



大气中国 2025

中国大气污染防治最佳实践



亚洲清洁空气中心

关于亚洲清洁空气中心

亚洲清洁空气中心（Clean Air Asia, 简称 CAA）是一家国际非营利性环保公益组织，致力于改善亚洲区域空气质量，打造健康宜居的城市。CAA 成立于 2001 年，是联合国认可的合作伙伴机构。

CAA 总部位于菲律宾马尼拉，在中国北京和印度德里设有办公室。CAA 拥有来自全球的 261 个合作伙伴，并建立了六个国家网络——印度尼西亚、马来西亚、尼泊尔、菲律宾、斯里兰卡和越南。

CAA 自 2002 年起在中国开展工作，专注于空气质量管理、绿色交通和能源转型。2018 年 3 月 12 日，CAA 获得北京市公安局颁发的《境外非政府组织代表机构登记证书》，在北京设立亚洲清洁空气中心（菲律宾）北京代表处。CAA 接受公安部及业务主管单位生态环境部的指导，在全国范围内开展大气治理领域的能力建设、研究和宣传教育工作。

报告团队

案例编制 《京津冀及周边地区：深化大气污染联防联控 推进区域空气质量持续改善》

汤 翊	中国环境科学研究院大气环境研究所 副研究员
褚旸晰	中国环境科学研究院大气环境研究所 研究员
张玮琦	中国环境科学研究院大气环境研究所 副研究员
葛文东	中国环境科学研究院大气环境研究所 助理研究员
胡京南	中国环境科学研究院大气环境研究所 研究员

《北京：“三监”联动精细化治理新模式 赋能“一微克”行动》

王小菊	北京市生态环境监测中心 高级工程师
沈秀娥	北京市生态环境监测中心 主任
张立坤	北京市生态环境监测中心 高级工程师

《上海：深化工业源 VOCs 减排 构建臭氧与细颗粒物协同治理新格局》

卜梦雅	上海市环境科学研究院 工程师
张钢锋	上海市环境科学研究院 高级工程师

《上海：构建重型柴油车排放智慧监管体系 助力移动源精细化治理升级》

胡磬遥	上海市环境科学研究院 高级工程师
黄 成	上海市环境监测中心 正高级工程师
曹翊寰	上海市环境科学研究院 工程师
黄丹丹	上海市环境科学研究院 高级工程师
王红丽	上海市环境科学研究院 正高级工程师
伏晴艳	上海市环境科学研究院 正高级工程师

《成都：探索近零碳施工工地 引领建筑施工场景协同减污降碳》

邓 也	成都市环境保护科学研究院 所长
张 鑫	成都市环境保护科学研究院 工程师
卓俊好	中国国检测试控股集团股份有限公司成都分公司 副总经理

报告汇编	王 悦	亚洲清洁空气中心 环境项目主管
	张伟豪	亚洲清洁空气中心 中国空气质量项目总监
	成慧慧	亚洲清洁空气中心 中国绿色交通项目总监

传播支持	朱 妍	亚洲清洁空气中心 传播主管
	王 思	亚洲清洁空气中心 环境研究员
	梁 缘	亚洲清洁空气中心 高级传播官员

前言

过去十余年，我国持续推进大气污染防治，空气质量改善取得显著成效。自 2013 年以来，全国 PM_{2.5} 浓度水平大幅下降。2024 年，全国 339 地级及以上城市的整体 PM_{2.5} 年均浓度相比 2013 年下降 59%，重污染天气减少九成以上。

在此期间，《大气污染防治行动计划》《蓝天保卫战三年行动计划》《空气质量持续改善行动计划》相继出台，我国逐步构建起目标明确、责任清晰、措施有力的治理体系，通过推动产业绿色转型、能源清洁高效利用、交通运输清洁化以及完善法规制度等措施，实现空气质量持续改善。随着治理工作持续深入，精细化管理、科技支撑、区域协作等成为核心关键词。

在国家顶层设计下，城市和区域是大气污染治理的核心力量。城市作为政策落地的前沿阵地，能够结合自身产业结构、污染特征和发展定位，不断探索优化政策设计、管理机制和治理模式。区域协作则是应对跨省（市）污染传输、实现整体改善的重要途径。城市多元探索和区域协同治理，不仅能够改善本地及周边空气的质量，也提供了可复制、可推广的实践经验。

随着“十四五”收官和“十五五”启动在即，梳理并总结优秀经验和实践做法对我国下一阶段的大气污染防治工作具有重要的指导意义。立足于此，亚洲清洁空气中心编制《大气中国 2025 | 中国大气污染防治最佳实践》报告，精选五个具有代表性的实践案例，聚焦我国在联防联控、重点领域减排、智慧监管、减排场景挖掘等方面的探索，旨在为我国更多区域和城市提供参考，推动空气质量持续改善，助力迈向绿色、健康、可持续的未来。

目录



执行摘要 04



京津冀及周边地区
深化大气污染联防联控
推进区域空气质量持续改善 09



北京
“三监”联动精细化治理新模式
赋能“一微克”行动 21



上海
深化工业源 VOCs 减排
构建臭氧与细颗粒物协同治理新格局 29



上海
构建重型柴油车排放智慧监管体系
助力移动源精细化治理升级 39



成都
探索近零碳施工工地
引领建筑施工场景协同减污降碳 51



执行摘要

过去十余年间，我国大气污染防治工作成效显著，主要污染物排放大幅下降，空气质量改善取得了历史性成就。但随着治理不断深入，污染特征与治理需求发生变化，大气污染防治进入攻坚和升级的新阶段。一方面，产业升级、能源结构调整和绿色交通等综合措施同步推进，对地方治理能力、技术支撑和精细化管理提出更大挑战；另一方面，跨区域污染传输问题也对区域协作提出更高要求。

在新的发展阶段，地方层面的治理实践成为观察我国大气污染防治进程与经验的重要窗口。近年来，多地结合自身产业结构、发展基础和污染特征，探索了多种治理路径，包括完善政策和监管机制、推动工业和交通等重点行业减排、开展典型场景试点以及加强跨区域协作等。这些差异化的实践，体现了地方在应对复杂大气污染问题时的创新性和多样性，也为全国提供了丰富的经验储备。系统总结和推广这些实践经验，对构建更高水平的大气污染治理体系、支撑下一阶段行动具有重要的指导意义。

基于此，亚洲清洁空气中心编制《大气中国 2025 | 中国大气污染防治最佳实践》报告，汇编五个具有代表性的实践案例，分别是：京津冀及周边地区联防联控、上海市工业源 VOCs 治理、上海市重型柴油车排放智

慧监管以及成都市近零碳施工工地试点，聚焦区域协作、重点领域深度减排、数字化治理和减排场景挖掘四个方向，展现地方在政策落地、管理创新、科技赋能、产业转型等方面的探索。报告总结四个实践案例的主要发现如下。

京津冀及周边地区联防联控 以高效协作引领区域空气质量整体改善

受能源、产业、运输“三偏结构”限制叠加特殊地理和气象条件的影响，京津冀及周边地区长期面临严峻的大气污染形势，并呈现明显的跨省市污染传输的特征，单一城市治理成效易受输入性污染影响。自 2008 年北京奥运会空气质量保障工作起步以来，京津冀及周边地区联防联控机制不断完善，逐步形成了全国具有代表性的区域协同治理模式，主要经验可归纳为以下三方面。

- **构建多层次协同、跨部门跨区域协作的治理体系。**在国家统筹—区域协调—省市落实的框架下，区域协同治理更加常态化、体系化。通过统一规划、统一标准、统一监测、统一治理措施，实现了政策和行动的一体化。跨部门合作统筹推进能源、产业、交通等结构优化与减排行动，为京津冀及周边地区大气污染联防联控提供了坚实制度保障和核心支撑。

- **完善区域联动机制，强化应急协同调度。**推动区域内各级人民政府制定重污染天气应急预案，明确分级预警标准和重污染天气应急响应流程，提升 7-15 天精准预测能力，协调区域内各城市及时启动污染预警；不断完善应急减排清单，涵盖工业源、移动源、扬尘等主要排放领域，通过绩效分级和精细化管理，优化应急减排策略，实现多地同步、分区施策，有效提升了重污染天气应对的效率与成效。开展跟踪评估，成立联合评估组牵头开展重污染过程的应对评估，实现了“问题查找 - 联合评估 - 地方整改”的跟踪评估闭环，实现科学治污、精准治污。
- **科技支撑与资金支持双轮驱动，全面提升治理能力。**技术方面，提升区域监测预警与重污染天气应对能力；推动智慧监管建设，为应急减排提供决策依据；支持技术研发降低治理成本，推动重点行业源头减排。资金方面，中央财政与地方资金共同投入，形成包含补贴、收费、奖励、价格和金融等在内的多元环境经济政策体系，为燃煤、机动车、工业等多个重点污染源的治理提供资金支持，促进治理措施协同实施和持续深化。

在联防联控持续推进下，京津冀及周边地区空气质量显著改善，PM_{2.5} 浓度显著下降，重污染天数大幅减少，优良天数明显提高。随着治理深入推进，仍在区域治理体系、技术水平和协作机制等面临新的压力与挑战，需要进一步提升预测预报能力、健全应急减排清单、构建污染管控技术体系、强化法治与监管效能、完善区域协作机制，推动由“联合行动”向“协同治理”的全面升级，持续提升区域空气质量。

北京市“三监”联动：科技赋能构建超大城市“一微克”治理新范式

自 2017 年启动大气污染防治“一微克”行动以来，北京市积极探索适应“深水区”阶段的治理新模式，市生态环境部门聚焦精准治污、科学治污、依法治污，创新建立了以“监管调度—监测感知—监察执法”协同为核心的“三监”联动工作机制，为数据驱动、智能联动的大气环境治理体系提供了可参考的范本，主要经验可归纳为以下两方面。

- **构建跨部门、跨层级协同的高效闭环治理体系。**“三监”联动工作机制可充分发挥全局各部门力量，环境监管部门发挥“发动机”作用，统筹调度，提出重点任务要求；环境监测部门发挥“哨兵”作用，发现并分析线索问题；环境执法部门发挥“铁拳”作用，基于线索循迹溯源，实施精准执法，三者共同构建了闭环治理响应体系。此外，北京还结合实际形成“三监”联席会机制、“三监”帮扶机制、“三监”溯源机制，开展不同场景“三监”联动，做到分工明确、节点明晰、流程顺畅。通过不间断推送问题线索并调度问题整改情况，持续压实治理责任，充分调动了各区、各街道（乡镇），以及相关部门力量，形成了闭环工作合力，促进了全市上下形成“一盘棋”的协同共治格局。
- **强化科技支撑，推动数字化、智能化监管。**依托人工智能、物联网、车载巡测、卫星遥感等技术，北京市构建了“天上看、地上巡、数据联、电量核”的一体化监测网络，实现对各类污染源的全方位、全时段监控。通过智能算法库提升线索研判能力，实现治理对象、问题、区位、时间和对策五个方面的精准。同时，以污染应对

为主要场景构建了“2 小时反馈、4 小时办结”的闭环调度体系，实现了精准智能的高效调度以及对违规、违法问题的闭环监管。得益于科技支撑，“三监”联动机制实现了从经验驱动的人工监管向数据驱动的智慧监管的跨越，为科技赋能的高效治理提供可复制、可推广的模式。

“三监”联动机制为北京市提供了精准的靶向治理支撑，稳住了空气质量改善成效。PM_{2.5} 年均浓度连续四年达到国家空气质量二级标准，2024 年北京市优良天数为历年最多，重污染天数为历年最少。未来，“三监”联动体系将继续优化升级和迭代，充分利用大数据、人工智能技术，构建智能化、易获取的集“评价、诊断、预警、研判、决策”一体化技术支撑体系，实现大气环境分析问题的智能推理，并进一步提升污染问题的发现效率、研判能力和闭环处置水平，推动治理工作向“反应更快、识别更准、治理更稳”的方向发展，为科学决策与精准调度提供强大支撑，助力北京实现从“一微克”行动到“0.1 微克”攻坚行动的跨越。

上海市工业源 VOCs 治理
以精细化治理破解 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制难题

作为全国最早探索工业源 VOCs 治理的城市之一，上海十余年来持续推进治理进程。从 2007 年开展 VOCs 污染源普查的起步阶段，到如今覆盖全市所有 2000 余家涉 VOCs 企业的深化治理阶段，上海在工业源 VOCs 治理领域形成了一套可复制、可推广的治理模式，主要经验体现在以下四方面。

- 坚持顶层设计与分步实施相结合。上海市 VOCs 治理自 2007 年的排放清单摸底等基础性工作开始，2011 年启

动重点企业试点，2014 年后分阶段、分批次全面推开，并于 2020 年开启深化治理新阶段，这种“先行探索、以点带面、稳步推开”的模式，确保了治理范围从重点企业平稳拓展至全市所有相关行业企业。

- 坚持制度创新与治理模式升级。在治理过程中，上海市注重结合实际进行制度创新。2014 年率先实施“一厂一策”，引导企业制定针对性减排方案，后在深化治理阶段进一步升级为“一行一表、照表施治”，为不同行业提供标准化的治理任务清单，实现从“个性化方案”到“标准化管理”的跨越。
- 坚持政策协同与多方联动并举。上海市将财政补贴等正向激励政策、排污收费等反向约束机制以及严格的执法监管有机结合，使各项政策工具相互支撑、协同发力，有效调动了企业减排的主动性与积极性，确保了各项治理任务的有效落实。
- 坚持精准施策与依法治理结合。一方面，上海市为不同行业制定差异化的治理标准与技术规范，为企业提供清晰的治理指引，并优先将排放量大、活性强、环境影响显著的行业纳入管控重点，实施分级分类管理，确保治理资源用在刀刃上。另一方面，上海市在依法依规开展监管的同时，积极为企业提供政策解读和技术帮扶，体现了“放管服”改革的要求，推动企业从“要我治理”向“我要治理”转变。

经过持续、系统地推进工业源 VOCs 治理，上海市 VOCs 排放总量持续下降，并在 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制中发挥关键作用。PM_{2.5} 年均浓度自 2020 年首次低于国家环境空气质量二级标准后持续保持在较优水平，O₃ 浓度快速增长的势

头也得到了有效遏制。同时，VOCs 治理行动也有效撬动了企业环保投入，促进了环保产业链的发展。未来，上海市将持续深化源头替代提升绿色发展水平，聚焦无组织排放补齐过程管控短板，实施差异化精准监管提升末端治理效能，进一步深挖 VOCs 减排潜力，为实现更高水平的空气质量改善目标提供有力支撑。

上海市重型柴油车排放智慧监管 以数字化赋能移动源精细化治理

作为国家物流枢纽，上海市公路货运需求庞大，重型柴油车保有量高、排放量大，且涉及主体多、流动性强、活动范围广，难以实现集中、实时、高效监管。为此，上海市环境科学研究院牵头开发了重型柴油车排放智慧监管系统，实现移动源领域“车、油、路、企”各环节的智慧化、自动化污染防治，有效推动移动源精细化治理升级和监管效能提升，主要经验体现在以下三方面。

- **搭建多源融合的数据信息底座和系统架构，形成车辆全天候实时监管。**系统融合多源大数据资源，搭建先进系统结构，实现对全域重型柴油车运行和排放的实时监控，并能够识别重点企业和港口码头货运通道和动态跟踪排放，支撑监管部门明确监管重点。
- **建立算法驱动的“车辆 – 企业 – 行业 – 区域”全链条智慧化监管。**系统依托高排放车辆识别、人工智能聚类、地理信息逆解析等算法，结合车辆排放和故障信息、营运基础信息、运行活动特征等多源数据，能够实现对车辆、所属企业和行业、用车大户的一体化全链条监管，有效解决传统监管手段对高排放车辆识别效率低、针对性差等问题。

- **构建“车、油、路、企”全过程闭环管理体系。**系统集成了针对高排放车辆、非社会加油站、货运通道和用车大户的识别功能，消除车辆在用符合性监管、燃料监管、货运通道监控和优化、重点用车大户监管中的管理盲区，并解决了不同层级监管需求融合难、统筹难的问题，显著提升重型柴油车排放监管效能。

系统上线应用以来，有效支撑了柴油车减排有关措施的落实。一方面，系统已成为上海市重型柴油车污染防治措施效果评估的重要工具，全面支撑了老旧柴油车淘汰效益的动态跟踪评估；另一方面，系统支撑了清洁柴油车免年检政策的制定和实施，其中的免年检车辆识别模块于 2023 年 1 月 1 日正式上线运行，对清洁柴油车免年检实践起到了重要作用，有效促进车辆的规范使用，降低车辆排放水平。未来，上海市将进一步加强平台建设，开发多源数据整合模块、加油车辆点位规范管理及劣质油品溯源、重大活动和临时管控措施自动汇总评估等多种场景，推动移动源领域“车、油、路、企”各环节污染防治智慧化、自动化，持续助力城市空气质量改善。

成都市“近零碳施工工地”试点 以场景创新引领建筑行业协同减污降碳

面对空气质量持续改善难题，成都市聚焦移动源和扬尘两大贡献源，以建筑工地场景为突破口，启动“近零碳施工工地”试点，探索工地内新能源设备替代，并将绿色低碳理念融入施工全流程，助力建筑业绿色低碳转型，同时为城市空气质量持续改善和协同降碳提供可参考的示范经验，主要体现在以下三方面。

- **构建“政府主导—企业实施—第三方核证”的协同推进机制。**试点工作由成都市生态环境局牵头制定方案与路径，联合市住建局、区城管局等形成多部门、多层级协调机制，实施企业履行施工主体责任，第三方机构独立开展检测评估，从而系统构建起各主体职责清晰、分工明确的管理体系。

- **多措并举保障新能源设备替代与应用。**市生态环境局引入多家新能源设备厂商参与替代匹配研究，推动设备新能源化，同时出台多项支持措施，包括开辟新能源重卡充电专用通道，优先保障试点项目充电需求；协调临时用地建设内部充电桩并协调电容电力，满足场内洒水车 and 机械充电需求，保障试点项目用电负荷等。此外，试点项目也配套了扬尘管控、绿色施工、全过程管理方面的各项措施，助力建筑施工阶段的管理效率和减排成效提升。

- **强化智慧监测确保全过程管理，有力支撑科学决策和管理优化。**成都市试点构建“监测—核证—优化”闭环体系，搭建了近零碳施工工地智慧碳监测系统，实现施工过程数据的精准、实时监测；同时引入第三方核查机构开展全过程核证，确保数据透明、真实、可追溯，为科学决策和管理优化提供依据。

作为全国首个全生命周期绿色低碳项目，成都市试点的环境效益和社会效益显著。一方面，SO₂、NO_x、PM₁₀、PM_{2.5}等大气污染物和CO₂排放显著下降；另一方面，推动建筑行业绿色转型，改善工地周边居民生活环境，并创造新岗位促进就业和推动施工人员技术升级。未来，成都市将继续以近零碳施工工地为抓手推进协同减污降碳，进一步促进新能源设备投放满足工地多样化的使用需求，充分积累试点经验，分阶段扩展至其他类型工地，并制定差异化的评价标准框架以确保推广有据可依。



01

京津冀及周边地区

深化大气污染联防联控
推进区域空气质量持续改善

一、背景概述

作为我国经济社会发展的重要区域之一，京津冀及周边地区经济快速增长，能源消费需求急剧上升，且长期受到“三偏结构”的制约，大气污染防治形势严峻、压力巨大。首先，产业结构偏重，尤其是河北省。以 2023 年为例，河北省第二产业占 GDP 比重高达 37%，显著高于 23% 的全国平均水平，其中钢铁、石化等高耗能、高排放行业占 GDP 的比重尤其较大。其次，能源结构偏煤，以 2020 年为例，河北省煤炭消费量 2.8 亿吨，在能源消耗中占比为 80%，比全国平均水平高出 20 个百分点。最后，运输结构偏公路，河北省 2020 年大宗货物公路运输占比超过 80%，比全国平均高出 8 个百分点，大量重型柴油货车导致其在氮氧化物排放中的贡献超过了 30%。

此外，特殊的地理位置和气象条件还进一步加大大气污染治理难度。一方面，京津冀及周边地区位于太行山东侧、

燕山南侧，整体呈半封闭地形，导致大气扩散能力较弱。另一方面，京津冀及周边地区以平原为主，整体处于同一空气流场，当南风主导时，污染物极易积累且跨省市传输显著。2025 年新发布的北京市第四轮源解析结果显示，现阶段北京市大气 PM_{2.5} 中区域来源占 57%，本地占 43%。相较 2020 年，区域传输占比增加一成多，超过五成。随着污染级别增加，区域传输对北京市 PM_{2.5} 的影响逐渐增大，中重度污染日时，区域传输占比可达八成。这意味着单一城市的治理措施难以独立奏效，需要整个区域进行大气污染的联防联控。

由于京津冀及周边地区能耗大、排放高、污染重，中共中央、国务院对此高度重视，逐步推动实施大气污染联防联控机制，有效推动了京津冀及周边地区的大气污染防治工作，空气质量改善取得显著成效。



二、发展历程

京津冀及周边地区的大气污染联防联控最早可追溯至 2008 年北京奥运会空气质量联防联控，这是该区域在大气污染协同防治上的首次尝试。此后，在 2014 年 11 月亚太经合组织（APEC）领导人非正式会议、纪念中国人民抗日战争暨世界反法西斯战争胜利 70 周年大会、庆祝中华人民共和国成立 70 周年大会、2022 年北京冬奥会等重大活动期间，京津冀及周边地区多次实施区域联防联控，不断深化联防联控机制。随着实践的推进，联防联控区域范围逐步扩大（如图 1-1），形成覆盖京津冀及周边地区“2+36”城市的协同治理格局。总体上，发展历程可分为以下三个阶段。

探索阶段：

北京治理探索与区域协同雏形（2013 年以前）

1998 年，北京市首次发布《北京市人民政府关于采取治理大气污染措施的紧急通知》，开启了重污染天气应对与治理的历程。2000 年修订的《中华人民共和国大气污染防治法》（以下简称《大气法》）首次规定“在大气受到严重污染，危害人体健康和安全的紧急情况下，当地人民政府应当及时向当地居民公告，采取强制性应急措施，包括责令有关排污单位停止排放污染物”。但是 2000 年修订的《大气法》

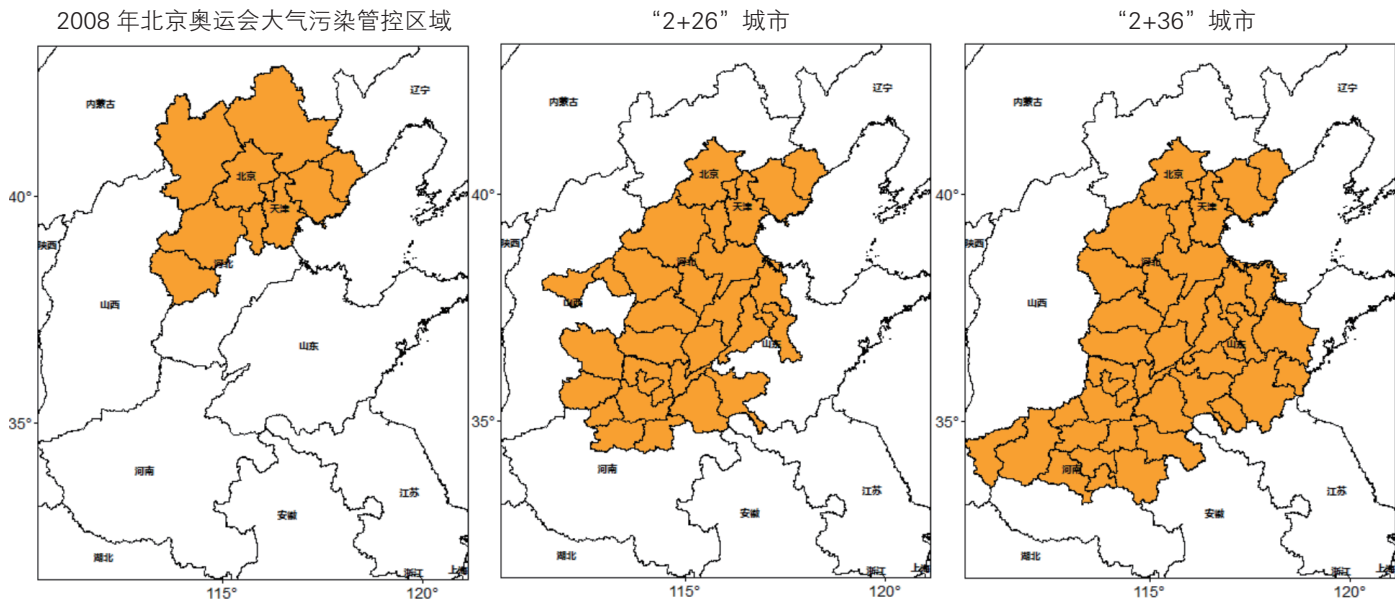


图 1-1 2008 年至今大气污染联防联控区域变化

并未针对重污染天气应对设置单独章节，也缺少相关细则，因此区域联防联控主要针对重大活动保障开展。2008 年，为了保障奥运会期间的空气质量，原环境保护部与北京、天津、河北、山西、内蒙古和山东 6 省区市联合制定了《第 29 届奥运会北京空气质量保障措施》。6 省（自治区、直辖市）政府先后制定并发布了各自的实施方案，通过机动车管理、工地停限作业、重点企业停限产、燃煤设施减排、有机废气减排和极端不利气象应急六大措施保障空气质量，有效降低大气污染物浓度。在奥运会、残奥会举办的 29 天中，北京空气质量天天达标，其中 12 天为优、17 天为良，申奥空气质量承诺圆满兑现。据专家测算，排放控制对 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度下降的贡献比例分别为 71% 和 60%，是空气质量改善的首要因素。

完善阶段：

联防联控机制确立与初步实践（2013—2022 年）

2013 年初，京津冀及周边地区出现严重污染，引发广泛关注。同年 9 月，国务院印发《大气污染防治行动计划》，提出建立京津冀大气污染防治协作机制，由区域内省级人民政府和

国务院有关部门（如原环境保护部、气象局等）参加，承担协调解决区域突出环境问题、组织实施大气污染防治措施、通报区域大气污染防治工作进展等工作，奠定了联防联控的制度基础。2014 年 11 月的“APEC 蓝”和 2015 年 9 月的“阅兵蓝”则是联防联控成效的初步显现。APEC 会议期间，北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区、山东省六地同步针对燃煤、机动车、工业及扬尘污染采取多项严格管控措施，2014 年 11 月 1 日 -12 日北京市 $PM_{2.5}$ 、可吸入颗粒物、二氧化硫和二氧化氮的浓度分别为 $42.9 \mu g/m^3$ 、 $62.1 \mu g/m^3$ 、 $8.3 \mu g/m^3$ 和 $45.9 \mu g/m^3$ ，相对 2013， $PM_{2.5}$ 比上年同期下降 54.5%，可吸入颗粒物、二氧化硫和二氧化氮比近 5 年平均水平分别降低 44%、64% 和 31%，各项污染物的浓度都达到近 5 年以来最低值。

2018 年，国务院印发《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，进一步完善区域大气污染防治协作机制，划定京津冀及周边地区的范围为“2+26”城市；加强重污染天气应急联动，当预测到区域将出现大范围重污染天气时，统一发布预警信息，各相关城市按级别启动应急响应措施，实施区域应急联动。制定完善重污染天气应急预案，明确了黄色、橙色、



红色级别减排比例原则上分别不低于 10%、20%、30%，同时根据企业绩效分级实施差异化减排措施。2022 年冬奥会期间（2 月 4 日至 2 月 20 日），生态环境部会同北京、河北等 8 省（区、市）精准实施区域联防联控，统筹赛事期间经济社会平稳运行、能源供给和人民群众温暖过冬，对部分污染重、排放量大、经济影响相对较小的企业和车辆采取了临时性管控，措施精准到具体企业、具体工艺、具体设备和具体车辆。同时，冬奥会正值春节期间，部分企业放假停工，区域内社会经济活动水平大幅下降，交通流量明显降低。综合评估显示，区域内污染物排放减少三成以上，进一步助推了空气质量改善。冬奥会期间，北京市空气质量每日达标，实现了赛前承诺。与此同时，区域联防联控成效凸显，京津冀及周边地区 PM_{2.5} 平均浓度为 52 μg/m³，同比下降 20%；重污染天数同比减少 90% 以上。

深化阶段：

联防联控范围扩展与体系升级（2023 以来）

考虑到已有的“2+26”城市联防联控区域不足以覆盖京津冀大气污染传输通道上的全部关键城市且苏皖鲁豫交界地带污染较为严重，2023 年国务院印发《空气质量持续改善行动计划》，将京津冀及周边地区的城市范围由“2+26”城市拓展至“2+36”城市。同时，为了有效冲抵秋冬季极端不利气象条件的影响，生态环境部从 2024–2025 年秋冬季起，针对长时间、大范围重污染过程开展积极应对，不仅组织京津冀及周边地区应急联动，还将长三角、汾渭平原、长江中游城市群等区域纳入应急联动范围，不仅减缓了京津冀及周边地区的污染累积，也减少了中东部地区重污染天气发生频次。

三、实施机制

为确保大气污染联防联控的高效运行，京津冀及周边地区逐步建立起多层级协同治理体系，并形成跨部门、跨区域的协作机制。

在治理体系方面，我国经过多年探索，形成了多层级协同的专业化治理架构。2018 年，国务院成立京津冀及周边地区大气污染防治领导小组，包含 13 个部委及 7 省（市）的负责人，负责制定区域空气质量目标、审批重大政策和协调省际矛盾。此外，生态环境部还承担日常监测预报、应急清单管理、跨区域执法调度等任务，使区域协同治理更加常态化、体系化，提升大气污染防治效能。

在协作机制方面，我国逐步建立起多层次、多部门协作的大气污染联防联控机制。一方面，多省市协同推动规划统一与标准一体化，国家发改委、生态环境部等部门联合制定区域生态环境保护规划；京津冀三地实现区域性立法协同，同步实施《机动车和非道路移动机械排放污染防治条例》，共同出台 VOCs 含量限值等区域性环境标准，并在重点区域统一执行严于国家标准的大气污染物特别排放限值。另一方面，多部门协作深入推进结构优化与减排行动。工信部、发改委、生态环境部等部门依法淘汰落后产能、整治“散乱污”企业，严格限制京津冀地区新增高污染产能项目；国家能源局、发改委推动煤炭消费减量替代和清洁能源改造；交通运输部、生态环境部等部门联合推动“公转铁”“公转水”运输结构调整，实施更严格的机动车排放标准，全面推广新能源汽车，从源头减少大气污染排放。

四、配套措施

为推进区域联防联控落地见效，国家、地方层面从技术、资金、法规标准、重污染天气应对体系等方面提供保障，以确保区域协同治理工作有力推进。

健全大气污染治理技术支撑体系

工业源方面，大气重污染成因与治理攻关项目支持了重点行业超低排放改造、低 VOCs 含量原辅材料替代、工业炉窑清洁能源替代等技术的研发，减少工业源污染排放。移动源方面，完善重型车和非道路机械远程排放远程在线监控系统，加强油品储运销环节油气回收，对运输量大的重点行业企业推广使用门禁视频监控系统，引导第三方排放检测机构使用大数据、人工智能等技术方法研判问题线索。面源方面，强化了扬尘精细化管控，推进矿山、散货码头防尘设施和物料输送系统封闭改造，推动基坑气膜等新技术

落地使用，在京津冀及周边地区开展大气氨排放控制试点，推广氮肥机械深施和低蛋白日粮技术。智慧监管方面，北京市建成“监管统筹、监测感知、监察执法”的“三监联动”调度平台，河北省建立省市县三级数智环保系统，能够破解污染成因复杂性与跨区域传输难题，为应急减排提供决策依据，提升治理成效。

构建完备的重污染天气应对体系

经过多年的发展完善，现已构建了包括监测预报、成因分析、预警应急、跟踪评估、舆情引导的重污染天气应对体系。监测预警方面，京津冀及周边地区已构建起国家—区域—省级—城市四级空气质量预报体系，实现 7—15 天精准预测，并建立未来 45 天的延伸期污染气候预测，重污染天气预测预报能力显著提升，2024 年北京重污染预报率从



“十三五”期间的不足 50% 上升至超过 80%。成因分析方面，依托大气重污染成因与治理攻关、国家重点研发计划等国家级科研项目，从污染物排放情况、化学转化、气象条件变化、污染传输四个方面，全面阐明了京津冀及周边地区秋冬季重污染的成因。预警应急方面，《大气法》要求各级人民政府制定重污染天气应急预案，其中应急减排清单是核心内容。为系统推动应急减排清单化与精准化管理，国家层面连续出台多项重要文件开展差异化减排。从 2017 年出台的《重污染天气预警分级标准和应急减排措施修订工作方案》到 2024 年出台的《重污染天气应急减排清单编制技术指南》，重污染天气减排清单编制技术不断完善。随着政策不断深化，纳入清单的企业数量持续增长，截至 2024 年，应急减排清单已覆盖所有出现重污染天气的城市，涉及全国 29 个省（区、市），成为应对重污染天气的兜底一招。跟踪评估方面，融合近实时排放表征技术、高分辨率遥感技术、走航监测技术等先进技术方法，大幅提高了污染源远程智能监管、全社会污染排放实时表征、管控措施成效综合评估能力，实现了“问题查找—联合评估—地方整改”的监管闭环，推动措施落实到位。舆情引导方面，广泛宣传解读相关政策举措，在重污染期间，组织专家撰写专家解读回应公众关注的问题，正确引导舆论，争取人民群众的广泛支持。

加大大气污染防治资金激励

为推动大气污染治理措施的协同实施，京津冀及周边地区逐步构建起涵盖补贴、收费、奖励、价格、金融等多手段的环境经济政策体系，为燃煤、机动车、工业等多类污染源的治理措施提供资金支持。对于燃煤治理，引导各地财

政资金支持燃煤锅炉清洁能源改造、城乡居民散煤替代以及农村煤改电、煤改气工程。如北京对完成清洁能源改造的居民用户实行采暖期优惠电价，优惠幅度可达 60% 以上。对于机动车治理，统一推进老旧机动车淘汰更新、重型柴油车治理及新能源汽车推广，并提供财政补助。例如，针对符合标准的新能源汽车购置，地方还在中央财政补贴基础上提供额外补助。对于工业治理，通过奖补结合引导高污染企业退出或进行清洁生产改造，并实施差别化排污收费政策。例如，对主动退出或关闭重污染生产线、实现整体退出的企业，根据规模及影响给予不同档位的资金奖励，最高可达数百万元。

完善法律法规与标准体系

京津冀及周边地区持续推进系统性、法治化与精细化的大气污染联防联控建设，在法律基础、法规制定、标准提升等方面取得显著进展。在法律与法规体系建设上，国家于 2015 年修订《大气法》，设立“重点区域大气污染联合防治”和“重污染天气”，从法律层面规定了区域联防联控和重污染天气应对机制；2018 年国务院发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》进一步将京津冀及周边地区列为重点区域，推动区域协同减排与应急响应；区域内多地协同修订地方大气污染防治条例，在省（市）级立法中明确区域协同治理的法律责任与协调机制。在标准统一与升级上，京津冀于 2017 年共同发布的《建筑类涂料与胶粘剂挥发性有机化合物含量限值标准》，成为三地首个统一的环保标准；之后三地还在钢铁、油品质量、机动车排放、锅炉大气污染物等领域逐步实现区域标准协同，例如共同实施第六阶段机动车排放标准。

五、政策效果

2013 年以来，在国家大气污染防治行动以及多污染物协同治理的大框架下，京津冀及周边地区主要大气污染物排放量持续下降，实现了经济增长和空气质量改善的双赢。

从污染物变化趋势来看，京津冀区域的大气污染物浓度明显降低，尤其区域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染得到根本性缓解，如图 1-2。2024 年，北京市、天津市、河北省三地的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分别为 $30.5\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $38.1\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $37.7\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相较于 2013 年的 $89\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $96\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $108\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，下降幅度

均达到六成左右。臭氧（ O_3 ）浓度也同步得到控制，以北京为例，2024 年 O_3 日最大 8 小时滑动平均第 90 百分位浓度值较 2013 年下降 6.8%， O_3 浓度上升势头基本得到遏制， $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 污染协同控制初见成效。

伴随着污染物浓度下降，区域空气质量明显改善，优良天数比例显著提高，重污染天数大幅削减。北京市改善尤为显著，2024 年优良天数增至 290 天，比例达到 79.2%；重污染天数从 2013 年的 58 天降至 2024 年的 2 天。天津市

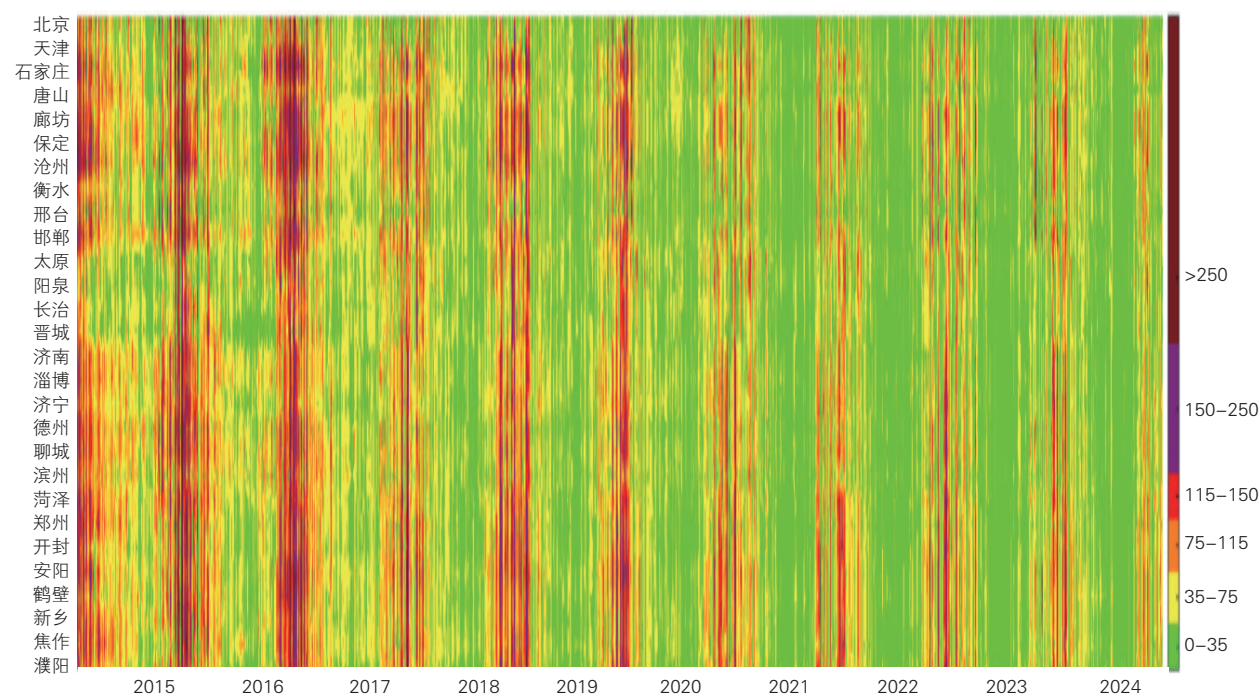


图 1-2 2015-2024 年京津冀及周边地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化

重污染天数从 2013 年的 49 天下降到 2024 年的 4 天；河北省各城市的平均重污染天数也明显降低，从 2013 年的平均 80 天下降到 2024 年的 5 天。

重污染期间的区域应急联动也取得显著成效，充分凸显区域联防联控的作用。2024 年 10－12 月，京津冀及周边地区先后经历 4 轮污染过程，生态环境部在京津冀及周边地区开展区域应急联动，并调度长江中游地区、长三角等采

取跨区域联动，最终取得良好联防联控成效。在重点污染源管控方面，生产工序可中断行业的重点企业开工率下降了 8－11 个百分点；在电力、供热开工率明显上升的情况下，各省重点污染源在线监测排放量下降 16%－31%；重型货车交通流量下降 2%－9%；工程机械开工时长下降幅度基本在 20% 以上。在空气质量改善方面，在 4 轮污染过程中，京津冀及周边地区中重度污染实际发生 119 天，较预测情况减少 373 天（如图 1-3）。

省市	20241023		20241024		20241025		20241026		20241027		20241028		20241029		20241030		20241031		20241101		20241102		20241103		
	预报	监测	预报	监测	预报	监测	预报	监测	预报	监测	预报	监测	预报	监测	预报	监测	预报	监测	预报	监测	预报	监测	预报	监测	
北京市	43-59	22	67-83	43	91-107	115	108-122	153	21-35	11	51-67	23	75-91	68	51-67	67	67-83	104	67-83	99	108-122	92	35-51	43	
天津市	47-71	45	67-91	92	99-122	109	107-129	128	55-79	68	83-107	45	99-122	86	63-87	66	83-107	100	51-75	70	83-107	81	43-67	46	
河北省	石家庄市	67-91	31	91-115	64	136-160	114	129-150	153	99-122	75	99-122	46	136-160	98	136-160	106	136-180	83	122-143	50	136-160	51	75-99	65
	唐山市	57-81	37	79-103	84	95-118	106	115-136	98	43-67	60	91-115	57	111-132	75	71-95	46	95-118	83	39-63	79	67-91	33	95-118	42
	廊坊市	59-83	47	95-118	95	118-139	112	139-165	160	91-115	41	95-118	55	136-160	90	107-129	92	111-132	100	103-125	93	132-155	66	99-122	38
	保定市	63-87	37	95-118	74	132-155	113	136-160	158	111-132	77	111-132	48	132-155	91	132-155	107	132-155	97	111-132	57	132-155	57	63-87	55
	沧州市	67-91	50	103-125	72	103-125	90	136-160	123	83-107	66	99-122	29	150-200	94	103-125	141	136-160	133	99-122	48	136-160	60	99-122	82
	衡水市	67-91	50	95-118	83	139-165	79	136-180	99	103-125	88	103-125	38	132-155	96	139-165	153	136-180	155	122-143	53	132-155	49	67-91	92
	邢台市	59-83	31	122-143	68	132-155	89	139-185	104	122-143	100	115-136	60	132-155	111	136-160	142	136-160	112	129-150	32	136-160	46	107-129	57
	邯郸市	59-83	46	99-122	66	118-139	87	136-160	96	95-118	104	99-122	60	136-160	106	136-160	169	136-160	126	118-139	53	139-165	57	59-83	74
	秦皇岛市	59-83	32	75-99	72	111-132	70	122-143	73	43-67	33	59-83	39	95-118	68	79-103	26	95-118	58	75-99	51	75-99	24	55-79	65
	郑州市	59-91	28	72-110	52	81-123	63	122-190	79	122-190	89	126-155	111	85-128	114	91-136	112	81-123	170	85-128	60	126-155	61	76-116	60
	开封市	59-91	61	72-110	53	81-123	68	126-155	88	126-155	100	91-136	90	85-128	94	85-128	105	72-110	126	91-136	42	93-117	52	118-160	76
河南省	安阳市	56-86	55	78-119	61	81-123	75	122-190	92	126-155	119	126-155	70	126-155	124	126-155	175	126-155	144	126-155	53	91-136	64	81-123	91
	鹤壁市	56-86	51	78-119	61	81-123	64	122-190	86	126-155	117	126-155	72	91-136	121	126-155	163	91-136	145	126-155	43	91-136	59	81-123	81
	新乡市	59-91	51	72-110	60	81-123	66	122-190	100	126-155	136	126-155	86	91-136	124	91-136	144	91-136	166	126-155	53	126-155	72	91-136	74
	焦作市	56-86	33	72-110	54	81-123	71	122-190	90	126-155	104	126-155	94	91-136	111	91-136	128	76-116	155	126-155	57	118-160	56	76-116	50
	濮阳市	59-91	61	78-119	56	81-123	70	137-171	77	126-155	96	126-155	70	91-136	98	126-155	150	107-129	160	91-136	56	95-118	64	85-128	91
	许昌市	65-101	36	65-101	52	72-110	65	126-155	110	136-170	121	126-155	124	91-136	99	85-128	100	72-110	163	91-136	69	118-160	80	118-160	88
	漯河市	65-101	36	65-101	43	72-110	64	126-155	108	136-170	126	126-155	110	91-136	90	85-128	82	72-110	76	91-136	83	118-160	83	118-160	85
	平顶山市	65-101	25	65-101	46	72-110	65	126-155	67	126-155	45	126-155	113	91-136	89	85-128	83	72-110	111	91-136	88	118-160	68	76-116	64
	商丘市	65-101	60	49-77	50	54-83	74	91-136	67	126-155	104	91-136	112	85-128	111	85-128	101	76-116	84	81-123	132	95-118	92	126-155	98
	周口市	56-86	67	49-77	44	54-83	49	91-136	89	126-155	115	126-155	96	85-128	117	85-128	75	72-110	54	76-116	87	103-140	83	118-160	86
	三门峡市	53-81	16	53-81	35	72-110	59	85-128	57	72-110	24	85-128	56	85-128	79	72-110	80	59-91	100	72-110	66	59-91	59	62-96	61
山东省	洛阳市	53-81	25	56-86	48	81-123	76	76-116	60	72-110	33	126-155	114	91-136	118	85-128	125	78-119	164	78-119	64	78-119	56	75-115	54
	济南市	43-67	26	55-79	41	67-91	71	67-91	67	63-87	100	55-79	23	59-83	53	64-88	103	83-107	126	95-118	77	43-67	34	63-87	61
	淄博市	55-79	28	71-95	50	95-118	73	83-107	87	55-79	81	63-87	36	71-95	58	83-107	103	87-111	132	83-107	73	63-87	56	55-79	57
	济宁市	47-71	45	55-79	50	67-91	58	59-83	62	39-63	117	55-79	48	67-91	75	63-87	102	75-99	103	59-83	112	59-83	49	63-87	79
	潍坊市	59-83	50	71-95	58	83-107	83	95-118	107	55-79	88	71-95	25	118-140	79	103-126	133	107-129	159	83-107	36	53-77	47	55-79	91
	聊城市	61-85	51	67-91	45	91-115	67	101-123	91	83-107	91	71-95	41	103-126	82	129-150	117	103-126	144	115-136	58	115-136	46	103-126	84
	滨州市	14-20	30	71-95	52	79-103	84	59-83	96	14-20	54	11-18	32	52-76	72	71-95	100	47-71	97	63-87	50	10-17	61	55-79	60
	菏泽市	59-83	61	63-87	43	95-118	67	99-122	52	95-118	82	71-95	77	71-95	109	99-122	118	111-132	115	95-118	88	111-132	64	111-132	90
	临沂市	14-20	29	67-91	54	59-83	51	18-24	33	55-79	54	52-76	23	52-76	70	67-91	94	63-87	64	10-17	37	10-15	50	13-19	90
	泰安市	23-42	34	41-60	49	53-72	67	41-60	56	12-31	87	55-79	30	31-50	56	41-60	88	73-92	107	35-54	81	31-50	35	52-76	70
	潍坊市	45-79	21	61-91	52	61-91	64	65-95	44	40-79	50	21-51	44	40-79	50	69-99	77	77-107	84	65-95	51	25-59	58	60-91	54
	东营市	43-67	26	71-95	49	75-99	70	79-103	44	47-71	33	39-63	30	52-76	63	67-91	64	79-103	62	67-91	46	55-79	43	55-79	57
	枣庄市	47-71	36	63-87	46	55-79	47	63-87	37	55-79	80	59-83	40	59-83	52	71-95	77	59-83	68	59-83	48	55-79	56	75-99	79
	日照市	11-18	22	13-20	43	43-67	34	16-23	26	11-18	41	8-15	19	12-19	38	18-25	67	59-83	47	12-19	34	8-15	59	16-23	55

图 1-3 2024 年 10-11 月重污染期间京津冀及周边地区空气质量实况与预测预报结果对比

六、挑战与对策

京津冀及周边地区区域联防联控机制虽然已经基本建立，但随着治理深入推进，仍在区域治理体系、技术水平和协作机制等面临新的压力与挑战。为实现空气质量持续改善，仍需聚焦以下五方面，提出针对性解决方案。

提升预测预报能力，支撑精细化研判与联动应对

虽然我国大气污染预测能力已具备基础，但仍存在明显短板。动态污染源排放清单的时效性与精细化程度不足，复杂气象形势下的北京地区气象预报准确性有待提高，这都制约了污染预报的精准度，中长期预报能力尤其薄弱，超过7天的预报准确率显著下降，难以支撑有效的决策应对。此外，近年来存在区域内中重度污染天气未准确报出的情况，污染等级预报准确率有待进一步提高；春季污染预报还面临冷空气活动调整频繁带来的额外挑战，包括预报不确定性提升以及预报偏差风险增加。

为提升大气污染预测预报能力，区域层面需从以下三方面推进自主可控的系统建设，并通过数据整合实现互联互通与产品共享。一是建立近实时排放清单，同时提升城市气象要素预报能力，强化污染气象指标的监测与分析。二是针对不同季节优化预报模型参数方案，融合机器学习方法，发展概率预报、潜势预报和短临预报。三是构建多层级预报产出的科学评估体系，加强污染溯源、减排评估及沙尘、山火、秸秆焚烧等专项预报能力，制定规范的预报操作规程和人员质控标准，固化预报经验，并推动气象与环保部门在合作框架下共享资源、优势互补。

健全应急减排清单，推动差异化精准管控

作为重污染天气应急预案重要组成部分、应急减排措施执行的重要依据，以及有效应对重污染天气的重要基础，应急减排清单需要进一步科学化、规范化，尤其针对涉气企业应纳未纳、部分减排措施无实际减排量、擅自放宽豁免范围、地方审核把关不严等问题，亟须出台有关文件，指导地方进一步规范应急减排清单编制工作。

2025年印发的《重污染天气应急减排清单编制技术指南》进一步提出要落实重污染天气中污染排放量和产品产量“双减”、加严移动源管控。这将进一步夯实应急减排的减排量，提高区域协同治理效果。

构建污染调控技术体系，助力科学动态减排决策

当前，我国仍缺乏系统化、精准化的污染调控技术支撑体系。由于能源结构、产业布局和污染特征与欧美等发达国家差异明显，国外经验难以直接借鉴。而且，尚未建立起成熟的污染源减排与空气质量改善之间的定量响应关系技术，导致难以科学预测减排措施的实际环境效果。这不仅导致京津冀及周边地区难以实现更加精细和深度的调控，也限制了基于环境目标制定精准、动态减排策略的能力，同时也限制了治理措施的针对性和有效性。

为开发污染调控技术体系，需依托京津冀环境综合治理国家科技重大专项从三方面突破。一是研究调控措施动态优

化技术，构建调控对象、调控措施与污染减排的响应关系；结合污染物排放、源贡献和气象的时空动态变化设置调控情景；将改善区域空气质量和降低对经济社会运行影响作为约束条件，优选动态调控路径。二是开发污染源智慧监管技术，解决重点行业企业超标排放和在线造假、绩效水平符合性、适用于不同行业和生产工艺的应急减排措施不落实等问题；并建立问题线索分类分级管理技术，支撑污染过程精准调控，推动各地减排责任落实。三是开发调控效果综合评估技术，实现全社会污染减排实时评估；建立污染排放与空气质量和主要组分的响应关系，定量评估调控措施对空气质量改善的贡献比例。

强化法治与监管效能，保障措施高效落实

经过多年持续治理，京津冀及周边地区整体排放强度显著下降，随之而来的是应急减排空间进一步压缩的现实挑战。当前，区域内产业结构偏重、能源结构依赖化石燃料的局面尚未根本扭转，在现有治污水平上挖掘减排潜力的难度日益加大，与群众生产生活密切相关的秸秆焚烧、烟花爆竹等非传统问题日益凸显。尤其在重污染天气应急响应期间，传统工业限停产、机动车管控等常规应急措施边际效益递减，可供灵活调度的减排空间有限。



对此，需围绕“狠抓减排落实”，多措并举强化监管效能，挖掘减排潜力。推动修订生态环境法典，增加对未落实重污染天气预警应急响应要求的违法行为罚则，提升法律约束力。建立“问题通报—核查整改—落实反馈”闭环管理机制，精准跟踪督促整改。同时，进一步提升信息化监管水平，将监管手段置于线上平台，依托技术手段强化全过程动态监测与管理，确保减排责任落到实处、取得实效。

完善区域协作机制，强化联防联控合力

目前，京津冀及周边地区“2+36”城市联防联控主要应用于应对波及北京市的中重度污染过程，以及提升重大活动期间北京市空气质量。但近年来秋冬季跨区域的重污染天气过程时有发生，其应急联动机制还不够完善，导致京津冀及周边地区以外且污染排放强度较高的区域（如苏皖鲁豫交界地区）应急响应力度差异显著，影响减排效果和空气质量改善程度。因此，需构建更具约束力和操作性的跨区域应急联动体系。

为进一步完善重污染天气应对联防联控机制，需进一步加强污染协同应对的统一组织与指导帮扶能力建设，深化京津冀及周边地区与苏北、皖北等区域的跨区域应急联动，系统提升京津冀及周边地区联防联控水平和整体应急响应能力。



02

北京

“三监”联动精细化治理新模式
赋能“一微克”行动

一、背景概述

作为首都和全球重要的超大城市，北京市在环境治理领域长期处于全国领先地位，多年来始终将大气污染防治作为环境管理重点，持续探索完善治理体系和提高治理能力。

自《大气污染防治行动计划》实施以来，通过实施结构优化、排放控制、联防联控等，北京市空气质量持续改善，大气污染物浓度显著下降，2024 年北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $30.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较 2013 年的 $89.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降了 65.9%， PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 等主要大气污染物的浓度也分别下降了 50.0%、57.1%、88.7%；重污染天数也大幅削减，从 2013 年的 58 天降至 2024 年的 2 天。

早在 2017 年，北京市就提出“ $\text{PM}_{2.5}$ 治理要一个微克一个微克地去抠”，启动了大气污染防治“一微克”行动，通

过综合运用科技、执法、管理等手段，实施大气污染精准治理，开启以微克为单位的精细化减排阶段。

进入“十四五”时期，北京市连续四年实现 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度稳定达标，但出现小幅年际波动，标志着北京市大气污染治理已经进入“深水区”，污染治理的复杂性与艰巨性呈指数上升，传统依赖人工经验的分析模式已经难以应对支撑高频次、动态化的大气环境决策需求。北京市生态环境部门在大气污染防治领域创新实施监管部门统筹调度、监测部门智慧感知、监察执法部门精准执法的“三监”联动，致力于提升治理精准性、响应时效性与系统协同性，实现污染源的精准识别、快速响应和高效治理，以有效支撑新阶段的大气污染防治工作。



二、发展历程

“十四五”时期的大气污染防治攻坚战，正处于从重点攻坚向全面减排深化的关键阶段，在此过程中，监测工作始终发挥着“耳目”与“哨兵”的基础性作用。通过构建“天地空移”一体化监测网络，精准捕捉从宏观区域到微观点源的污染动态，实现了对污染成因的深度诊断和治理成效的科学评估，为精准管理决策提供了不可或缺的数据支撑，主要包括以下三部分内容：

一是“三监”联动的重要支撑——监测体系的完善。北京市生态环境监测体系的发展，是一部持续引领全国、对标全球的创新史。早在1983年，北京率先建成全国首个大气环境自动监测系统，实现了从手工监测到自动监测的跨越。经过三十余年的积累与探索，2016年建成了覆盖全市的高密度监测网络，2018年率先建成首个重型柴油车远程在线监控平台，标志着监测体系开始走向智能化。2022年，融合卫星遥感、车载巡测、物联网和电力大数据，成功构建了“天上看、地上巡、数据联、电量核”的一体化监测网络，监测体系正式迈入智能化、精准化新阶段。

二是治理模式的变化——从经验驱动到数据驱动。生态环境监测日均产生上亿条海量数据，然而传统经验驱动治理

模式对数据挖掘深度和时效性欠缺，难以满足精细化治理的需求。为突破这些局限，数据驱动的新治理模式应运而生。2024年7月，监测中心率先发布了国内首个生态环境监测领域大模型——“三监”联动大模型。2025年2月，接入DeepSeek完成升级，构建起大气监测、评价、预警、溯源、分析一体化的智能助手，推动治理从“经验驱动”向“数据驱动”转变。大模型全面部署于驾驶舱、业务分析平台、移动APP等系统中，在问数、问答、问诊场景实现突破，为生态环境治理工作注入强劲科技动力。

三是系统化、数智化升级——助力治理精准度与响应效能双提升。探索以数智化技术支撑“一微克”行动的新型路径，提出大气“三监”联动新模式。2022年冬奥会期间首次探索构建“三监”联动新模式，年末建成“1+N”的精准治污调度平台，实现了20余类问题的智能捕捉，以污染应对为主要场景构建“2小时反馈、4小时办结”的闭环调度体系。2023年，市生态环境局印发《大气污染防治“三监”联动工作机制（试行）》，“三监”联动走向常态化治理。2024年以来，不断拓展感知数据来源，迭代优化算法模型，推动环境问题识别能力提升到小时级，线索精准性提升至75%以上。

三、实施机制

党的二十大提出，深入推进污染防治，持续深入打好蓝天保卫战。北京市始终坚持以生态环境持续改善为核心目标，强化创新驱动，深入实施污染防治攻坚战年度行动计划，探索出充分发挥全局各部门力量，协同、高效、科学的监管－监测－监察“三监”联动工作机制。在该机制中，环境监管部门发挥“发动机”作用，统筹调度，提出重点任务要求；环境监测部门发挥“哨兵”作用，发现并分析线索问题；环境执法部门发挥“铁拳”作用，基于线索循迹溯源，实施精准执法，三者共同构建了闭环治理响应体系（如图 2-1）。

以“三监”联动促进市区协同、联动共治。良好的运转机制是高效监管的重要保证，北京结合实际形成“三监”联动机制、“三监”联席会机制、“三监”帮扶机制、“三监”溯源机制，开展不同场景“三监”联动。经过长期实战和优化提升，“三监”联动分工明确、节点明晰、流程顺畅，实现线索推送和问题整改“快下快上、日产日消”，通过不间断推送问题线索并调度问题整改情况，持续释放落实压力，充分调动了各区、各街道（乡镇），以及相关部门力量，促进举一反三、及时整改，形成了闭环工作合力，促进了全市上下一盘棋的协同共治机制的形成。通过“三监联动”有效破解跨部门、跨层级的协同治理难题，以精准数据分析为指挥棒，推动形成“数据驱动—三监联动”的治理新模式，实现从分头行动到系统作战、从经验判断到智慧决策的转变，为空气质量持续改善提供了坚实的机制保障与能力支撑。



图 2-1 “三监”联动工作机制

研发事前－事中－事后精准管控体系。事前要精准研判，建立了跨越中长期到小时级的预测预报体系，同时，通过 AI 技术赋能，实现小时级的风险预警，支撑从被动应对到主动精准调控的跨越。事中要精准溯源，聚焦低浓度水平下城市精细化管理需求，自主研发了动态追踪高值冒泡、超标排放和违规行为溯源模型。例如，通过远程在线监控技术，掌握全市 18 万辆重型柴油车的行驶路线和排放状况，一旦车辆出现超标排放，即可将车辆信息和超标线索推送

至执法部门，精准快速执法。同时，利用设施用电监控技术，将全市千余家重点涉气企业和 6000 余个监测点位纳入监测，一旦发现生产设施电表在跑而治污设施电表没动静情况，将被系统捕捉记录。智能解析技术可对 2000 多个工地、上万个摄像头捕捉到的全流程施工环节视频图进行解析，精准捕捉环境违法行为。事后要精准评估，依托多源感知数据，跟踪污染源变化情况，评估措施落实效果，量化减排成效，系统评估空气质量改善的主要贡献因素和不同措施的协同效果，以全方位的事后评估为科学施策提供依据。

首创基于大模型的智慧决策调度体系。利用大模型赋能提升三监联动协同效率（如图 2-2）。三监联动大模型以通义千问、DeepSeek 等通用大模型作为基础模型，输入大气环境领域专业知识和本地监测数据，经过思维链的构建和训练，打造大气环境监测垂直领域的专业大模型。研发构建了专业知识库。利用增强检索生成技术，在通用知识库基础上，引入 1600 多项业务实践知识，构建大气精准

治污实践应用体系化知识库。为大模型提供“专业知识”，让大模型更加“专业”。搭建了深度思考的思维链，将行业专家经验转化为 50+ 条具体思维链，针对大气环境“评价、诊断、预警、研判、决策”五大场景构建了思维链集，让大模型能像专家一样思考，更加“聪明”。然后，为了对大模型应用支撑能力进行客观评估，我们联合清华大学等高校、高新企业，共同构建了精准治污场景下的测评集，能够多维度评价大模型智能问题的准确性与专业性，促进大模型迭代优化。

习近平总书记强调，要“深化人工智能等数字技术应用，构建美丽中国数字化治理体系，建设绿色智慧的数字生态文明”。这一重要论述充分体现了人工智能在生态环境治理中的重要地位。围绕三监联动的管控场景，研发的智能感知技术、精准管控技术、智慧调度体系等创新性工作为生态环境智慧治理提供了关键的技术支持，推动了生态环境监管工作，并对实现美丽北京生态环境治理的数字化转型建设工作做出了积极的贡献。



图 2-2 北京市大气三监联动精准治污调度平台示意图

四、政策效果

2022 年以来，“三监”联动精细化治理新模式为北京市的大气污染治理提供了精准的靶向治理支撑，截至目前，该体系已经对 1.7 万余条环境问题线索实现闭环管理，问题查实率 80% 左右，管理时效性提升至小时级，非现场监管比例提升至五成，全面实现了大气环境管理的实时监测感知、智慧分析研判、高效精准调度，“三监”联动有力提升精准、科学、依法治污效能，推动大气污染治理能力现代化，支撑北京市持续深入打好蓝天保卫战，给市民带来了越来越多、实实在在的蓝天。

高水平支撑日常环境管理和应急应对工作。日常监管和污染过程期间，借助“三监”联动机制及技术支撑体系，我们能做到动态预报污染过程，支撑减排管理决策，锁定和推送问题线索，全市精准调度和执法，实时评估追踪措施落实，实现精细监测、科学溯源、精准分析和高效执法。例如，在应对达不到预警启动条件的污染过程时，及时启动了“三监”联动，快速推送问题线索，要求问题整改做到“快下快上、日产日消”，并逐日跟踪评估治理措施的落实情况。评估结果显示，在启动“三监”联动推进采取减排措施后，实际的污染程度比未采取减排措施的情景下降了一个等级，充分体现其在污染“削峰降速”中的关键作用。

赋能污染源监管实现非现场手段创新应用。“三监”大模型把空气质量、污染源、经济社会运行等各方面的数据进行了融合和集成，它能够进行智慧的研判分析，非常准确地溯源和定位到具体是哪一个区域、哪一部分的污染源，对空气质量造成了影响，实现了看得清、打得准，既“无处不在”，有力督促企业等责任主体杜绝侥幸心理、落实治污减排责任，又对守法企业“无事不扰”，进一步优化了营商环境。以 VOCs 无组织排放监管为例，监测部门以往很难精准定位排放浓度的高值点，现在则可以结合历史数据、企业生产情况等信息，精细安排走航路线，全面覆盖重点区域和点位。在发现高值区后，执法人员会迅速开展现场排查，并通过便携设备定位污染源，做到“边测边查、边查边办”。这种方式显著提升了执法效能和污染源监管能力。

“三监”联动是一种协同作战、高效运转、科学智慧的工作模式，达到了 1+1+1>3 的效果，进一步提升了精准治污、科学治污、依法治污的能力，推动了环境治理体系和治理能力现代化。

五、未来规划

随着北京大气污染防治迈入精细化攻坚阶段，空气质量改善面临 $PM_{2.5}$ 浓度从“30”向“20”质变跃升的新阶段，2025 年 1 月，北京市发布污染防治攻坚“路线图”，提出实施“0.1 微克”攻坚行动守护“北京蓝”，面向更高阶段的大气污染治理需求，在 $PM_{2.5}$ 稳定达标的基础上，下一步治理工作将更关注重点区域、重点时段和重点污染源的精准管控，着力提升问题识别、风险预警与动态响应的能力，“三监”联动将以智慧大脑为枢纽，通过提升统筹调度能力、智慧监测能力、非现场监控能力，为科学决策与精准调度提供强大支撑，助力北京实现从“一微克”行动到“0.1 微克”攻坚行动的跨越。

加强超大城市北京大气污染精准防治与智慧决策支撑能力建设。针对美丽北京建设中空气质量持续改善的要求，推进大气环境现代化治理能力的提升，充分利用大数据、人工智能技术，构建智能化、易获取的集“评

价、诊断、预警、研判、决策”一体化技术支撑体系，实现大气环境分析问题的智能推理，全面支撑“0.1 微克”攻坚行动。

以大气三监联动为基础，持续推动全要素三监联动走向智慧化。以大气为牵引，协同治理水、土壤、固废等，实现环境质量整体跃升。“三监”联动将进一步提升污染问题的发现效率、研判能力和闭环处置水平，推动治理工作向“反应更快、识别更准、治理更稳”的方向发展。

加快推进现代化监测体系建设，打造美丽中国数智化转型先行区。以智慧化为大方向，以建设“全国数智化转型先行区”为战略引领，实现“技术突破—场景落地—经验输出”的数智化转型示范效应，持续为全国探索深度治理路径提供经验参考，为建设美丽中国贡献“北京方案”和“北京智慧”。

03

上海

深化工业源 VOCs 减排
构建臭氧与细颗粒物协同治理新格局



一、背景概述

良好生态环境是最公平的公共产品，是最普惠的民生福祉。党的十八大以来，我国将大气污染防治工作纳入经济社会发展全局，先后实施《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等重大决策部署，推动大气污染防治实现历史性变革，主要污染物排放量大幅削减，空气质量显著改善。

然而，当前我国大气污染治理仍面临 $\text{PM}_{2.5}$ 污染形势依然严峻和 O_3 污染日益凸显的双重压力。挥发性有机物（VOCs）是 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 中二次有机气溶胶的共同关键前体物，持续推进 VOCs 减排，是从根本上解决 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 复合型污染问题的核心路径，也是促进产业结构调整、推动经济高质量发展的重要手段。在此背景下，工业源作为 VOCs 的重要来源，其治理工作是大气污染防治的重中之重。

上海市作为长三角核心城市和全国重要的工业基地，大气污染长期呈现 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 复合污染的典型特征。近年来，上海的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度虽然持续下降，但 O_3 污染问题却依然突出，已成为影响环境空气质量优良率的首要制约因素。统计数据显示（如图 3-1），2020–2024 年期间， O_3 作为首要污染物的污染日占比达到 66.4%。 O_3 污染问题得不到有效解决，将严重影响空气质量的进一步改善。研究表明，上海市工业源 VOCs 排放约占全市总量的近七成，其中石化化工行业与含溶剂产品使用行业是两大主要来源，占比均

在三成左右。这一排放结构决定了强化工业源 VOCs 治理是上海市协同控制 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染、实现空气质量持续改善的核心举措。

自 2013 年起，上海市已在此领域开展了系统性工作。通过构建并完善 VOCs 地方性法律法规及标准规范体系、强化财税等经济政策激励引导、创新实施“一厂一策”精细化管理制度等系统性举措，上海已先后完成两轮工业企业 VOCs 治理，探索形成了一条从“无”到“有”、由“有”向“精”的 VOCs 治理之路。

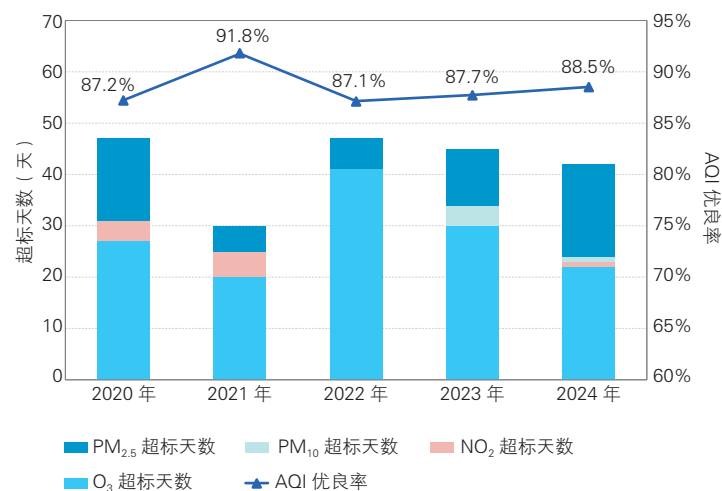


图 3-1 2020-2024 年上海市 AQI 优良率变化及污染日中首要污染物占比图

二、发展历程

上海市的工业源 VOCs 治理工作循序渐进、持续深化，大致可分为三个阶段。

探索起步阶段（2007–2013 年）

上海市是全国最早开展工业源 VOCs 污染治理的城市之一。2007 年，在第一次全国污染源普查工作中，上海便主动将 VOCs 列入普查范围，并据此建立了较为完整的工业源 VOCs 排放清单，为后续的科学管控奠定了坚实基础。

2010 年，上海以举办第 41 届世界博览会为契机，进一步强化生态环境管理工作，揭开了工业源 VOCs 工程治理的序幕。2011 年，上海市生态环境局（时为上海市环境保护局，以下统称“市生态环境局”）发布《上海市重点化工企业（区）挥发性有机物（VOCs）控制试点工作实施方案》，重点从两个方面探索管控路径：一是聚焦石化企业开停工检维修过程，要求上海石化、高桥石化、上海赛科等试点单位加强生产管理，减少非计划开停工并削减 VOCs 排放；二是聚焦设备密封点泄漏，要求上海石化乙烯事业部、高桥石化炼油事业部、上海华谊丙烯酸、上海赛科率先开展泄漏检测与修复（LDAR）试点。这也使上海市成为国内最早对 VOCs 泄漏进行系统管控的城市，有力推动了 LDAR 等先进技术在国内的推广应用。

系统推进阶段（2013–2017 年）

在前期探索的基础上，上海市开启了第一轮工业源 VOCs 全面治理（即 VOCs 治理 1.0），逐步形成了以重点行业为纲、经济激励为引、规范管理为基的综合治理体系。

2014 年 3 月，市生态环境局印发关于《开展本市挥发性有机物（VOCs）排放重点企业污染治理工作》的通知，要求全市 150 家重点工业企业编制 VOCs 减排“一厂一方案”，并在 2015 年底前完成治理工作。2015 年 7 月，市生态环境局会同市发展改革委、市财政局联合印发《上海市工业挥发性有机物治理和减排方案》和《上海市工业挥发性有机物减排企业污染治理项目专项扶持操作办法》，将 VOCs 治理范围扩大至 2000 余家工业企业，并设立专项资金对符合条件的项目予以经济支持。为确保政策落地，2016 年 3 月，市生态环境局又发布《上海市工业挥发性有机物减排企业污染治理项目专项扶持操作办法实施细则》，进一步明确补贴的支持范围、申请流程、申请条件、现场核实要求以及补贴认定等工作要点，对按时开展的 LDAR、末端治理及在线监测项目分类型给予差异化财政补贴。

截至 2017 年底，全市累计完成 2026 家工业企业的治理任务，实现 VOCs 减排约 10 万吨，超额完成阶段性减排目标。

深化治理阶段（2020 年至今）

2020 年初，上海市通过发布关于《开展本市重点行业挥发性有机物综合治理工作》的通知，启动了新一轮工业源 VOCs 深化治理工作（即 VOCs 治理 2.0）。更加突出精准治污、科学治污、依法治污，强调源头防控、过程管控与末端严控相结合的全过程减排路线，治理模式也从上一阶段的“一厂一方案”更新为更为系统化的“一行一表、照表施治”，推动 VOCs 治理持续向精细化水平迈进。

2021 年，面对全球经济下行与新冠疫情双重冲击，市生态

环境局会同相关部门及时出台新一轮专项扶持办法，遵循“多减多补”的原则，将补贴额度与企业实际减排量直接挂钩，重点支持三类项目：一是通过涉 VOCs 产品或原辅材料替代、工艺和装备改进等技术实现源头削减的项目；二是通过气液平衡、密封提效等措施控制逸散排放的过程管控项目；三是通过密闭收集、运维增效等技术实现深度减排的末端治理项目。同年 11 月，市生态环境局印发《上海市重点行业企业挥发性有机物综合治理工作推进细化方案》，进一步对 VOCs 治理时限、减排量核算与报告编制要求等作出具体规定，为本轮深化治理工作的有序推进提供了清晰的行动指南。



三、实施机制

在工业源 VOCs 治理工作中，上海市逐步建立了一套职责清晰、路径明确、保障有力的实施机制，主要体现在组织协同、分步推进和政策引导三个方面，有效保障了各项治理措施的落地见效。

建立多部门协同的组织保障体系

建立了市、区两级联动，多部门分工协作的工作机制。市级层面，市生态环境局发挥牵头作用，负责总体规划、政策制定和统一监管；市发展改革委做好产业政策的衔接，并将 VOCs 管控要求纳入相关产业发展规划；市财政局负责落实专项治理的资金保障。区级层面，各区生态环境部门作为属地监管主体，具体负责辖区内企业的政策传达、技术指导和日常监督。企业作为污染治理的责任主体，负责制定并落实 VOCs 治理方案，确保稳定达标排放。同时，技术支撑机构（如上海市环境科学研究院）则提供全过程技术支持，包括政策标准研究、企业技术指导、治理效果评估等。此外还充分发挥行业协会的作用，组织开展技术交流和培训。

采用分阶段递进的工作推进模式

全市治理工作遵循“由点及面、由浅入深”的原则，通过阶段性递进，逐步实现治理工作的规范化和精细化。在第一轮治理（1.0 阶段）中，采用“先试点、后推广”的方式，从 150 家重点企业起步，逐步将治理范围扩大至全市 2000 余家企业。在深化治理（2.0 阶段）中，治理范围有

了进一步的扩展，将全市 24 个重点行业、4 个通用工序以及 1 个典型排放过程（异味排放）全面纳入整治，形成了“24+4+1”的全覆盖治理局面。两个阶段的治理工作均遵循“明确治理要求—编制治理方案—组织技术评估—落实工程措施”的规范化实施流程，确保工作推进的科学性和有效性。

推行激励与约束相结合的路线方针

VOCs 治理过程中，始终坚持引导与约束相结合，综合运用财政补贴与排污收费等经济杠杆，引导和倒逼企业主动减排。在第一轮治理中，政策侧重于对治理行为的差异化支持。激励方面，对 LDAR、末端治理及在线监测三类项目，分别按 10 元/密封点、20 元/立方米每小时风量、20 万元/套的标准给予补贴，单个企业补贴上限为 1000 万元。约束方面，同步实施 VOCs 排污收费制度，并将收费标准从 10 元/千克逐步上调至 20 元/千克。进入深化治理阶段后，政策重心转向以治理成效为导向。激励机制调整为依据核定的 VOCs 减排量，按 10 万元/吨的标准给予补贴，不再区分具体项目类型。这一调整更加注重实际减排效果，有力地激发了企业实施深度治理的内生动力。

四、配套措施

上海市在推进工业源 VOCs 治理的核心举措包括法律法规保驾护航、标准规范科学指引、系列政策组合施治、一厂一策核心驱动、聚焦问题精准帮扶等诸多方面，这些措施协同发力，保证了减排效果。

法律法规保驾护航

2014 年，《上海市大气污染防治条例》发布并实施，明确规定了 VOCs 污染防治要求及对应罚则，为 VOCs 污染管控提供了强大的法律依据。比如，条例首次提出 VOCs 无组织排放要“应收尽收”，要求产生含 VOCs 废气的生产经营活动在密闭空间或者设备中进行，并设置废气收集和处理系统且保持正常使用。条例还在第四十九条、第五十条和第五十一条条款中对 VOCs 进行明确规定，如鼓励生产、使用低 VOCs 含量的原料和产品；医院、学校及幼托机构等环境敏感区域内禁止使用高 VOCs 含量的产品；在化工、表面涂装、包装印刷等重点行业逐步推进低 VOCs 含量产品的使用；市环保部门应当会同市质量技术监督等部门，制定本市重点行业 VOCs 排放标准、技术规范；原油和成品油码头、加油站、储油库、油罐车、服装干洗行业等应当配备 VOCs 回收装置。

标准规范科学指引

近十年来，上海市围绕工业源 VOCs 治理，先后研究制定 11 项排放标准和 10 余项典型行业 VOCs 污染控制技术规范，涵盖汽车制造、家具制造、船舶工业、制药工业、包

装印刷等重点行业。目前，上海市已经形成了较为完善的固定源 VOCs 排放管理标准体系，为重点行业实施 VOCs 排放控制提供了科学依据。其中，部分标准的核心指标已经处于国际先进水平，一些管控指标甚至严于发达国家和地区的要求（如表 3-1）。

系列政策组合施治

综合运用多种政策工具打“组合拳”是上海市 VOCs 治理的一大特点，也是一贯坚持的基本路线。比如，在 VOCs 治理 1.0 阶段，管理部门先发布《上海市工业挥发性有机物治理和减排方案》，明确治理方向和任务；随后出台《上海市工业挥发性有机物减排企业污染治理项目专项扶持操作办法》及实施细则，通过财政补贴调动企业减排积极性，鼓励企业率先减排。同时，根据《上海市挥发性有机物（VOCs）排污收费试点实施办法》，依阶段、依行业开展 VOCs 排污收费，倒逼企业大幅削减 VOCs 排放。这些政策相互衔接、同向发力，有力保障了 VOCs 减排落地见效。

一厂一策核心驱动

上海市是国内最早提出并实施“一厂一策”治理模式的城市。2014 年，市生态环境局在相关通知中就明确提出通过制定“一厂一方案”（即“一厂一策”）推动企业实施 VOCs 治理。自此之后，“一厂一策”成为上海 VOCs 治理工作的主要抓手，也成为 1.0 和 2.0 阶段 VOCs 治理工作的核心驱动。2019 年，生态环境部发布的《重点行业挥发性有机物综合

治理方案》，将“一厂一策”作为一项普遍要求在全国推广。截至目前，江苏省、浙江省、山东省、四川省、福建、河南省、湖北省等地的逾百座城市，已陆续开展 VOCs “一厂一策”减排方案编制及相关治理工作。

聚焦问题精准帮扶

在 VOCs 治理推进过程中，市生态环境局先后多次会同新闻出版局、印刷协会、家具协会、船舶协会、汽车协会、

汽修协会、化学建材协会、涂料染料行业协会等相关单位，分行业组织开展 20 余场专题培训，聚焦热点问题开展精准帮扶，为相关企业传经送宝、答疑解惑。同时，充分利用新媒体平台，持续开展减排政策和先进技术宣传。通过系统性的政策引导和技术帮扶，企业在污染治理方面的认识水平和技术能力得到明显提升，逐步形成了主动治理、规范管理的良好局面。

表 3-1 上海市针对 VOCs 治理出台的部分标准规范

序号	标准名称	标准号
1	汽车制造业（涂装）大气污染物排放标准	DB31/859—2014
2	大气污染物综合排放标准	DB31/933—2015（2025 年已修订）
3	船舶工业大气污染物排放标准	DB31/934—2015
4	涂料、油墨及其类似产品制造工业大气污染物排放标准	DB31/881—2015（2024 年已修订）
5	印刷业大气污染物排放标准	DB31/872—2015（2024 年已修订）
6	恶臭（异味）污染物排放标准	DB31/1025—2016
7	家具制造业大气污染物排放标准	DB31/1059—2017
8	汽车维修行业大气污染物排放标准	DB31/1288—2021
9	制药工业大气污染物排放标准	DB31/310005—2021
10	设备泄漏挥发性有机物排放控制技术规范	DB31/T 310007—2021
11	半导体行业污染物排放标准	DB31/374—2024

五、政策效果

通过持续、系统地推进工业源 VOCs 治理，上海市不仅在环境效益上取得了显著成果，同时也带动了相关环保产业发展，实现了环境、经济效益的双赢。

环境效益方面，一系列 VOCs 治理措施的深入实施，有效推动了全市 VOCs 排放总量的持续削减，对 PM_{2.5} 和 O₃ 的协同控制发挥了关键作用。2020 年是重要的里程碑年份，全市空气质量考核指标首次实现全面达标，空气质量优良率达到 87.2%，大幅超过该项考核要求（75.1%）。其中，PM_{2.5} 年均浓度降至 32 μg/m³，远低于国家下达上海市的“十三五”考核目标（42 μg/m³），也首次低于国家环境空气质量二级标准（35 μg/m³），此后 PM_{2.5} 年均浓度持续下降，2022 年进一步降至 25 μg/m³，并连续多年稳定在优于国家标准水平（如图 3-2）。此外，在全国及区域 O₃ 浓度普

遍呈上升趋势的背景下，上海市 O₃ 污染的快速增长势头得到有效遏制，已成功扭转 2017 年（181 μg/m³）的峰值水平，浓度在 2021 年回落至 145 μg/m³（如图 3-3）。

经济效益方面，差别化补贴政策有效撬动了企业治理投入，促进了地方环保产业的发展。从 VOCs 治理 1.0 到 2.0 阶段，补贴机制不断优化，财政激励从基于项目类型补贴转为基于减排量补贴，实现“多减多补”，更加突出减排成效。同时，分阶段实施 VOCs 排污收费全面覆盖重点排放行业，在激励与约束双重作用下，VOCs 治理需求催生了完整的产业链条，带动了设备制造、工程服务、运维管理、技术咨询等相关产业发展，不仅形成了新的经济增长点，而且推动了治理相关技术装备的研发创新，提升了上海市环保产业的整体技术水平和市场竞争力。

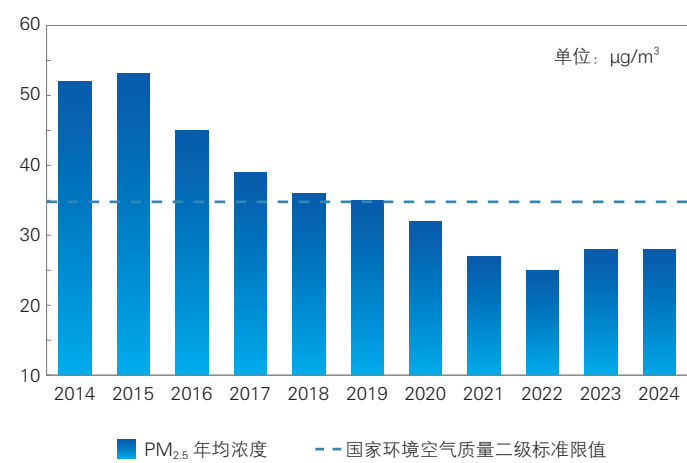


图 3-2 2014-2024 年上海市 PM_{2.5} 年均浓度变化趋势

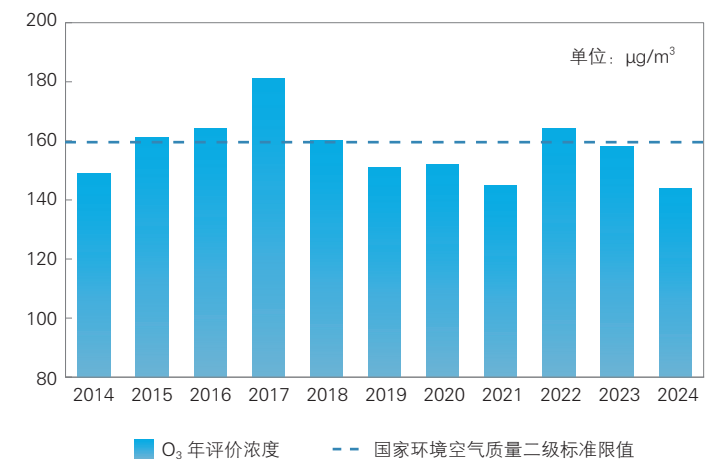


图 3-3 2014-2024 年上海市 O₃ 年评价浓度变化趋势

六、经验总结

上海市通过长期探索与实践，在工业源 VOCs 治理领域形成了一套可复制、可推广的治理模式，其经验对于其他地区开展相关工作具有积极的借鉴意义。总体来看，主要经验可归纳为以下四个方面。

一是坚持顶层设计与分步实施相结合。上海 VOCs 治理工作始终坚持系统性谋划，推进路径清晰有序。从 2007 年的排放清单摸底等基础性工作，到 2011 年启动重点企业试点，再到 2014 年后分阶段、分批次全面推开，直至 2020 年开启深化治理新阶段，工作部署始终循序渐进、层层深入。这种“先行探索、以点带面、稳步推开”的模式，确保了治理范围从重点企业平稳拓展至全市所有相关行业企业，保证了各阶段治理工作的扎实有效。

二是坚持制度创新与治理模式升级。在治理实践中，注重结合实际进行制度创新。2014 年在全国率先提出并实施“一厂一策”，引导企业制定针对性减排方案，该做法的有效性得到了国家层面认可并获推广。进入深化治理阶段后，又与时俱进地将模式升级为“一行一表、照表施治”，通过为不同行业提供标准化的治理任务清单，实现了从“个性化方案”到“标准化管理”的跨越，大幅提升了治理工作的精准度和效能。

三是坚持政策协同与多方联动并举。注重统筹运用激励、约束和法治等多种手段，形成政策“组合拳”。在治理过程中，将财政补贴等正向激励政策、排污收费等反向约束机制以及严格的执法监管有机结合，使各项政策工具相互支撑、协同发力。这种多管齐下的综合治理体系，有效调动了企业的主动性与积极性，形成了推动 VOCs 减排的强大合力，确保了各项治理任务的有效落实。

四是坚持精准施策与依法治理结合。始终将科学、精准、依法的原则贯穿 VOCs 治理全过程。一方面，根据不同行业的产排污特征制定差异化的治理标准与技术规范，为企业提供清晰的治理指引，并优先将排放量大、活性强、环境影响显著的行业纳入管控重点，实施分级分类管理，确保治理资源用在刀刃上。另一方面，将严格执法与优化服务相结合，在依法依规开展监管的同时，积极为企业提供政策解读和技术帮扶，体现了“放管服”改革的要求，推动企业从“要我治理”向“我要治理”转变。

七、未来规划

随着治理工作不断推进，上海市工业源 VOCs 治理进入深挖减排潜能的新阶段。这对政策体系的完备性、技术水平的先进性和日常管理的精细度均提出了新的更高要求。展望未来，上海市将在巩固现有治理成果的基础上，继续坚持源头削减、过程管控和末端治理协同发力的全链条治理思路，推动 VOCs 治理水平再上新台阶，为实现更高水平的空气质量改善目标提供有力支撑。

持续深化源头替代，提升绿色发展水平

未来将继续把源头替代作为治本之策，聚焦涂料油墨生产、汽车制造、船舶制造、工程机械、家具制造、包装印刷等重点溶剂使用行业，系统性推动提质增效。一是大力推广低（无）VOCs 含量原辅材料的使用，进一步提高绿色原辅材料在工业生产中的应用比例。二是积极引导企业实施绿色工艺改造，采用无需或减少使用 VOCs 的新技术、新设备。三是严格落实国家和地方关于涂料、油墨、胶粘剂、清洗剂等产品的 VOCs 含量限值标准，强化对相关产品生产、销售和使用等环节的全过程监管。

聚焦无组织逸散排放，补齐过程管控短板

现阶段，VOCs 的无组织逸散排放仍是工业企业管控的重点和难点。下一步，将重点针对石化、化工等行业的开停车、设备检维修、火炬排放等非正常工况，研究制定相应的管控标准和技术规范，将其纳入制度化、规范化管理轨道。同时，对于船舶制造维修等行业的露天喷涂作业，将在推动源头替代的基础上，进一步强化过程管理，研究提高废气有效捕集率的技术路径，最大限度减少逸散排放。

提升末端治理效能，实施差异化精准监管

为确保稳定减排成效，未来将对 VOCs 末端治理设施实施更为精细化的分类监管。比如，对于采用焚烧（RTO/TO）等高效治理工艺的设施，将严格依据上海市相关规定，推广安装在线监测系统（CEMS），实现对排放水平的实时监控。对于采用活性炭吸附等简易治理工艺的设施，将重点考虑推广基于关键参数（比如温湿压流等）的生产工况监控技术，以较低成本实现对该类设施运行状态的常态化、数字化监管，切实保障 VOCs 治理设施稳定有效运行。



04

上海

构建重型柴油车排放智慧监管体系
助力移动源精细化治理升级



11027

一、背景概述

上海市是中国国际经济、金融、贸易、航运、科技创新中心和国家物流枢纽，集装箱吞吐量和货物吞吐量分别居全球第一和第二，以重型柴油车为主的公路货物运输需求庞大。截至 2024 年底，全市重型柴油车近 22.2 万辆，分布在全市 2 万余个市场主体，占全市汽车总量的 5%，其 NO_x 和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放占全市机动车排放总量的 83% 和 81%。

重型柴油车使用强度大、运营里程长、单车排放水平高，常年处于高负荷运行状态，尾气净化装置劣化率高，油品质量参差不齐，因此高排放问题突出，是深入打好蓝天保卫战的治理重点。监控结果表明，全市重型柴油车中存在高排放、故障报警或尿素不正常添加等问题的车辆占比超过 5%，其排放水平是正常排放车辆的 3~5 倍。与此同时，重型柴油车涉及市场主体多、流动性强、活动范围大，油品及 NO_x 还原剂添加渠道复杂，难以实现集中、实时、高效监管。大数据分析结果表明，全市 2 万余家运输企业每日实时进出上海的重型柴油车高达 28 万辆次，其中 5% 的车辆日均行驶里程高达 300 公里；全市车用柴油和 NO_x 还

原剂每日加注点数量均达到 1158 个，其中 379 余个为非社会化运营的内部加油站，监管难度相当大。如何利用数字化、智慧化手段，提升重型柴油车污染防治效能，实现“依法治污，精准治污”一直是生态环境主管部门工作重点。

加强柴油车污染治理力度、提升柴油车管理智慧化水平，是当前深入打好蓝天保卫战的重点任务和内在要求。国务院出台的《空气质量持续改善行动计划》、生态环境部等部委出台的《深入打好重污染天气消除、臭氧污染防治和柴油货车污染治理攻坚战行动方案》和《上海市清洁空气行动计划（2023—2025 年）》，均针对重型柴油车污染治理提出了新的要求，治理工作需要由过去以提升新车标准和淘汰老旧车辆为主的模式，向以智慧化驱动的“车、油、路、企”全链条管理转变。为持续改善上海市空气质量、降低重型柴油车环境影响、提升重型柴油车污染防治效能、提高重型柴油车监管效率，上海市环境科学研究院牵头开发了上海市重型柴油车排放智慧监管系统，实现移动源领域“车、油、路、企”各环节污染防治智慧化、自动化，实现精准治污、科学治污、依法治污。

二、发展历程

体系奠基，全面建设（2018–2021 年）

2018 年发布的《柴油货车污染治理攻坚战行动计划》明确要求加快重型柴油车远程在线监控体系建设。上海市积极响应，在“十四五”规划和《深入打好污染防治攻坚战实施意见》等政策指引下，确立了“依法治污、科学治污、精准治污”的方针，运用数字化、智能化手段推动移动源污染防治能力现代化。同年，上海市率先在重点道路布局机动车排放遥感监测设备，强化路检路查，实现国家、省、市三级排放监测平台数据互联互通，初步搭建远程监控网络框架。

2020 年 4 月，上海市生态环境局会同交通、公安等六部门联合印发《推进重型柴油车污染物排放远程在线监控工作方案》，明确提出加快远程车载诊断（OBD）终端安装和监控系统建设，到 2020 年底力争重点车辆 OBD 安装基本全覆盖，这标志着全市重型柴油车远程在线监控系统建设全面启动。到 2021 年底，监管系统架构基本完成，并具备大数据并发接收与排放特征动态分析等核心能力。



功能完善，实战应用（2022–2024 年）

经过两年，上海市建成了全国首个大规模重型柴油车排放智慧监管系统（如图 4-1）。截至 2025 年 10 月，已有 20 万余辆重型柴油车接入监控系统，实现车辆排放数据的实时上传。上海市陆续开发了“车－油－路－企”全环节，“单车－车队－行业”全链条的监管场景，形成全市运行排放概览，构建了基于地理围栏的区域的实时车辆运行、排放统计规则，能够实现秒级时间精度的区域实时监控和米级的重型车排放地图。

基于此系统，能够实现车、油、路、企一体化综合管理。车辆管理方面，开发了车辆排放特征提取算法规则，能够勾勒立体的车辆排放画像，并建立了车辆排放分级管理体系。油品管理方面，开发了非社会加油站识别、监管指引和动态跟踪算法规则，建立了非社会加油站“识别定位—属性认定—上门督察—证据移交”闭环管理体系。道路管理方面，系统能够实现排放热点道路识别和监管，精准捕捉关键枢纽区域重型柴油车排放的主要运输通道。企业管理方面，开发了行业涉车企业车辆监管和排放表征方法，建立了不同行业热点区域识别和跟踪监控算法规则、重点用车大户车辆排放管理体系和相关行业企业的排放表征方法。



图 4-1 重型柴油车排放大数据智慧监管系统

三、实施机制

该系统搭建了适应上海市重型柴油车管理需求的系统架构和数字底座，并利用大数据算法、人工智能模式识别算法和地理信息逆解析算法工具，结合车辆运行、排放动态数据，建立多种重型柴油车监管应用规则，开发了面向“车－油－路－企”等对象的应用场景，利用数字化、智慧化手段，提升了重型柴油车污染防治效能，实现了“依法治污，精准治污”。

多源融合的系统架构和数字底座

系统聚焦全市重型柴油车排放监管，以运行排放监控数据、故障数据为基础，融合车辆技术信息、运营信息、地理信息，

构建起适应上海市重型柴油车管理需求的系统架构和数字底座。系统集成的数据涵盖北斗导航实时监控的 24.9 万辆重型柴油车全量运行数据（含本地注册及进出上海的外牌车辆）、具备 OBD 终端的 18.7 万辆重型柴油车实时排放监控数据(新注册车辆实时更新)，156 家全市检测与维护(I/ M) 机构、8 个港口码头、323 家重点企业、1661 个社会加油站以及 522 个施工工地。

在此基础上，系统构建了面向“车－油－路－企”等对象的应用场景，实现“车辆－企业－行业－区域”不同层级重型柴油车排放的全时空、全链条“科学化、精准化”监管。此外，系统基于分层建设理念，搭建网络层、基础设施层、

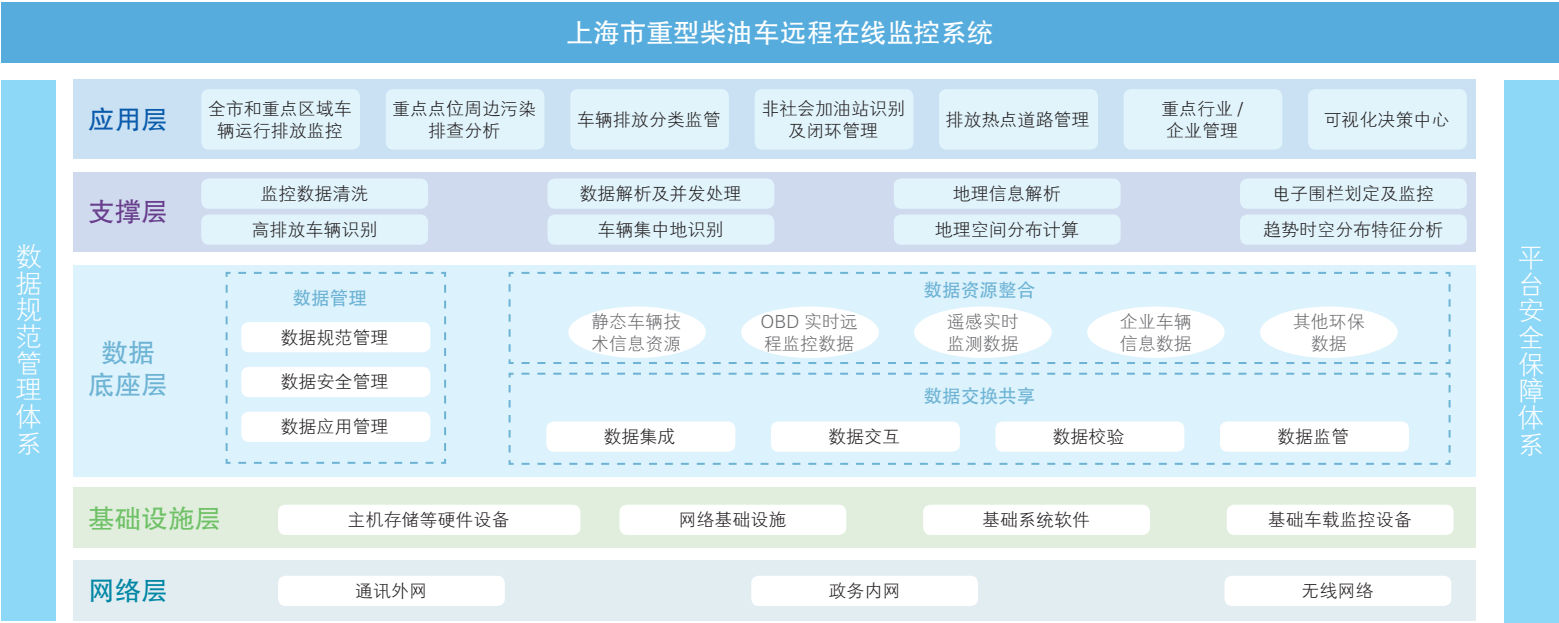


图 4-2 重型柴油车排放大数据智慧监管系统架构

数字底座层、支撑层及应用层共 5 层大数据系统架构，同时兼顾数据规范管理体系与系统安全保障体系，如图 4-2。

在大数据管理方面，系统基于 Hadoop 生态，采用分布式架构方式，搭建集群服务器，使用 HDFS 技术为数据提供存储，通过 kafka 传输数据，使用 Hbase 数据库，对大数据进行随机性的实时读取/写入访问，保证数据的高可靠性、高性能、面向列及可伸缩性。系统采用 MapReduce 技术对海量数据进行计算，提升数据并行处理能力，提高安全

性和数据处理规模。根据业务需求，对数据进行挖掘分析，数据挖掘分析结果用 BI 看板的方式进行直观展现。

高时空分辨率的全市概览

在全市概览部分，系统可全面掌握全市及重点区域不同排放标准、车型的重型柴油车运行与排放情况，以及车辆运行对环境的影响（如图 4-3）。系统融合了重型柴油车北斗导航实时定位、远程排放监控及地理兴趣点等大数据资

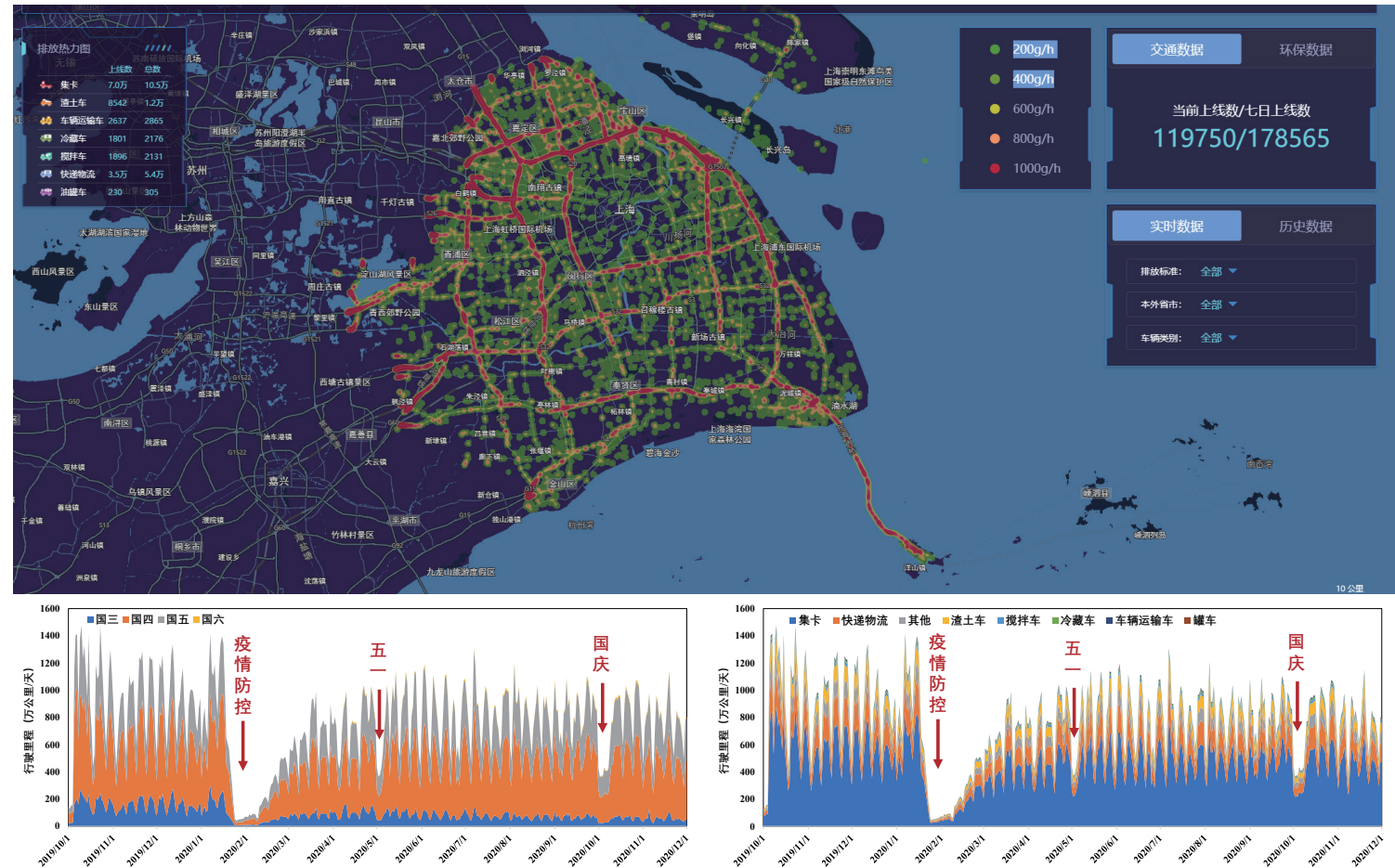


图 4-3 不同车型与排放标准重型柴油车实时排放变化

源, 实现对全域不同车型、排放标准和区域重型柴油车运行和排放的实时监控; 通过数据矢量切片算法可将数据转化为矢量图片, 实时绘制展示不同排放标准、车型和区域重型柴油车各类污染物排放、能耗以及 CO₂ 排放的实时变化和分布情况。

基于大数据的车辆排放分级管理

系统基于重型柴油车排放水平评估算法，能够实现针对高排放车“识别—定位—治理”的闭环管理。重型柴油车流动性大、监管困难，传统单车管理模式对高排放车辆的执法效率低下。为解决这一难点，系统开发了高排放及问题车辆闭环管理应用场景。该场景采用监督学习算法，实现

了车辆实际排放情况的实时跟踪及排放相关故障的实时诊断，实现了尿素不规范使用、尾气净化装置屏蔽等潜在高排放问题的识别、诊断和预警。系统还进一步开发了高排放问题车辆接口，通过与交通部门营运车队基本信息的实时交互，实现了用车大户问题车辆排放及运行调度情况的实时监控。依托上述功能，系统建立了重型柴油车排放的闭环管理机制，可实时生成故障车辆清单、用车大户名单及集中停放地址，并建立黑名单制度，定期推送执法监管部门，实现了“识别—定位—治理”闭环管理全链条智慧化监管。

同时，系统还搭建了针对清洁车辆免于定期排放检验的监控模块。长期以来，重型柴油车每年都要进行“定期体检”，



图 4-4 清洁车辆免于定期排放检验管理体系

检查排放是否达标。为了响应国家和本市提升数字治理能力的总方针，让“数据多跑路”，减轻车主负担，支持运输行业复工复产，上海市出台了《关于实施污染物排放远程在线监控重型柴油车免于排放检验的通告》。该通告提出，对安装污染物排放远程在线监控并联网且稳定达标排放的重型柴油车，在定期排放检验时免于排放检验。对此，系统可以通过分析数据完整性、连续性以及是否存在异常高排放和排放相关故障等信息，判定每辆联网车辆是否可以享受免年检待遇（如图 4-4）。

基于聚类算法的非社会加油站闭环管理

在油品加注管理部分，系统结合车辆燃料加注数据，基于 DBSCAN 聚类算法和地理信息逆解析技术，实现非社会加油点“识别定位—属性认定—上门督察—证据移交”闭环管理。

过去，重型柴油车所用油品质量参差不齐，劣质油品及 NO_x 还原剂流通极易导致车辆尾气净化装置失效，造成高排放。上海市货运集疏运车辆运行集中，存在大量物流场站未经许可或不规范经营加油和加注 NO_x 还原剂等现象，油品和还原剂质量难以得到有效控制。为解决这一难题，系统基于车辆油箱液位实时监控，采用 DBSCAN 人工智能聚类算法和地理信息逆解析技术，开发了非社会加油站动态监管应用场景，通过与社会加油站及物流场站等地理信息动态比对，实现了非社会加油站地理位置、加注次数、加注车辆及用车大户等信息的实时监控。

基于上述应用场景，上海市建立了非社会加油站闭环管理机制，定期向执法监管部门推送非社会加油站名单，为精

准定位疑似不规范加油经营点提供了重要线索，极大地提升了非社会加油站的执法检查效率。为方便执法部门现场核查，上海市还开发了加油站核查小程序，供各区生态环境局、市场监管局使用。

基于起讫点分析的道路监管

系统结合车辆运行、排放规律，基于 O-D 算法和路网匹配算法，实现全市排放热点道路的识别和监控，为区域移动源减排提供决策支撑。系统开发了重点企业和港口码头货运通道排放跟踪应用场景，可实时监控与上述港口码头和企业相关车辆到发数量、行驶轨迹和排放情况，精准捕捉关键枢纽区域重型柴油车排放的主要运输通道，为重点区域重型柴油车优化调度提供技术支撑。

基于上述功能，系统进一步开发了重点企业和港口码头清洁运输措施的实时评估模块，可在重大活动或重污染应对期间，实时评估企业和港口码头清洁运输措施的落实情况及效果。同时，系统开发了“热点识别—标记—跟踪”算法，可实现对重点企业和港口码头相关集疏运车辆货运通道排放的实时跟踪。

基于电子围栏技术的企业管理

在企业管理部分，系统结合监督学习算法、DBSCAN 人工智能聚类算法和地理信息逆解析技术，通过分析渣土车、集装箱运输车、厢式货车和油罐车到达、出发运行特征，可以动态识别工地、堆场、物流场站、重点企业；结合路网、水网、铁路网数据，可以自动绘制地理围栏，这为监控相关工地、堆场、物流场站、行业重点的企业运行情况以及

企业用车清洁化提供了基础，极大地提高了相关企业主体车辆集中停放地的识别效率，为主管部门提供了精准监管指引。

同时，系统也能够对企业运营情况实施监控。结合自动识别到的企业地理围栏和车辆运行情况，系统能够监控工地、堆场、物流场站、重点企业对象的车辆运行排放情况，进而表征企业实际生产、排放情况，实现对相关企业的动态排放跟踪，依此可以为生态环境管理部门动态掌握相关行业活动信息和管控措施落实情况提供重要信息，也为区域动态排放情况提供数据驱动。

基于数字孪生理念的可视化展示中心

为了更好支撑生态环境主管部门决策，系统建设了上海市重型柴油车排放监管可视化中心界面。基于数字孪生理念，系统利用地图可视化技术，将不同功能场景、图层、元素集成在一张地图上，建设了智慧地图中心，同时利用 BI 数据可视化技术，汇总不同功能场景的实时结果，按层次集成诊断数据，开发了环保数据展示中心。



四、实施效果

通过建设并深化应用重型柴油车排放智慧监管系统，有效支撑了老旧车辆淘汰、限行管理及清洁车辆免年检等减排措施的落实。

首先，系统已成为上海市重型柴油车污染防治措施效果评估的重要工具，全面支撑了老旧柴油车淘汰效益的动态跟踪评估。在国三柴油车限行淘汰工作中，系统支撑分析了全市国三、国四、国五重型柴油车从 2019 年底至 2020 年底的运行和分布情况演变过程（如图 4-5）。分析结果显示，对国三柴油车实施分阶段限行、淘汰后，全市 $PM_{2.5}$ 和 NO_x 排放较实施前分别下降 13.1% 和 13.4%。

其次，在车辆清洁化管理上，系统对清洁柴油车免年检实践起到了重要作用。为了提高在用车监管效率，提振道路运输行业信心，减轻行业负担，上海市生态环境局在我院技术支撑下结合排放监控数据，制定了重型柴油车免年检政策。我院开发的免年检车辆识别模块已于 2023 年 1 月 1 日正式上线运行。截至 2025 年 9 月底，累计有 10.6 万柴油车可以享受免年检政策优惠，累计免年检量为 9.2 万辆左右，为车主节省资金 1472 余万元。免年检政策在减轻车主负担的同时，可以促进更规范使用车辆，按要求加注车用油品以及尿素等 NO_x 还原剂，及时消除发动机及尾气净化系统存在的故障，降低车辆排放水平，提高车辆排放达标率。

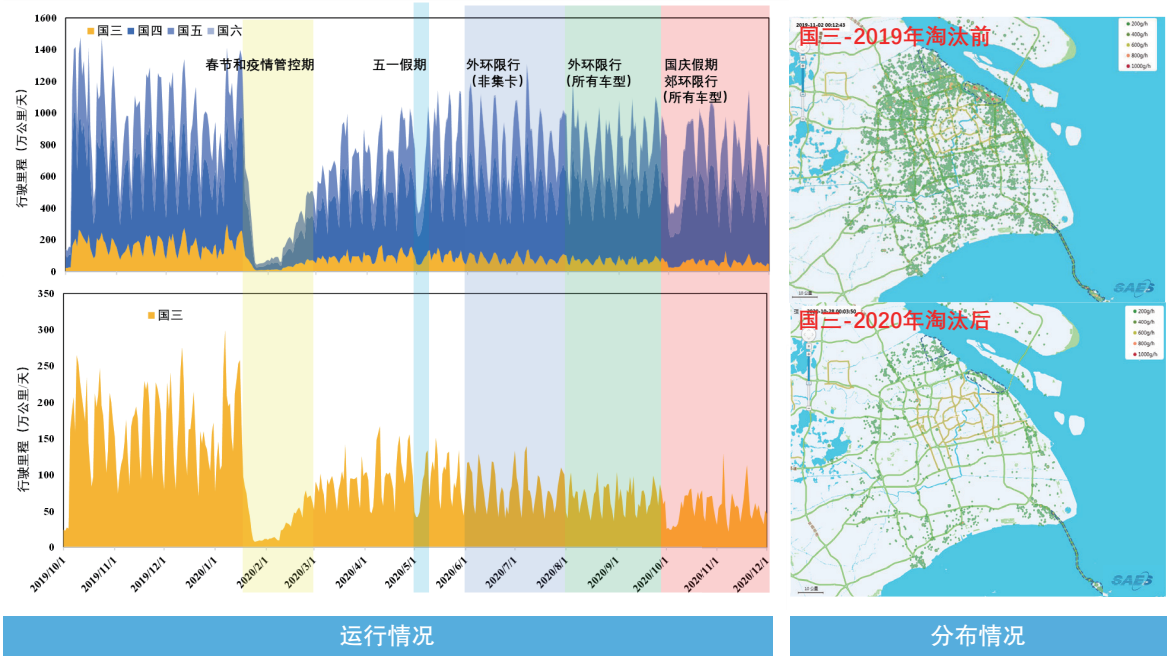


图 4-5 国三柴油车限行、淘汰效果

五、经验总结

上海市重型柴油车排放智慧监管系统有如下三点先进性：

一是实现了大城市重型柴油车运行和排放全天候实时监管。系统融合了北斗导航实时定位、远程排放监控及地理兴趣点等多源大数据资源，搭建了具备高并发监控数据高速接收、解析和存储能力的先进系统结构，可实时监控全域和重点区域不同车型、排放标准重型柴油车的运行和排放，并可识别重点企业和港口码头货运通道和动态跟踪排放，彻底消除了全市重型柴油车监管盲点，为移动源排放监管部门指明了监管重点。

二是支撑了大城市重型柴油车“车辆－企业－行业－区域”全链条智慧化监管。系统结合车辆排放和故障信息、营运

基础信息、运行活动特征，基于高排放车辆识别算法、人工智能聚类算法和地理信息逆解析算法，实现了自下而上的对车辆、车辆所属企业及行业、用车大户的一体化全链条监管，破解了定期排放检验高排放车辆识别效率低、路查路检针对性差和威慑性弱等问题。

三是构建了大城市重型柴油车“车、油、路、企”全过程闭环管理体系。系统集成高排放车辆识别功能、非社会加油站识别功能、货运通道识别和跟踪功能以及用车大户识别跟踪功能，消除了车辆在用符合性监管、燃料监管、货运通道监控和优化、重点用车大户监管中的管理盲区，解决了不同层级监管需求融合难、统筹难的问题，大大提高了重型柴油车排放监管效能。

六、未来规划

深入推进上海市重型柴油车排放大数据智慧监管系统建设，旨在完成蓝天保卫战的重点任务，破解传统定期排放检验、路查路检、黑烟抓拍等手段无法实现对全市海量柴油车的动态达标监管的难题，提升重型柴油车污染防治效能，提高重型柴油车监管效率，降低重型柴油车的环境影响，推动移动源领域“车、油、路、企”各环节污染防治智慧化、自动化，实现精准治污、科学治污、依法治污，助力上海市空气质量持续改善。

未来，上海市将在目前系统的基础上，重点开发以下场景：重型柴油车相关多源数据整合模块、区域重型柴油车动态运行排放监控、重型柴油车排放健康状态诊断、全市加油车辆点位规范管理及劣质油品溯源、道路及重点点位重型柴油车流量排放预测、挥发性化学品运输车辆运行和 VOCs 泄漏监控、易扬尘行业渣土车运行及扬尘监管、重大活动和临时管控措施自动汇总评估等。

05

成都

探索近零碳施工工地

引领建筑施工场景协同减污降碳



一、背景概述

“十三五”期间成都市空气质量持续改善，2020年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度为 $41\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较2015年下降28.1%。但进入“十四五”后，改善步伐明显放缓，2021–2022年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度维持在 $40\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右，距离达标（ $35\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）仍有明显差距。同时， O_3 污染问题凸显，空气质量改善动力明显不足。 NO_2 作为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 的重要前体物，其浓度长期处于全国168个重点城市靠后水平，成为制约协同治理成效的关键因素。

移动源和扬尘是成都市空气污染的重要来源。2022年底，移动源对 NO_x 和VOCs的排放占比分别达到87%和25%，对 $\text{PM}_{2.5}$ 的综合贡献为38.8%；扬尘对 $\text{PM}_{2.5}$ 贡献比例约为20%，同时随着建筑工地增加呈波动变化趋势；工地扬尘、道路扬尘直接排放的一次颗粒物在全社会颗粒物排放总量中占比超过60%。

建筑工地是扬尘和移动源排放的叠加集中区。施工过程中，大量工程机械与运输车辆高强度运行，直接排放大量 NO_x 、VOCs、PM等，并产生大量扬尘，对空气质量造成直接压力。同时，施工环节设备多、能耗高，也带来较多碳排放。2022年，全国建筑业建造阶段碳排放占全国能源相关碳排放的26.6%。可见，加强建筑工地排放管控，不仅能够推动成都市在新阶段实现空气质量持续改善，还兼顾协同降碳效益。

为有效应对目前空气质量持续改善面临的难题，成都市以近零碳施工工地试点为突破口，积极探索在建筑工地推广新能源工程机械和运输车辆，并将绿色低碳理念深度融入施工全流程，推动从施工到运营的全生命周期绿色转型。当前，首个试点项目选址于天府新区科学城中路东段南侧的天府新区天府永兴实验室，园区占地约65亩，总建筑面积约154143平方米，如图5-1所示。基于此，成都市力求在有效控制施工期大气污染排放的同时，实现建筑业绿色低碳转型，为城市空气质量持续改善和协同降碳提供可复制推广的示范经验。



图 5-1 天府永兴实验室园区建设项目（一期）效果图

二、发展历程

在推进近零碳施工工地试点工作中，成都市生态环境局积极担当，先后多次组织召开专题会议，围绕试点工作目标、技术实施难点以及面临的各类壁垒展开深入研讨，凝聚多方智慧力量，针对性研究具有可操作性的解决思路，为试点工作有序推进夯实基础，逐步推动试点工作开展。2023 年 10 月，

市生态环境局召开首次专题研讨会，明确了政府主导、企业实施的总体思路后，随后召开多次工作会议，逐步完善实施方案。至 2024 年 4 月，首个试点项目——天府永兴实验室园区建设项目（一期）正式获批，标志着近零碳施工工地试点开始进入实施阶段，如表 5-1。

表 5-1 成都市近零碳施工工地试点工作推进关键节点

时间	组织部门	会议内容
2023.10.31	市生态环境局	组织召开首次近零碳工地研讨会，邀请相关企业及专家探讨近零碳工地实施路径，初步明确“政府主导、企业实施”的试点工作原则，采取“边试边评”的方式，重点推进建设工地使用频率高、污染排放大的非道路移动机械、货运车辆等移动源的新能源替代，并明确将绿色低碳理念贯穿工地施工的全过程。
2023.11–2024.02	市生态环境局 市住建局	组织研究制定试点工作方案，邀请徐工集团、同创柳工、中联重科、三一重工、四川邦立重机等机械生产企业对新能源机械替代匹配问题和试点项目合作进行探讨，共同研究新能源机械替代匹配和成本核算等问题。
2024.03.06	市生态环境局 市住建局	联合印发《成都市“近零碳施工工地”试点工作方案（试行）》（成环发〔2024〕20号），并组织各区（市）县和建设单位积极申报试点工地。
2024.04.25	市生态环境局 市住建局	实地考察申报的试点工地，批复同意天府永兴实验室园区建设项目（一期）作为成都市首个近零碳施工工地试点项目。

三、实施机制

成都市近零碳施工工地试点工作严格遵循“政府主导、企业实施”的基本原则，建立了多部门协同推进机制。各参与主体依据职能分工明确职责，并通过政企协同、多方联动，系统构建起贯穿施工全过程的管理体系。

政府主管部门负责政策制定、统筹协调与进度跟踪。市生态环境局牵头制定试点工作方案并明确实施路径；组织研讨会和工作推进会，协调解决新能源机械匹配及成本核算问题；审批试点项目并每月跟踪进展，确保政策落地和问题及时解决，并委派成都市环科院、成都市机动车排气中心进行技术指导及跟踪评价。市住建局联合市生态环境局印发试点方案，参与试点工地筛选与管理，监督低碳施工措施落实。协助对接施工单位和建设单位，推动新能源机械应用。属地管理部门落实配套保障。四川天府新区生态环境和城市管理局制定属地试点政策，组建专班强化组织

保障。保障充电设施需求，统筹新能源商混车供应，协调渣土就近消纳，优化夜间施工管理，确保项目按期推进。

实施企业严格履行施工主体责任。在试点工作中，成都天投集团作为建设单位，会委托第三方机构开展碳核算评估，配合政策实施，协调施工方落实减排措施，确保数据真实性和减排目标达成。中国五冶集团作为施工单位，将近零碳要求纳入施工方案，专人负责试点工作。执行新能源机械替代和节能措施，配合数据监测与减排优化。

此外，中国国检集团作为第三方机构独立开展监测评估，制定碳核算方案，开发监测系统实时跟踪数据。全程核查核证，确保数据准确性，并及时提出减排建议或策略。设备供应商则提供新能源设备并参与新能源机械替代匹配和成本核算等工作。



四、配套措施

在推进近零碳施工工地试点过程中，成都市以天府永兴实验室园区建设项目（一期）为示范案例，以新能源替代为核心，辅以全过程管理，叠加光伏发电、污染防治等手段，从多维度构建配套措施体系。

新能源替代与配套支持

本试点聚焦工程机械和重型货车两大类设备，由市生态环境局牵头，引入徐工集团、三一重工等新能源设备生产企业参与替代匹配研究，推动设备新能源化。为了保障顺利推进，四川天府新区生态环境和城市管理局牵头出台支持措施，包括开辟新能源重卡充电专用通道，优先保障试点项目充电需求；协调临时用地建设内部充电桩并协调电容电力，满足场内洒水车和机械充电需求，保障试点项目用电负荷；定向协调新能源商混车供应、强化管控期间混凝土浇筑夜间施工保障及就近渣土消纳场，保障施工进度。对于因特殊施工情况不能使用新能源替代的环节，则从管理方式和制度方面推进减排，如合理规划场内运行路线、运作时间。

目前，新能源设备替代取得阶段性进展，如表 5-2。在土石方挖掘阶段受市场供给、运输距离、施工工期、地质条件等多方因素约束，渣土车新能源车次替代比例较低，仅有 26%，挖掘机仅使用 1 台新能源设备进行回填作业。在基础及主体施工阶段，新能源替代比例较高，商混车新能源车次占比高达 93.5%；锚杆机、曲臂车、剪叉式高空作业平台实现 100% 新能源（电动）替换，洒水车新能源作业量占 44%，地泵新能源工程量占 36%。

表 5-2 新能源设备替代情况

类型	替代情况
渣土车	共使用渣土车 8116 辆次，其中新能源渣土车运输 2072 辆次，新能源车次占比为 26%
商混车	共使用商混车 10683 辆次，其中新能源商混车 9988 辆次，新能源车次占比为 93.5%
洒水车	总计 3 台洒水车，其中燃油车 2 台，新能源车 1 台，新能源洒水车作业量占总量的 44%
锚杆机	新能源抗浮锚杆机 8 台，100% 替换
曲臂车	使用新能源曲臂车 50 台，替换燃油登高车、曲臂车等，实现登高机械清洁能源 100% 替换
挖掘机	使用 1 台新能源挖掘机替换燃油挖机进行肥槽土方回填
地泵	使用新能源地泵，工程量占比为 36%
剪叉式高空作业平台	100% 使用电动设备
原材料运输车	钢材运输，部分采用新能源车辆运输

扬尘管控和绿色施工

在施工过程中，扬尘是影响空气质量的重要因素。为有效控制扬尘排放，本试点创新建设吊塔雾炮喷淋装置，建设期间共计使用吊塔 6 台，且全部安装雾炮喷淋装置，可 100% 实现施工现场高空高效降尘。在主体建筑建设阶段，每隔 4 层布置一圈腰带喷淋，实现主体施工全覆盖降尘。

同时，配置 7 台 360° 高压旋喷桩，可充分保障施工现场主要道路和基坑全覆盖抑尘。通过这些措施，能够有效减少施工过程产生的扬尘以及对周边空气质量的影响。

除扬尘治理外，本试点还注重绿色施工实践。试点建成 48m² 光伏发电板和 14m² 碲化镉发电玻璃，累计发电 5267 kW·h，可以满足办公区 6% 用电需求；部署太阳能路灯、LED 节能灯等可再生能源设施，建成 7 台太阳能路灯、6 台节能 LED 灯，用于道路和基坑照明。此外，施工现场回收混凝土、砖块等建筑废弃物，经破碎、清洗、分级后，造石机重新打磨成型，重新加工为再利用低碳建材，并用于总坪铺装，减少建筑的隐含碳排放。

全过程管理

本案例构建“监测—核证—优化”闭环体系，搭建了近零碳施工工地智慧碳监测系统，如图 5-2。智慧监测系统能够实时展示排放数据，动态调整减排方案；建立纸质与电子台账规范管理流程；组织专业技术团队，针对各排放源（移动机械载具、重点耗能设备）进行能耗监测，核查核证加油记录、充电记录、电表读数、发电记录等，确保数据真实可靠，为科学决策提供依据，针对现场发现的问题进行总结、提出解决办法，针对工地碳排放管理进行现场培训。



图 5-2 近零碳施工工地智慧碳监测系统

五、政策效果

成都市近零碳施工工地试点项目——天府永兴实验室园区建设项目（一期），是全国首个从设计到施工到运维的全生命周期绿色低碳项目，产生了突出的环境效益和一定的社会效益。

在环境效益方面，本试点项目通过新能源设备替代、精细化管理等措施，大幅降低工地施工过程对环境的多重压力。如表 5-3 所示，大气污染物减排与协同降碳成效显著，SO₂、NO_x、VOCs、PM₁₀、PM_{2.5} 的减排比例为 37%、22%、17%、19%、19%；分阶段来看，基础及主体阶段的新能源替代率相对于土石方阶段更高，其大气污染物减排效果优于土方阶段，各污染物减排比例均达到 50% 左右，其中 SO₂ 减排比例更是达到 76%；相比未采取措施的预估排放量减少了 33%，新能源设备替代贡献了 99%，其余主要来自生物质燃油和新能源发电。此外，项目结合光伏发电系统、太阳能路灯和节能 LED 照明系统，有效降低了对传统电网的依赖及化石能源消耗，还

通过应用节能建筑材料显著减少能源消耗和实现资源循环利用。测算结果显示，项目累计节约能耗 155 万 kW·h，较普通建筑能耗降低 52%，成功打造出超低能耗的绿色建筑示范工程。

在社会效益方面，本案例以绿色低碳理念指导施工全过程，取得了积极的社会效益，主要体现在以下方面：一是推动行业绿色转型。通过示范应用，促进建筑业从“高碳粗放”向“低碳精细”模式转变，形成可复制、可推广的绿色施工经验。二是改善居民生活环境。减少噪音、扬尘和尾气污染，有效减少施工对周边社区的影响，提升居民生活满意度及环保意识。三是促进就业与技术升级。新能源机械运维、智慧监测系统开发等需求创造了新的就业岗位，同时推动施工人员技能向绿色低碳方向升级。四是提升城市可持续发展形象。成都市通过打造近零碳施工工地示范标杆，增强城市韧性及在绿色建筑领域的引领作用。

表 5-3 大气污染物与二氧化碳减排情况

施工阶段	类别	SO ₂ (kg)	NO _x (kg)	VOCs (kg)	PM ₁₀ (kg)	PM _{2.5} (kg)	CO ₂ (t)
土方阶段	预估排放	74.9	3117.6	297.4	159.6	158.9	1174.8
	实际排放	52.3	2770.6	283.6	150.7	150.2	913.1
	减排量	22.6	347.0	13.8	9.0	8.7	261.7
	减排比例	30%	11%	5%	6%	6%	22%
基础、主体阶段	预估排放	12.1	1238.2	113.7	73.6	72.9	469.0
	实际排放	2.9	625.1	56.8	37.6	37.1	196.4
	减排量	9.2	613.1	56.9	36.0	35.9	272.5
	减排比例	76%	50%	50%	49%	49%	58%
试点以来	预估排放	87.1	4355.7	411.1	233.2	231.9	1643.8
	实际排放	55.2	3395.7	340.4	188.3	187.2	1109.5
	减排量	31.9	960.1	70.7	44.9	44.6	534.3
	减排比例	37%	22%	17%	19%	19%	33%

六、挑战与对策

成都市近零碳施工工地试点为抓手，探索了以新能源设备替代和全过程管理为核心的大气污染物减排与协同降碳的新路径。试点过程中，成都市建立了“政府主导、企业实施”的推进机制，明确各方职责，通过典型项目的边试边评，逐步完善管理模式，地方政府提供了充电设施、电力保障等配套支持，引入第三方机构参与数据监测和核证，确保减排成效真实可追溯，这些举措为近零碳施工工地推广积累了宝贵经验。然而，在推进过程中仍面临多重挑战，需通过针对性、精细化措施从以下五方面推进问题的解决。

升级新能源设备技术与供给体系，满足施工工地多样化需求。当前市场上新能源工程机械的类型与数量有限，难以满足建筑施工工地多样化的机械、车辆需求。此外，部分机械生产企业仅提供订购服务，不支持设备租赁，进一步限制了新能源机械的使用。为破解这一问题，未来将以美丽成都、美丽社区建设为抓手，出台相关财政补贴和激励政策，鼓励生产企业扩大设备生产与投放，满足工地多样化的使用需求。同时，强化关键技术攻关和成本优化，推动氢燃料重型卡车、电动挖掘机等成熟技术应用，同时配套建设工地微电网，推广“光伏+储能”一体化临时供电系统，从生命周期层面全面推进近零碳施工工地试点。

强化智慧监测确保全过程监管，有力支撑科学决策和管理优化。由于建设工地完工后数据具有不可追溯性，场景无法重现，施工过程中数据的准确监测至关重要。若在施工过程中未能有效兼顾减污降碳管理工作，易出现数据上报延迟、填报不规范、监测不准确等问题，进而影响数据的真实性与准确性。为解决这一问题，成都市开发智慧监测系统（如成都市智慧碳监测系统），实现全过程监管，并引入第三方核查机构全过程核证，确保数据透明可追溯，为科学决策和管理优化提供有力支撑。

加强前期风险识别与过程动态管理，增强试点工作治理韧性。在试点项目实施过程中，需注重提前识别潜在风险，如设备供应不足、运输路线不合理、施工组织不规范等，并制定应对措施，减少对工期、成本、减排成效的影响。通过科学规划，指导重点区域内政府投资的工地，将减污降碳的要求纳入立项、设计、施工、验收、使用等全过程管理，实现建筑工地全过程大气污染物和碳减排，同时注意动态调整，如协调机械供应、优化运输规划等，提高试点项目的应对能力和治理韧性，保障各项工作稳步推进。

统筹协调建设成本与进度优化，保障试点项目高效稳步实施。虽然新能源机械节省的能源成本可弥补部分租金差异，但由于大型新能源工程机械在全国范围内分布零散，高昂的运输费用远超使用成本。同时，新能源渣土车、商混车等设备运量较小，若运输距离规划不合理，将导致项目进度滞后，增加建设工期与成本。通过优化运输路线规划，协调就近资源（如渣土场、充电设施），并以长期能源节省效益平衡初期成本，从而降低工期与成本压力，保障项目顺利平稳推进。

分阶段推进试点体系建设，加快形成可复制推广模式。近零碳工地试点需覆盖工程项目从图纸设计至竣工验收的全流程，而非单一施工阶段。由于不同类型工地适用的评价标准存在差异，试点工作面临高要求、高难度的挑战。目前试点范围仅涵盖房屋建筑类工地，其他类型工地的试点工作尚未开展。对此，未来需要分阶段推进持续打造近零碳施工工地场景试点，总结目前试点工作经验，加快形成可复制推广的实施体系和评价体系，并逐步扩展至其他类型，激发各行业和各部门打造近零碳施工工地的内生动力。

亚洲清洁空气中心中国办公室



北京市朝阳区秀水街 1 号建国门外外交公寓 3-41, 100600

邮箱 : china@cleanairasia.org

电话 / 传真 : +86 10 8532 6172

网址 : www.cleanairasia.org www.allaboutair.cn