 2030 全球可持续发展目标，包括良好健康与福祉、应对气候变化、性别平等、可持续城市和社区、可负担的清洁能源等 17 项目标。城市层面的实践和良好范例是实现全球可持续发展的重要基础。北京市在保持社会经济

持续增长的情景下有效改善空气质量方面堪称城市典范。我们建议北京在 2030 可持续发展目标的框架下来谋划其下一步的环境质量目标和行动，更好地统筹人口、资源、环境问题，既有效应对本地环境挑战、实现城市高质量发展，也为应对全球环境挑战做出贡献。



北海风景最宜秋  
(照片来源：北京市环境保护宣传中心)



# CHINA

## 参考文献

- 《北京环境保护丛书》编委会. 北京环境管理 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2017.
- 《北京环境保护丛书》编委会. 北京环境规划 [M]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
- 北京交通发展研究中心. 2018 年北京交通发展年报, 2018.
- 北京市财政局. 北京市预算执行情况报告, 2009-2018.
- 北京市环境保护监测中心. 北京发布 PM<sub>2.5</sub> 来源解析结果, 2014; 2018. <http://www.bjmemc.com.cn/g327/s921/t1971.aspx>
- 北京市人民代表大会. 北京市大气污染防治条例, 2014.
- 北京市人民政府. 北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划, 2013.
- 北京市人民政府. 2017 年北京市人民政府重点工作情况汇编, 2018.
- 北京市统计局. 北京统计年鉴, 1998-2018.
- 国家原环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准 (GB 3095-2012), 2012.
- 联合国环境规划署. 北京空气污染治理历程: 1998-2013 年. 内罗毕, 肯尼亚, 2016.
- 原北京市环境保护局. 北京市质量技术监督局. 锅炉大气污染物排放标准 (B11/139-2007), 2007.
- 原北京市环境保护局. 北京市质量技术监督局. 重型汽车排气污染物排放限值及测量方法 (车载法) (DB11/965-2013), 2013.
- 原北京市环境保护局. 北京市环境状况公报, 1998-2018.
- 原北京市环境保护局. 北京市空气重污染应急预案, 2012, 2014-2017.
- 原北京市环境保护局. 打击环境违法 | 北京曝光 4 大类 10 起环境违法典型案例. 京环之声, 2017.
- 张少君. 中国典型城市机动车排放特征与控制策略研究 [博士学位论文]: 清华大学, 2014.
- 中国环境保护产业协会、生态环境部环境规划院 (产业协会政策与集聚区专业委员会). 中国环保产业分析报告. 2018
- Cai, W., Li, K., Liao, H., et al. (2017). Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change, *Nature. Climate. Change.*, 7, 257-263, <http://dx.doi.org/10.1038/nclimate3249>.
- California Environmental Protection Agency, Air Resource Board (2010). Software upgrade for diesel trucks. Available from; [www.arb.ca.gov/msprog/hdsoftware/hdsoftware.htm](http://www.arb.ca.gov/msprog/hdsoftware/hdsoftware.htm)
- Carslaw, D.C., Beevers, S., Tate, J., et al. (2011). Recent evidence concerning higher NO<sub>x</sub> emissions from passenger cars and light-duty vehicles. *Atmospheric Environment* 45, 7053-7063.
- Chen, Y., Schleicher, N., Fricker, M., et al. (2016). Long-term variation of black carbon

- and PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China with respect to meteorological conditions and governmental measures, *Environ. Pollut.*, 212, 269-278, <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.008>.
- Cheng, J., Su, J.P., Cui, T., et al. (2019). Dominant role of emission reduction in PM<sub>2.5</sub> air quality improvement in Beijing during 2013–2017: a model-based decomposition analysis., *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/acp-2018-1145-RC1>, 2019
- Elser, M., Huang, R.-J., Wolf, R., et al. (2016). Baltensperger, U., El-Haddad, I., and André S. H. Prévôt.: New insights into PM<sub>2.5</sub> chemical composition and sources in two major cities in China during extreme haze events using aerosol mass spectrometry, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 3207-3225, <https://doi.org/10.5194/acp-16-3207-2016>, 2016.
- Hao, J., He, D., Wu, Y., He, K. (2000). A study of the emission and concentration distribution of vehicular pollutants in the urban area of Beijing. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(3), 453-465.
- Hua, Y., Wang, S., Jiang, J., et al. (2018). Characteristics and sources of aerosol pollution at a polluted rural site southwest in Beijing, China, *Sci. Total. Environ.*, 626, 519-527, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.047>, 2018.
- Jiang, X., Hong, C., Zheng, Y., et al. (2015). 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, *Environ. Res. Lett.*, 10, 104006, <https://www.researchgate.net/publication/282907942/>.
- Li, M., Zhang, Q., Kurokawa, J.-I., et al. (2017). MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP, *Atmos. Chem. Phys.*, 17, 935-963, doi:10.5194/acp-17-935-2017.
- Wang, Y., Bao, S., Wang, S., et al. (2017). Local and regional contributions to fine particulate matter in Beijing during heavy haze episodes, *Sci. Total. Environ.*, 580, 283–296, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.127>.
- Wu, Y., Zhang, S., Li, M., et al. (2012). The challenge to NO<sub>x</sub> emission control for heavy-duty diesel vehicles in China. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12, 9365-9379.
- Zhang, Q., Streets, D.G., Carmichael, G.R., et al. (2009). Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission. *Atmospheric Chemistry and Physics* 9, 5131-5153.
- Zhang, S., Wu, Y., Wu, X., et al. (2014a). Historic and future trends of vehicle emissions in Beijing, 1998-2020: A policy assessment for the most stringent vehicle emission control program in China. *Atmospheric Environment* 89: 216-229.
- Zhang, S., Wu, Y., Hu, J., et al. (2014b). Can Euro V heavy-duty diesel engines, diesel hybrid and alternative fuel technologies mitigate NO<sub>x</sub> emissions? New evidence from on-road tests of buses in China. *Applied Energy* 132: 118-126.
- Zhang, X., Zhong, J., Wang, J., et al. (2018). The interdecadal worsening of weather conditions affecting aerosol pollution in the Beijing area in relation to climate warming, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 18: 5991–5999, <https://doi.org/10.5194/acp-18-5991-2018>.
- Zheng, B., Tong, D., Li, M., et al. (2018). Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions, *Atmos. Chem. Phys.*, 18, 14095-14111, <https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018>.







冬日颐和园



蓝蓝的天上白云飘



秋天挂甲峪



汉石桥湿地



[www.unenvironment.org](http://www.unenvironment.org)

联合国环境规划署

邮政信箱：30552 内罗毕 00100，肯尼亚

电话：+254 20 762 1234

传真：+254 20 762 3927

邮箱：[unenvironment-publications@un.org](mailto:unenvironment-publications@un.org)