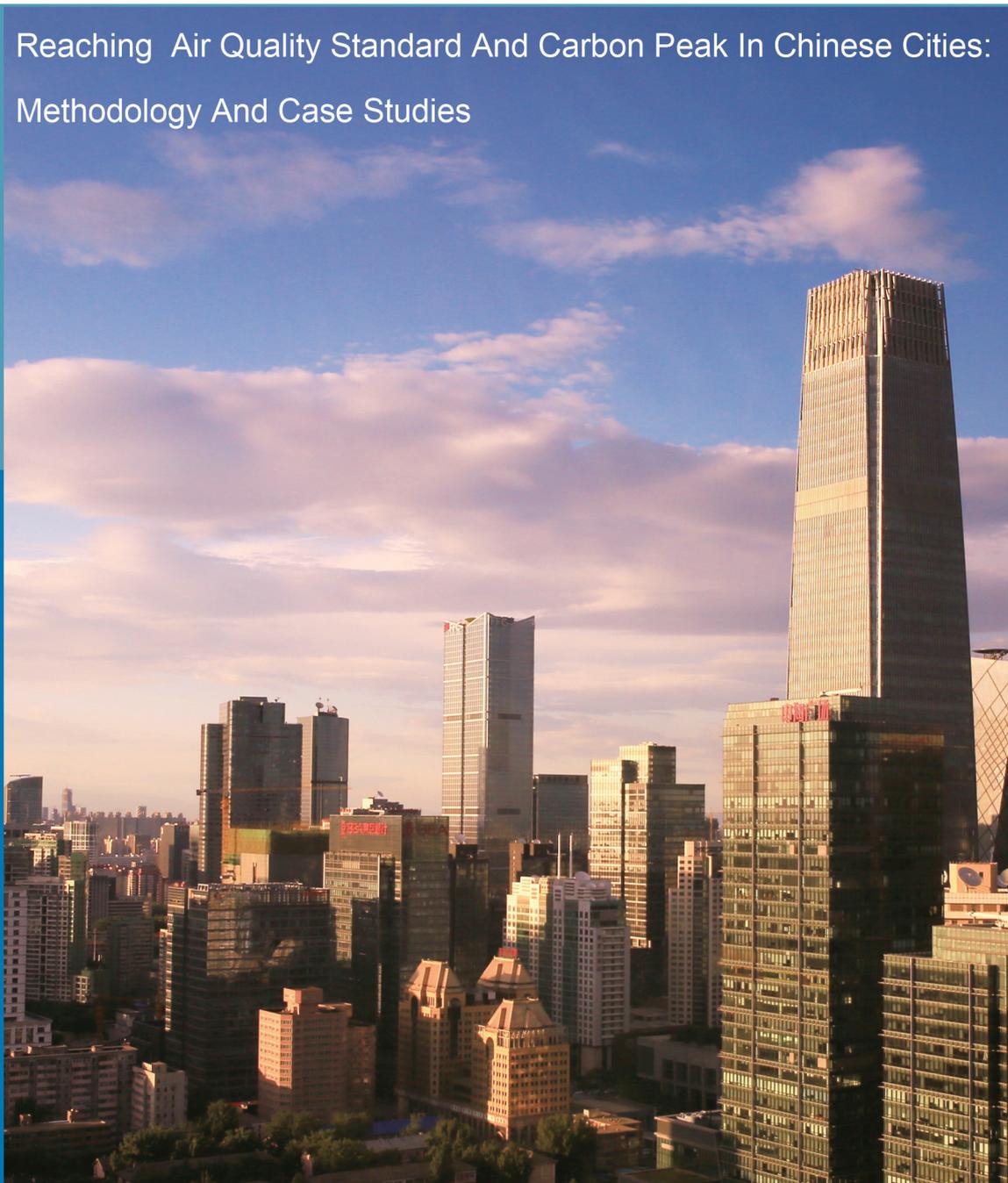


中国城市空气质量达标与碳排放达峰

方法及案例研究

Reaching Air Quality Standard And Carbon Peak In Chinese Cities:
Methodology And Case Studies

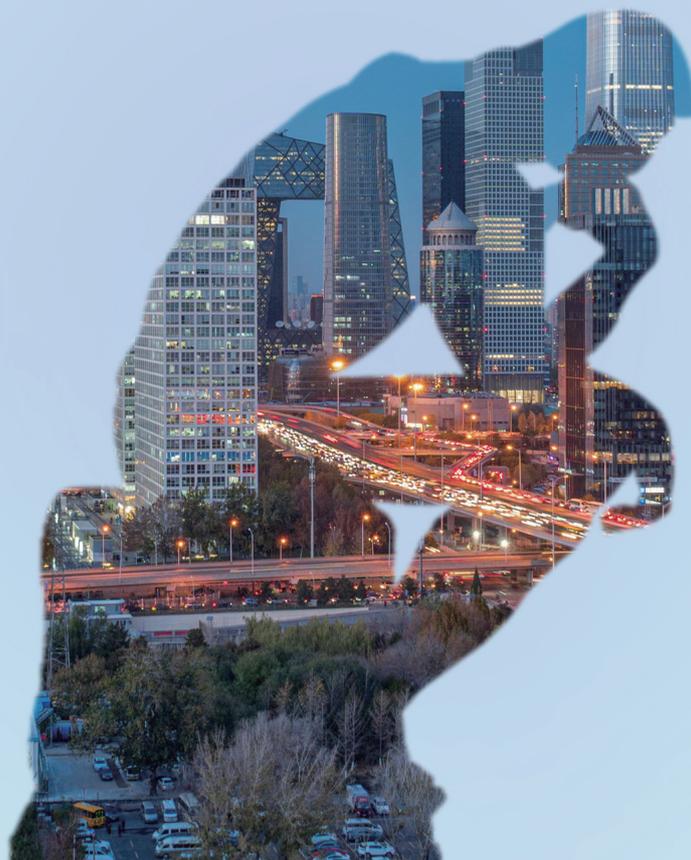


清华大学 2023.5

Tsinghua University May, 2023

中国城市空气质量达标与 碳排放达峰方法及案例研究

Reaching Air Quality Standard And Carbon Peak In Chinese Cities:
Methodology And Case Studies



清华大学 2023.5

Tsinghua University May, 2023

关于报告

在能源基金会的支持下，清华大学贺克斌院士和张强教授团队编制了《中国城市空气质量达标与碳排放达峰方法及案例研究》（以下简称“双达”报告），旨在基于自下而上的城市排放清单，建立经济－能源－排放耦合动态响应分析方法以及不同类型城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架，动态预测未来中国城市能源和排放的变化，综合评估产业、能源、交通、用地结构调整各措施带来的减排效益，探讨空气质量目标导向下城市“双达”的路径和策略，为国家和地方机构改革背景下“双达”在城市层面的实践提供研究参考和决策依据。

ABOUT THE Report

With the support of the Energy Foundation China, the team of Academician He Kebin and Professor Zhang Qiang of Tsinghua University compiled "Reaching Air Quality Standard And Carbon Peak In Chinese Cities: Methodology And Case Studies" (Hereinafter referred to as the "Dual Reach" report), aiming to build an economic-energy-emission coupled dynamic response analysis method as well as the collaborative analysis framework of achieving air quality standards and peaking carbon emission in different types of cities, dynamically predict future changes in energy and emissions in Chinese cities, and comprehensively evaluate the impact of various measures for industrial, energy, transportation, and land use structure adjustments. Furthermore, we also explore the pathways and strategies of "Dual Reach" under the guidance of air quality goals. This report provides the research reference and decision-making basis for the practice of "Dual Reach" at the city level under the background of national and local institutional reforms.

作者团队

贺克斌 清华大学 / 中国工程院
张 强 清华大学
薄 宇 中国科学院大气物理研究所
施沁人 清华大学
宋子谦 清华大学深圳国际研究生院
张露瑶 清华大学
孙世达 清华大学
徐晨曦 清华大学
张改革 清华大学



关于作者

贺克斌，中国工程院院士，清华大学环境学院教授、院长，清华大学碳中和研究院院长，中国工程院环境与轻纺工程学部主任，从事大气污染防治研究 30 多年，被认为是中国大气污染防治与公共健康领域顶尖专家之一。国家有关酸雨与 PM_{2.5} 污染防治的行动计划中均有很多重要研究成果，包括其主持建立的中国多尺度排放清单模型（MEIC）在线平台，确立的结合排放、观察与模拟的新污染源解析方法，以及其所开发的针对大气污染防治解决方案的动态评估模型。

ABOUT THE AUTHORS

Professor He Kebin, academician of the Chinese Academy of Engineering; professor and dean of the School of Environment, Tsinghua University; dean of the Carbon Neutral Research Institute of Tsinghua University; director of the Department of Environmental and Textile Engineering of the Chinese Academy of Engineering. Prof. He has been conducting research on air pollution control for over 30 years, is widely regarded as one of China's top experts in the fields of air quality and public health. He made significant achievements that have been implemented in national action plan on acid rain and PM_{2.5} pollution control, including the development of an online platform of Multi-resolution Emission Inventory for China (MEIC), the establishment of a new approach for source apportionment of integrating emission, observation, and simulation, and the development of a dynamic assessment model for air pollution control solutions.

致谢

本研究由清华大学统筹撰写，由能源基金会提供资金支持。

ACKNOWLEDGEMENT

This report is a product of Tsinghua University and is funded by Energy Foundation China.

目录

CATALOG

中国城市空气质量达标与碳排放达峰方法及案例研究

1 研究背景和目标	1
1.1 研究背景	2
1.1.1 中国空气质量达标与碳排放达峰所面临的挑战	2
1.1.2 城市空气质量达标及碳排放达峰协同路径的意义	3
1.2 研究目标	3
2 城市大气污染物与碳排放清单编制及措施评估方法	4
2.1 城市大气污染物及二氧化碳排放清单编制方法	5
2.2 措施评估方法	8
2.2.1 措施分类	8
2.2.2 措施评估	19
3 中国城市碳达峰与空气质量改善协同效益评估	21
3.1 已有研究进展	22
3.2 城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析方法	23
3.2.1 城市类型划分	23
3.2.2 中国城市尺度排放预测模型建立	25
3.2.3 情景设计方法	29
3.3 全国城市碳达峰与空气质量改善协同效益评估	30
3.3.1 碳达峰目标对城市空气质量改善的协同作用	30
3.3.2 协同目标对全国城市碳达峰与空气质量改善的推动作用	37
4 城市编制“双达”路径技术指南	46
4.1 城市大气污染物及二氧化碳排放特征及变化趋势分析	47
4.2 城市编制“双达”路径工作思路	52
4.3 城市编制“双达”路径工作内容	53

5 典型城市案例 56

5.1 综合服务业型城市.....	57
5.1.1 北京市“双达”路径分析.....	57
5.1.2 深圳市“双达”路径分析.....	66
5.2 偏轻工业型城市.....	75
5.2.1 济南市“双达”路径分析.....	75
5.2.2 成都市“双达”路径分析.....	84
5.2.3 苏州市“双达”路径分析.....	93
5.2.4 合肥市“双达”路径分析.....	101
5.3 偏重工业型城市.....	108
5.3.1 唐山市“双达”路径分析.....	108
5.3.2 郑州市“双达”路径分析.....	115
5.3.3 石家庄市“双达”路径分析.....	123

6 不同类型城市协同减排路径 133

6.1 综合服务业型城市.....	134
6.2 偏轻工业型城市.....	135
6.3 偏重工业型城市.....	136
6.4 能源生产型城市.....	137
6.5 旅游型城市.....	138
6.6 农业型城市.....	139

7 结论与展望..... 140

7.1 结论.....	141
7.2 减排措施总结.....	142
7.3 城市“双达”建议.....	142





1 研究背景和目标

在经济发展和快速城市化背景下，我国面临着来自空气污染和气候变化问题的双重挑战。以化石燃料为主的一次能源结构决定了我国温室气体和大气污染物排放具有高度同源性的特点，加强顶层设计、加快结构调整、深挖协同减排潜力将是我国应对空气污染和气候变化挑战的有效途径。

1.1 研究背景

1.1.1 中国空气质量达标与碳排放达峰所面临的挑战

在经济发展和快速城市化背景下，我国的经济增长取得了举世瞩目的成就，但经济的快速增长对生态环境造成了一定程度的破坏。改革开放以来，我国面临着来自空气污染治理和气候变化问题的双重挑战。近年来，以PM_{2.5}为特征的大气复合污染给我国人民身体健康和社会经济发展造成了不利影响。全国主要城市群地区均出现了不同程度的区域大气污染问题，空气质量达标与碳排放达峰，引发公众广泛关注。

党的十八大以来，我国的生态文明建设和生态环境保护进入了一个新的历史阶段，特别是随着2013年我国政府启动向污染宣战，相继发布了“大气十条”“水十条”和“土十条”后，大气污染防治取得了前所未有的成就。“十三五”时期，是我国生态环境质量改善成效最大、工作推进成效最好、得到公众乃至国际社会高度认可的五年，全面完成规定的各项任务，超额实现“十三五”提出的总体目标和量化指标。2021年全国339个地级以上城市中，218个城市环境空气质量达标，占比64.3%。其中，细颗粒物(PM_{2.5})年均浓度已实现“十三五”以来的“六连降”，浓度平均为30 μg/m³，空气质量优良天数比率达到87.5%，京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原等重点区域空气质量改善明显。

但就目前来看，我国产业结构、能源结构、运输结构还未发生根本性改变，资源环境承载能力接近或达到上限，依旧面临生态环境风险累积高发的局面。2021年全国339个地级及以上城市中仍有121个城市环境空气质量未达标，空气质量未达标城市数量超过1/3，与世界生态环境先进水平相比，与2035年美丽中国基本建成目标相比，与我国自

身的法律法规和环境标准要求相比，差距仍然很大。由于能源、工业以及民用领域的固定源污染减排潜力逐渐缩小，未来空气污染防治难度将加大，我国城市空气质量依然面临严峻挑战，以城市为单元的大气污染防治措施将持续推进与升级。

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第五次报告指出，人类活动很可能是造成气候变暖的主要原因。有证据显示，1750年至今的总人为辐射强度相比2005年报告中的数值提高了43%。在过去50年里，全球共发生1.1万多起由天气、气候和水导致的灾害，造成了200万人死亡和3.6万亿美元经济损失。由于气候变化的原因，极端天气和气候事件的发生频率、强度及严重性有所增加，各方已经在《巴黎协定》达成共识，在本世纪末，将全球平均气温较工业化前水平升高控制在2°C之内设定为基本目标，并为把升温控制在1.5°C之内而努力。IPCC第六次报告指出，自1850—1900年以来，全球地表平均温度已上升约1°C，并指出从未来20年的平均温度变化来看，全球升温预计将达到或超过1.5°C，并对未来超过1.5°C的全球升温水平的可能性进行了新的估计，指出除非立即、迅速和大规模地减少温室气体排放，否则将升温限制在接近1.5°C或甚至是2°C将是无法实现的。

中国目前是世界上最大的能源消耗国和碳排放国。作为负责任的大国，中国向《联合国气候变化框架公约》提交《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》文件，确定了到2030年的自主贡献目标，包括2030年左右二氧化碳排放达到峰值并争取尽早达峰、单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降60—65%。习近平总书记在第75届联合国大会一般性辩论上的讲话(2020年9月22日)：中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

从中国政府首次在联合国气候峰会上提出“努力争取二氧化碳排放总量尽早达到峰值”以来，我国开始积极应对气候变化。2013–2016 年中国碳排放总体呈平稳下降的趋势，然而 CDIAC、UN、BP 多个机构数据显示，2017 年受到经济上行等因素的影响，我国能源消费呈现出回暖态势，中国碳排放出现反弹。研究表明，2018 年中国碳排放相比 2017 年进一步上升，碳排放强度下降带来的减排量被重工业生产回暖和天然气使用增加带来的碳排放增量所抵消。截至 2020 年，中国碳排放强度比 2015 年降低了 18.8%，比 2005 年降低 48.4%，超过了向国际社会承诺的 40%–45% 的目标，基本扭转了二氧化碳排放快速增长的局面。但未来一段时间，我国能源需求总量还会持续增长，而非化石能源准备周期和建设周期长、投入高的特点将导致我国能源系统向非化石资源转型面临较大的阻力。综合来看，中国实现 2030 年达峰目标仍然面临着挑战。

1.1.2 城市空气质量达标及碳排放达峰协同路径的意义

在经济发展和快速城市化背景下，我国面临着来自空气污染和气候变化问题的双重挑战。以化石燃料为主的一次能源结构决定了我国温室

气体和大气污染物排放具有高度同源性的特点，加强顶层设计、加快结构调整、深挖协同减排潜力将是我国应对空气污染和气候变化挑战的有效途径。

城市是政策落地实施的基本单元，是实现协同减排的关键区域。目前，广州、大连、成都等城市已经开展空气质量达标规划研究，北京、武汉等城市提出了碳排放达峰目标，但能将两者统一起来的城市不多。根据各地区官网政策公开信息统计，截至 2022 年 4 月，全国 31 个省（区、市）目前仅有 26% 的省（区、市）制定并出台了推进碳达峰碳中和战略行动的实施意见。受资源禀赋、产业基础、区位特征等多方面因素的影响，各城市发展水平不一，产业结构和排放特征也有较大差异，未来的发展战略和减排路径也将显著不同。因此根据不同城市特点制订协同减排路径、探究我国空气质量达标和城市碳达峰间的协同作用，对实现我国城市尺度的协同减排具有关键意义；然后选择不同类型的城市，总结不同类型城市协同减排措施，编制城市协同减排典型案例集，并结合典型案例，提出不同类型城市开展协同减排工作的重点和思路，可供省、市两级生态环境管理部门和地方技术支撑部门开展协同“双达”培训、不同类型城市开展协同“双达”政策实践交流使用；同时也为决策者出台协同“双达”政策提供参考。

1.2 研究目标

（1）建立基于统一源分类体系与源排放表征技术方法的的城市尺度温室气体和大气污染物排放的清单编制方法；

（2）建立经济 – 能源 – 排放耦合动态响应分析方法以及城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架；

（3）以北京、深圳、成都、合肥等城市为典型案例城市，进行能源、经济发展预测，制定符

合其城市发展的城市协同“双达”路径，综合评估产业、能源、交通、用地结构调整各措施带来的减排效益。

（4）基于典型城市的实践案例，探讨空气质量目标导向下城市“双达”的路径和策略，为国家和地方机构改革背景下“双达”在城市层面的实践提供研究参考和决策依据。

2

城市大气污染物与碳排放清单编制及措施评估方法

建立高精度的城市排放清单是摸清城市排放现状、指导城市未来协同减排路径的基础。在我国步入减污降碳协同治理新阶段的大背景下，分析历史城市尺度大气污染物和碳排放特征、变化趋势及其驱动力具有重要意义。然而，目前仍然缺乏统一污染物与碳排放的、覆盖所有全国城市的高分辨率排放清单序列，以及对应的措施评估方法。



2.1 城市大气污染物及二氧化碳排放清单编制方法

建立高精度的城市排放清单是摸清城市排放现状、指导城市未来协同减排路径的基础。在我国步入减污降碳协同治理新阶段的大背景下，分析历史城市尺度大气污染物和碳排放特征、变化趋势及其驱动力具有重要意义。然而，目前仍然缺乏统一污染物与碳排放的、覆盖所有全国城市的高分辨率排放清单序列。

一方面，由于大气污染物和二氧化碳协同减排的概念在近年来我国提出“碳达峰碳中和”目标后才逐渐受到关注，过去我国城市大气污染物排放清单和碳排放清单的发展相对独立，并未形成统一的方法学。2013年以来以“2+26”区域为代表的部分城市基于自身空气质量管理的需求已经在《城市大气污染物排放清单手册》指导下初步建立了相对完整的大气污染物排放清单，但并未关注碳排放。另外有一些研究收集公开的城市年鉴数据（主要包括能源、工业产品产量等）

统一估算了中国部分城市的碳排放，但这类研究往往不讨论城市大气污染物排放或仅通过简化方法估算。

另一方面，缺乏完整的城市层面的基础数据成为制约全国城市尺度高分辨率排放清单发展的主要因素。由于基于代用参数将省级排放直接分配到城市无法反映精细尺度上的真实排放分布情况，应当尽可能使用城市级别的基础数据自下而上地建立城市排放清单以保证清单精度和准确性。然而，目前缺乏完整的、可支持建立全国大气污染物和碳排放清单的城市级基础数据，如城市能源消耗量、产品产量、各行业污染控制水平等。城市本地调研数据获取周期长且往往不对外公开，从城市统计年鉴中获取数据则存在数据缺失及口径不统一的问题。

为解决以上问题，本研究首先基于多源数据融合方法形成了完整的全国城市排放计算参数数



数据库，通过引入大量可定位至城市的电力和工业点源信息、在县一级开展机动车活动水平和排放因子的拟合及修正等方法保证各城市尽可能使用本地化的排放计算参数，进而提升城市排放清单的表征精度。然后，针对不同排放源使用基于技术和动态过程的排放表征方法计算排放，建立起 2012–2018 年覆盖碳排放和主要大气污染物排放的中国城市尺度高分辨率排放清单，经空间化分配过程后可进一步与空气质量模式进行对接。本研究建立的 2012–2018 年中国城市尺度高分辨率排放清单估算了在城市行政区划边界内产生的直接排放，包括 SO₂，NO_x，PM_{2.5}，CO，VOC，BC，OC，NH₃ 和 CO₂ 排放。图 2-1 展示了基于多源数据融合方法建立 2012–2018 年中国城市排放清单的技术路线。本研究将城市排放清单源分类划分为电力、工业、交通、民用、溶剂使用、其他，共六大类，并针对污染物产生机理和排放特征的差异按照部门/行业、

燃料/产品、燃烧/工艺技术以及末端控制技术将每类排放源分为四级，自第一级至第四级逐级建立完整的排放源分类分级体系。由于单一数据源无法满足基于四级排放源建立城市级排放清单相关数据需求，本研究使用了多源数据融合方法建立了完整覆盖全国城市所有源分类的排放数据库，通过引入大量点源及区县尺度参数保证了各城市排放计算参数具有较高的本地化率，从而提升城市排放清单的精度，涉及的数据源的具体信息见表 2-1。

对于可直接获取点源排放计算参数的排放源，即电力源、工业源中被点源数据库覆盖的部分，通过基于企业/设备和工序的点源排放表征模型精确刻画各城市的电力及重点工业行业排放特征。首先从数据库中获取逐点源的燃料使用量、工业产品产量、硫份、灰分、末端控制信息等计算参数，然后基于宏观统计数据、演替模型和中国多尺度排放清单模型 (Multi-resolution Emission Inventory for

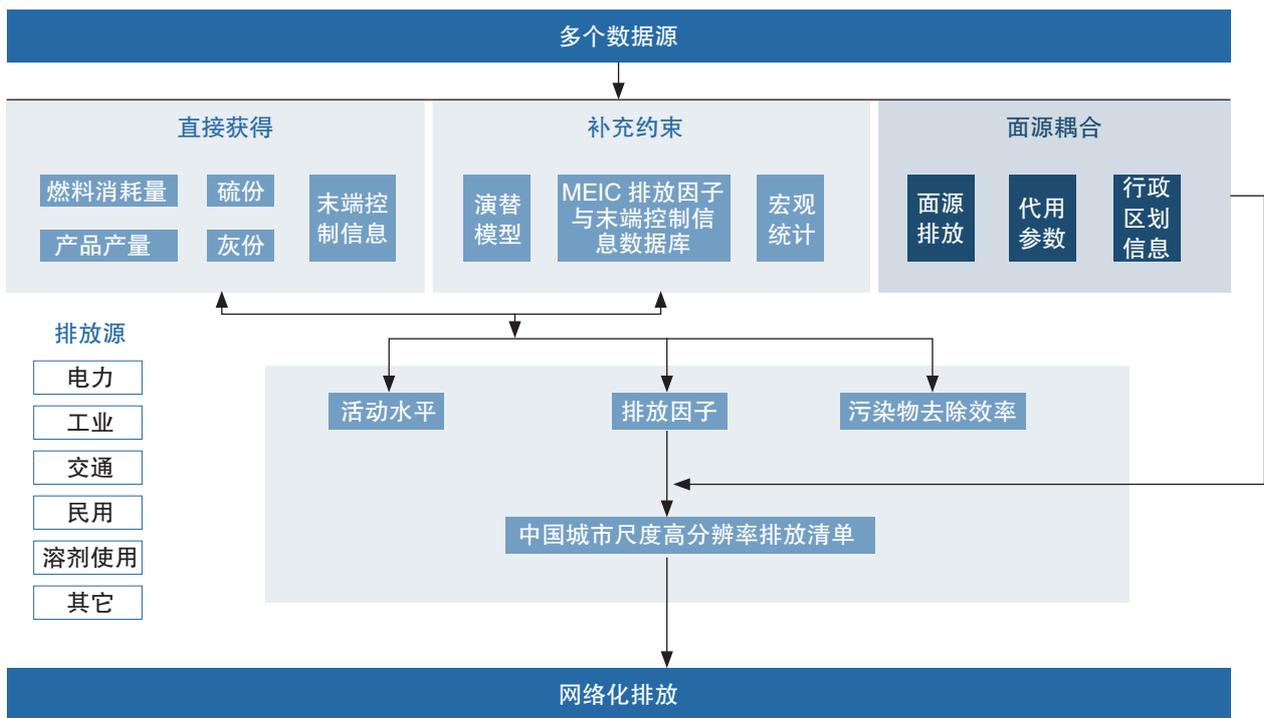


图 2-1 基于多源数据融合方法建立 2012–2018 年中国城市排放清单技术路线

表 2-1 数据源信息

数据源	对应源	精度	信息
中国燃煤电厂数据库 (CPED)	电力源 - 煤电	机组	燃料使用量、燃料硫份、燃料灰分、燃烧技术、末端控制信息
CCED	工业源 - 水泥	生产线	燃料使用量、燃料硫份、燃料灰分、生产工艺、末端控制信息
生态环境部重点工业基础信息的未公开统计结果 (全口径数据)	工业源 - 平板玻璃	生产线	燃料使用量、燃料硫份、末端控制信息
中国钢铁工业点源数据库	工业源 - 钢铁	生产线	燃料使用量、燃料硫份、燃料灰分、生产工艺、末端控制信息
生态环境部环境统计数据 (环境统计数据)	工业源 - 钢铁、油气生产、其他火电、焦炭、有色金属、工业锅炉	企业	燃料使用量、燃料硫份、燃料灰分、部分生产工艺和燃烧技术信息、部分末端控制信息
区县尺度机动车排放数据库	交通源 - 机动车	区县	分区县排放量
中国多尺度排放清单模型 (MEIC)	所有源	省	分省排放量
CEADs	所有源	省	分省分行业能源使用情况
分省能源平衡表	所有源	省	分省能源消费量
分省工业产品产量	所有源	省	分省工业产品产量

China, 简称 MEIC, <http://meicmodel.org>) 提供的排放因子与末端控制信息数据库对计算参数进行补充约束, 最终形成四级排放源分类下标准化的活动水平、排放因子和污染物去除效率, 计算点源排放并可进一步聚合至城市。对于无法获取点源排放计算参数的排放源或非点源的排放源, 使用耦合面源排放的方法进行补充。对于交通源中的机动车部门, 使用 Zheng 等人开发的区县尺度机动车排放模型估算获得的区县尺度机动车排放按城市聚合, 即得到了城市机动车排放量。该模型在县一级进行了活动水平拟合和排放因子表征技术方法的修正, 通过将排放分配误差约束在县域范围减少后续网格化过程引入的空间分配误差, 因此也能够保证城市尺度机动车排放表征的精确度。对于电力源、工业源中未能被点源数据库覆盖的部分, 交通源中的非道路机械部门, 民用源, 溶剂使用源和其他源, 由于它们具有面源排放特征且缺少城市层面可用数据, 统一采用将

MEIC 提供的省级排放基于代用参数向下分配至城市的方法。最终, 各类源排放在省级尺度上受到 MEIC 省级排放约束后形成中国城市尺度高分辨率排放清单。各类源排放的编制方法参考了贺克斌等人编制的《中国城市空气质量改善和温室气体协同减排方法指南》。

为支持空气质量模式的输入, 需要进一步对排放进行网格化处理, 点源排放从相应的数据库中获取经纬度位置直接进行定位。机动车排放根据各车型活动规律和不同类型道路行驶里程分配权重将县级排放量分配到各类型道路, 通过各类道路的高精度路网数据最终将排放分配到网格。对于其他面源, 首先基于不同区县活动水平参数将排放分配到区县, 然后通过总人口/城市人口/农村人口栅格数据将区县排放分配到网格。至此, 本研究建立的中国城市尺度高分辨率排放清单既可以支持全国城市尺度的排放分析, 又能与大气化学模式所需的网格化输入对接支持空气质量模拟。

2.2 措施评估方法

2.2.1 措施分类

2.2.1.1 能源结构

能源结构指能源总生产量或总消费量中各类一次能源、二次能源的构成及其比例关系，直接影响国民经济各部门的最终用能方式，并反映人民的生活水平，是中国能源发展面临的重要任务之一，也是保证中国能源安全的重要组成部分。

《世界能源统计年鉴 2021》数据显示，2020 年，全球一次能源消费量为 556.63EJ，同比下降 4.5%，2009 年至 2019 年平均增长 1.9%。中国连续 12 年保持全球一次能源消费量最大国的地位，全年一次能源消费量为 145.46EJ，同比增长 2.1%，2009 年至 2019 年平均增长 3.8%，占世界的比重为 26.1%，比上年提高 1.71 个百分点，创历史最高水平。从我国能源供应结构来看，目前我国能源供应以煤为主，石油、天然气资源短缺，能源发展受到资源短缺和环境污染的双重约束。以煤炭为主的能源结构，决定了我国燃煤机组在总体电源构成以及火电中的主体地位。调整能源结构，减少煤炭在一次能源消费中的比重，是一项十分重要的任务。

2020 年，全球总发电量为 26.82 万亿千瓦时，同比下降 0.9%，2009 年至 2019 年平均增长 2.9%。中国连续 10 年保持全球最大发电国的地位，全年总发电量为 7.78 万亿千瓦时，同比增长 3.4%，2009 至 2019 年平均增长 7.3%，截至 2020 年，中国发电量占世界的比重为 29.0%，比上年提高 1.21 个百分点，创历史最高水平。2020 年燃煤发电在我国煤炭终端消费中占比依然高达 56.8%，使得电煤资源与运输之间的矛盾越来越突出，电力产业结构不合理问题凸显，主要表现在两个方面：一是从电源结构来看，主要是水电开发速度不快，

核电和地热发展缓慢，小火电所占的比例仍然较大。火电装机比重过大造成对煤炭的需求越来越大，同时电力用煤需求不断增加直接导致电力行业对煤炭依赖度越来越高，对节能减排造成巨大压力。二是从电源布局来看，主要是中国东、中、西部地区能源资源分布不均，东部沿海地区煤电装机过多、过密，造成环保压力加大。此外，煤炭运输已占铁路货运能力的 1/3 以上，西煤东运、北煤南运的大跨度、超负荷的运输格局，更加剧了运力紧张，导致煤炭的污染不仅存在于煤炭的终端消费，还存在于煤的前期开发过程中。

因此，调整能源结构要从减少对石化能源资源的需求与消费，降低煤电比重；大力发展新能源和可再生能源，把光伏水电开发放到重要地位几个方面入手，推进节能减排。发展中国电力产业，必须调整电源生产结构，优化电源布局结构，构建以优化发展煤电为重点，加快发展新能源，合理布局东、中、西部电源结构的电力产业发展模式。具体措施如表 2-1。



表 2-1 能源结构调整措施

措施名称	具体措施
加强散煤治理	将散煤监管职责全面分解落实到街道（乡镇），严格实施考核问责；充分发挥社区居委会（村委会）以及环境监管网格员作用，及时发现和制止“无煤化”区域散煤使用反弹等问题。 建立煤球球渣发现和上报制度，垃圾内发现煤灰和废煤球的，追根溯源，严格倒查，从重处罚。
煤炭质量管控	推进火电、钢铁等重点行业炉前煤质检测体系建设，做好企业煤质信息收集管理及特殊煤质报备工作。对使用不达标煤质的单位依法处罚，加强煤质检验机构管理，规范企业自测煤质计量器具使用。
削减非电用煤	制定有色、耐材、炭素、建材、化工等重点行业压减煤炭消费行动方案，明确划分压煤重点企业。
燃煤污染控制	开展工业炉窑用煤情况抽测，依法查处使用不符合质量标准煤炭的企业。 开展燃煤锅炉在用燃煤执法检查，对违规使用不符合质量标准的煤炭的单位依法处罚并责令整改。 研究制定各区县年度减煤目标，并下发各相关部门。
严把煤炭堆存关	督促各堆场建立煤炭经营管理台账，明确各批次煤炭来源及去向。
严把煤炭运输关	严格监管汽运煤炭车辆持证运输，严厉查处无证运煤、违反禁行规定、超载超限、无遮盖撒漏、运输煤炭质量不达标等违法行为。
严把煤炭准入关	依法严厉查处无证经营、流动售卖散煤等违法行为。对涉农区开展拉网式排查，确保街镇全覆盖，发现违法售卖行为的依法查没处罚。
煤电机组淘汰	制定年度燃煤电厂煤电小机组（小于 30 万千瓦以下）淘汰计划。
加强燃煤电厂监管（末端治理）	对所有燃煤电厂开展巡查，重点检查燃料购买记录、使用台账、污染治理设施运行记录及在线监测数据情况，督促燃煤机组稳定达到超低排放。
锅炉综合整治	开展燃气锅炉氮氧化物执法检查，对排放超标单位依法处罚。 检查在用锅炉现状，动态更新完善在用锅炉台账。 对辖管工业燃煤及生物质成型燃料锅炉开展巡查，其中对生物质成型燃料锅炉至少抽查 20%。重点检查燃料购买记录、使用台账及污染治理设施运行记录等数据情况，适时抽取部分锅炉进行监督性监测；对复燃煤和排放超标等违法行为依法严格查处，对已领取财政奖励的锅炉依规予以追回。 开展在用燃煤小锅炉调查，加大燃煤小锅炉（含茶水炉、经营性炉灶、储粮烘干设备等燃煤设施）淘汰力度。 对辖区内燃煤锅炉淘汰改造情况开展“回头看”，防治已淘汰的燃煤小锅炉“死灰复燃”。
清洁能源替代	开展农业大棚、食用菌、烤烟叶、中药材烘干、畜禽养殖等领域清洁能源替代散煤工作。 制定全市及各区县年度清洁能源（包括风能、水能、光伏发电等）发展目标。
推进清洁取暖	开展清洁取暖设备的运维服务，保障取暖设备正常运行。
扩大禁燃区范围	根据清洁取暖改造进展情况，调整扩大各区县禁燃区范围；相关远郊区（市）县可根据管控需要，优化调整高污染燃料禁燃区范围。依法对违规使用高污染燃料的单位进行处罚。
加强企业监管（末端治理）	重点企业部署安装环保用电智能监管系统。通过对工业企业生产设施与污染防治设施用电实施负荷、异常用电等实时动态监测，实现对企业停产与限产、治污设施擅自停运与低负荷运行的实时监测、预警、分析与管控。重点工业企业全部安装在线监测设施并与环保部门联网。 各区县要全面评估实施改造的钢铁、水泥、陶瓷企业等是否严格按照超低排放指标要求进行改造，未按要求达到超低排放改造的企业要进行停产改造。

2.2.2.1 产业结构

产业结构调整是为促进一、二、三次产业健康协调发展，逐步形成农业为基础、高新技术产业为先导、基础产业和制造业为支撑、服务业全面发展的产业格局，坚持节约发展、清洁发展、安全发展，实现可持续发展的必须路径。要坚持市场调节和政府引导相结合，实现资源优化配置。把增强自主创新能力作为调整产业结构的关键环节，大力提高原始创新能力、集成创新能力和引进消化吸收再创新能力，提升产业整体技术水平。推进信息化与工业化融合，以信息化带动工业化，以工业化促进信息化，促进产业协调健康发展。发展先进制造业，提高服务业比重和水平，加强基础设施建设，优化城乡区域产业结构和布局。走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、安全有保障、人力资源优势得到充分发挥的发展道路，努力推进经济发展方式的根本转变。

2021年以来我国深化供给侧结构性改革，加快推进经济结构战略性调整和经济转型升级，产业结构不断优化，内生动力显著提升，先进制造业、新兴服务业、“四新经济（新技术、新产业、新业态、新模式）”等已成为我国经济发展的重要驱动力。其中，三大产业格局保持稳定，新兴服

务业发展迅速。根据市场监管总局发布数据，截至2021年底，我国第一、二、三产业登记在册企业分别为152.0万户、968.1万户、3722.2万户，分别占3.1%、20.0%、76.9%。第三产业呈大进大出特点，新兴服务业新设企业增速明显，文体娱乐、餐饮服务等加速恢复，服务业发展优势突出，6个细分行业新设企业增速均高于平均水平。2021年10月，中共中央、国务院印《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中，把“深度调整产业结构”作为实现碳达峰、碳中和的重要途径和重大任务，对产业结构优化升级提出了明确要求，意味着“碳达峰、碳中和”给我国产业结构调整带来前所未有的压力，也为产业结构优化升级创造了重大战略机遇。

推进产业结构优化升级主要是促进产业由高消耗向高效率转变，由粗加工向深加工转变，由低端产品向高端产品转变，促进产业做大做强。促进第一产业由薄弱转为稳固，着力振兴装备制造业，大力发展高新技术产业，调整原材料工业结构，加强矿产资源勘查、开发和保护，加强能源、交通、水利、信息基础设施建设，促进第二产业由大变强，坚持市场化、产业化、社会化方向，完善促进服务业发展的政策措施，全面发展服务业特别是现代服务业，促进第三产业更快更好地发展。具体措施如表2-2。

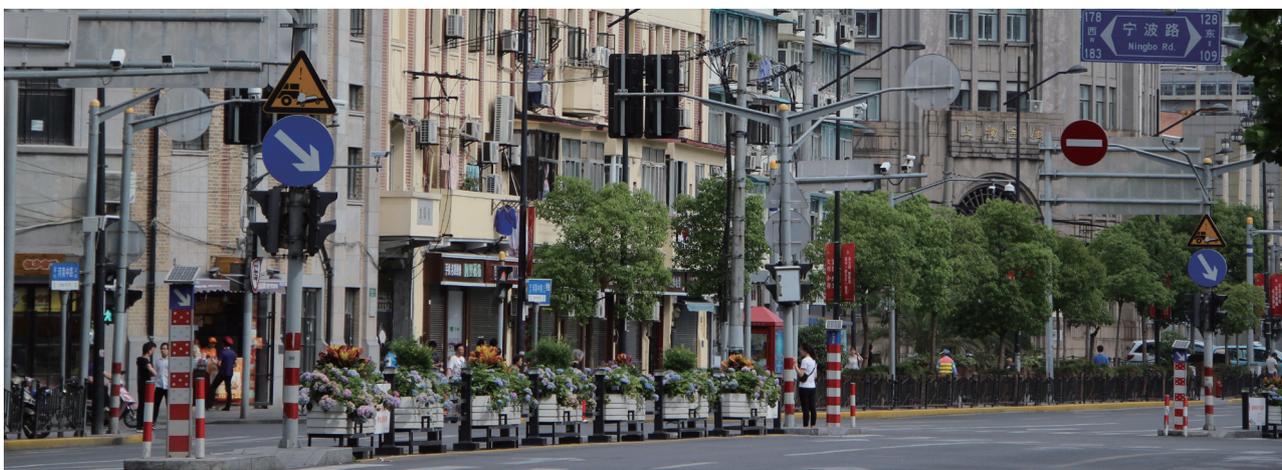


表 2-2 产业结构调整措施

措施名称	措施说明
优化城市空间布局	根据大气环境特征优化城市用地格局，构建城市多级通风廊道系统，形成城市一级通风廊道和二级通风廊道，一级通风廊道内污染企业逐步退出转移，通风廊道范围内避免过高过密建筑物的开发建设，形成有利于大气污染物扩散的城市空间格局。
优化产业布局	加强产业集聚区、经济技术开发区、高新技术产业开发区、工业园区等集中整治，有序退出与主导产业发展冲突的企业。
深化重点行业产业结构调整 and 升级改造	完成有色金属冶炼、高能耗高污染再生铅再生铝生产、砖瓦、建筑陶瓷、岩棉、中大型石材生产加工、园区外化学原料生产等行业调整。涂料、油墨行业基本完成从高 VOCs 含量产品向低 VOCs 含量产品的转型升级；包装印刷、汽车及零部件制造、家具制造、木制品加工等行业和涉涂装工艺的企业，使用的涂料、油墨等原辅料基本完成由高 VOCs 含量向低 VOCs 含量的转型升级。
推进企业集群升级改造	结合本地产业特征，针对特色企业集群，进一步梳理产业发展定位，确定发展规模及结构，按照“标杆建设一批、改造提升一批、优化整合一批、淘汰退出一批”的总体要求，制定综合整治方案，建设清洁化企业集群。 制定集群清洁运输方案，优先采取铁路、水运、管道等方式运输；推广集中供汽供热或建设清洁低碳能源中心；鼓励具备条件的地区建设集中涂装中心、有机溶剂集中回收处置中心等。
实施镇村产业聚集区淘汰机制	开展镇村产业聚集区年度考评，对本区评价排名后 15% 的镇村产业聚集区，采取疏解、淘汰、整合、升级改造等措施，实现“腾笼换鸟”、提质增效。
推进重污染工业企业搬迁改造	对城市建成区内现有钢铁、电解铝、水泥、玻璃、铸造、炭素、化工、造纸、印染等重点行业的工业企业开展全面调查摸底，严格依照行业排放标准确定重污染企业名单。 积极协调可以承接搬迁企业的产业集聚区和工业园区，统筹制定重污染企业搬迁改造实施方案，明确企业就地改造、退城入园、转型转产或者关闭退出的搬迁改造方式和完成时间。 深入推进城镇人口密集区危险化学品生产企业搬迁改造，实行“一企一策一档”分类实施。依序对中小型危险化学品生产企业和存在重大风险隐患的大型企业、城市建成区内重污染企业、县级以上城市建成区重污染企业进行搬迁改造工作。 环城高速以内煤矸石砖瓦窑全部搬迁退出或停产，传输通道县（市、区）退出或停产 30%，其他县（市、区）退出或停产 10%。保留的煤矸石砖瓦窑要达到深度治理标准，确保污染物减量排放。
严格环境准入门槛	严格执行国家和省高耗能、高污染和资源型行业准入条件，明确本地禁止和限制发展行业、生产工艺和产业目录。 强化大气环境质量对规划环评的约束和指导作用。加强重点区域、重点流域、重点行业 and 产业布局规划环评，调整优化不符合生态环境功能定位的产业布局、规模和结构，严格控制重点流域、重点区域环境风险项目。 完成“三线一单”全部编制工作，明确禁止和限制发展的行业、生产工艺和产业目录。
严格控制燃煤项目	积极推行区域规划环境影响评价，新、改、扩建钢铁、石化、化工、焦化、建材等项目的环评影响评价，应满足区域、规划环评要求。禁止新增化工园区，加大现有化工园区整治力度。 严格控制污染物新增排放量。对排放二氧化硫、氮氧化物的新建项目，实行区域内现役源 2 倍削减量替代；对排放工业烟粉尘、挥发性有机物的建设项目，按照国家相关要求逐步实行减量替代。严格实施环评制度，将环境空气质量达标情况纳入规划环评和相关项目环评内容。定期开展核查工作，对发现未按要求进行替代的新建项目进行通报，问题严重的进行约谈；空气质量（PM _{2.5} 和优良天数）连续 3 个月同比下降的区（市）县，实施区域限批。
严格控制燃煤项目	禁止新建、扩建耗煤项目审批、核准、备案及环评、安评、能评等手续办理。所有改建耗煤项目（包括以原煤或焦炭等煤制品为原料或燃料，进行生产加工或燃烧的建设项目）新增燃煤一律实施 2 倍煤炭减量或省最高标准执行替代，并且排污强度、能效和碳排放水平达到国内先进水平。

<p>严控“两高” 行业产能</p>	<p>充分发挥市场机制的倒逼作用，综合运用差别电价、惩罚性电价、阶梯电价、信贷投放等经济手段推动落后和过剩产能主动退出市场。</p> <p>原则上禁止新建、扩建单纯新增产能的钢铁、电解铝、水泥、玻璃、传统煤化工(甲醇、合成氨)、铸造、铝用炭素等产能过剩的传统产业项目，禁止耐火材料、陶瓷等行业新建、扩建以煤炭为燃料的项目。</p> <p>禁止新建、扩建燃煤电厂和企业自备发电锅炉，严禁新建、扩建石化、水泥、钢铁、平板玻璃、铸造、建材、有色金属等高污染、高能耗企业。</p> <p>结合“退二进三”和“三旧”改造，按照产业结构调整指导目录，严格限制平板玻璃、皮革、印染、水泥等行业规模，限制石油化工类企业扩建与增加产能。</p> <p>对本地过剩产能重点行业搬迁、改建项目，实行污染物排放2倍量削减替代，其他行业搬迁项目污染物排放量削减比例不低于1.5:1，并将替代方案落实到企业排污许可证中，纳入环境执法管理。</p> <p>严格落实钢铁行业结构调整和布局优化规划方案，加快推进分布区域、污染排放、能源消耗减量和产能结构、产品结构、物料运输优化“三减三优”措施。</p> <p>压小上大：加快推进淘汰钢铁企业180m²以下烧结机、1000m³以下高炉、100吨以下转炉生产装备，置换规格大、节能减排的生产装备。</p> <p>全力攻坚压减焦化过剩产能任务，全面启动炭化室高度为4.3米(产业政策限制类)的焦炉淘汰工作，加速焦化产业转型升级。首先提出升级改造或压减方案，逐步完成所有炭化室高度4.3米的焦炉全部关停。</p>
<p>严控“两高” 行业产能</p>	<p>铸造行业整合升级改造：对环保绩效评级为C级的铸造企业全部实施达标整治，完成一家、验收一家。制定目标和关键节点，全市在生产铸造企业通过自我提升整治力争达到环保绩效B级标准。</p> <p>不能完成减量置换改造升级的100吨以下转炉、1000立方米以下高炉、130平方米以下烧结机和4.3米以下炭化室焦炉，加大季节性生产调控比例，实施停产措施。</p>
<p>严控“两高” 行业产能</p>	<p>煤研石砖瓦窑搬迁或退出：环城高速以内煤研石砖瓦窑全部搬迁退出或停产，传输通道县(市、区)退出或停产30%，其他县(市、区)退出或停产10%。保留的煤研石砖瓦窑要达到深度治理标准，确保污染物减量排放。</p>
<p>加严涉VOCs 项目建设</p>	<p>严格限制新建、扩建医药、印染、化纤、合成革、工业涂装、包装印刷、塑料和橡胶等重污染项目。禁止建设生产和使用高VOCs含量的溶剂型涂料、油墨、胶黏剂项目，其他新、改、扩建排放VOCs的项目，从源头加强控制，使用低(无)VOCs含量的原辅材料，配套安装高效收集、治理设施。</p> <p>新建涉VOCs排放的工业企业要入园，实行区域内VOCs排放等量或倍量削减替代。</p>
<p>全面实施挥发性有机物总量控制</p>	<p>实施工业源挥发性有机物总量控制和行业控制，遵循“控制总量、削减存量、减量替代”原则，涉挥发性有机物的建设项目，按照新增排放量的2倍进行减量替代。推进石化化工、汽车及零部件制造、家具制造、木制品加工、包装印刷、涂料和油墨生产、船舶制造等行业挥发性有机物治理。</p>
<p>淘汰落后 过剩产能</p>	<p>重点对水泥(包括粉磨站)、砖瓦、铸造、化工等重点行业过剩产能逐渐淘汰，制定工作方案，明确重点任务、时间节点、工作措施和责任部门，全面淘汰落后和过剩产能企业。制定市县两级年度工作方案，相关职能部门要分别建立排查、整改、关闭和淘汰等相应台账，完成“淘汰类”落后生产工艺装备和落后产品的淘汰任务。</p> <p>以砖瓦窑、铸造、化工、造纸、电镀等行业为重点，再推进一批落后产能企业的关停或部分生产线淘汰。按要求对砖瓦行业实施兼并重组，上大压小，产能减量置换。</p> <p>加快推进30万千瓦及以上的热电联产机组供热半径15公里范围内燃煤锅炉和落后燃煤小热电的关停整合。</p> <p>结合“工业企业绿色绩效评价”，进一步压减电解铝、炭素、水泥、棕刚玉、耐火材料、砖瓦、铸造、石灰、石材、氯化石蜡等行业产能。淘汰10万吨/年以下的独立铝用炭素企业；退出单套装置30万吨/年以下的合成氨生产企业；淘汰100吨/年以下独立水泥粉磨站及直径3米及以下水泥粉磨装备。实施棕刚玉、陶瓷、耐火材料、砖瓦窑、铸造等高排放行业达标整治，对不能达到相关标准、无法改造升级的企业，依法依规实施停产限产、关停退出。</p>

“散乱污” 综合整治	<p>开展“散乱污”企业综合整治的同时，对“散乱污”企业较为集中的区域同步进行区域环境综合整治。</p> <p>全面组织排查，建立清单，分类实施整治。进一步完善“散乱污”企业动态管理机制，实行网格化管理，压实基层责任，发现一起查处一起。</p> <p>创新监管方式，充分运用电网公司专用变压器电量数据以及卫星遥感、无人机等技术，定期开展排查整治，实现“散乱污”企业动态管理。</p> <p>建立市、县、乡三级联动监管机制，紧盯重点区域、重点行业、重点设备，充分发挥乡镇（街道办）、村（社区）网格员作用，加强环境监管和巡查检查，实行拉网式排查和清单式、台账式、网格化管理，坚决杜绝“散乱污”企业死灰复燃。</p> <p>落实乡镇街道属地责任，以农村、城乡结合部、行政区域等为重点，采取昼夜巡查、无人机飞检等手段，对乡镇工业大院、无名场院、老旧车间、已取缔的“散乱污”企业等场所进行回头看。</p> <p>清理无名场院，对全区范围所有无名场院进行拉网式排查，清晰梳理无名场院数量、面积、归属、土地性质、生产经营、用电用水、手续、合法性等，全部登记造册；按照“一场一策”要求制定整治方案，依法整治各类违规占地、违法生产经营行为，清理、拆除无手续的无名场院和建筑物，对符合整治条件的无名大院根据实际情况实施硬化、绿化、净化。</p>
推进绿色发展	推进重点行业大气污染物深度治理及稳定运行，强化清洁生产审核，重点企业清洁生产审核比例达到90%以上。
工业园区整治	<p>对全市工业集聚区开展全面排查，建立清单台账，持续分类分批研究制定综合提升改造计划，开展“一区一策”。</p> <p>制定综合整治方案，确保各类VOCs治理设施稳定运行。</p>
工业园区整治	<p>推动产业园区环境管理平台完善，通过开展走航监测和溯源分析等措施，建立健全预警监控体系；纳入企业VOCs组分构成、特征物质、废气收集与治理设施建设情况、重污染天气应急预案、LDAR管理、违法处罚等环保信息。</p> <p>树立行业标杆，开展工业园区集中整治，同步推进区域环境综合整治和企业升级改造。</p>

2.2.1.3 交通结构

交通运输作为经济系统的基础设施，是社会生产与人民生活中不可或缺的重要保障。在我国快速城镇化和快速机动化的双重压力下，城市空间与交通供需平衡的冲突尤为强烈，在我国经济水平迅速发展和碳减排约束进一步增强的背景下，转变发展方式、进行结构调整已成为我国交通运输业未来发展的方向，城市布局与交通协调发展更为重要。在交通问题越来越突出的背景下，利用公共交通的发展来驱动城市土地利用的发展，形成与交通建设相协调的城市布局形态、产业结构，使交通资源的供给成为影响交通需求分布和强度的主导因素，将被动的供给压力转化为主动的带动需求发展的牵动力，从根本上消除需求杂

乱无章地自然发展而持续形成对交通资源供给的压力。

生态环境部发布的《中国移动源环境管理年报（2021）》显示，2020年，全国机动车保有量达到3.72亿辆，四项污染物排放总量为1593.0万吨。其中，一氧化碳（CO）、碳氢化合物（HC）、氮氧化物（NO_x）、颗粒物排放量分别为769.7万吨、190.2万吨、626.3万吨、6.8万吨。汽车是污染物排放总量的主要贡献者，其排放的CO、HC、NO_x和颗粒物超过90%，其中柴油车排放的NO_x更是占到汽车排放总量的88.8%，颗粒物排放占比达99%以上。此外，交通领域碳排放约占我国碳排放总量的10%，尤其是公路运输，年均排放10亿吨二氧化碳，量占交通行业排放总量的85%左右，是不折不扣的排放主体。根据国务院

印发的《2030年前碳达峰行动方案》提出，加快形成绿色低碳运输方式，近年来，交通运输行业持续推进绿色交通基础设施建设，不断优化调整交通运输结构，节能减排取得了积极成效。但我国交通行业技术水平和能源行业生产消费结构还未发生根本性转变，二氧化碳减排压力大，形势严峻。从某种意义上讲，交通产业可能是最晚实现碳达峰的产业。

在碳中和、碳达峰的大背景下，移动源或将成为未来大气污染治理和二氧化碳减排的协同重点，而低碳燃料可能成为未来车用燃料发展的重要方向。此外下一步工作还将集中在推广低碳高效运输装备、建设绿色交通基础设施、优化交通运输结构、引导绿色低碳出行、强化能力建设、完善绿色交通标准体系、持续发布交通运输行业重点节能低碳技术推广目录等方面。

表 2-3 交通结构调整措施

措施名称	措施说明
柴油车深度治理	<p>针对到达或即将到达强制报废条件的营运柴油货车，完成国四及以下排放标准营运柴油货车的提前淘汰更新工作。</p> <p>联合公安交管、交通运输部门开展入户抽查工作，对物流园区、工业园区、公交、长途客运、环卫、城市建筑工地等柴油车集中停放地开展入户抽查工作，重点查验污染控制装置造假、屏蔽车载诊断系统（OBD）功能、冒黑烟、尾气排放不达标、油品及车用尿素质量不合格等违法行为依法处理。</p> <p>制定在用柴油车安装 DPF 推广工作方案和技术指引，指导各责任单位开展 DPF 安装工作，开展环卫柴油车和建筑工程柴油车 DPF 安装改造工作。</p> <p>动态更新超标柴油车黑名单，将遥感监测（含黑烟抓拍）、超标车辆纳入黑名单，动态管理，并与公安、交通部门实现信息共享。加大重型柴油货车远程在线排放监控装置安装的推广力度，建设柴油车动态监管平台。</p> <p>联合公安交管、交通运输部门开展路检路查。在高速公路、国省道路口、市区进出主要路口、国（省）治超点及执法点等布设排放监测站，针对柴油货车等开展常态化全天候现场执法检查。重点查验污染控制装置造假、屏蔽车载诊断系统（OBD）功能、冒黑烟、尾气排放不达标、油品及车用尿素质量不合格等违法行为依法处理。</p> <p>全市范围内各重点用车单位包括建成区内的物流园区、园林、垃圾清运、运输公司（包括油区）车辆所属的企事业单位及个人，需在生态环境局上报车辆信息，并申报 OBD 的安装。</p> <p>所有在用排放标准为国四以上的重型柴油车（最大总质量超过 3.5 吨）均要安装在线 OBD 监控装置，未安装 OBD 的国四及以上货车将限制在市内通行。</p> <p>根据重污染天气应急响应需求，对重点企业承担运输任务车辆进行抽查，重点检查管控门禁和视频监控记录以及运输车辆排放标准。</p>
非道路移动机械管控	<p>推进非道路移动机械实施检测、挂牌、贴标、定位“四位一体”监管制度。</p> <p>加大非道路机械编码登记摸排力度，实现编码登记全覆盖。</p> <p>开展物流园区、企业园区等地非道路移动机械排放情况、新能源或清洁能源使用情况，鼓励使用更换电动叉车。制定新能源或清洁能源车辆纳入城市建设工程招标方案中实施办法，鼓励选用电动或天然气动力工程机械。</p> <p>推广非道路移动源排放控制技术，鼓励非道路移动机械、船舶通过优化燃油喷射、使用废弃循环（EGR）、安装壁流式颗粒物捕集器（DPF）、选择性催化还原装置（SCR）及更换同型号燃气发动机等进行提标升级改造。</p> <p>开展新生产销售发动机和非道路移动机械的监督检查工作。对城市生产（进口）的发动机和非道路移动机械主要系族的年度抽检率达到 60%，覆盖全部生产（进口）企业；对在市区销售但非本市生产的主要发动机和非道路移动机械主要系族的年度抽检率达到 50%。</p> <p>推广非道路移动机械在线监控与实时定位设备的安装与使用，建成非道路移动机械排气污染在线管理监控平台和排气污染防治数据信息系统。</p> <p>开展非道路移动机械专项检查行动，对禁止使用高排放非道路移动机械区域内的企业、物流园区、公路建设工地、市政工程工地、建筑工地等场所开展非道路移动机械抽查抽检，排查尾气排放不符合烟度限值机械以及使用不合格油品、车用尿素等行为。</p>

措施名称	措施说明
大型工矿企业物流园区运输管控	<p>开展大宗货物年货运量 100 万吨以上的大型工矿企业和物流园区摸底调查，按照宜铁则铁的原则，研究制定铁路专用线新建、共建、开放共用等“公转铁”方案。</p> <p>钢铁、焦化、水泥、电力等重点用车企业门禁系统升级，货运车辆进出口增加用于控制大型货车通行的道闸系统和本地处理单元，严格排查因尾气排放不达标或者其他尾气污染行为禁止入厂。门禁系统要求能够在本地存储车辆抓拍信息和全程通行信息，并能够捕获和记录人为开闸信息，所有信息的本地存储时间不低于 90 天，可实时调阅查看，并与市、县（市、区）两级生态环境部门联网，具备黑名单远程输入功能和运能设置功能。</p> <p>开展已有铁路专用线的大型工矿企业和物流园区货物运输情况调查工作，挖掘货物“公转铁”潜力，推进铁路货运比例提升。</p>
油气储运销综合整治	<p>市区实现油气回收自动监控设备安装联网全覆盖，其它县市区销售大于 2000 吨的加油站安装油气回收自动监控设备并联网。</p> <p>完成全市加油站油气回收设施运行情况抽检抽查。</p> <p>市区内加油站（不含柴油加油站）卸油作业时间调整到每天 20 时至次日 8 时，其他时间禁止卸油。将民营加油站及自备油库列为重点监管对象，在全市加油站（点）抽检车用汽、柴油。</p> <p>以加油站为重点，开展加油站、储油库以及在用机动车油箱的油品质量抽查，严厉打击生产销售、使用非标油行为。</p> <p>开展高速公路、国道、省道沿线加油站尿素质量抽查工作，月均抽查不少于 5 个批次。</p> <p>开展企业自备油库专项执法检查，对大型工业企业、公交车场站和铁路货场自备油库油品质量进行监督抽测，严禁储存和使用非标油。</p> <p>推进成品油市场整治，开展清除无证无照经营的黑加油站点、流动加油罐车专项整治行动，持续打击生产销售不合格油品行为。</p>
新能源车推广	<p>开展党政机关、公共机构、市属（区属）国有企业公务车使用情况及新能源汽车使用比例，制定公务车使用制度，优先选用纯电动车。</p> <p>制定巡游出租车置换为纯电动车的鼓励性政策，加快实现巡游出租车纯电动化。禁止非纯电动车辆新注册为网络预约出租车。</p> <p>推进公交、环卫、通勤、轻型物流配送等车辆新能源化进程，摸清现有各行业车辆排放情况与替代更新计划，逐步实现行业车辆清洁化。</p> <p>加快物流园、产业园、工业园、大型商业购物中心、农贸批发市场等物流集散地建设充电设施。加强居民居住区充电基础设施建设，对现有居民区停车位进行电气化改造。</p>
企业专项检查	<p>开展巡游出租车公司等出租车集中停放地开展尾气抽查抽测工作，督促尾气不达标巡游出租汽车更换三元催化装置。</p> <p>落实《关于建立实施汽车排放检验与维护制度的通知》要求，开展排放检验机构专项检查工作，采取现场随机抽检、排放检测比对、远程监控排放等方式，重点抽检复核每年首检超标车、外地车、注册 5 年以上的营运柴油车。</p> <p>加强对机动车维修单位监督管理，对发现维修单位以临时更换机动车污染控制装置通过机动车排放检验、破坏机动车车载排放诊断系统等虚假维修行为，对机动车维修单位立案处罚。</p>
新生产车辆环保达标监管	<p>开展市内生产、进口、销售的机动车环保达标检查工作，抽查核验新生产销售车辆的 OBD、污染控制装置、环保信息随车清单等，抽测部分车型的道路实际排放情况。</p>
重点企业门禁系统安装	<p>开展 150 万吨 / 年以上的用车重点企业门禁及视频监控系统的安装情况调查，加快完成重污染天气应急减排清单绩效分级管控中 A、B 级企业门禁及视频监控系统的安装工作。</p>
船舶专项检查	<p>严格管控货运船舶和渔业作业船只冒黑烟的问题，加大“黑烟”船舶的治理力度。</p>
低排放控制区试点建设	<p>以空气质量改善和保护居民健康为出发点，在中心商业区、医院、学校、居住生活区等空气质量管控重点区域开展轻型车辆管控试点建设。</p>



2.2.1.4 用地结构

国土空间结构与大气污染和碳排放紧密相关，用地是城乡各项人类活动的空间载体，用地结构通过影响能耗活动水平进而对大气污染和碳排放产生重要影响。城市和建制镇用地（简称城镇用地）占国土总面积的1%，但碳排放约占全国总排放的近90%，工业用地（城镇用地的约17%）的碳排放和非工业用地的碳排放约各占一半。根据2021年中国国土勘测规划院发布的《空间用地结构对大气污染物与碳排放的研究报告》表明，我国东部地区排放总量最高，占全国总排放的39%；东北地区排放量最小，仅占比12%，各省排放总量差异显著。山东、内蒙古、江苏、河北、山西、河南、广东、辽宁、安徽和浙江的碳排放量居于全国前十名，排放总量占全国总排放的59%。我国大部分城市仍处于土地GDP产出不高，碳排放强度较大的粗放发展阶段。在单位土地GDP产出相似的情况下，不同城市土地碳排放强度有较大差异，深圳等城市实现了土地利用的高GDP产出和低CO₂排放，但大部分城市还处于土地GDP产出低，土地碳排放强度大的状况，说明城市层面通过用地控制碳排放强度潜力较大。

城镇地区的空间结构优化是实现碳达峰和碳中和的重中之重。2030年碳排放预测结果表明，如果建设用地按照过去十年年均约60万公顷的速度继续增长，且不采取用地结构调整、碳排放强度约束等措施，那么二氧化碳排放量将持续增长，预计2030年相比2020年增加16%。此外，裸土裸地分布与当地的建设用地分布、工地施工、建筑物拆除等息息相关，固定扬尘污染问题已成为制约城市颗粒物浓度下降和空气质量持续改善的主要污染源之一。

因此，未来应以加强防护林建设，建设防沙带生态安全屏障，推广保护性耕作、林间覆盖等方式，抑制季节性裸地农田扬尘。深入实施天然林保护工程和公益林的保护与管理，推进重点风沙策源地的综合治理。在城市功能疏解、更新和调整中，将腾退空间优先用于“留白增绿”。建设城市绿道绿廊，实施“退耕还林还草”。继续实施城市绿化工程，因地制宜提高城市建成区绿化覆盖率。严格控制建设用地的无序盲目扩张，优化国土空间用地结构和布局，引导产业用地结构调整，推进清洁、高附加值的产业升级，部分地区严控高耗能高污染工业用地供应，并进一步提出土地碳排放强度的控制约束要求。

表 2-4 用地结构调整措施

措施名称	措施说明
施工扬尘管控	<p>加强房屋拆除工程备案管理，每月上报房屋拆除工程备案项目数量、拆除面积、建筑废弃物处理数量等信息。</p> <p>各施工工地建立规范化的自查机制，并建立自查档案，主管部门定期进行档案核查。</p> <p>强化工地抑尘设备配备，房屋工程、场平工程、地铁站点工程等每 5000 平方米占地面积配套一台雾炮设施；市政工程、河道工程、管廊工程每 500 米安装一台雾炮设施，公路项目在城镇建成区和居民集中居住区以及重要土石方作业点位设置移动式雾炮机湿法作业进行降尘。</p> <p>按市、区监管职责分工完成全市全部建设工程摸底排查，明确各工地监管员，将所有建设工程及处于土石方开挖、回填、拆除等易产生扬尘的工程名单、各工地监管员名单报市环保管理部门。</p> <p>各区将工地扬尘防治纳入辖区城市管理网格化巡查，每日开展巡查并及时向工地主管部门报告扬尘违法行为。对未达到“8 个 100%”要求的施工工地，全部依法责令停工整改，限期整改完成方可开工。</p> <p>每月组织住建、交通、水务部门开展工地扬尘污染防治督查，3 个工作日内将污染工地名单移交各主管部门，完成对污染工地的查处和整改复核，并及时将信息反馈市大气污染防治管理部门。定期在新闻媒体上通报“十佳”和“十差”工地。</p> <p>保留的预拌混凝土搅拌站完成绿色生产和密闭化升级改造，达到城市预拌混凝土绿色生产管理相关要求。</p> <p>对登记备案的沥青混合料搅拌站进行测评，测评结果向社会公示。</p> <p>加强扬尘在线监测数据的应用，现场在线监控 PM₁₀ 数据小时均值达 250 μg/m³ 时，施工单位应停止扬尘作业；拒不执行的，予以查处，并将不良信息纳入建筑市场信用管理体系，列入建筑市场主体“黑名单”。</p>
施工扬尘管控	<p>建立各类施工工地扬尘管理清单动态更新机制，每季度更新。</p> <p>对列入台账的施工工地，乡镇（街道）一线执法部门的月检查率要达到 100%；区级执法部门的月检查率（含远程视频监控）不低于 60%；市级执法部门的月检查率（含远程视频监控）不低于 30%。</p> <p>建设全市施工工地可视化、智能化的扬尘视频监控平台，并实现施工工地扬尘视频监控平台信息在市、区两级行业主管部门以及市、区、乡镇（街道）三级城管执法部门之间共享。</p>
工业企业扬尘管控	<p>工业企业开展“洗厂行动”，每周最少两次，并建立清扫保洁台账。</p>
道路扬尘整治	<p>开展道路扬尘移动监测，每月监测道路 6000 公里以上，并将结果纳入全市街道环境卫生指数考评排名系统。</p> <p>提高道路冲洗、清扫频次，一级、二级道路和工地出口 500 米路段每天冲洗 2 次以上、洒水 1 次以上，三级、四级道路每天冲洗 1 次以上、洒水 2 次以上。</p> <p>加强重点道路渣土运输检查，通过设置固定检查站或移动检查站等手段，严格开展渣土车带泥上路和沿途撒漏及其他交通违法的执法。</p> <p>运用车载光散射、走航监测等技术，滚动式监测、评价，每月通报道路扬尘状况。</p> <p>对主城区道路逐条进行走航监测，精准制定“一路一策”达标治理方案，降低城市道路扬尘。</p> <p>持续开展道路积尘负荷走航监测评价，通报全市道路积尘负荷情况。定期开展道路尘土存量监测及分级考核评价。做好街巷及农村道路清扫保洁，确保各级道路尘土存量达到相应标准要求，提升道路洁净度。</p> <p>强化渣土运输车监督检查，建立完善渣土车《名录》。利用建筑垃圾运输处置信息和监管平台，强化对渣土运输车的监督和检查，严查严处运输车辆各类违法违规行，并纳入渣土运输企业信用等级考核。对《名录》外车辆非法在本市从事渣土运输的违法行为进行依法查处。每月组织开展运渣车联合整治行动，对运渣车违反限行规定、超限、超载、撒漏等违法行为进行查处。</p> <p>建立城乡一体化扬尘治理方案，全面清理市中心区、县（市）区建成区主次干道两侧浮土，重点路段加大机械化清扫洒水、冲洗力度。</p> <p>对国道、省道及物流园区周边等柴油货车临时停车场出入口进行平整和硬化，保持场内干净、整洁，各区（市）县每月至少开展 2 次巡查，对发现的问题，立即责令整改，对存在的违法行为严肃查处。</p>

堆场扬尘管控	<p>对工业企业物料堆场实施规范化全封闭管理。易产生扬尘的物料堆场采取封闭式库仓；不具备封闭式库仓改造条件的，应设置不低于料堆高度的严密围挡，密闭输送物料必须在装卸处配备吸尘、喷淋等设施，未达标堆场全部整改完毕。</p> <p>清治散料堆场，全面排查各类散料堆场，按照能清则清、不清则治、治则一流原则整治到位。所有粉状物料必须全部入棚进仓，不得露天堆存。</p> <p>块状物料要采取有效覆盖措施，设置不低于物料高度的严密围挡，用于苫盖的防尘网目数不得低于 800 目。料场地面、厂内道路全部硬化或绿化，做到非硬即绿。</p>
扬尘在线监测	<p>完成管理维护城市扬尘在线监测信息管理系统，全面监控工地、道路、裸露土地扬尘污染状况，设立污染物超标报警机制。</p>
扬尘考核评价	<p>建立扬尘污染防治量化问责实施办法，根据扬尘污染指数（以 PM₁₀ 作为评价指标）排名情况、降尘量和扬尘污染防治工作专项督查情况作为问责依据。</p>
裸土整治	<p>全面开展裸露地面防尘覆盖和绿化覆盖综合整治，重点对土石方作业区、长期闲置土地、临时渣土堆场、主次干道两侧裸土进行整治覆盖，每月至少开展 2 次巡查，对发现的问题，立即责令整改，一个月内完成整治并报送市大气污染防治部门。每季度向责任单位提供全市裸露土地风蚀扬尘治理清单。</p> <p>进行裸土治理考核，对裸土裸地治理进展缓慢、虚假治理、敷衍治理的，给予通报批评。</p>
裸土整治	<p>对国土储备用地、出让未开发及拆而未建的闲置土地中的政府已出让陆续开发或尚未开发地块，短期（3 个月）闲置的，按标准进行围挡、苫盖。长期闲置（3 个月以上）的地块，实行绿化。城市管理范围内的主次干道、支街背巷、平交道口、商铺门前的裸露地进行全面硬化，道路两侧进行绿化补植；企事业单位庭院及居民社区裸露土地中的既有老旧庭院和小区，进行系统的绿化提升和改造，裸土裸地采取绿化补植措施，更新退化的草坪；河道及河床两侧裸露土地，进行绿化或硬化，两侧进行景观绿化；城中村及城区近郊裸露土地中的撂荒、废弃土地，实行临时绿化，或调整土地性质。</p>
秸秆综合利用	<p>加强“定点、定时、定人、定责”执法管控，开展秋收阶段秸秆禁烧专项巡查。</p> <p>坚持“通报曝光”制度和经济处罚制度，尤其是重污染天气应急响应期间发现的火点，每个属地政府扣罚款项。</p>
生活面源污染治理 (末端治理)	<p>餐饮企业全部安装油烟净化设施，油烟排放每半年监测 1 次，油烟净化设施每季度保养 1 次，6 个基准灶头及以上餐饮企业安装油烟在线监测设施并与监管部门联网，禁止餐饮企业燃用木柴等高污染燃料。</p> <p>加强餐饮油烟执法检查。各区（市）县每月至少开展 1 次餐饮油烟和露天烧烤专项执法检查，将检查情况报市城管委，每月至少开展 1 次餐饮油烟专项督查。</p> <p>全面清理取缔市中心区、各县（市）区建成区市场、小区、街道露天油炸（炒）摊点。对排查中查证存在的违法行为按照相关法律法规及时查处；建立长效监管机制，细化门店管理，确保整治成果长期保持。</p>
严格重点区域管控	<p>抓好敏感区周边精细化管理，严格落实“点长制”，建立专门队伍，落实“网格化”管理，每日巡查，凡发现餐饮油烟等各类治污设施不正常运行的，一律停业整顿至 3 月 31 日。</p> <p>敏感区直径两公里范围内，发现表面喷涂、包装印刷、干洗店（无洗涤设备门店除外）、汽修喷涂、电焊等产生 VOCs 的门店及企业一律取缔。</p>
汽修行业整治 (末端治理)	<p>严格查处露天喷涂及无证喷涂等违法行为。各区（市）县开展汽修行业喷涂废气收集和治理设施专项整治，并将整治情况报市交通运输局备案。每月组织至少开展 2 次汽修行业 VOCs 治理专项检查。</p> <p>开展汽修行业专项检查。一、二类汽修企业以及经营范围含车身维修的三类维修业户钣喷、烘干作业应当在装有废气处理或者收集装置的密闭车间内进行，并实现稳定达标排放，未实现达标排放的，一律停业整顿；经营范围不含车身维修的三类维修业户严禁开展钣喷、烘干作业。</p>
生活源整治 (末端治理)	<p>加强重点工程涉及 VOCs 排放工序管控，每年 6 月前，引导全市涉及 VOCs 排放作业工序的工地（大中型装修工程、外立面改造工程、道路画线作业、道路沥青铺设作业）合理安排施工时间，制定错峰施工方案，原则上 6 月 1 日至 8 月 31 日不得开展涉及 VOCs 排放作业工序作业。</p> <p>需在 6-9 月进行涉及 VOCs 排放工序作业的工地，应于 6 月 1 日前报市政府批准，并在每日 10:00-18:00，不得开展涉及 VOCs 排放作业工序作业（应急施工工程除外）。</p>

2.2.2 措施评估

2.2.2.1 成本效益

成本效益分析是通过比较项目的全部成本和效益来评估项目价值的一种方法，将成本费用分析法运用于政府部门的计划决策之中，以寻求在投资决策上如何以最小的成本获得最大的收益。费用主要包括新增末端治理措施的投资及运行费用，中间技术改进的投入成本、管控成本、补贴成本，以及环境税费等。效益主要包括增加的环境效益（污染排放减少、环境质量改善）及环境改善的终端效益（健康效益增加、农作物产量增加、清洁费用减少等）。

大气污染物和 CO₂ 同根同源，相互影响。大气污染物和 CO₂ 协同治理面临着阶段性大气污染防治规划制定、温室气体减排路径选择和方案制定等管理需求，因此借助不同措施实施后减污降碳效果及其成本效益评估、特定空气质量目标下大气污染物和 CO₂ 减排策略优化等共性技术，利用大气污染物与 CO₂ 协同控制成本效益分析工具有助于科学精准地优选协同治理措施，获得协同减排效益。根据 2022 年最新发布的《减污降碳协同增效实施方案》中提出，要求一体推进重点行业大气污染深度治理与节能降碳行动，推动钢铁、水泥、焦化行业及锅炉超低排放改造，探索开展大气污染物与温室气体排放协同控制改造提升工程试点。目前我国针对重点行业超低排放改造正在进行，通过成本效益分析方法可助力实现环境政策的科学制定、评价和优化。

因此除针对重点行业超低排放改造外，对 VOCs 治理措施、跨界调电、新能源政策、空气质量标准实施、碳排放贸易、O₃ 和 PM_{2.5} 协同控制、

大气污染物与温室气体协同减排和大气环境政策对公众心理健康及社会风险的影响等领域开展以大气污染控制费用效益分析为核心，形成多污染物协同控制优化决策体系，即可以提高空气质量改善政策措施的成本有效性，又推动了空气污染治理向风险管控的转变，提高环境政策和决策的科学化水平。

2.2.2.2 减排潜力

近年来，全国各城市紧围绕着改善大气环境质量，从结构调整、污染防治和城市管理等方面开展了多项工作。针对产业结构调整、能源结构优化、运输结构调整、移动源污染防治、工业污染治理、城市精细化环境管理等重要措施，从电力、钢铁、石化、水泥、玻璃、交通、建筑等行业提出潜在减排措施，设置能源与污染控制情景，具体控制情景在下文 3.1 中详述。

能源结构调整在大气污染物和 CO₂ 减排方面均有较大的减排效益，能源结构调整相关措施包括：民用散煤替代、工业煤炭压减、热电联产及供暖企业整合等，工业用煤和取暖用煤是实现“双达”的关键部门。为实现“双达”目标，必须进行能源结构的深度调整，此外，还应针对不同的大气污染物采取相应的针对性的措施。如对于 NO_x 的减排，钢铁行业产业优化升级和移动源污染防治措施减排效应较好；针对颗粒物减排，采取扬尘及其他面源治理措施具有较好的减排效应；针对 VOCs 减排，工业污染治理措施减排效应明显。此外，产能升级和产能淘汰政策在 CO₂ 减排方面的优势明显，其在减少空气污染物方面也有较好的效果。

2.2.2.3 协同效益

基于不同气体排放之间的关联，大气污染物与温室气体多由化石能源燃烧产生，从污染根源上具有很大程度的关联性，从治理方法上，二者也具有较强的互补性，旨在减少温室气体排放的气候政策与以控制大气污染为目标的大气污染控制政策在某种程度上会互相影响，即在实行其中一类政策时可能对另一类政策目标的实现产生“协同效应”。不少学者通过模型进行测算，验证了二者的协同效应，为协同治理提供了科学的理论根据。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第三次评估报告中首次提出了“协同效益”的定义，即减缓温室气体排放的政策所产生的、被纳入政策制定考虑之中的非气候效益，同时指出，通过协同效益可以使实施的政策在减缓气候变化的同时形成大气污染物减少的协同效应。协同治理既可以降低政策的运行成本，实现事半功倍的效果，还可以避免分开治理导致的大气污染物和温室气体“此增彼减”乃至同步增加，进而又需要更高昂的代价来进行补救的政策无效率现象。而中国以化石能源为主的能源结构导致人为二氧化碳排放与主要大气污染物排放具有很强的“同根、同源、同时”特征。目前，污染物减排或温室气体减排可带来正向协同效益，但不同区域的协同效益不尽相同，以国家层面进行协同管理，有可能带来区域层面的效益损失。协同效益评估和协同管理应综合多种情形进行全面考虑，因地制宜制定管理措施。因此，建立大气环境治理与温室气体协同控制可量化评价方法，是衡量

协同效果的重要考量。

可采用“协同效应系数”表示一定区域实施污染物减排措施，减排单位大气污染物的同时减少的温室气体减排量。

协同效应系数 = 二氧化碳减排量 / 常规大气污染物减排量

选取产业结构调整、能源结构优化、运输结构调整、移动源污染防治、工业污染治理、扬尘及其他面源治理、农业源污染防治七大领域以及细分行业和措施，开展单位 PM_{2.5} 浓度下降协同减碳量分析。较大的协同效应系数意味着减排单位常规大气污染物的同时产生的温室气体减排量较大，也就说明该区域实施的污染物减排措施协同效应较好。从协同效应的角度出发，协同效应系数可以是衡量某项污染物减排措施或技术优劣的一项指标。协同效应系数可以比较同一区域不同污染物减排措施的协同效果，例如某一区域结构调整措施和工程减排措施的协同效应，也可比较不同区域同一污染物减排措施的协同效果。

2.2.2.4 措施优选

由于在不同驱动因素作用下，各领域和行业减污效益和降碳效益不相同，减污带来的协同降碳效果亦相差较大。在城市“双达”管理中，物理协同效益和成本的经济效益同样需要考虑。因此，基于削减 PM_{2.5} 单位成本和效益费用比，单位 PM_{2.5} 协同减碳量、结合各项污染物及二氧化碳减排潜力，各自排序加和得出减污降碳协同综合推荐序列，以星级方式表现（★数量多代表协同效益明显，措施综合推荐优先级高）。

3

中国城市碳达峰与空气质量改善协同效益评估

城市碳达峰与空气质量改善效益评估路径效果的评估包含多个维度。最基本的效果评估主要包括对目标城市碳达峰时间、大气污染物及碳减排量以及空气质量达标情况的预测，在此基础上还可进一步评估成本效益、健康效益等。



3.1 已有研究进展

城市碳达峰与空气质量改善效益评估路径效果的评估包含多个维度。最基本的效果评估主要包括对目标城市碳达峰时间、大气污染物及碳减排量以及空气质量达标情况的预测，在此基础上还可进一步评估成本效益、健康效益等。

从基准年城市排放清单出发，设置减排情景、预测未来排放并结合空气质量模型评估未来空气质量改善情况的方法学已经较为成熟。这一方法学首先在国家级和省级尺度研究得到应用，近年来逐渐拓展到了城市尺度。技术路线图总结如图 3-1 所示，首先选取减排措施、建立参数化方案，以城市基准排放清单为基础预测未来年份连续年份的大气污染物及二氧化碳排放量。通过对未来年份排放分析可以得到碳达峰年份，对比不同情景间未来排放可进一步评估二氧化碳和大气污染物的减排量。然后，基于空气质量模型模拟获取未来 $PM_{2.5}$ 浓度，评估未来城市空气质量是否达标。以下对各步骤进行更详细的介绍。

构建减排情景方面，从城市实际情况出发选

取不同情景下各个部门的减排措施组合、确定措施执行力度并进行参数化，进而计算得到未来年主要大气污染物和二氧化碳排放量。以往城市在制定空气质量达标规划的实践中，往往通过计算各措施到目标年份的减排量来基于基准年排放清单推算得到目标年份的排放清单；但在“双达”效果评估背景下，需要连续预测未来年份碳排放以确定城市碳排放的达峰时间。已有许多研究利用自下而上的模型进行城市未来连续年份的排放预测，包括 LEAP、GAINS-CITY、MAEKAL、能源平衡模型、系统动力学模型等。其中，LEAP 提供了较为灵活的结构和丰富的技术细节，是在城市未来预测中最具代表性、应用最为广泛的模型。该模型以人口、GDP 等主要社会经济参数为驱动，通过将各项减排措施参数化设置不同情景下未来各部门能源强度、燃料结构、技术分布，已经在深圳 6、北京 7 等城市“双达”路径研究中得到了应用。城市“双达”研究的情景设置中通常包括参考情景（即不采取额外减排措施的情景）和若干个减排情景，通过对比参考情景和不

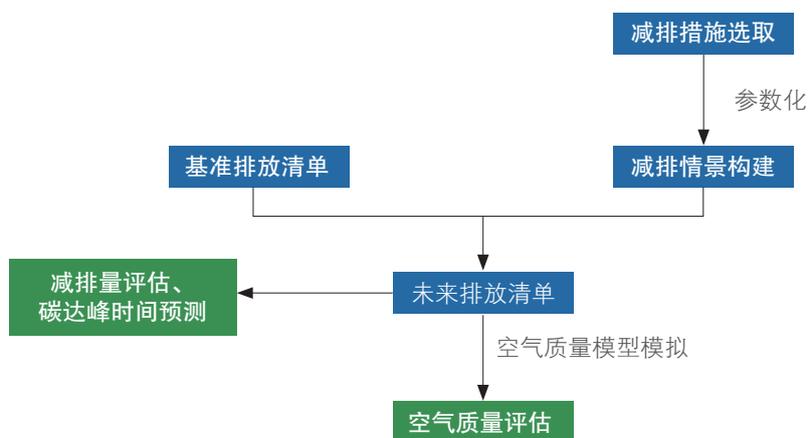


图 3-1 评估“双达”路径效果的技术路线

同的减排情景可评估减排措施对城市碳达峰的推动作用以及相应的减排量。

对于空气质量达标效果的评估主要基于空气质量模型开展，以下以应用较为广泛的 WRF-CMAQ 区域空气质量模型为例进行介绍。WRF 是新一代中尺度天气预报模式，用于进行气象参数模拟并为 CMAQ 空气质量模拟提供气象输入场。减排情景下的目标年排放需要通过时间和空间分配形成能够与大气化学模式对接的网格化输入。CMAQ 是由美国环保署主持开发的第三代空气质量模型，能够通过模拟大气污染物在大气中的传输扩散和各类物理化学过程模拟 PM_{2.5}、臭氧等主要污染物的浓度。人为源排放清单需要进行时空分配处理以形成三维网格化排放文件作为 CMAQ 模型的输入。

空间分配方面，点源排放基于经纬度位置直接进行定位，面源排放，通过人口、GDP、路网等代用参数将排放分配到网格。时间分配方面，针对不同源采用工业产品产量、交通流量等参数建立时间分配廓线，将年排放分配至月、天乃至小时。搭建起完整的 WRF-CMAQ 模拟体系后，可通过对比模拟结果和观测数据验证模型的可靠性。除直接使用 WRF-CMAQ 进行模拟外，也有一些研究借助数学统计手段（回归方法、多项式函数等）和深度学习方法，基于 CMAQ 的数值模拟结果构建空气质量响应曲面模型（RSM）。这一模型建立了污染物排放和空气质量之间的快速响应，本质上是可用于预测空气质量的“简化模型”，也已经在一些城市得到了应用。

3.2 城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析方法

本研究建立了城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架。首先从经济发展水平和产业特征出发，将全国城市划分为六种城市类型（综合服务业型、旅游型、偏能源生产型、偏重工业型、偏轻工业型和农业型），构建相应的减排情景。然后，基于中国城市未来排放预测模型预测了不同情景下 2018-2035 年全国不同类型城市二氧化碳和主要大气污染物的排放变化情况，最终结合空气质量模型和健康效益模型探讨了碳达峰目标对城市空气质量改善的推动作用。

3.2.1 城市类型划分

受资源禀赋、产业基础、区位特征等多方面因素的影响，我国城市处于不同发展阶段。不同城市的经济发展水平、人口规模、产业、能源结构和排放特征具有差异，未来的发展战略和减排路径也将显著不同。识别城市支柱产

业，分类总结城市特征，可为减排路径提供初步的指导。

国内近年来有系列研究基于三产结构、人口、经济发展水平、工业分国民经济行业的产值占比等指标，使用 K-means 聚类方法或绝对值划分方法对中国城市类型进行了分类。本研究参考了以往研究使用的方法，首先主要基于产业结构信息将全国城市划分为农业型、工业型和服务业型，然后结合经济发展水平（人均 GDP）和工业产值结构进一步对工业型和服务业型城市进行细化，最终形成农业型、综合服务业型、旅游型、偏能源生产加工型、偏重工业型和偏轻工业型六类城市。整体技术路线图 3-2 所示，其中，Q1-Q4 如下：

Q1：第一产业占比是否高于全国平均值，且粮食产量高于全国平均值两个标准差？或第一产业占比是否高于全国平均值一个标准偏差？或单位面积人口是否小于 10 人/平方千米？Q2：第

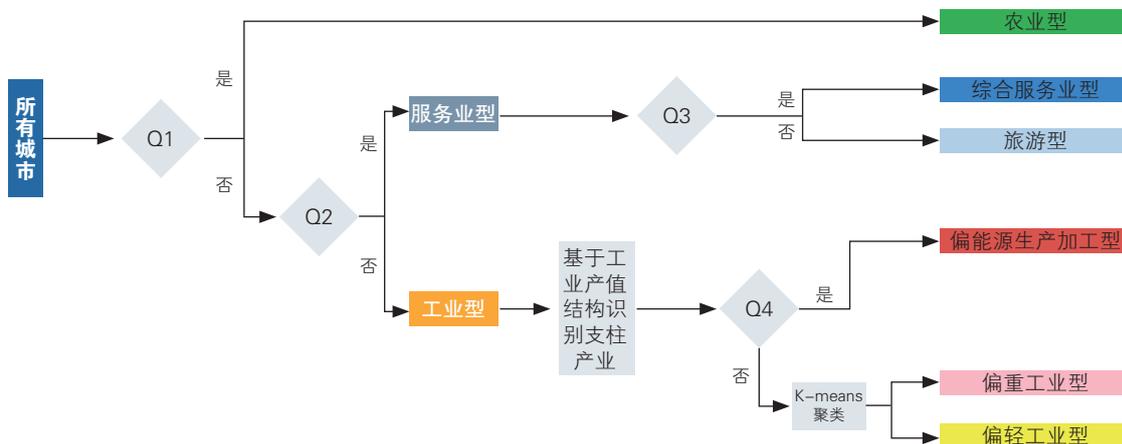


图 3-2 城市类型划分技术路线图

三产业占比是否高于全国平均水平一个标准差？
Q3: 人均 GDP 是否达到发达国家水平？ Q4: 工业产值结构中，能源生产加工产值占比是否最高？

工业产值数据由环境统计数据逐企业聚合至城市，包括能源生产加工业、轻工业和重工业三大类。对于某一工业城市，若能源生产加工业占比最高将被划分至偏能源生产加工型。其余

工业型城市参考 Shan 等人的方法，对工业产值结构进行全国城市排名归一化后进行 K-means 聚类，得到偏轻工业型和偏重工业型两类城市。完成以上步骤后，本研究参照一般认知对个别城市手动进行了类型调整，包括包头、石家庄、大同、朔州、拉萨和韶关。

图 3-3 展示了城市类型的最终划分结果。农

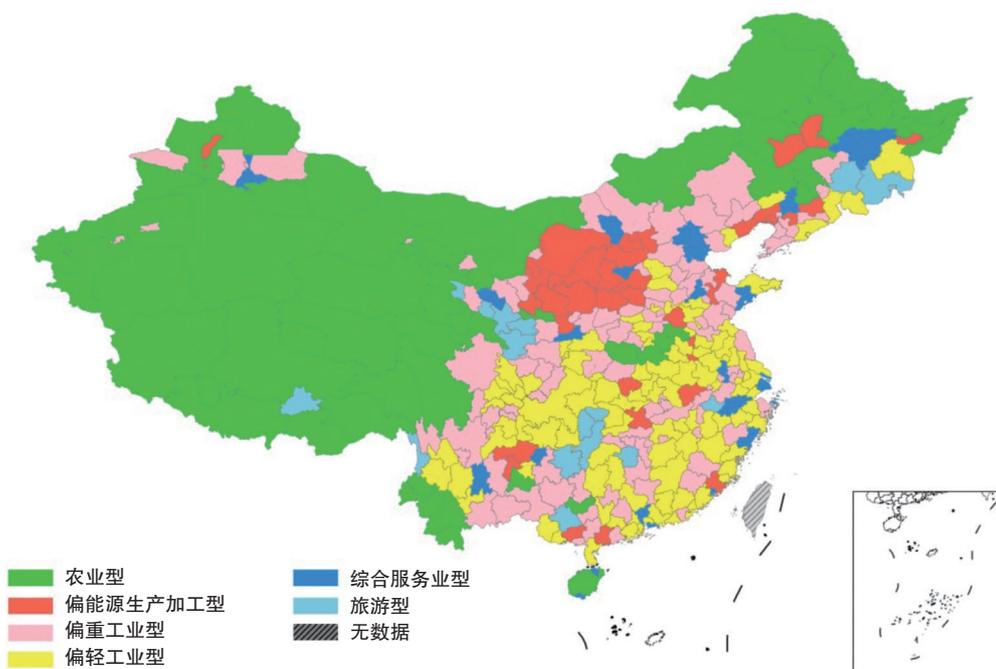


图 3-3 城市类型划分结果

业型城市共 58 个，主要包括以绥化市、齐齐哈尔市、周口市为代表的粮食产量较高、农业发达的城市，以及以那曲地区、阿勒泰地区等人口稀少、生活着大量农牧民的城市。偏能源生产加工型城市共 38 个，包括位于山西 - 内蒙古煤炭基地、淮南 - 淮北煤炭基地、贵州煤炭基地和茂名油田等主要能源生产基地的典型城市。偏轻工业型和偏重工业型城市分别有 103 个和 100 个，广泛分布在我国中部至东南沿海地区。综合服务业型共 24 个主要包括北上广深等大型都市及省会城市，旅游型城市共 16 个，主要包括张家界、黄山等以旅游业为支柱产业的 城市。

为验证城市类型划分的合理性，本研究参考 shan 等 8 的方法分析了不同类型城市的主要社会经济参数情况，并使用 z 检验法进行总体平均值的显著性检验。图 4-4 展示了不同类型城市主要社会经济参数情况，图 4-5 则为双尾 z 检验结果，每一格为不同类型城市间的两两对比，深红色、浅红色和蓝色分别代表非常显著 ($p < 0.01$)、显

著 ($p < 0.05$) 和不显著。农业型城市农业发达，第一产业占比显著高于其它所有类型城市，同时工业化水平低、人均 GDP 水平相对较低。偏能源生产加工型、偏重工业、偏轻工业城市均为进入工业化阶段的工业城市，每一类工业城市对应的支柱工业产值占比都显著高于其它两类工业城市。综合服务业型城市和旅游型城市服务业发达，第三产业占比显著高于其它城市，但综合服务业型城市已经进入后工业化阶段，经济发达；旅游型城市整体经济发展水平仍然较低，两者人均 GDP 的差异在统计学上显著。

3.2.2 中国城市尺度排放预测模型建立

本研究开发的 中国城市排放预测模型框架如图 3-6 所示，以情景设计形成的参数化方案为输入，对接活动水平预测模块和分部门排放预测模块，动态模拟中国城市未来经济发展、能源使用过程和排放变化。

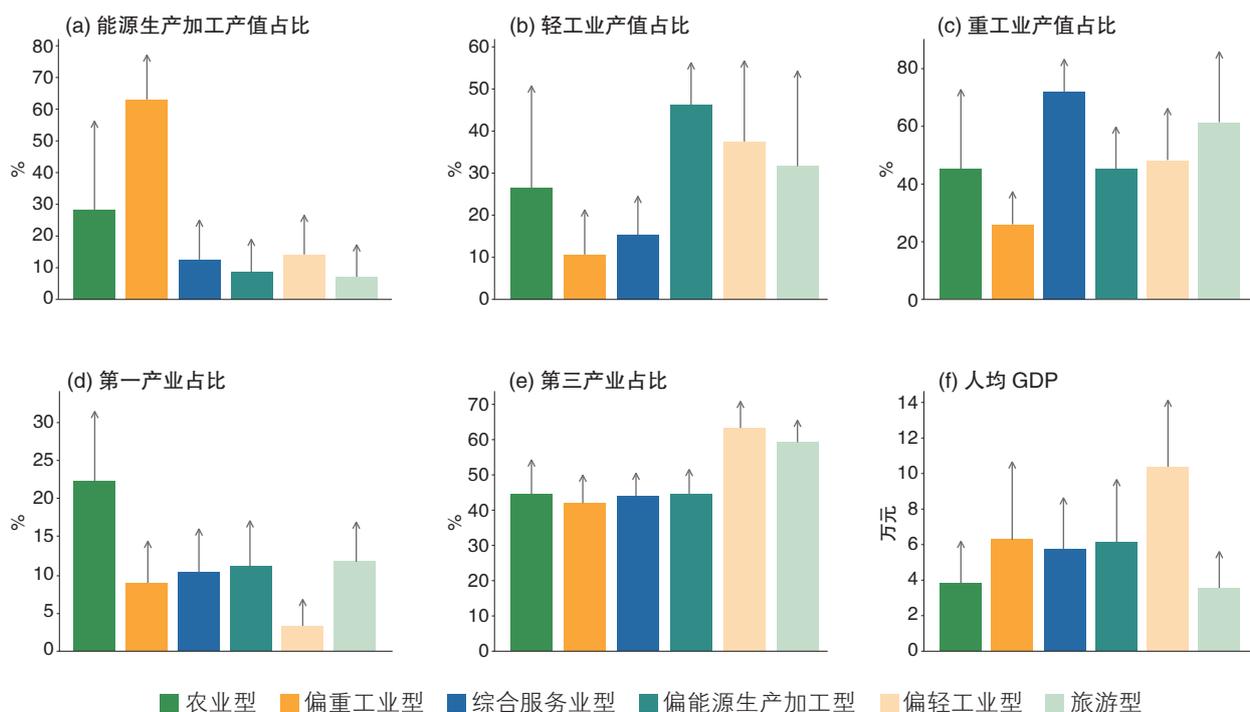


图 4-4 各类型城市主要社会经济参数

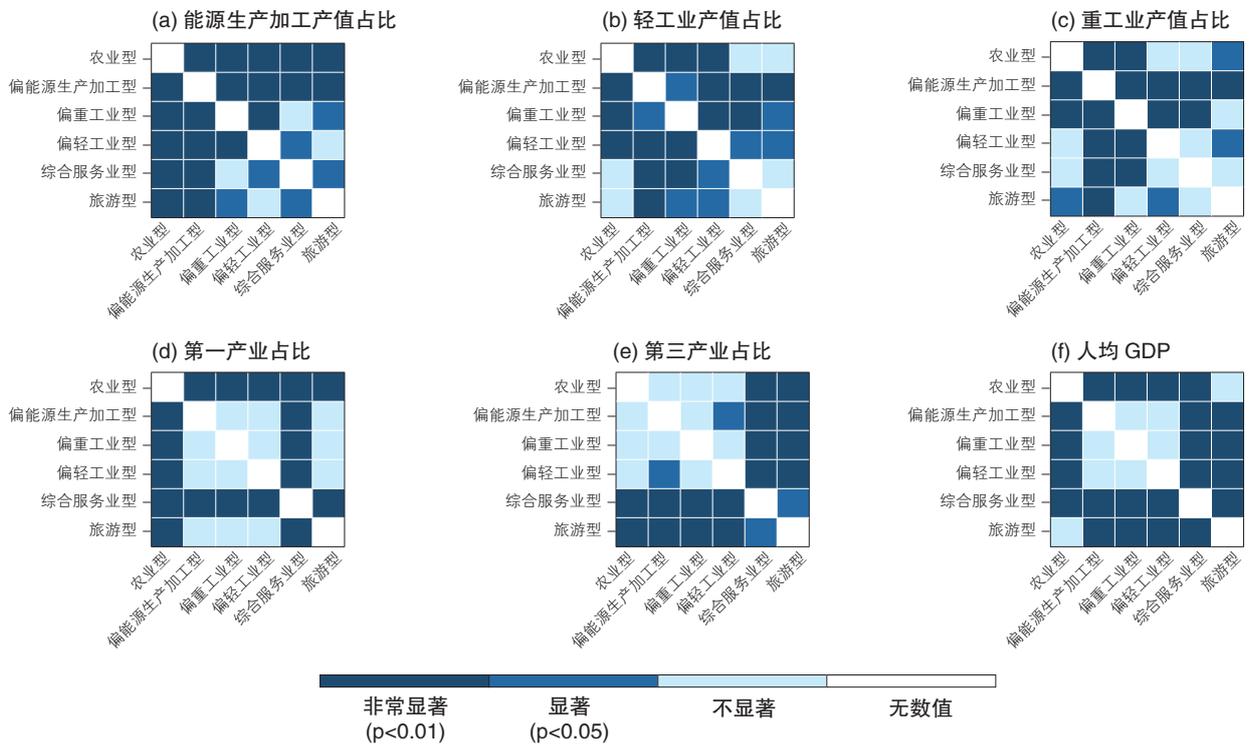


图 3-5 各类型城市主要社会经济参数平均值双尾 z 检验结果

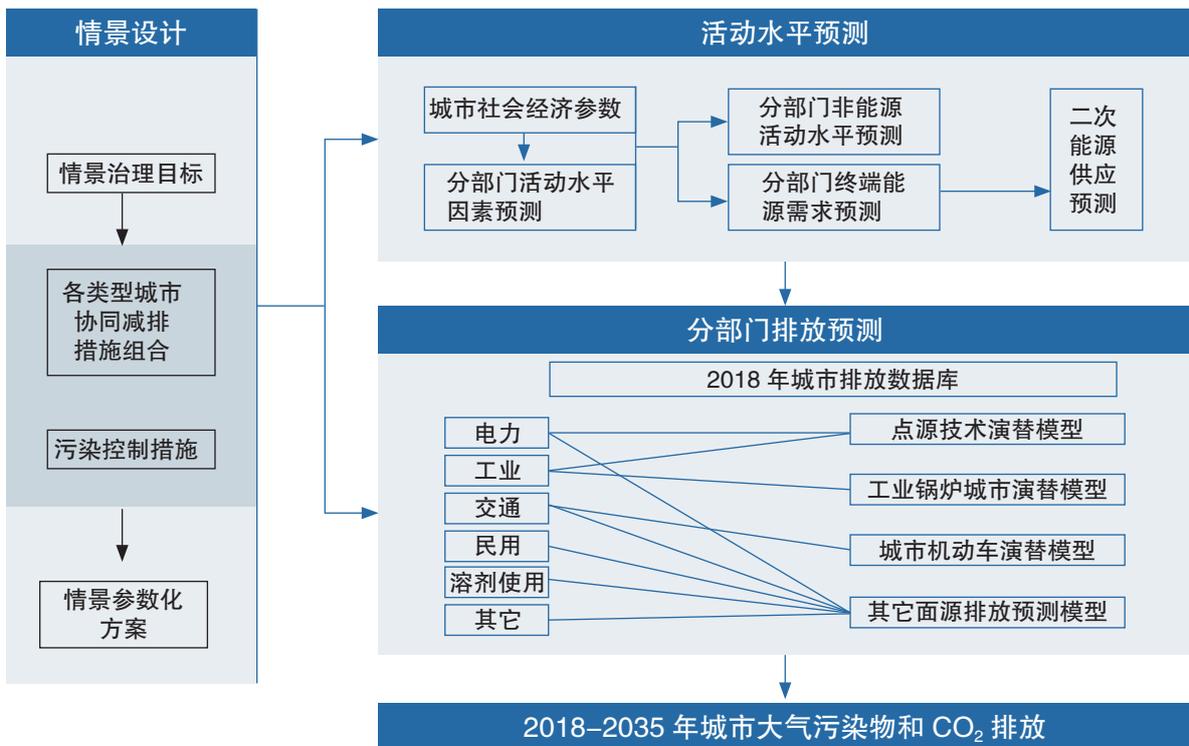


图 3-6 城市大气污染物和二氧化碳排放预测模型

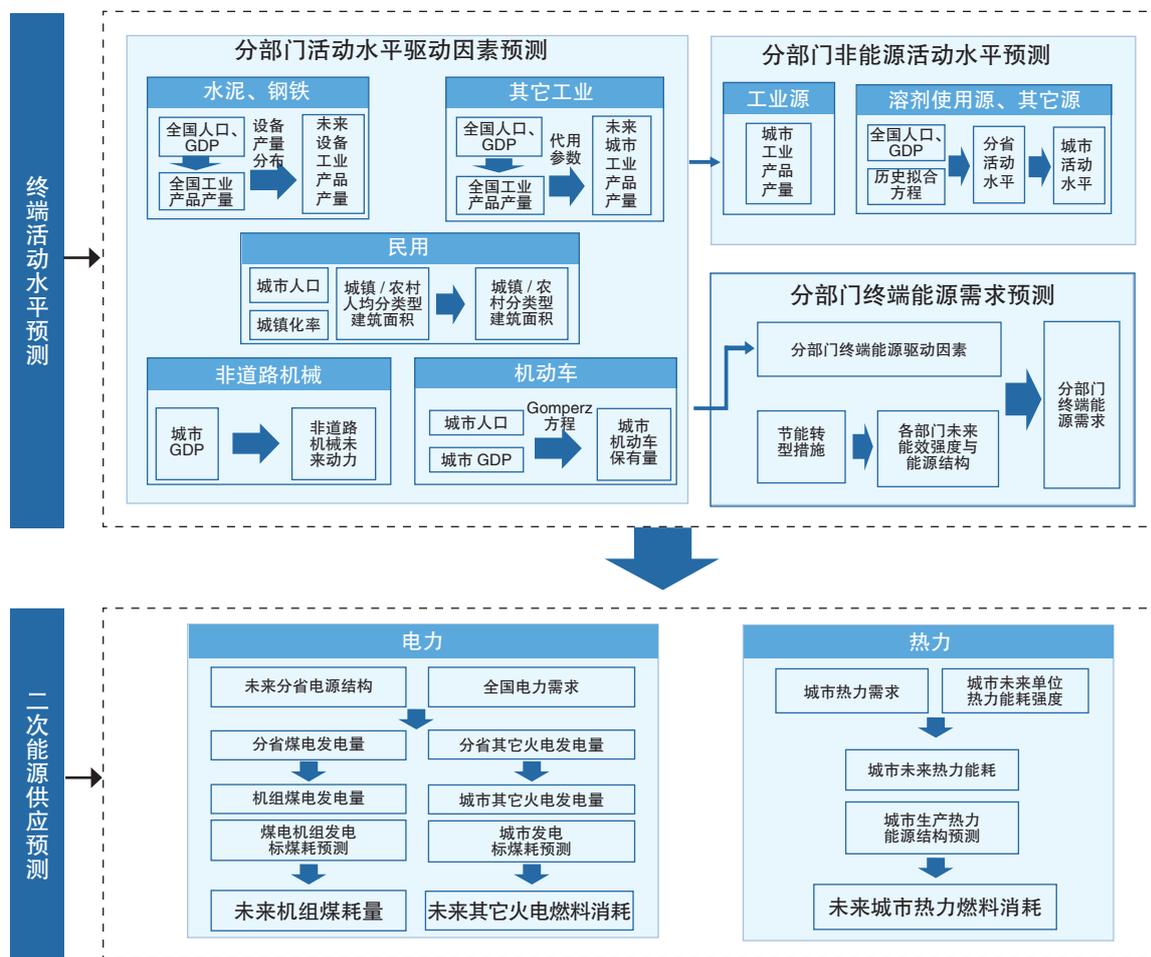


图 3-7 城市活动水平预测模块

城市活动水平的预测技术路线如图 4-7 所示，包括终端活动水平预测和二次能源供应预测两个部分。终端活动水平预测具体又包括分部门非能源活动水平预测和分部门终端能源需求预测，前者指工业、交通、民用、溶剂使用、其它源的产品产量、原料使用量等，对接非能源过程产生的排放；后者指工业、交通、民用的终端能源消耗量，涵盖煤炭、燃油、天然气、电力、热力、非化石能源六大类能源。该模块首先以城市尺度社会经济参数为驱动预测得到分部门活动水平驱动因素，包括工业产品产量、分类型建筑面积、机动车保有量、非道路机械未来动力等。然后，工业产品产量可直接对接至分部门非能源活动水平预测模块，结合溶剂使用源和

其它源的预测形成完整的分部门非能源活动水平预测。对于分部门终端能源需求预测，则在驱动因素基础上结合不同情景下的能源结构与能耗强度（如单位产品能源消耗量），最终得到各部门的终端活动水平。二次能源供应预测主要包括电力和热力预测，从终端能源需求出发预测得到二次能源供应量，结合城市产量分布情况、生产二次能源单位能耗及能源结构，进一步得到用于生产电力或热力的燃料消耗量。

分部门排放预测模块的技术路线如图 3-8 所示。本研究根据不同部门基础数据的详细程度和特征构建了不同精度的预测模型，包括点源技术演替模型、工业锅炉城市演替模型、城市机动车演替

模型和其它面源排放预测模型。这一模块继承了中国未来排放动态评估模型 (Dynamic Projection model for Emissions in China, 简称 DPEC) 基于技术演替的未来排放变化动态演替模拟框架, 并在此基础上使用第二章建立的中国城市排放基础数据库对分部门排放预测模块进行了细化, 支持考虑未来城市层面减排措施带来的影响。

使用点源预测模型的部门包括燃煤电厂、水泥和钢铁, 从第二章建立的包含产能、产量、服役时间、生产/末端技术等详细信息的点源数据库出发, 细致刻画不同情景措施作用下的点源淘汰新建过程以及未来技术演替过程, 最终计算获

得未来逐点源排放。对于城市机动车演替模型和工业锅炉城市演替模型, 本研究引入了大量城市本地化参数 (例如, 分城市保有量拟合曲线、分城市工业锅炉蒸吨数分布等) 以提升预测精度。机动车预测模型逐年计算未来城市机动车保有量、注册量, 动态模拟城市机动车车队结构和相应排放变化; 燃煤工业锅炉部门则以面源形式动态模拟燃煤锅炉淘汰和新增过程。其它面源排放预测模型由于可用的本地化参数较少难以建立技术演替过程, 因此简单预测减排措施影响下的技术分布与排放变化。其中, 基准年排放因子、末端控制技术等技术参数由 MEIC 模型提供, 同一省份的城

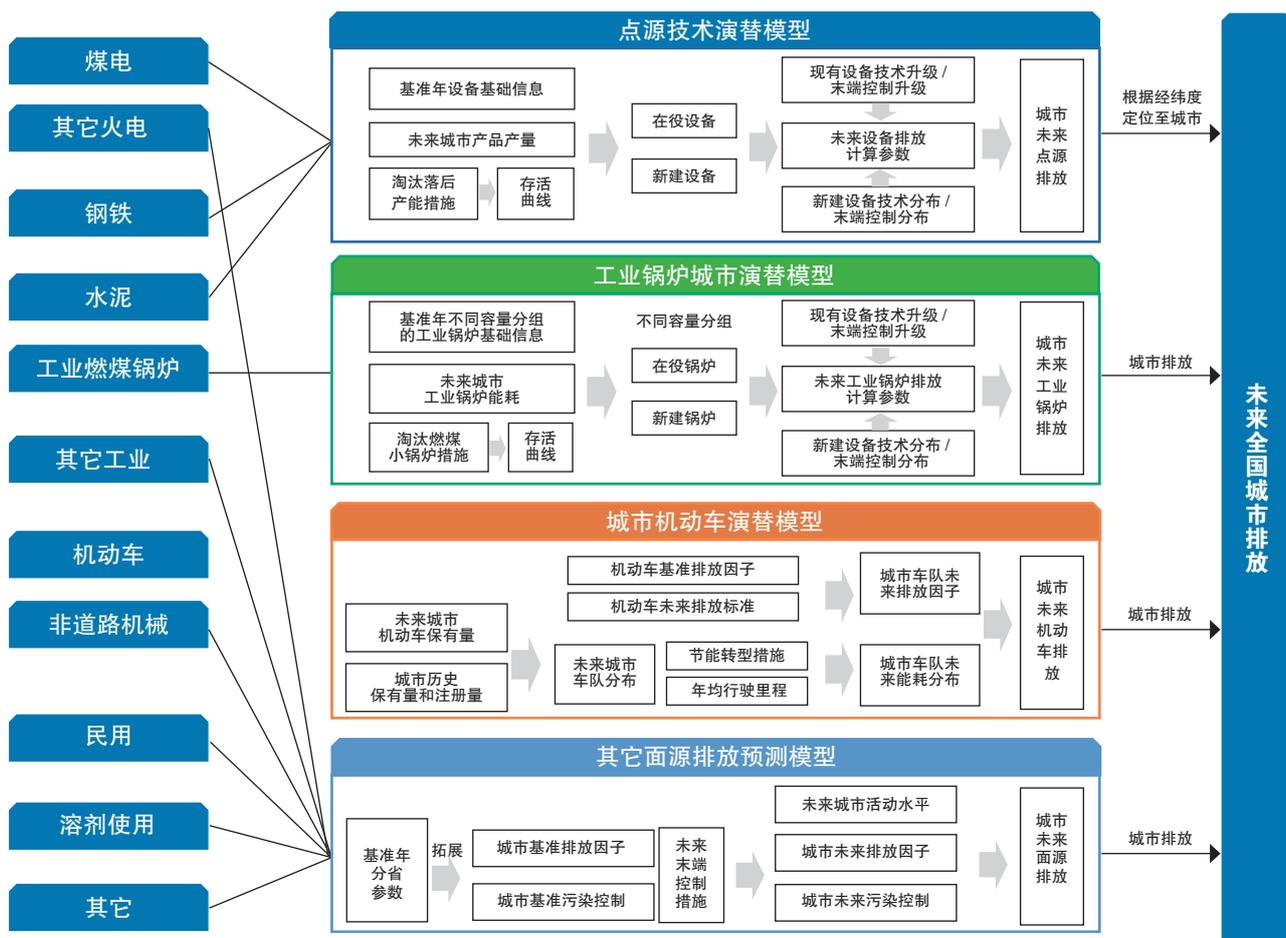


图 3-8 城市分部门排放预测模块

市参数在省级尺度上保持一致。基准年城市活动水平由 MEIC 的省级活动水平向下分配得到，并将优先使用环境统计数据库聚合得到的分城市产品产量作为代用分配参数。

3.2.3 情景设计方法

本研究设计情景时，以治理目标作为约束，从不同类型城市特征出发选取城市协同减排措施组合，结合相应的污染控制措施方案，最终形成能够与活动预测水平模块和分部门排放预测模块对接的情景参数化方案（图 3-9）。

对于城市协同减排数据库，本研究梳理总结了 27 条措施，涉及电力、供热、工业、机动车、非道路机械、民用等 12 个部门，如表 4-1 所示。对每一条协同减排措施，本研究均构建了不同实施力度的三组参数化方案，从弱到强分别是常规减排、强化减排和最佳减排。不同减排情景对应不同力度的减排措施组合。需要特别说明的是，由于电力传输的复杂性和基础数据的局限性，城市预测模型无法在城市尺度展开非化石电力的相

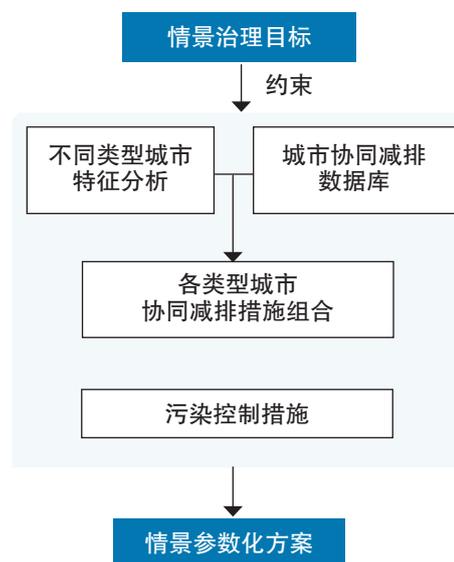


图 3-9 本研究使用的情景设计方法

关预测，因此电力结构清洁化措施在本研究中使用省级火电比例变化进行表征。除此以外，交通结构调整、植树造林等低碳政策由于模型局限性未能考虑在内。

大气污染物控制措施方面，本研究沿用了 DPEC 中 Tong 等 9 构建的末端治理方案，包括现行末端治理、强化末端治理和最佳末端治理。

表 3-1 城市协同减排措施库

编号	措施	编号	措施
P1	电力 - 禁止新建产能	F2	石化化工 - 清洁能源替代燃煤
P2	电力 - 淘汰落后产能	M1	有色冶炼 - 淘汰落后产能
P3	电力 - 压减单位供电煤耗	M2	有色冶炼 - 清洁能源替代燃煤
P4	供热 - 淘汰燃煤小锅炉	O1	其它工业 - 淘汰落后产能
H1	供热 - 淘汰燃煤小锅炉	O2	其它工业 - 清洁能源替代燃煤
H2	供热 - 推广可再生能源和余热利用	V1	机动车 - 能效提升
S1	钢铁 - 淘汰落后产能	V2	机动车 - 推广 LNG 车辆
S2	钢铁 - 推广电炉炼钢	V3	机动车 - 推广新能源车辆
C1	水泥 - 淘汰落后产能	N1	非道路机械 - 淘汰老旧机械
L1	石灰 - 淘汰落后产能	N2	非道路机械 - 提升电动化比例
L2	石灰 - 清洁能源替代燃煤	R1	民用 - 建筑节能
B1	砖瓦 - 淘汰落后产能	R2	民用 - 散煤替代
B2	砖瓦 - 清洁能源替代燃煤	R3	民用 - 提升可再生能源比例
F1	石化化工 - 淘汰落后产能		

3.3 全国城市碳达峰与空气质量改善协同效益评估

为探索在碳达峰和空气质量改善目标约束下未来全国城市排放路径和空气质量演变情况，本研究设计了两组情景。第一组情景在 3.3.1 节中进行介绍，以全国碳达峰时间、全国碳达峰排放峰值，以及各类型城市达峰率为整体约束，选取协同减排措施集合，在统一的污染治理方案（强化末端治理）下分析碳达峰目标对不同类型城市 PM_{2.5} 浓度改善的推动作用。第二组情景在 4.3.2 节中进行介绍，以碳达峰和清洁空气协同目标为导向设置三个情景，探究末端治理和协同措施的 PM_{2.5} 浓度改善潜力，分析设计的协同治理路径下城市碳达峰和空气质量改善情况。

3.3.1 碳达峰目标对城市空气质量改善的协同作用

考虑不同城市在经济、产业结构、排放特征

等方面的差异是构建合理的减排路径的基础。本研究构建了差异化情景分析构建方法，在情景治理目标约束下，从不同类型城市特征出发选取城市协同减排措施组合，结合相应的污染控制措施方案，最终形成能够与城市未来排放预测模型对接的情景参数化方案。整体技术路线如图 3-10 所示。

按照综合评分排序，本研究确定了不同类型城市未来碳减排措施整体强度：综合服务业型（29）> 偏轻工业型（27）> 偏重工业型（24）> 偏能源生产加工型（19）> 旅游型（16）> 农业型（11）。不同类型城市的分项指标及得分如图 3-11 所示。分城市类型来看，综合服务业型城市平均碳排放规模较大，经济发展水平较高、碳排放强度较低，能够较好地支持推进碳减排工作。尽管综合服务业型城市过去实现 GDP 和碳排放增长脱钩的比例较低，但整体推进碳达峰的意愿较强，出台低碳规划的城市数量占比高达

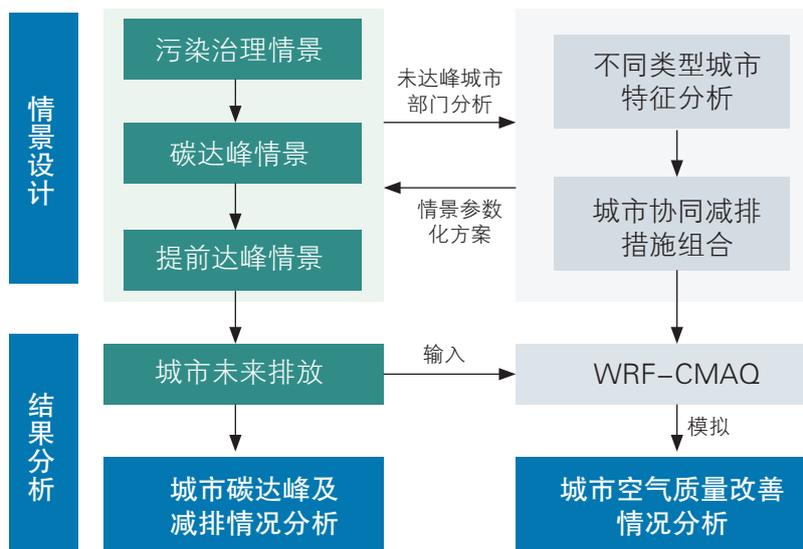


图 3-10 碳达峰目标下的情景设置方法

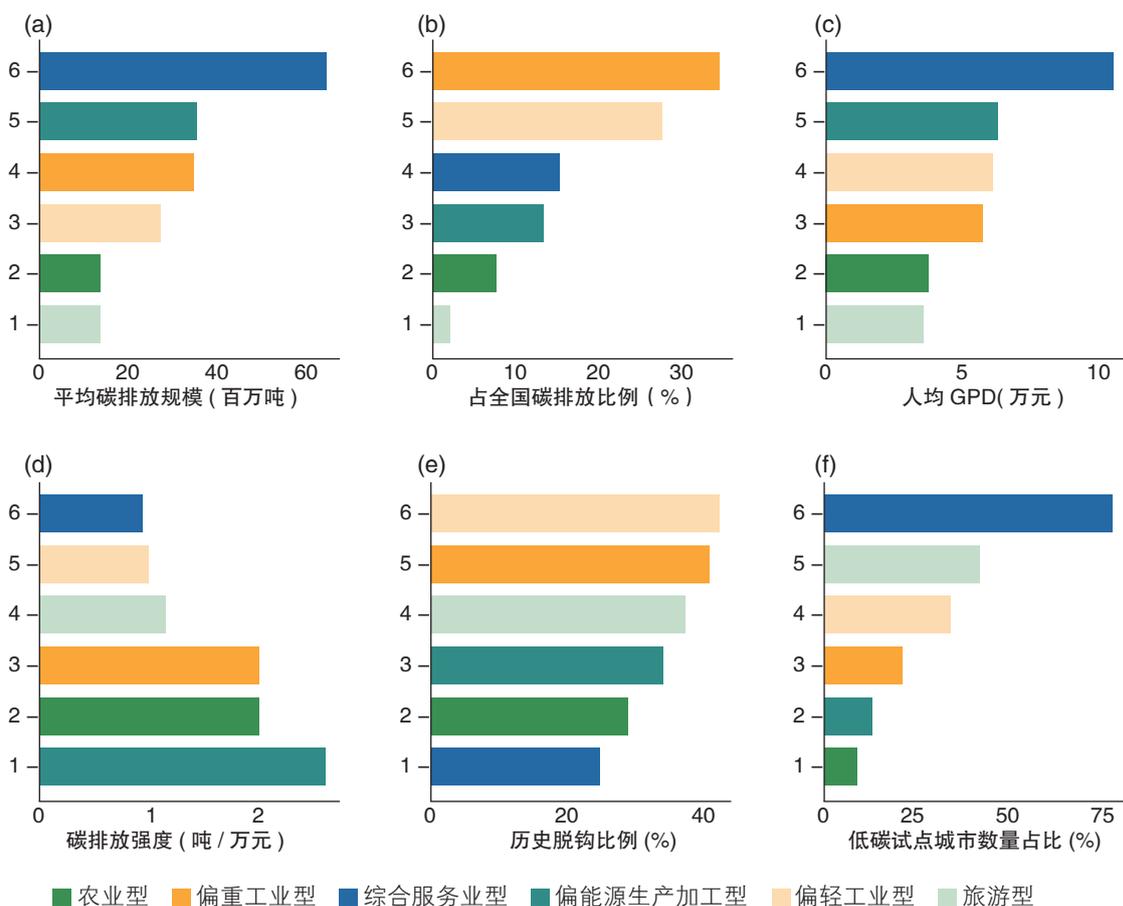


图 3-11 不同类型城市碳达峰目标分析

78.2%，因此未来将发挥碳达峰示范作用，减排力度最强。三类工业型城市的整体减排强度划分至第二梯队。其中，偏轻工业型城市历史脱钩比例高、碳排放强度较低，经济水平良好，支持碳减排工作进一步推进。偏重工业型和偏能源生产加工型城市由于分别承担着钢铁、火力发电等主要工业产品和能源生产责任，转型难度相对更大，低碳试点城市数量相对较少。但它们的平均碳排放规模大，偏重工业型城市占全国碳排放比例更是居所有城市类型首位，因此具有碳减排必要性。旅游型、农业型城市的碳排放规模、占全国碳排放比例均较低，整体减排压力较小；此外从发展公平性来看，这两类城市人均 GDP 水平仍然较低，

未来应当充分给予这两类城市经济发展空间，因此总体未来碳减排力度在所有类型城市中最弱。

本章设置的三组情景用于探究碳达峰目标对中国城市空气质量改善的协同作用，具体包括污染治理情景、2030 年碳达峰情景、2025 年提前达峰情景，其中碳达峰情景与提前达峰情景均考虑了城市差异化达峰目标。污染治理情景反映未来社会经济增长自然驱动下的排放变化，仅考虑电力、民用能源的自然转型。碳达峰和提前达峰情景分别以 2030 年前全国碳排放达峰和 2025 年左右全国碳排放达峰为总体约束目标，同时基于前文的分析设定了各类型城市的差异化达峰目标、选取了相应的协同减排措施组合。大气污染物控

表 4-2 碳达峰目标下的情景设置

情景名称	治理目标	协同减排措施选取	污染物控制措施
污染治理	无约束	无	
碳达峰	全国碳排放在 2030 年前达到峰值。综合服务业型城市达峰率达到 40% 以上，偏轻工业型、偏重工业型达峰率达 30% 以上，偏能源生产型城市达峰率达 20% 以上，农业型和旅游型城市达峰率达 10% 以上	分析污染治理情景下未达峰城市的部门碳排放特征，强化对重点减排部门的对应协同减排措施	强化末端治理，考虑“大气十条”、“蓝天保卫战”系列末端治理措施的延续
提前达峰	全国碳排放在 2025 年左右达到峰值。综合服务业型城市达峰率达到 90% 以上，偏轻工业型、偏重工业型、偏能源生产型城市达峰率达 80% 以上，农业型和旅游型城市达峰率达 50% 以上	分析碳达峰情景下未达峰城市的部门碳排放特征，强化对重点减排部门的对应协同减排措施	

制措施方面，所有情景均采用强化末端治理，延续大气十条、蓝天保卫战已发布的污染控制政策，电力、钢铁、有色、水泥、玻璃等重点行业继续推行超低排放改造，并进一步加强对 VOC 的治理。

在此对协同减排措施的选取方法进行进一步说明。碳达峰情景以污染治理情景为基础，通过分析污染治理情景下未能实现碳达峰的各类型城市到 2030 年的部门碳排放情况，选取贡献较大、

增速较快的部门作为碳减排重点部门，对这些部门的协同减排措施进行强化。分析结果显示，电力、民用、机动车、供热等部门是各类型未达峰城市碳排放增长的主要驱动力。最终，本研究形成了碳达峰和提前达峰情景下选取的协同减排措施组合，如图 3-12 所示。y 轴代表协同减排措施，x 轴代表不同类型城市，不同颜色代表措施执行力度，白色代表未执行措施。

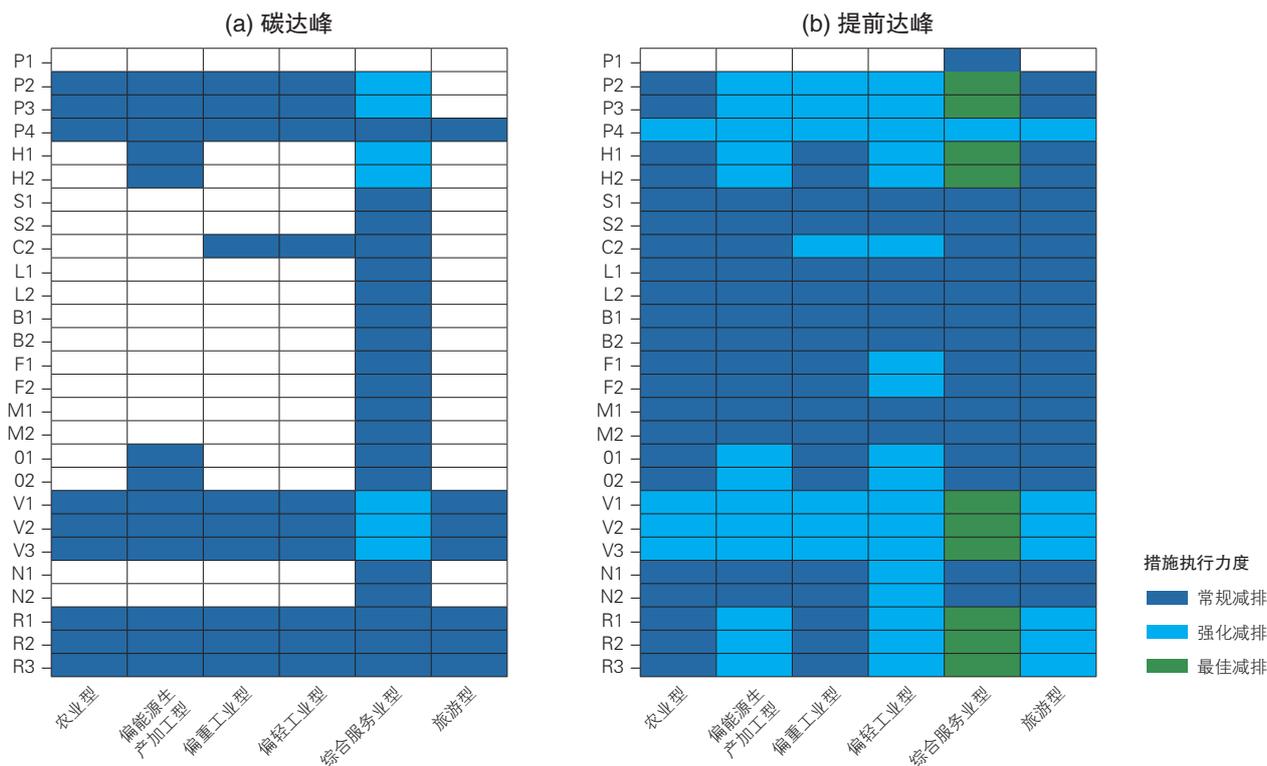


图 3-12 不同情景下的减排措施组合

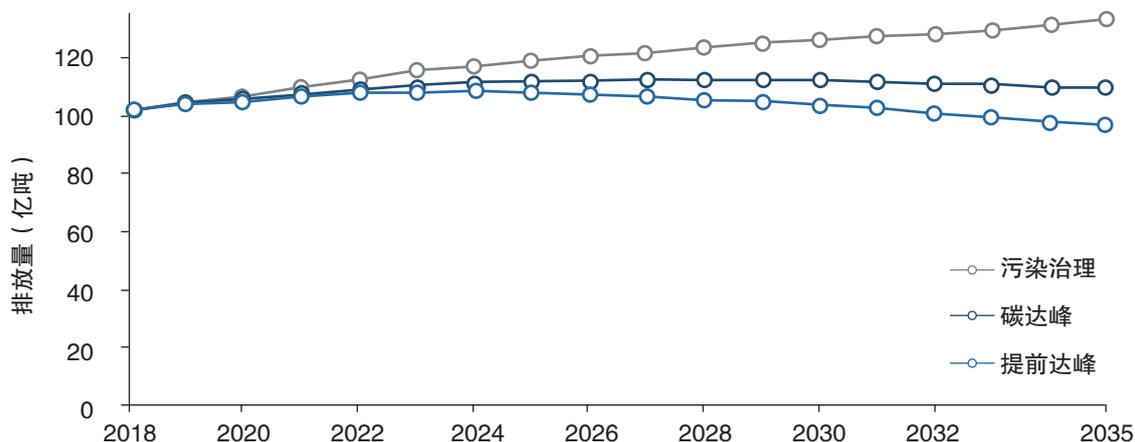


图 3-13 碳达峰目标下全国二氧化碳排放变化

碳达峰情景下全国碳排放将在 2029 年达峰，2030 年碳排放相对污染治理情景下降了 11.2%。分部门来看，通过推广工业部门节能减排技术，工业部门将提前至 2023 年左右碳达峰。电力部门在碳达峰情景下节能转型加速，2030 年非化石发电占比上升至 43.2%，2035 年进一步上升至 49.2%，电力部门碳排放于 2030 年达到峰值后开始下降。交通部门在 2032 年出现峰值。民用部门碳排放未出现峰值，但相对污染治理情景增幅减缓，到 2030 年碳排放相对污染治理情景下降了 6.4%。提前达峰情景于 2025 年达峰。在进一

步强化的协同减排措施推动下，工业部门碳排放达峰时间提前到了 2022 年。电力部门碳排放得益于发电标煤耗进一步的下降提前至 2026 年达峰。交通部门碳排放于 2030 年达峰。民用部门碳排放上涨速度进一步放缓但仍未达峰，到 2030 年排放相对 2018 年上涨了约 2.8%。

为进一步针对城市碳达峰的情况进行分析，首先需要引入碳达峰时间的判定标准。本研究参考了以往城市碳排放达峰的相关研究，首先找出城市在 2018–2035 年间碳排放最大值出现的年份，然后对该年份后的所有年份进行 Mann–

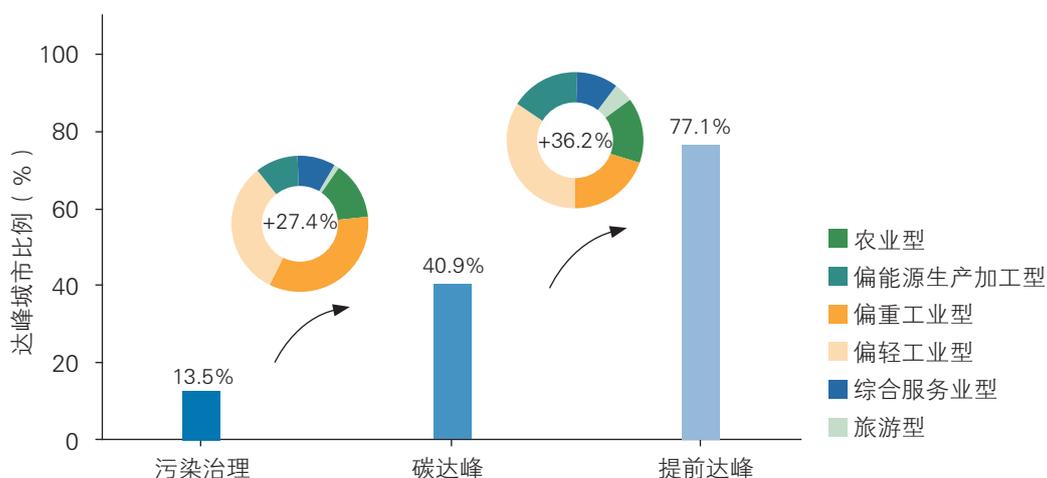


图 3-14 碳达峰目标下全国城市碳达峰比例

Kendall 趋势检验。Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数方法，可以用于确定某一时间序列是否符合单调递减的趋势，本研究中取 $p < 0.05$ 。当某一城市的碳达峰时间小于等于 2030 年且通过 Mann-Kendall 趋势检验时，认为该城市实现碳达峰。当碳达峰时间大于 2030 年时，即使出现在最高点，由于数据量过少仍然无法判定为达峰。图 3-14 展示了不同情景下城市碳达峰情况。柱状图代表达峰城市比例，环形图则展示了随着协同减排措施加强而进一步实现碳达峰城市中分类型的组成情况。若不推行额外的协同减排措施，污染治理情景下全国仅有 13.5% 的城市实现碳达峰，以偏重工业型城市、偏轻工业型城市居多。通过在全国城市推行碳减排措施，碳达峰情景下实现 2030 年碳达峰的城市比例可相对污染治理情景上升 27.4%，提前达峰情景下这一比例可相

对碳达峰情景进一步上升 36.2%。从城市类型来看，碳达峰情景相对污染治理情景增加的实现碳达峰的城市以偏重工业型城市和偏轻工业型城市为主。提前达峰情景相对碳达峰情景增加的实现碳达峰的城市中偏重工业型城市的占比明显下降，其它类型城市的占比则有所上升。

进一步对不同类型城市达峰情况和部门驱动力进行分析，图 3-15 展示了各情景下不同类型城市的达峰时间分布。污染治理情景下各类型城市的碳达峰率在 5.3%–25% 之间，其中偏重工业型城市的达峰率在所有类型城市中最高，钢铁、水泥等工业产品产量下降是污染治理情景下偏重工业型城市的达峰主要驱动力。偏能源生产加工型城市达峰率仅为 5.3%，包括固原市、抚顺市，由于人口流失较为严重、未来机动车保有量下降，交通部门减排成为碳达峰的主要驱动

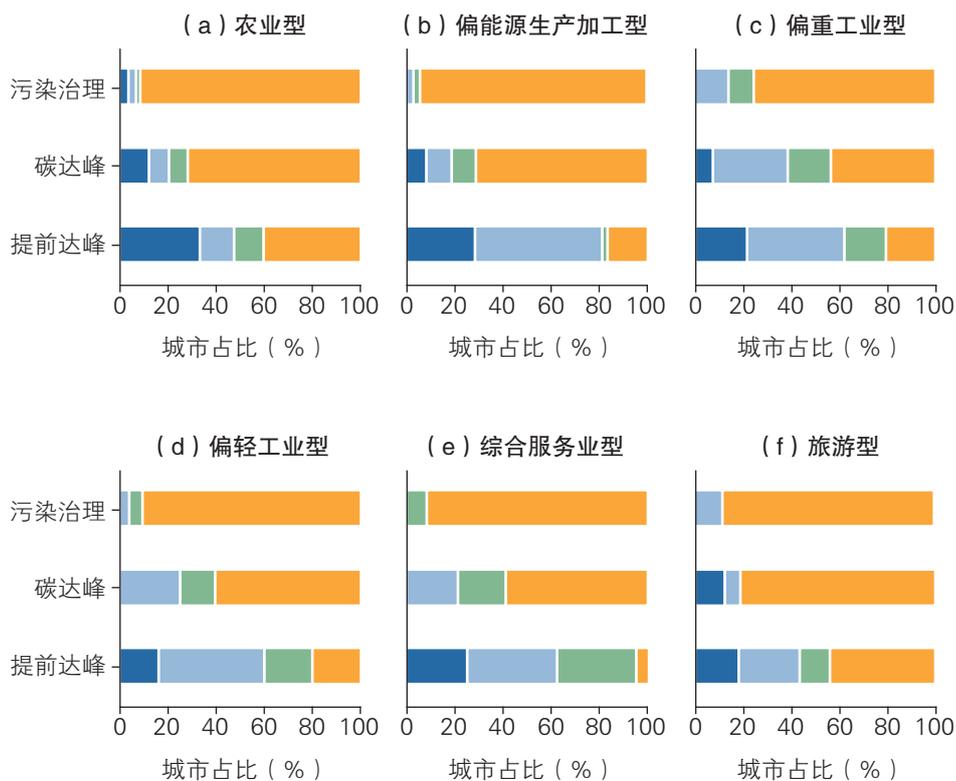


图 3-15 不同情景下各类型城市碳达峰情况分析

力。碳达峰情景下，各类型城市达峰率上升至18.8%–53.0%。偏重工业型、偏轻工业城市达峰率分别达到53.0%和42.7%。到2035年以工业部门为首要碳减排部门的城市在偏重工业城市和偏轻工业城市中的占比分别为81.1%和68.2%，相对基准年的平均碳减排比例约为20%左右，表明工业部门减排是推动这两类城市达峰的主要驱动力。旅游型、偏能源生产加工型、农业型和综合服务业型城市达峰率依次为18.8%、23.7%、25.4%和33.3%。农业型城市以电力为首要减排部门的达峰城市比例最高，占40.0%，平均碳排放变化比例达到-72%，这与农业型城市的落后火电被淘汰密切相关。其它三种类型则均以工业为首要部门的达峰城市比例最高，占50%–66.7%；其中综合服务业型城市中以电力和交通为首要碳减排部门的比例占到50%。提前达峰情景下，除农业型城市达峰

率为49.2%以外，其它各类型城市达峰率均超过50%，偏重工业型城市、偏轻工业型和综合服务业型城市达峰率达75%以上。从部门减排贡献来看，工业部门对所有类型城市达峰均为最为重要的驱动力，到2035年分别有37.9%–53.7%的城市以工业为首要碳减排部门。相较碳达峰情景，电力部门对城市碳达峰推动作用更为显著，分别有19.5%–34.5%的城市以电力为首要减排部门。

图3-16展示了不同情景下未来全国主要大气污染物排放变化情况。污染治理情景下，到2030年SO₂、NO_x、PM_{2.5}和VOC排放相对2018年排放分别下降了19.4%、19.2%、25.6%和11.5%。碳达峰情景可使得各类主要大气污染物排放到2030年相对污染治理情景进一步下降2.2–9.3%；提前达峰情景相对污染治理情景则下降了4.6%–16.1%。末端控制措施带来的减

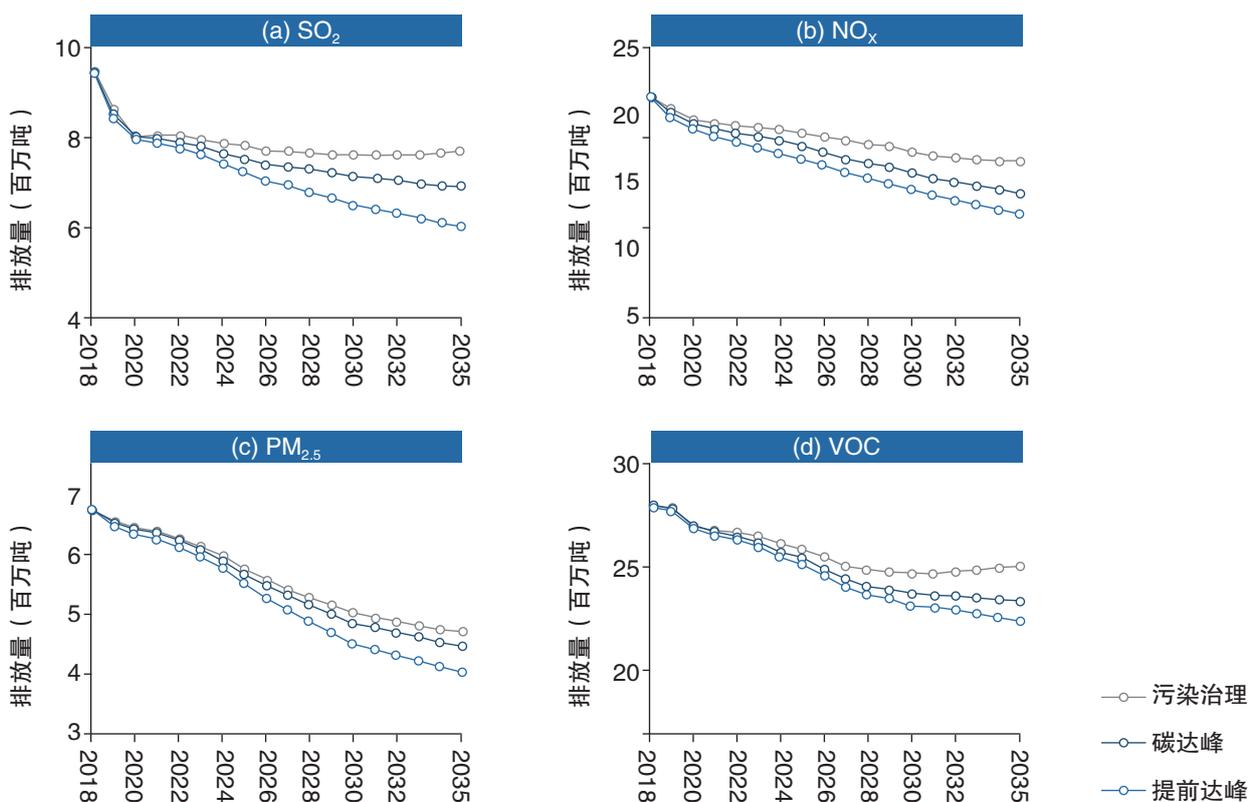


图3-16 不同情景下各类型城市主要大气污染物排放变化分析

排效益在 2030 年前较为显著。SO₂ 和 NO_x 排在 2018–2020 年间受工业重点部门超低排放改造推动出现显著下降。PM_{2.5} 排在 2022 到 2030 年间受到工业部门主要产品产量达峰和超低排放改造推进的双重影响，排放呈现快速下降趋势。VOC 排放受溶剂使用部门推广水性溶剂、推广 VOC 末端处理装置等治理措施驱动，在 2030 年前呈现出平稳的下降趋势。2030 年后，随着末端改造带来的减排潜力逐渐释放完毕，污染物排放下降趋缓，SO₂ 和 VOC 排在污染治理情景下甚至出现了上升趋势。以 VOC 为例，2030–2035 年溶剂使用量和燃油机动车数量持续上升，但 VOC 末端控制措施不再强化，最终引起 VOC 排放反弹。

图 3–17 展示了不同情景下 2030 年 PM_{2.5} 浓度的空间分布情况。基准年（2018 年）我国

PM_{2.5} 浓度空间分布呈现出和主要大气污染物排放分布类似的“西低东高”格局，高值区主要集中在“2+26”城市、汾渭平原等重点区域，同时新疆受到沙尘影响浓度存在 PM_{2.5} 浓度的相对高值区。2018 年，全国 PM_{2.5} 人口加权浓度为 39.3 μg/m³。污染治理情景下，电力、民用部门的自然转型以及末端控制措施推动了全国 PM_{2.5} 人口加权浓度下降，到 2030 年下降至 31.0 μg/m³。通过强化协同减排措施，碳达峰情景和提前达峰情景下 2030 年全国 PM_{2.5} 人口加权浓度可分别下降至 29.8 和 28.0 μg/m³，相对污染治理情景产生了 1.2 和 3.0 μg/m³ 的 PM_{2.5} 浓度下降效益。基于站点平均模拟值进行分析，到 2030 年污染治理情景、碳达峰情景和提前达峰情景下 PM_{2.5} 年均浓度达到国家二级标准（35 μg/m³）的城市数量占比从 2018 年的 52.2% 分别上升至 72.1%、75.7% 和

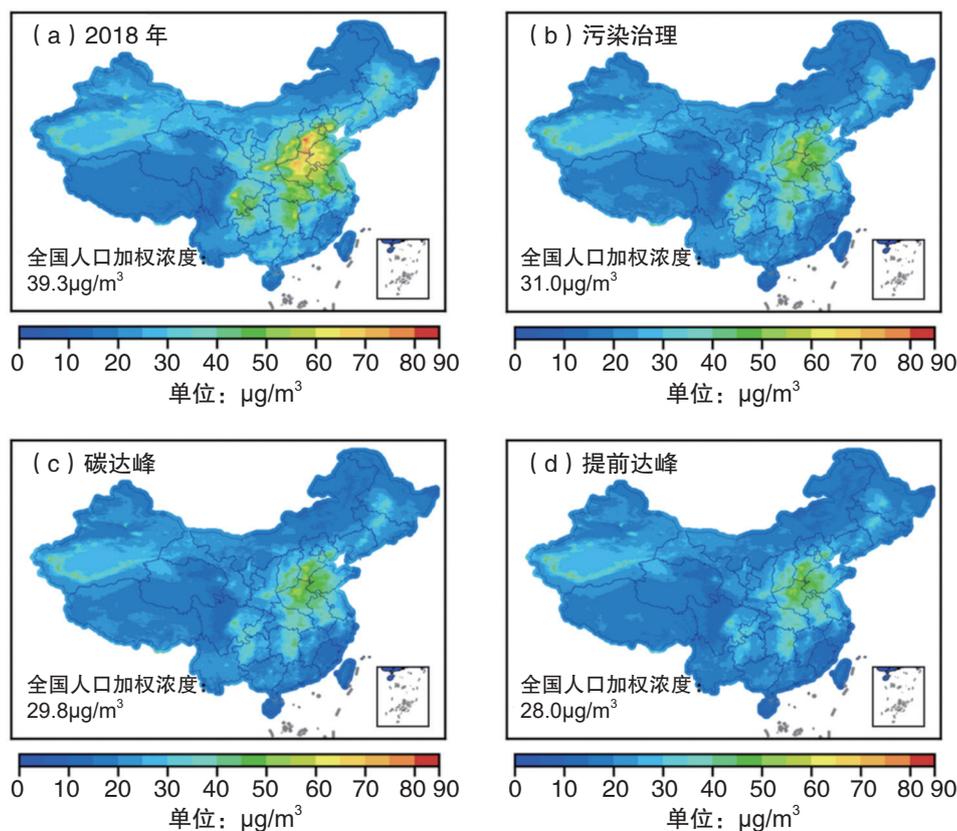


图 3–17 碳达峰情景下全国年均人口加权 PM_{2.5} 浓度

81.3%。减排情景下 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到国家一级标准 ($15 \mu g/m^3$) 的城市比例上升并不显著, 2018 年为 5.6%, 污染治理情景下仅为 4.5%; 碳达峰情景和提前达峰情景下则分别上升到 5.9% 和 6.8%。

分城市类型来看, 基准年三类工业型城市的 $PM_{2.5}$ 污染形势较为严峻, 年均 $PM_{2.5}$ 人口加权浓度接近 40, 年均浓度达到国家二级标准的城市比例仅为 45% - 52%。综合服务业型城市的 $PM_{2.5}$ 年均人口加权浓度低于三类工业型城市, 但仍处于相对高值 ($36.2 \mu g/m^3$), 年均浓度达到国家二级标准的城市比例为 54%。旅游型、农业型城市空气质量基础好, 基准年年均 $PM_{2.5}$ 人口加权浓度均低于 $30 \mu g/m^3$, 80% 以上的城市 $PM_{2.5}$ 浓度达到国家二级标准。污染治理情景下, 所有类型城市年均人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度降低到 $35 \mu g/m^3$ 以下, 其中旅游型、农业型城市达到 WHO 发布的 $PM_{2.5}$ 污染第二阶段过渡值标准 ($25 \mu g/m^3$)。碳达峰情景则能够推动各类型城市年均浓度相对污染治理情景下降 $0.7-1.2 \mu g/m^3$, 以偏能源生产加工型城市型和偏轻工业型城市下降最为显著; 同时, 所有类型城市 $PM_{2.5}$ 浓度达到国家二级标准的比例均增加至 70% 以上。提前达峰

情景下空气质量进一步改善。在 90% 以上城市碳达峰目标的驱动下, 综合服务业型城市年均人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度降低至 $25 \mu g/m^3$ 以下, 相对碳达峰情景进一步下降了 $3.7 \mu g/m^3$, 达到国家二级标准的城市占比提升至 92%。偏能源生产加工型、偏轻工业型和偏重工业型城市的年均人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度相对碳达峰情景进一步下降了 1.7、1.4 和 $1.3 \mu g/m^3$, 达标率均提升至 75% 以上。旅游型、农业型城市 2030 年年均人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度分别进一步下降了 1.3 和 $1.2 \mu g/m^3$, 其中旅游型城市全面达到国家二级标准。农业型城市中, 驻马店、周口等城市的基准 $PM_{2.5}$ 浓度较高 (高于 $50 \mu g/m^3$), 即使提前达峰情景也未能推动它们的年均浓度下降至 $35 \mu g/m^3$ 以下, 因此总体达标率相对碳达峰情景并未出现进一步的提升。

3.3.2 协同目标对全国城市碳达峰与空气质量改善的推动作用

本章共设计了参考情景、强化治污和协同 - 强化治污三组排放路径, 具体设置如下表所示。参考情景不考虑额外的协同减排措施和大气污染物控制措施 (现行末端治理), 为其余情景提供

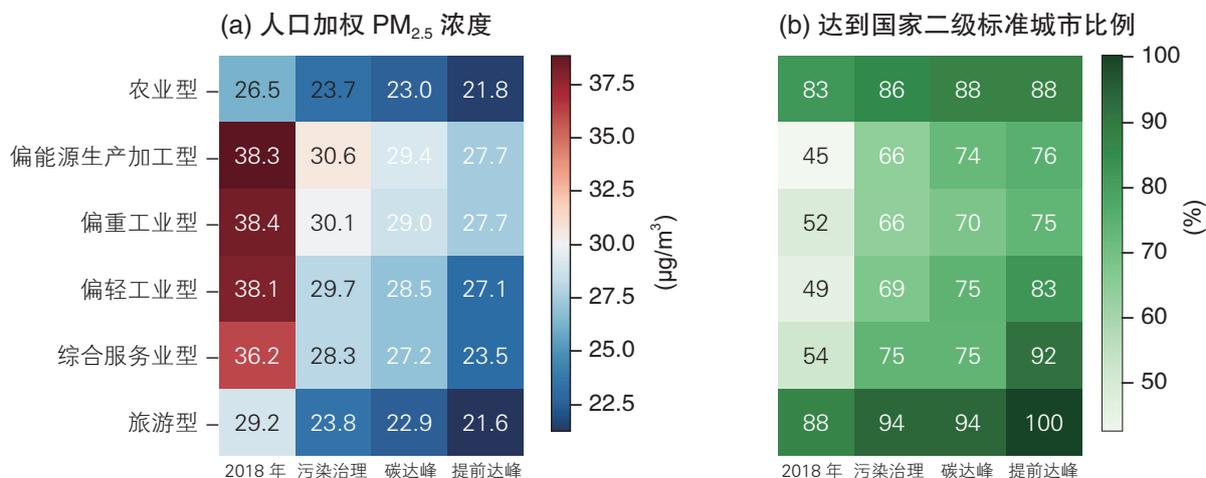


图 3-18 碳达峰情景下各类型城市 $PM_{2.5}$ 浓度改善情况

基准。强化减污情景采用了最佳末端治理方案，以考察大气污染物控制措施的减排潜力及其对中国城市空气质量的改善作用。协同-强化减污情景选取了PM_{2.5}浓度改善潜力较大和碳减排重点部门的相应措施，大气污染物控制措施与强化减污情景保持一致，以探究协同治理路径下中国城市碳达峰情况与空气质量改善情况。现行末端治理和最佳末端治理的参数化方案见附表，下面进一步介绍协同治理路径（即协同-强化减污情景下）的协同减排措施选取方法。

本研究首先分析了2018年不同类型城市的空气质量情况以确定相应的未来协同减排力度。图3-19(a)展示了分类型城市的人口加权PM_{2.5}浓度。人口加权PM_{2.5}浓度相比算数平均法计算的浓度能够更好地反映空气污染对公众健康和暴露人口的影响，计算方法已在第三章中进行了介

绍。三类工业型城市和综合服务业型城市的人口加权PM_{2.5}浓度平均值均超过国家二级标准，其中偏能源生产加工型城市接近40 μg/m³。从观测站点PM_{2.5}年均浓度未达到二级标准的城市数量来看（图3-19(b)），偏重工业型和偏轻工业型城市未达标率高达57.6%和54.5%，且绝对数量较大；偏能源生产加工型城市和综合服务业型城市的未达标城市数量占比也超过了50%。农业型、旅游型城市的未达标城市数量占比仅分别为23.7%和18.8%，农业型城市中有一部分已经达到了国家一级标准（年均PM_{2.5}浓度<15 μg/m³）。以上分析结果表明工业型城市和综合服务业型城市PM_{2.5}污染较为严峻，需要较强的减排力度以实现更多城市空气质量达标；旅游型、农业型城市的空气质量较好，可以采取相对较弱的减排方案。

表 3-3 治理路径设置

情景名称	治理目标	协同减排措施	大气污染物控制措施
参考情景	无约束	无	现行末端治理
强化减污	最佳污染治理	无	
协同-强化减污	全国二氧化碳排放2025年达峰且全国城市年均PM _{2.5} 浓度基本达到国家二级标准	优先选取PM _{2.5} 浓度改善潜力较大的措施、碳减排重点部门的相应措施。	最佳末端治理

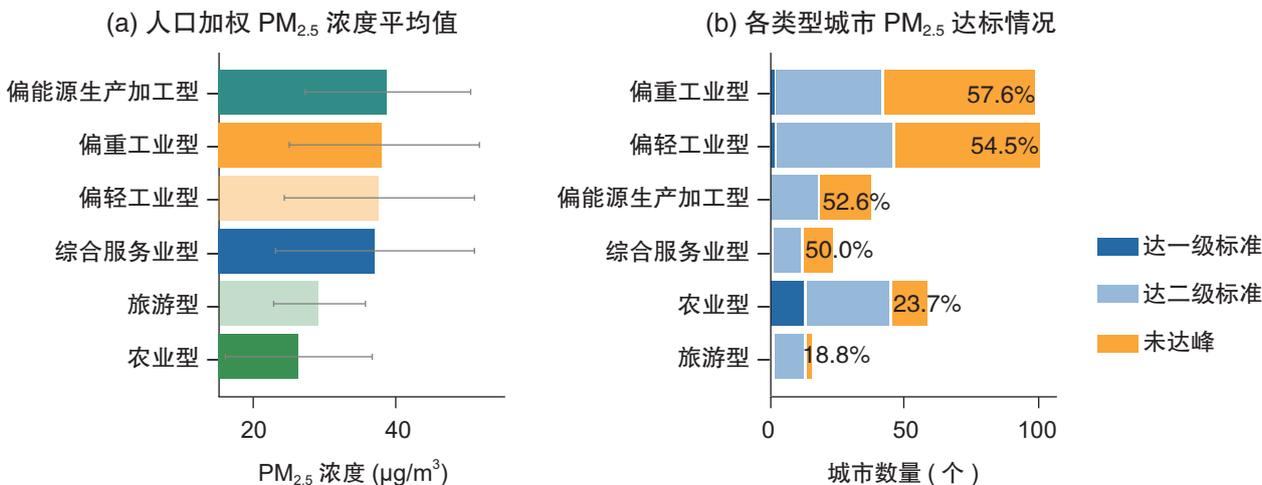


图 3-19 基准年不同类型城市空气质量情况分析

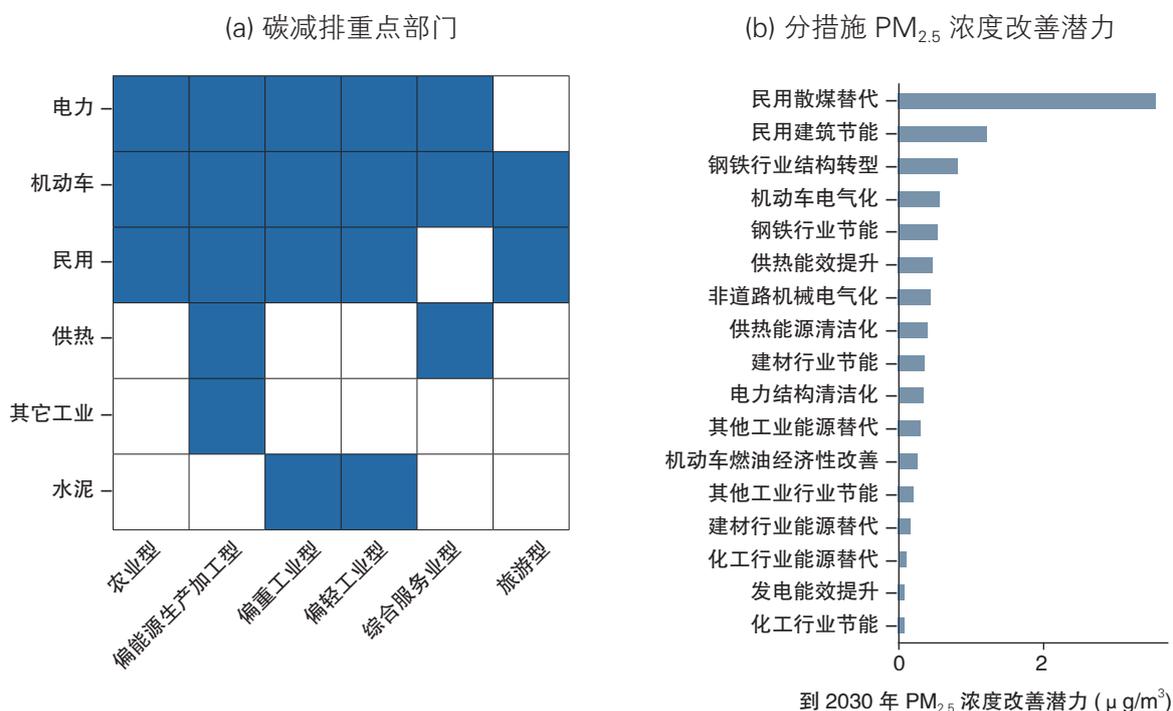


图 3-20 碳减排重点部门及到 2030 年各协同减排措施的 PM_{2.5} 浓度改善潜力

选取协同减排情景下的协同措施组合方案的主要原则为优先选取 PM_{2.5} 浓度改善潜力较大、以及碳减排重点部门的相应措施。本章建立的协同治理路径下的碳减排重点部门如图 3-20 (a) 所示。主要协同减排措施到 2030 年的 PM_{2.5} 浓度改善潜力采取了程静等建立的快速评估模型得到的分措施结果 (图 3-20 (b))。民用部门是参考情景下未达峰城市碳排放增长的重要驱动部门, 2030 年相对 2018 年各类型未达峰城市中民用碳排放增速高达 20.3% - 39.2%。同时, 民用部门散煤替代和民用建筑节能为 PM_{2.5} 浓度改善潜力最为突出的两项措施, 到 2030 年的改善潜力分别高达 3.53 μg/m³ 和 1.23 μg/m³, 具有高协同性, 应当采用较强的减排力度。

机动车和民用部门特征类似, 未来碳排放增长较为显著, 是未来碳减排需要重点关注的部门, 但整体 PM_{2.5} 浓度改善潜力低于民用部门协同减排措施。其中, 机动车电气化改善潜力较高, 达到 0.58 μg/m³, 因此在三类工业型城市和综合服

务业型城市中采取了强化减排方案; 机动车燃油经济性的改善潜力则仅为 0.27 μg/m³, 采取了常规减排方案。随着未来电力需求持续增长, 电力部门是未来碳减排的关键部门, 对于参考情景下未达峰城市的分析显示电力部门对于除旅游型城市外的城市类型均为碳减排重点部门。但由于火电部门的污染控制已经达到了较高的水平, 电力部门对于 PM_{2.5} 浓度改善的重要性则相对较低, 其中电力结构清洁化贡献为 0.35 μg/m³, 发电能效提升则仅为 0.11 μg/m³。根据以上分析, 本研究按照以下规则进行组合: 对于非碳减排重点部门的协同减排措施, 如 PM_{2.5} 浓度改善潜力高于 0.3 μg/m³ 则三类工业型城市和综合服务业型城市采取常规减排方案, 如 PM_{2.5} 浓度改善潜力高于 1 μg/m³ 则所有类型城市均采取最佳减排方案。对于碳减排重点部门的协同减排措施, 如 PM_{2.5} 浓度改善潜力低于 0.3 μg/m³ 则所有类型城市均采取常规减排方案, 如 PM_{2.5} 浓度改善潜力高于 0.3 μg/m³ 则三类工业型城市和综合服务

业型城市采取强化减排方案、其它类型城市采取常规减排方案，如 $PM_{2.5}$ 浓度改善潜力高于 $1 \mu g/m^3$ 则所有类型城市采取最佳减排方案。最终，形成的各类型城市的协同减排措施组合及其力度如图 3-21 所示。

参考情景和强化减污情景的碳排放变化和上一节中的污染治理情景一致，因此本小节主要讨论减污降碳协同治理路径（即协同 - 强化减污情景）下的二氧化碳排放变化。图 3-22 展示了协同 - 强化减污情景下四大部门能源结构碳排放量占比的变化情况。对于电力部门，电力结构清洁化措施采取了强化减排方案，协同 - 强化减污情景下的非化石发电比例将从 2018 年的 29.4% 上升至 2030 年的 53.9%。由于终端电力需求持续增加，全国发电量持续上升。2030-2035 年间，由于民用散煤“煤改电”进程完成、主要工业产品产量持续下降，终端电力需求增速趋缓，同时非化石发电比例加速上升至 54.5%，推动了煤电发电量

于 2030 年达峰，随后快速下降。对于工业部门终端能源结构，由于钢铁、水泥等煤炭使用量较大的工业产品产量达峰以及工业行业的电力替代技术推广，呈现出燃煤占比下降、电力占比上升的发展趋势。2030 年，工业终端能源中的煤炭占比从 2018 年的 55.0% 下降至 48.2%。对于民用部门，基准年终端能源结构中化石燃料占比为 38.3%，电力占比为 28.2%。协同治理路径下所有城市均以最佳方案执行民用散煤替代措施，到 2030 年民用散煤被完全取缔，天然气和电力占比分别上升至 16.9% 和 52.0%。同时通过推广地热等可再生能源，民用部门其它非化石能源比例从 2018 年的 7.4% 上升至 2030 年的 12.2%。对于交通部门，机动车电气化措施提升了机动车保有量中的电动车比例，到 2030 年和 2035 年分别达到 20.4% 和 32.3%。此外非道路机械电气化也有部分贡献，但相对不显著。从能源结构来看，到 2030 年交通部门的燃油占比仍然高达 90.3%。

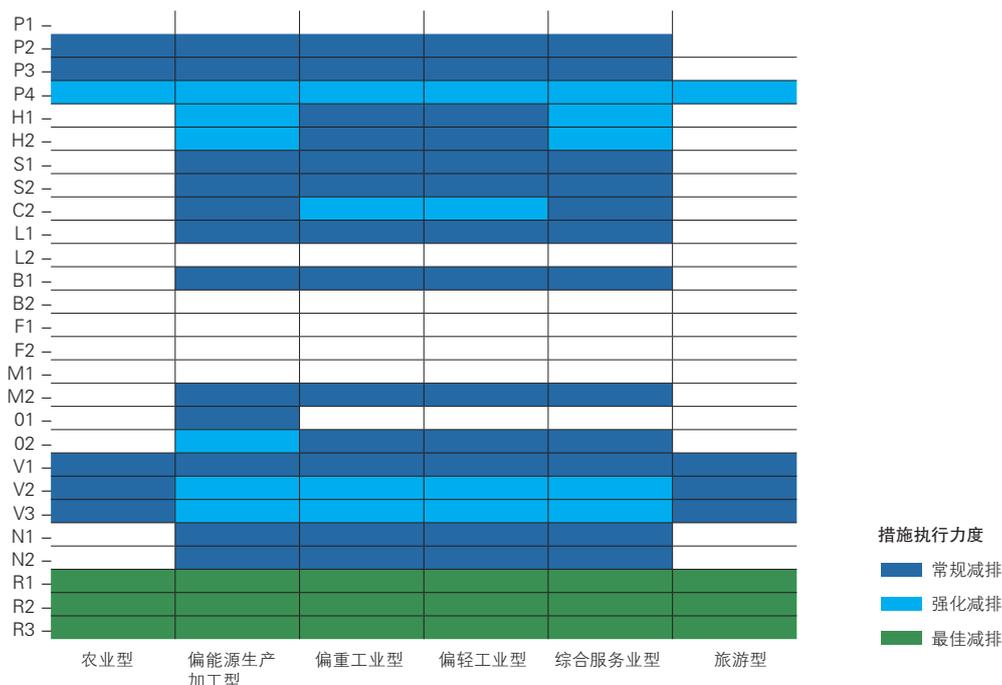


图 3-21 协同 - 强化治污情景下的协同措施组合

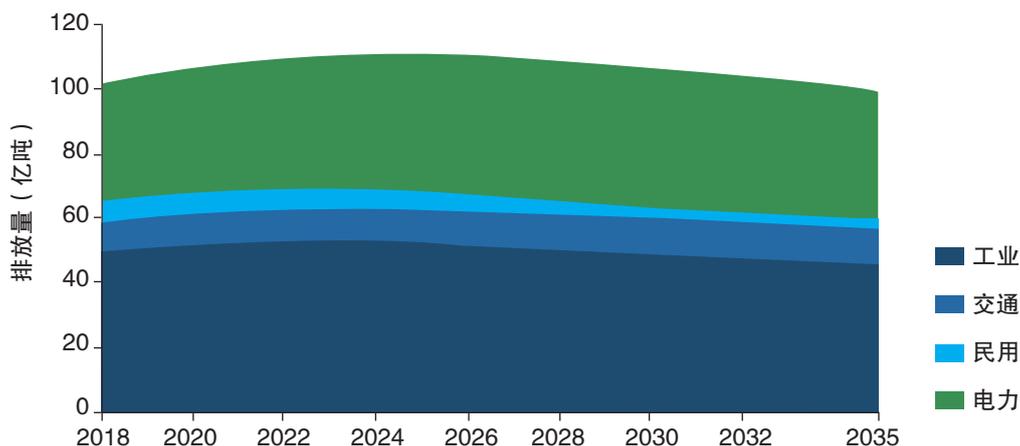


图 3-22 协同治理路径下碳排放变化

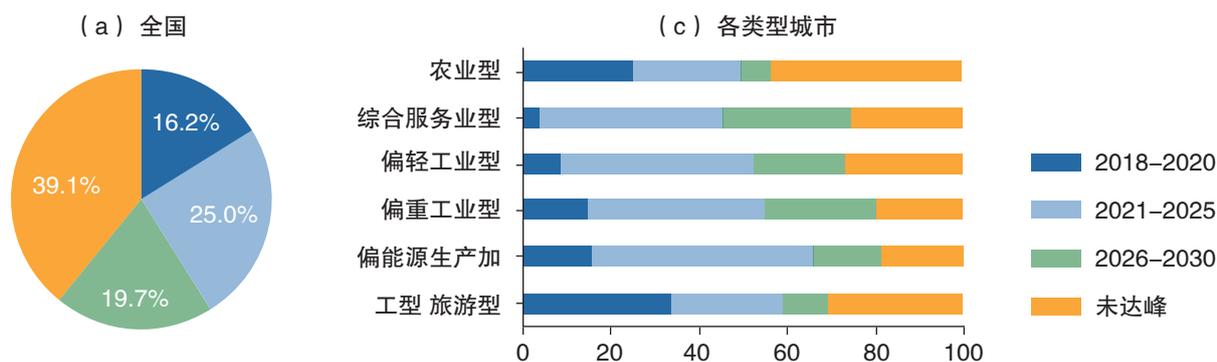


图 3-23 协同治理路径下全国城市碳达峰情况

从城市碳达峰的角度进行分析，协同-强化减污情景可推动全国 75.0% 的城市实现 2030 年前碳达峰（图 3-23）。这一比例略低于以碳达峰为目标的提前达峰情景下的达峰比例近似（77.1%），相比参考情景达峰比例（13.5%）提升了 61.5%。55.3% 的城市可在 2025 年及以前实现碳达峰，19.7% 的城市在 2026-2030 年间实现碳达峰。分城市类型来看，三类工业型城市和综合服务业型城市 2030 年达峰的占比较高，农业型、旅游型城市的达峰率相对较低。偏能源生产加工型、偏重工业型城市达峰率均超过

80%；偏轻工业型和综合服务业型城市在协同减排情景下的城市碳排放达峰率低于上一节设置的提前达峰情景，但仍然达到 75% 以上。从达峰时间分布来看，三类工业型城市和综合服务业型的已达峰城市，在 2021-2025 年之间达峰的比例最高，达 50% 以上；2026-2030 年达峰的城市数量次之；2020 年前就达峰的城市最少，尤其以综合服务业型城市的比例最低。农业型、旅游型城市由于空气质量基础较好，在协同-强化治污情景下仍然采用了较弱的协同减排方案，城市碳排放达峰率分别为 69.5% 和 56.3%。从达峰时间分

布来看，农业型和旅游型城市中实现碳排放达峰的城市达峰时间整体更早，2020年及以前的达峰比例明显高于其它几类城市。

图3-24展示了参考情景、强化减污情景和协同-强化减污情景下全国主要大气污染物排放的变化情况。参考情景下，SO₂、NO_x和VOC排在2020年后持续上涨，到2030年SO₂、NO_x和VOC相对2018年排放分别上升了11.7%、6.5%和13.1%。PM_{2.5}排放整体呈现缓慢的下降趋势，到2030年相对2018年下降了7.7%，这主要是由于随着居民生活水平提高民用部门生物质使用量自然下降。强化治污情景下，最佳末端治理措施驱动2030年SO₂、NO_x、PM_{2.5}和VOC排放到相对参考情景分别下降40.5%、33.2%、30.7%和26.1%。从变化趋势来看，各污染物排在2030年前下降较为迅速，2030年后下降逐渐放缓，

SO₂排在2030-2035年还出现了略微上升的趋势。协同-强化治污情景下，协同减排措施在推动全国碳排放2025年达峰的同时驱动2030年排放相对参考情景下降了60.9%、42.6%、59.2%和37.4%。该情景下到2030年全国SO₂、NO_x、PM_{2.5}和VOC排放量降低至411.0万吨、1300万吨、253.4万吨和1966.1万吨，为基准年水平的39.1%、57.4%、40.8%和61.6%。

以上分析表明，末端治理措施和协同减排措施均能产生可观的大气污染物减排效益，但在末端治理措施到2030年对污染物减排的推动作用更为显著。从不同污染物来看，协同减排措施对PM_{2.5}减排贡献更为显著，到2030年和最佳末端的减排贡献相当。

图3-25(a)-(c)展示了不同情景下2030年PM_{2.5}浓度的空间分布情况。参考情景下到2030

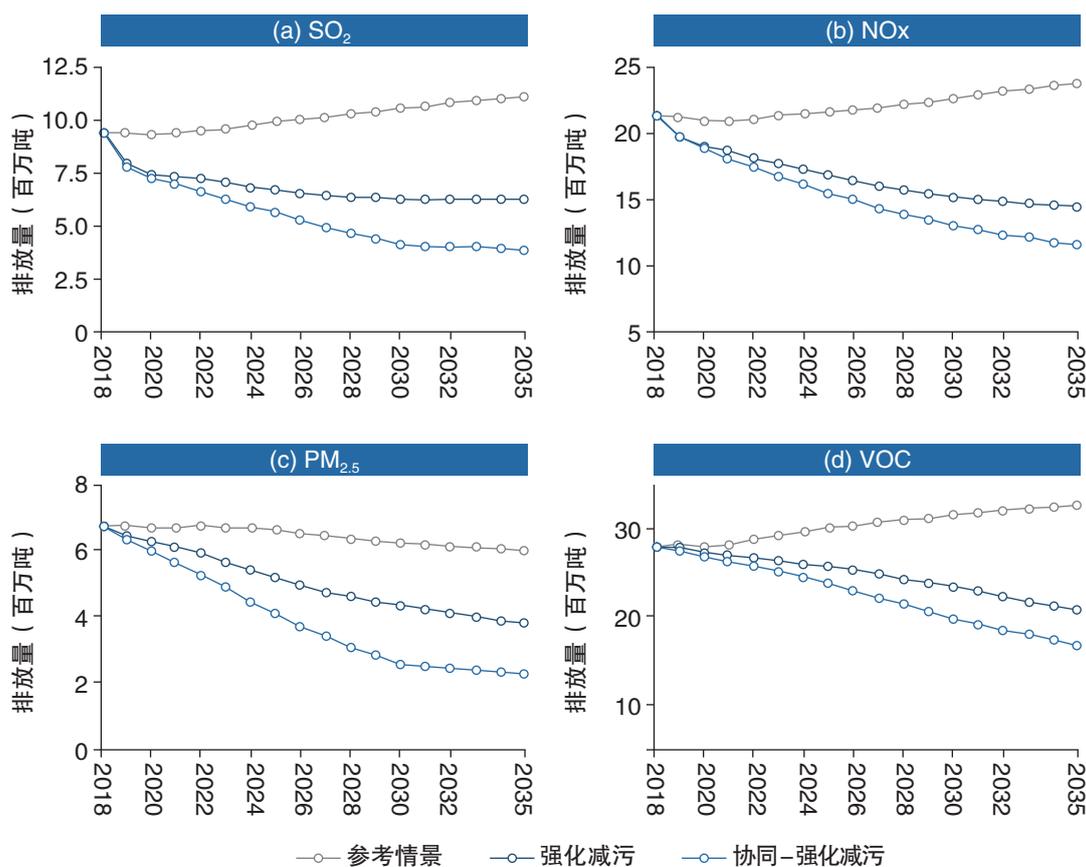


图3-24 不同治理路径下全国城市主要大气污染物排放变化情况

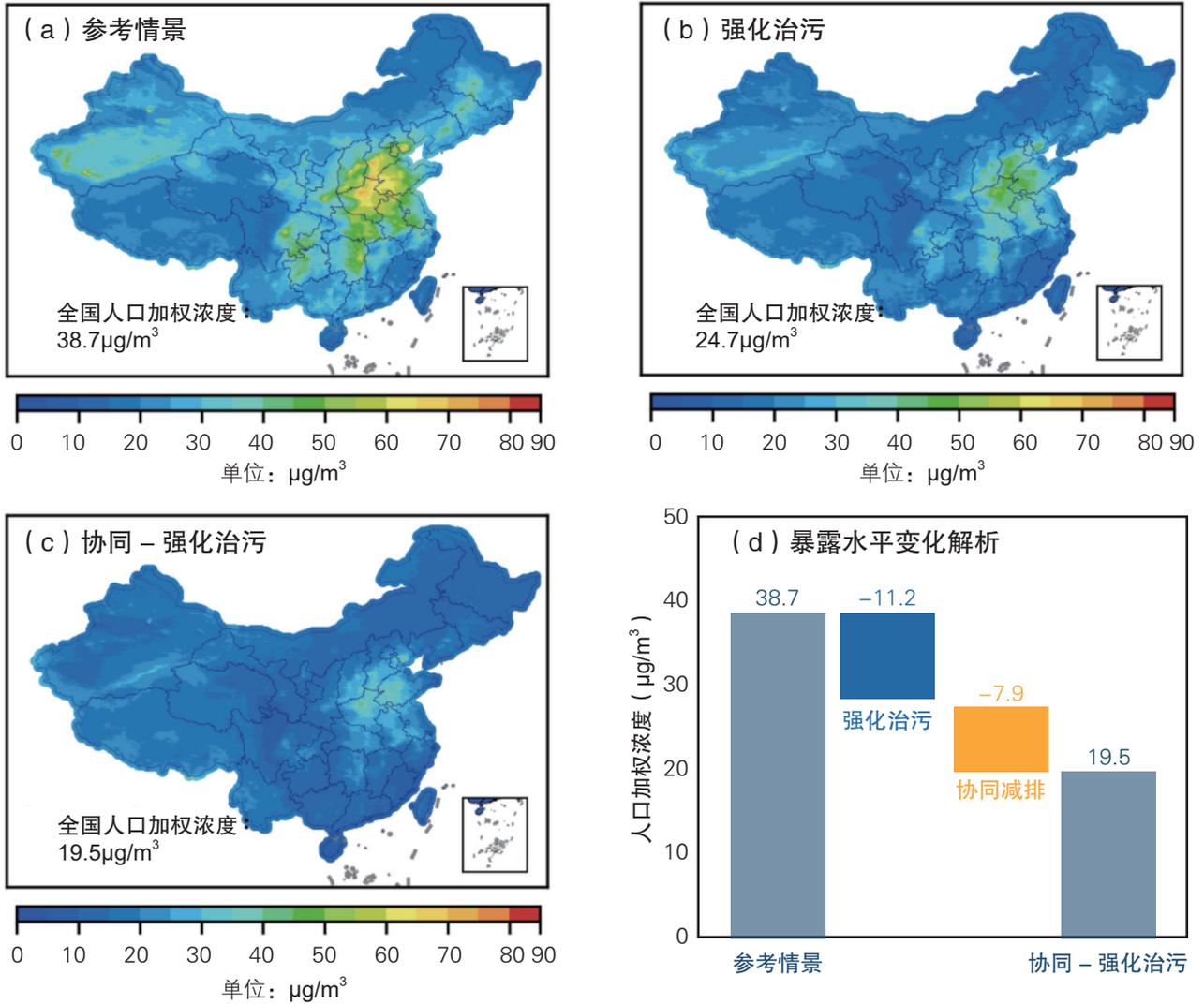


图 3-25 2030 年不同治理路径下全国 PM_{2.5} 浓度分布及暴露水平变化

年全国人口加权浓度仍然高达 38.7 μg/m³，相对 2018 年基准情景仅下降 0.6 μg/m³。最佳末端治理方案（强化治污情景）可推动全国人口加权浓度到 2030 年下降至 27.4 μg/m³；通过实施协同目标下的协同减排措施，可进一步下降至 19.5 μg/m³。对比情景间的结果差异并进行解析，到 2030 年污染治理和协同减排措施的全年均 PM_{2.5} 人口加权浓度改善潜力分别为 11.2 和 7.9 μg/m³（图 3-25(d)）。

图 3-26 展示了不同情景下全国和重点区域城市年均 PM_{2.5} 浓度达标情况。其中三种颜色代表了

三种标准：国家二级标准（35 μg/m³）、世界卫生组织第二阶段过渡值（WHO-IT2，25 μg/m³）以及国家一级标准（25 μg/m³）。参考情景下，2030 年全国城市中仅有 54.8% 的城市能够达到国家二级标准。强化治污情景下这一比例上升至 82.1%。协同 - 强化治污情景下，达到国家二级标准的城市比例上升到 97.6%，有 42.3% 的城市能够达到国家一级标准。从重点区域来看，参考情景下，到 2030 年“2+26”城市中没有一个能够达到国家二级标准的城市；长三角、汾渭平原城市中，达到国家二级标准的城市比例分别为 31.7%、9.1%；珠

三角已经实现全面达标。强化减污情景下，最佳末端措施可推动长三角和汾渭平原达到国家二级标准的城市比例上升至 78.0% 和 63.6%，“2+26”城市的达标率仅上升到 3.6%。协同 - 强化减污情景下，长三角、汾渭平原所有城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度都达到了国家二级标准，“2+26”城市达标率也达到了 78.6%。以上结果表明结合协同减排措施和最佳末端治理，全国城市到 2030 年能够基本实现“美丽中国”的空气质量目标，但“2+26”城市仍然有部分城市无法达标。

分城市类型来看，参考情景下到 2030 年三类工业型城市和综合服务业型城市年均人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度未能达到国家二级标准，达标率仅为 42% - 52%。强化治污情景下，三类工业型城市和综合服务业型城市年均人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度相对参考情景下降 10.7-11.4 $\mu g/m^3$ ，综合服务业型城市平均人口加权浓度达到世卫组织第二阶段过渡值。从达标比例来看，偏轻工业型城市

年均 $PM_{2.5}$ 浓度达到国家二级标准的比例增加至 83%，偏能源生产加工型、偏重工业型和综合服务业型达标比例均接近 80%。农业型和旅游型城市的达标比例则分别达到 90% 和 100%。协同 - 强化治污情景下空气质量进一步改善，旅游型城市平均人口加权浓度达到国家一级标准，浓度最高的偏能源生产加工型城市也降低至 19.6 $\mu g/m^3$ 。从达标率来看，未达标城市属于三类工业型城市，其它所有类型城市实现了全面达标。

基于全国城市未来年均 $PM_{2.5}$ 浓度变化和碳排放变化，可讨论协同 - 强化减污情景下中国城市协同减排与“双达”情况。如下图所示，到 2030 年，协同 - 强化治污情景下全国城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度相对基准年的平均变化比例为 -45.2%。仅有 16 个地级市的 $PM_{2.5}$ 浓度出现上涨，这些城市主要分布在青海、云南、西藏，多数属于农业型城市，协同减排力度较弱，但在 2030 年仍能达到全国二级标准。129 个城市到

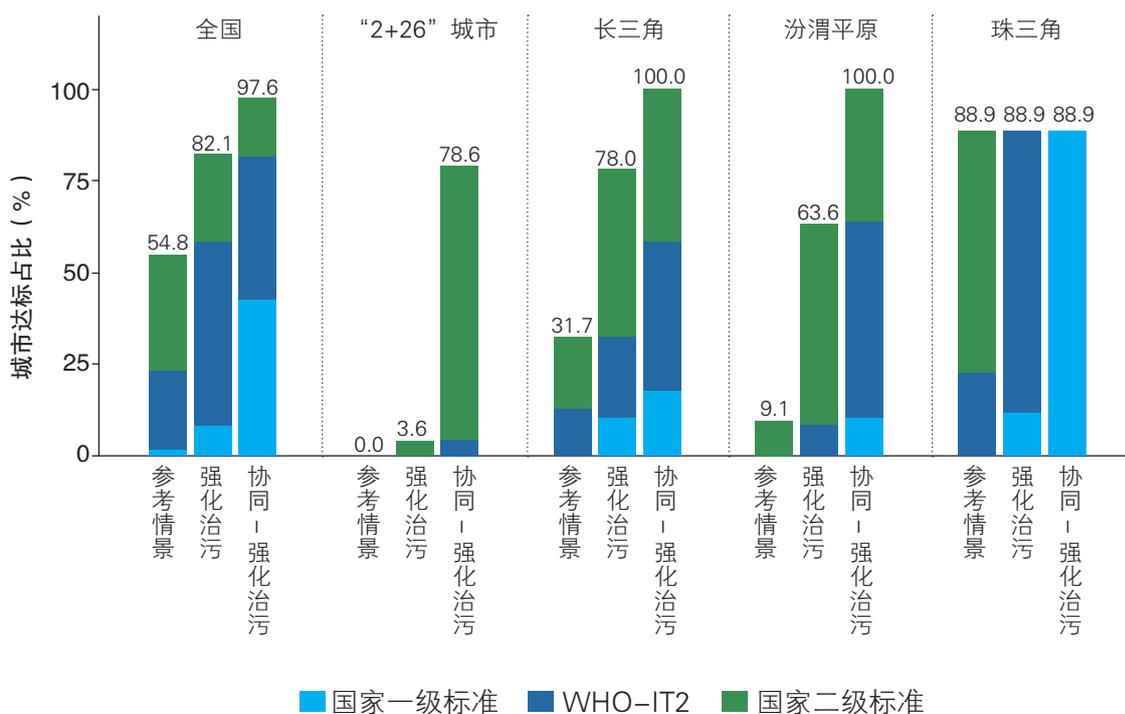


图 3-26 不同治理路径下全国及重点区域城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度达标情况

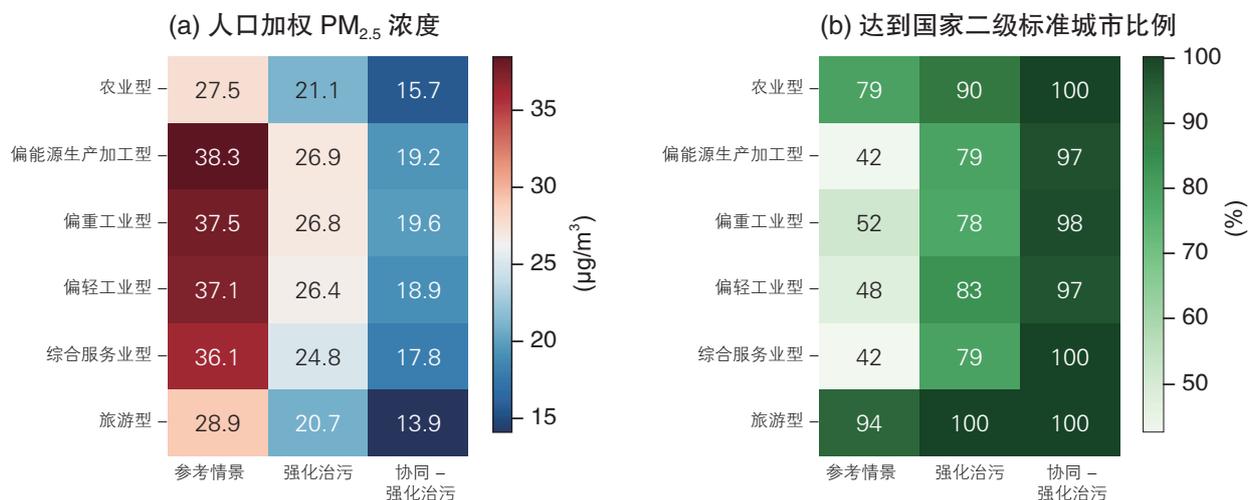


图 3-27 不同治理路径下 2030 年不同类型城市全国 PM_{2.5} 年均人口加权浓度与城市达标率

2030 年能够实现 CO₂ 排放和 PM_{2.5} 浓度协同下降，191 个城市实现 PM_{2.5} 浓度下降但碳排放上升。仅有四个城市的 PM_{2.5} 浓度和 CO₂ 排放均出现上升，分别是锡林郭勒盟、日喀则市、昌都市和山南市。从“双达”的角度来看，到 2030 年协同治理路径可推动 74.1% 的城市实现“双达”，24% 的城市实现了“达标未达峰”，仅有 1.8% 的城市“达

峰未达标”。分城市类型来看，能源生产加工和偏重工业型城市“双达”率最高，分别为 78.9% 和 78.8%，综合服务业型城市和偏轻工业型城市“双达”率也达到 70% 以上，分别为 75.0% 和 73.3%。农业型、旅游型城市“双达”比例仅分别为 69.0% 和 56.3%，其余城市年均 PM_{2.5} 浓度达到国家二级标准，但未能实现碳排放达峰。

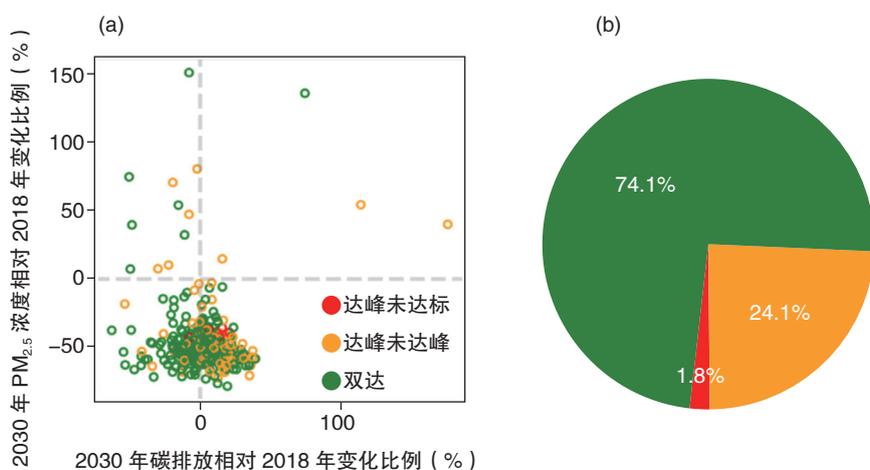


图 3-28 协同治理路径下中国城市“双达”情况分析

4 城市编制“双达”路径技术指南

城市是国家空气质量管理考核体系的基本单元，是空气污染治理的主战场，我国有超过50%的人口居住在城市，消耗了80%以上的能源，贡献了80%以上的碳排放和60%以上的大气污染物排放。由于城市发展水平不一，经济结构多元化，排放来源与减排潜力也将具有显著差异，因此需要考虑当地自身空气质量达标/持续改善和碳达峰碳中和目标的协同与有机统一。



4.1 城市大气污染物及二氧化碳排放特征及变化趋势分析

图 4-1(a) 展示了 2018 年中国城市碳排放总量的分布情况，全局莫兰指数 (Moran' sI) 为 0.28 且在 1% 的水平上显著，说明中国城市碳排放存在空间集聚性。结合局部莫兰指数进行冷热点分析，京津冀、汾渭平原乃至内蒙古中部城市，以及长三角城市存在成片的碳排放高值区；西藏、青海、四川西部城市、云南西部城市则存在成片的排放低值区。呈现出以上分布与城市化石能源消耗量密切相关。东部地区的大型都市或典型工业城市消耗大量化石燃料，尤其是京津冀、汾渭平原和内蒙古中部城市在电力、工业和民用部门煤炭消费量较大，是形成碳排放高值区的主要原因。西部地区人口偏少、工业相对不发达，能源消费量低，因此碳排放量也相对较低。

碳排放 - 洛伦茨曲线 (图 4-1 (b)) 展示

了全国城市碳排放总量的高度不均等性，城市间的碳排放量差异可跨越三个数量级。2018 年全国碳排放排名前五位的城市分别是唐山市，上海市，重庆市，济南市，天津市，以 1.5% 的城市数量贡献了全国排放的 8.6%；排放量排名前 10% 的城市贡献了约 32.5% 的碳排放，其中超过半数属于“2+26”城市及长三角地区，体现出碳排放高值区和大气污染物重点防治区域的一致性。

城市单位面积碳排放和单位 GDP 碳排放特征与碳排放总量分布特征存在差异 (图 4-1 (c-d))。单位面积碳排放的排放高值区更加集中在东南沿海地区，新疆、西藏等地区的大部分城市以及东北部分城市单位面积碳排放则明显较低。单位 GDP 碳排放高值则主要集中在北方地区，尤其是内蒙古、山西的部分城市，可能说明这些城市的经济发展仍

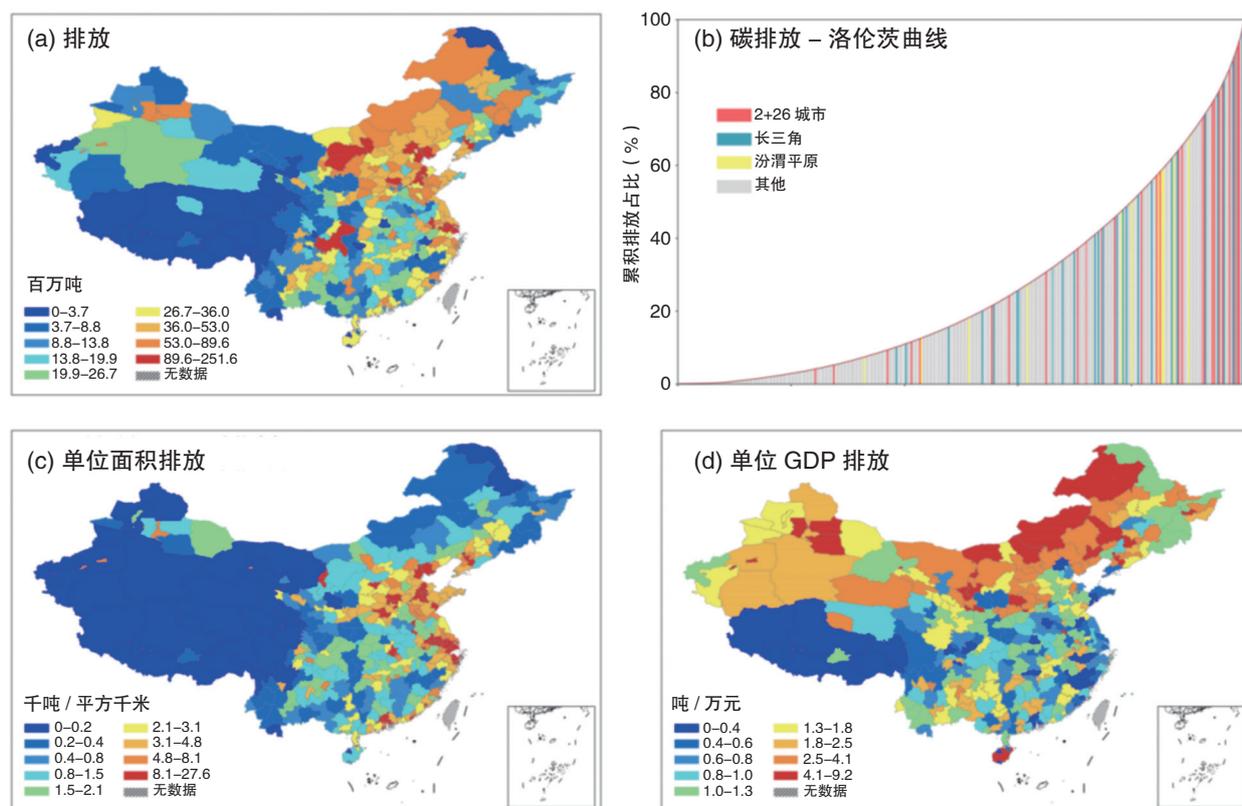


图 4-1 2018 年全国城市 CO₂ 排放和排放强度的空间分布情况

然高度依赖于煤炭等化石燃料。

四种主要大气污染物的全局莫兰指数为 0.27–0.34，在 1% 水平上显著，说明中国城市大气污染物排放存在空间集聚性。进一步结合局部莫兰指数进行冷热点分析（图 4-2），PM_{2.5} 的排放热点主要聚集在京津冀地区、山西和贵州的部分城市，SO₂ 排放热点除上述地区外还聚集在山东和内蒙古的部分城市，与这些地区燃料煤消费量较大、燃料煤硫分和灰分含量高密切相关。NO_x 排放热点主要集中在京津冀地区、山东省以及长三角地区，与这些地区燃料煤使用量较大、交通发达有关。VOCs 排放热点相对以上几种污染物更加集中于东南沿海区域，主要是由于石化化工等涉 VOCs 行业在东南沿海区域更为发达。

不同类型城市在碳排放规模、碳排放强度上存在显著差异。图 4-3 使用小提琴图展示了 2018 年不同类型城市的碳排放规模分布情况，

其中中间黑色方块部分为箱型图，外部曲线为核密度曲线，代表了不同碳排放量城市的分布概率。农业型、旅游型城市整体碳排放规模较小，超过一半的农业型、旅游型城市碳排放量在 1000 万吨以下。综合服务业型城市整体碳排放规模最大，城市数量占全国城市的 7.1%，对 CO₂ 的贡献却达到 15.4%。37.5% 的综合服务业型城市碳排放量超过了 3000 万吨，尤其是以上海、天津等超大型城市为代表的综合服务业型城市碳排放可达 1 亿吨以上。偏能源生产加工型城市和偏重工业型城市的 CO₂ 排放整体排放规模大于偏轻工业型城市，但偏重工业型城市、偏轻工业型城市中都存在超过 1 亿吨的碳排放热点城市。从碳排放强度来看，2018 年农业型、偏能源生产加工型、偏重工业型、偏轻工业型、综合服务业型、旅游型城市的单位 GDP 碳排放平均值分别为 2.0、2.6、1.9、0.99、0.94 和 1.15 吨 / 万元，农业

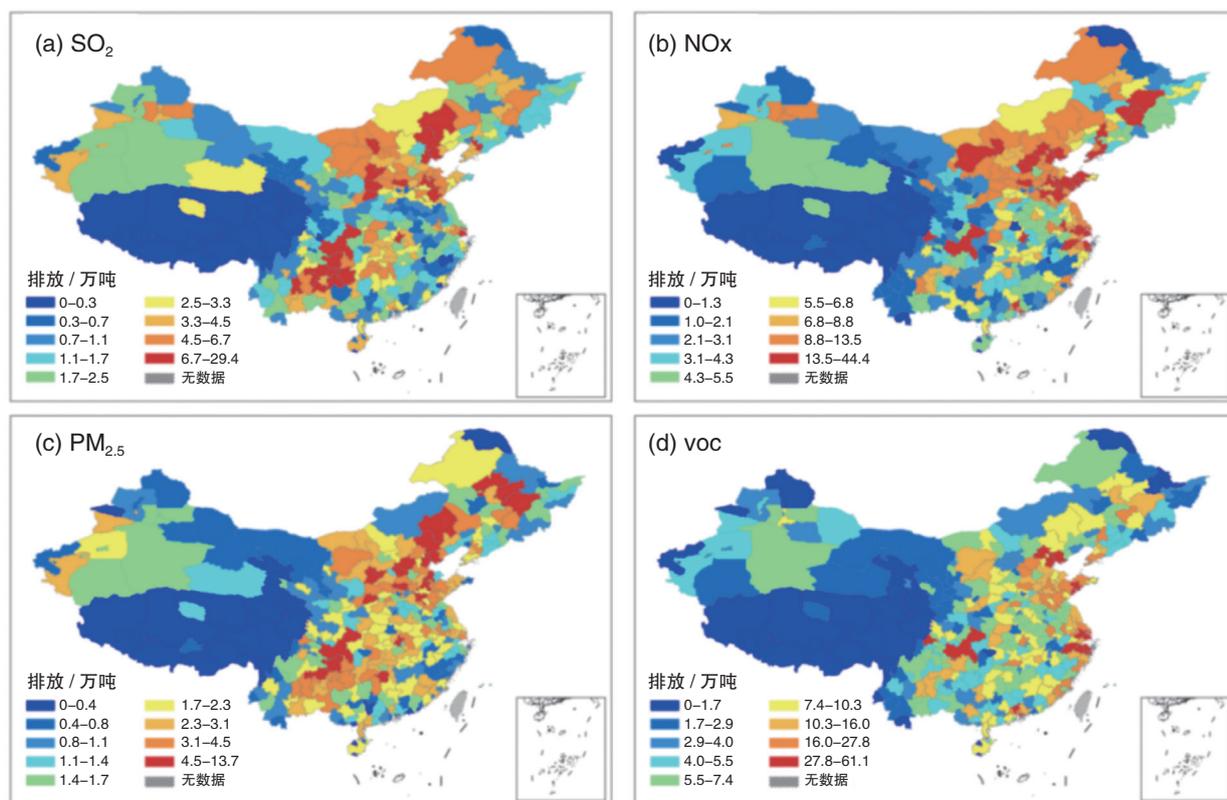


图 4-2 2018 年全国城市主要污染物排放空间分布情况

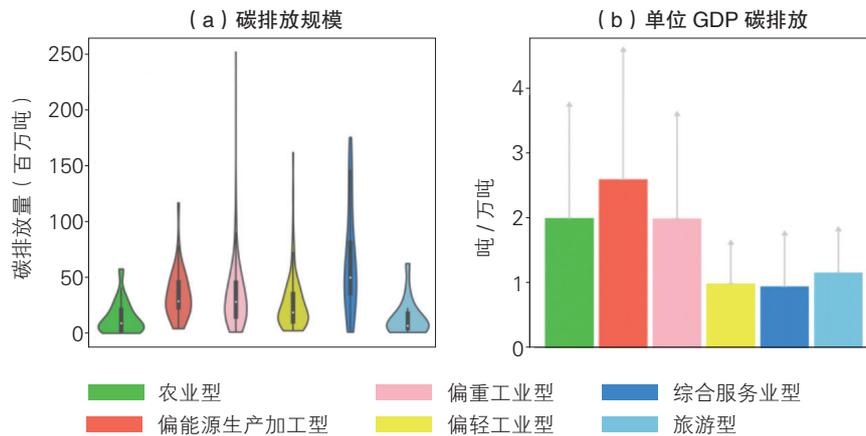


图 4-3 不同类型城市碳排放规模与排放强度

型、偏能源生产加工型和偏重工业型的平均排放强度显著高于另外三类城市（平均值双尾 z 检验 $p < 0.01$ ）。

不同类型城市在污染物排放规模上存在显著差异。图 4-4 展示了 2018 年各类型城市大气污染物排放总量规模分布情况。农业型城市和旅游型城市的排放占比明显小于数量占比，这两类城市数量共占 21.2%，但仅贡献了所有地级城市污染物排放的 10.5%–14.4%，其中污染物排放对

全国城市的贡献高于碳排放对全国城市的贡献。综合服务业型城市数量占全国城市的 7.1%，2018 对 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献却分别达到 12.1%，16.0%，9.7%。偏能源生产加工型城市和偏重工业型城市的排放占比均略高于数量占比，偏轻工业型的排放占比则略低于数量占比。对于 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 排放，偏能源生产加工型城市和偏重工业型城市的整体排放规模大于偏轻工业型城市。但对于 NO_x ，偏重工业型和偏轻工业型城市有更

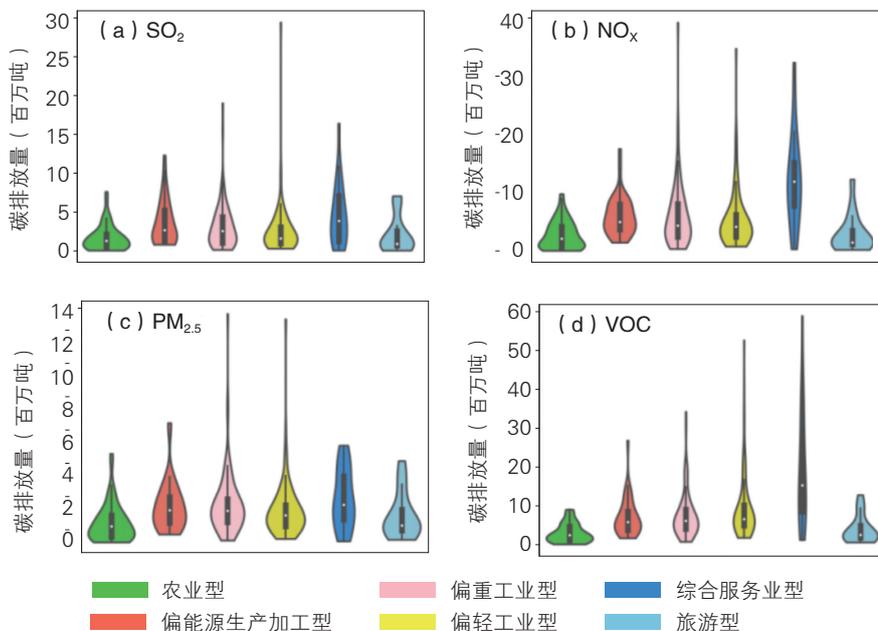


图 4-4 2018 年不同类型城市主要大气污染物排放总量特征

多排放规模较大的城市。

我国 60% 的城市在 2012–2018 年间未能实现经济增长与碳排放增长脱钩（图 4–5）。基于 GDP 变化和碳排放变化划分为四象限进行分析，209 个城市位于第二象限，即 GDP 和碳排放同步增长。有 43 个城市的碳排放增速超过了 GDP 增速，其中有 30 个城市人均 GDP 低于全国城市平均值（5.8 万元）。127 个城市位于第四象限，在 GDP 增长的同时实现了碳减排。4 个城市的 GDP 出现负增长，其中阜新市和鹤岗市的 GDP 和碳排放同步下降（第三象限），铁岭市和七台河市碳排放反而出现上升（第一象限）。分不同类型城市来看，2012–2018 年间同时实现碳减排和 GDP 增长的城市比例最高的为偏轻工业型和偏重工业型，分别占到 43% 和 41%；比例最低的则为综合服务业型和农业型，仅占 25% 和 29%。尽管人均 GDP 低于 3 万元的城市碳排放增幅平均值高于其它人均 GDP 更高的城市组别，人均 GDP 越高的城市碳减排成效越显著的规律并不明显，仍

然能观察到部分人均 GDP 水平较高但碳排放增幅较大的城市，如舟山市、海西州在 2012–2018 年间碳排放增幅分别达到了 281% 和 104%。

图 5–6 展示了 2012–2018 年间分部门协同减排情况，不同颜色代表实现某一部门实现特定协同减排情况的城市占有含有该部门排放城市数量的百分比。分污染物来看，实现 VOCs 或 NO_x 和 CO₂ 协同减排的城市数量相对较少，说明未来对 NO_x、VOCs 的控制还需要进一步加强。分部门来看，所有城市的机动车部门在 2012–2018 年间都实现了多种主要污染物减排，但碳排放却全部上升。前者主要得益于机动车排放标准的不断加严，后者反映了随着经济发展化石燃料机动车保有量在 2012–2018 年间仍在增加。其它部门都在不同程度上实现了协同减排，其中焦化、有色金属、水泥部门实现协同减排的城市数量较多，油气生产、平板玻璃、民用等部门实现协同减排的城市数量较少。

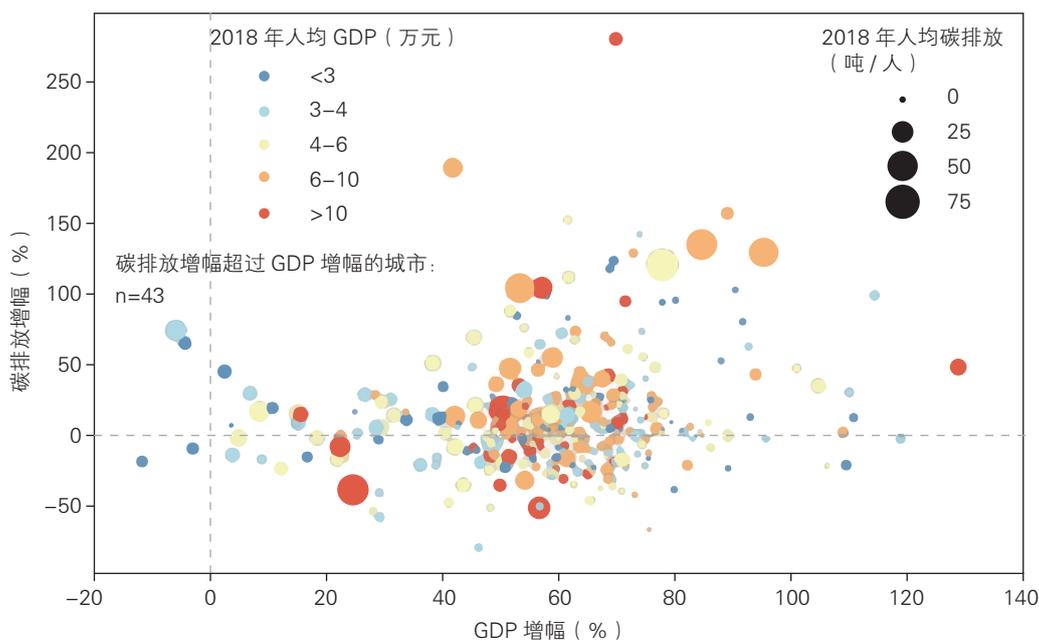


图 4–5 2012–2018 年全国城市碳排放增幅与 GDP 增幅关系图

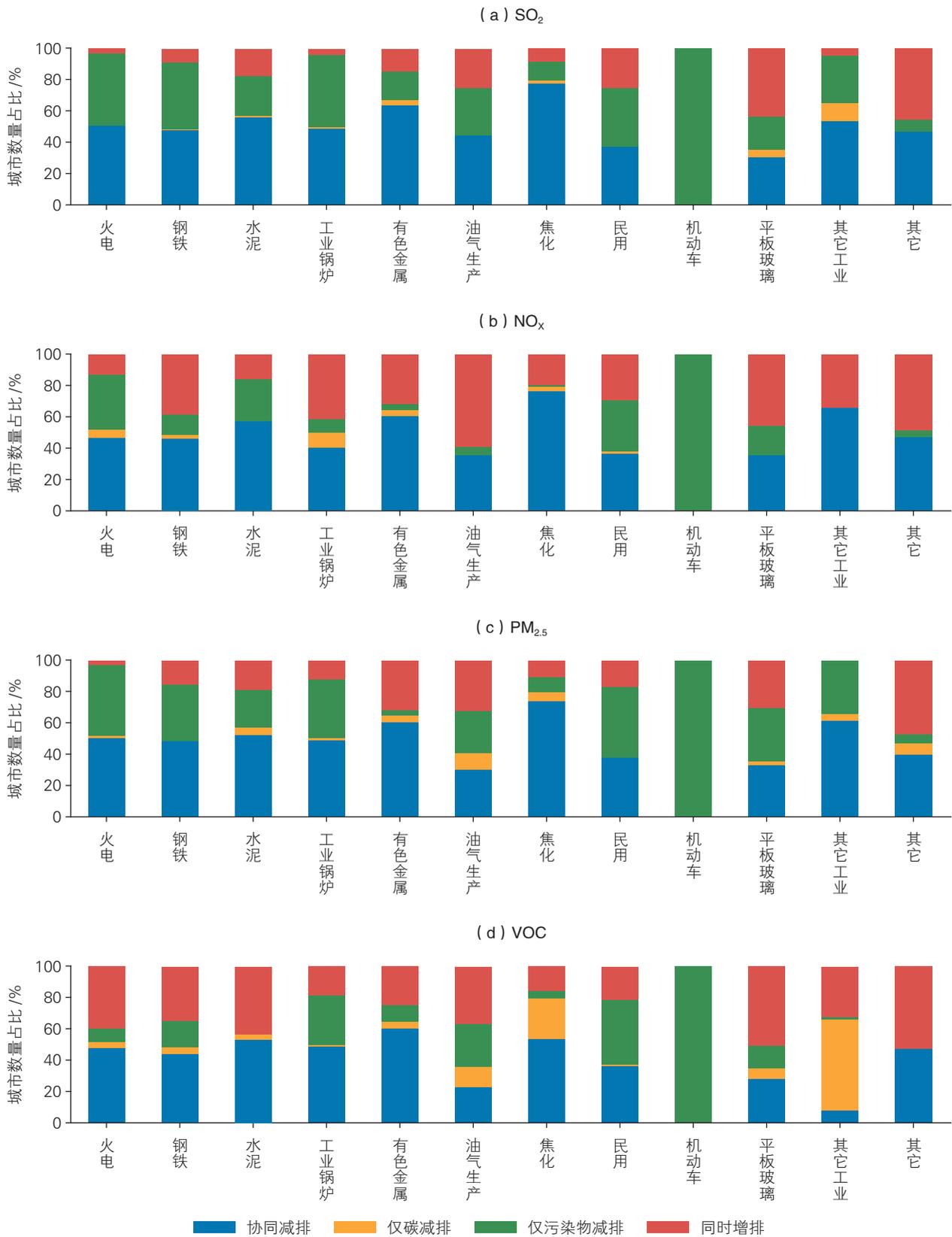


图 4-6 2012-2018 年分部门协同减排情况

4.2 城市编制“双达”路径工作思路

城市是国家空气质量管理考核体系的基本单元，是空气污染治理的主战场，我国有超过 50% 的人口居住在城市，消耗了 80% 以上的能源，贡献了 80% 以上的碳排放和 60% 以上的大气污染物排放。由于城市发展水平不一，经济结构多元化，排放来源与减排潜力也将具有显著差异，因此需要考虑当地自身空气质量达标/持续改善和碳达峰碳中和目标的协同与有机统一。

根据不同城市特点制订“双达”路径，首先，明确不同城市经济社会发展概况对城市进行分析，梳理总结不同城市减污降碳政策措施，建立城市污染物治理措施及碳减排数据库；再结合城市尺度的排放清单，分析城市大气污染物和碳排放特征，最终得到不同类型城市及其重点减排领域分析结果，据此评价“十三五”期间不同类型城市的措施减排效果。然后，根据空气质量目标约束、碳达峰及提前达峰的目标约束，结合“双达”目标协同减排措施的梳理，预测城市未来的能源使用与污染排放情

况，识别城市层级主要协同减排措施，为不同类型城市空气质量改善和碳减排路径选择提供依据，据此提出“十四五”不同类型城市的协同管控路径。最终通过“十三五”期间不同类型城市的措施减排效果评估和“十四五”期间不同类型的城市协同管控路径，提出针对不同类型城市的发展建议，具体实施技术路线如图 4-7。

在管控区域方面，国家层面选取重点区域时主要考虑高污染水平和高人口密度的区域；对于城市而言，可遵循相同原则，着重关注大气污染与温室气体排放“双高”的热点网格，以及距离高排放源较近且人群聚集的区域。在控制对象方面，从全国整体产业结构及布局角度出发识别重点对象；各城市则可根据自身产业结构，识别高耗能高排放行业作为重点协同治理对象。主要包含 7 方面的内容，分别是城市基本概况分析、排放特征分析、措施梳理与减排效果评估、目标确定、排放预测、目标可达性分析、措施优选及建议。

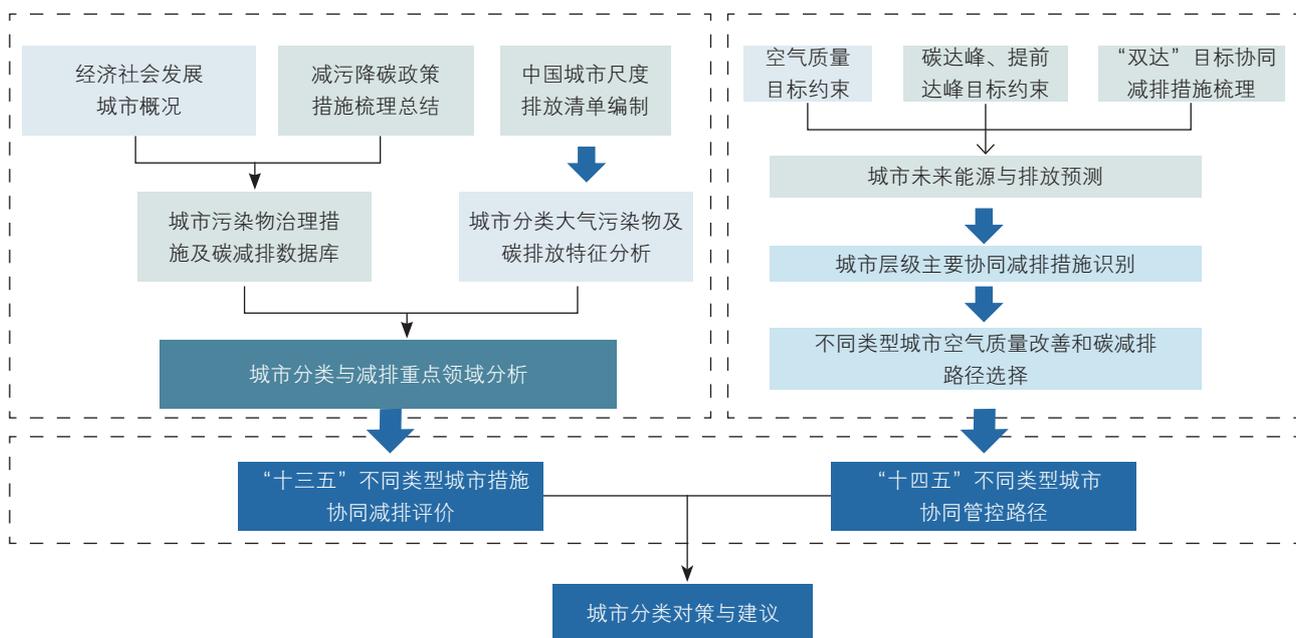


图 4-7 城市“双达”分析技术路线图

4.3 城市编制“双达”路径工作内容

(1) 城市基本概况分析

分析城市经济变化趋势、交通情况、人口变化、能源结构、污染物浓度变化趋势、二氧化碳排放量以及万元 GDP 碳排放等数据，判断城市发展阶段，识别大气污染与碳排放量处于高位的问题。

(2) 排放特征分析

基于城市大气污染物及二氧化碳排放清单，开展城市环境质量现状及主要大气污染物排放等城市环境特征分析，识别城市环境空气质量改善和碳达峰面临的主要问题，掌握主要大气污染物和碳排放主要来源及演变规律，识别污染物排放量和碳排放量“双高”重点行业和重点区域，强化协同治理。基于城市碳排放数据开展城市碳排放现状和达峰阶段判断，并横向对比，研判碳排放指标如单位 GDP CO₂ 排放量、人均 GDP CO₂ 排放量在同类型城市中的排位，判断目标城市碳达峰压力。依据环境空气质量改善状况及碳排放变化情况开展城市减污降碳协同度评价。

(3) 措施梳理与减排效果评估

政策措施从国家、省级、城市分层次梳理，分析城市《生态环境保护“十三五”规划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》《大气污染防治条例》《大气环境质量提升计划（2017-2020）》《能源发展“十三五”规划》《低挥发性有机物含量涂料限值》《污染源头防治推进“四减四增”三年行动方案》等综合性文件，《节能减排综合工作方案》等能源类文件，《钢铁、焦化、水泥行业全流程烟气达标治理工作方案》《锅炉治理专项实施方案》等重点行业文件，《重型柴油车污染治理工作方案》《机动车和非道路移动机械排放污染防治条例》《在用非道路机械用柴油机排气烟度限值及测量方法》等交通类文件，《低碳城市建设方案》《碳排放达峰路径研究》等低

碳城市方案，总结大气污染防治与二氧化碳减排措施，基于排放总量协同控制识别重点减排对象和重点减排区域。

运用响应曲面模型 RSM 建立济南市达标情景下不同控制措施与 PM_{2.5} 浓度间的快速响应关系，计算方法如下：

$$SI_i = \frac{\Delta E_{CO_2}}{\Delta Conc_i}$$

其中， $Conc_i = RSM (Emis_{SO_2}, Emis_{NO_x}, Emis_{NH_3}, Emis_{VOC_s}, Emis_{PM_{2.5}})$ ， i 代表某一污染物， ΔE_{CO_2} 代表某一措施实施后带来的二氧化碳减排量（单位：万吨）， $Conc_i$ 代表某一措施实施后带来的某一污染物浓度变化（单位： $\mu g/m^3$ ）。

(4) 目标确定

立足于国家 / 区域经济社会发展定位、碳达峰碳中和目标、生态环境质量要求等，分别梳理城市碳达峰目标和城市生态环境目标（如图 4-8），主要参考《“十四五”时期生态环境保护规划》《深入打好污染防治攻坚战 2022 年行动计划》等文件，最终确定城市“双达”目标（表 4-1）。

在梳理城市碳达峰目标时，立足城市所属的类型，分析当前二氧化碳排放变化趋势，预估二氧化碳排放达峰的时间及排放量。基于该城市定下的目标任务和已有的减污降碳协同性分析文件，提供碳达峰方案。

在梳理城市生态环境目标时，立足该城市环境质量现状及污染物排放情况，区分不同污染物治理的优先级，基于已有的减污降碳协同性分析文件，提供污染物治理方案。

统筹碳达峰方案和环境治理方案，需要考虑措施的减污降碳协同性，还需要考虑措施执行时所需经济成本，考虑方案间的交互反馈、相互支撑、协同优化、融合增效，识别协同措施及协同政策。

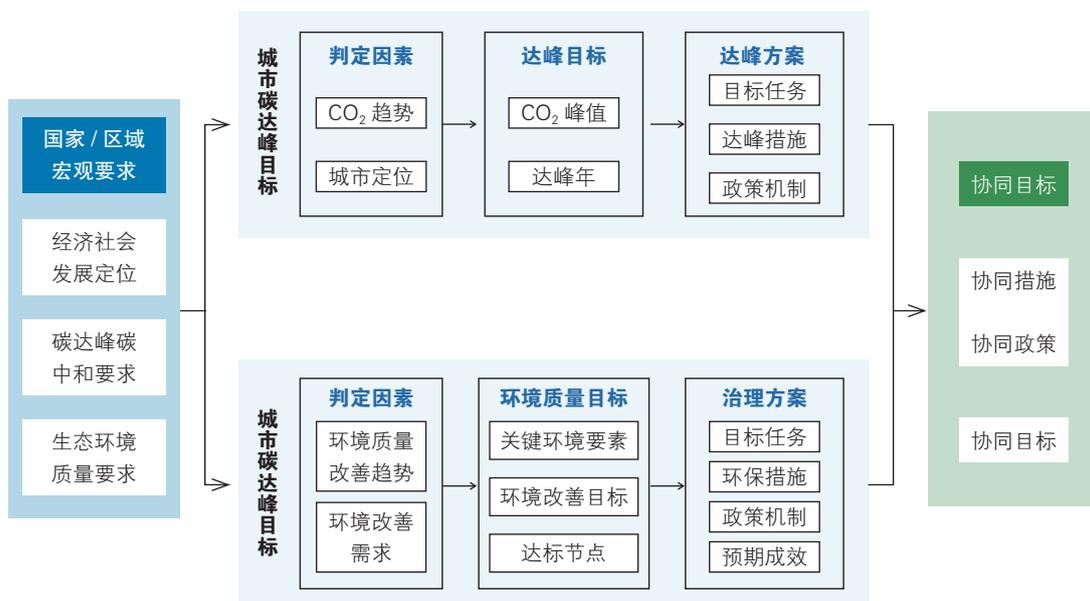


图 4-8 城市“双达”目标确定路径

表 4-1 国家“双达”目标

类别	序号	指标	2025 年	指标属性
环境质量改善	1	城市细颗粒物 (PM _{2.5}) 浓度 (μg/m ³)	相比 2020 年下降 10%	约束性
	2	城市空气质量优良天数比率 (%)	87.5%	约束性
绿色低碳发展	3	单位地区生产总值二氧化碳排放降低 (%)	相比 2020 年下降 18%	约束性
	4	单位地区生产总值能源消耗降低 (%)	按地区分配	约束性
污染物排放总量控制	5	挥发性有机物排放总量减少 (%)	按地区分配	约束性
	6	氮氧化物排放总量减少 (%)	按地区分配	约束性

(5) 排放预测

以城市空气质量为目标导向，基于未来社会经济参数和空气质量目标下的相关政策获取未来的能源需求情景。分别计算城市各部门二氧化碳和大气污染物的排放量，进一步进行空气质量达标和碳达峰路径分析。通过对比基准情景和政策情景，利用 LEAP 和 WRF-CMAQ 模型可分析不同能源政策、产业结构以及技术应用对温室气体和大气污染排放的影响，如图 4-9 所示。

(6) 目标可达性分析

利用 WRF-CMAQ 空气质量模型，模拟可实现的空气质量改善效果，如图 4-10 所示。输入

有针对性的达标措施，若可达到城市空气质量目标，则此方案为城市最优空气质量改善行动方案；若未达标，则继续调整管控情景，最终得到最优的达标情景。

(7) 措施优选及建议

构建减污降碳协同度指标，分行业评价源头控制措施减污降碳协同度，并基于协同度识别源头治理重点行业。基于技术适用性和减污降碳协同度优选各行业过程控制和末端治理控制措施，基于环境质量及人口密度确定重点区域，将结构调整等重点大气污染治理和降碳任务措施指标向重点行业/地区倾斜，发挥控碳对空气质量改善的牵引作用。

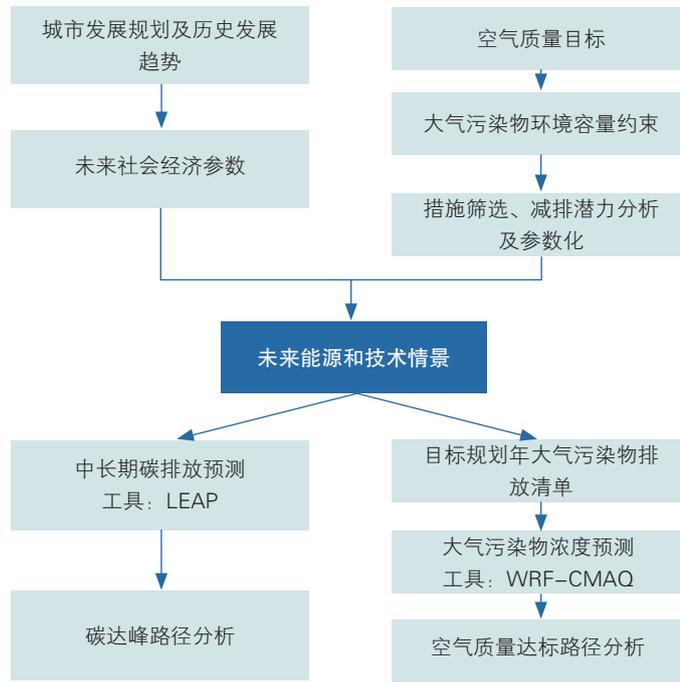


图 4-9 城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架

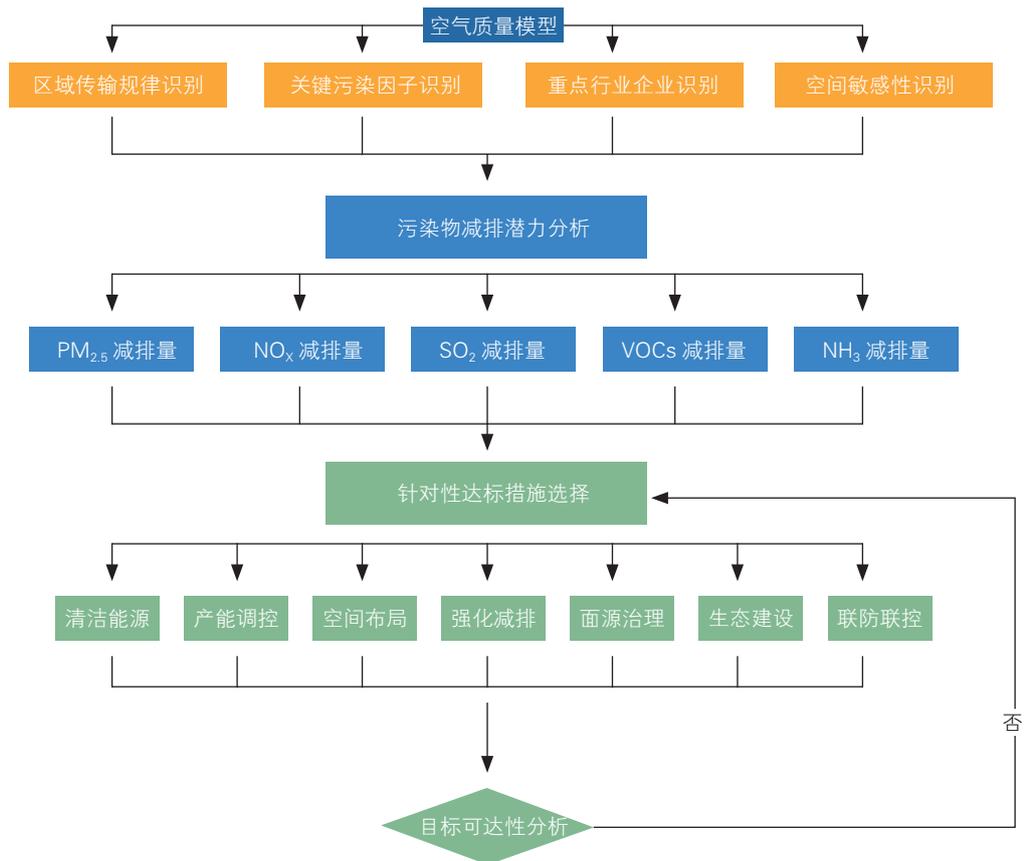


图 4-10 城市“双达”目标可达性分析

5 典型城市案例

考虑城市资源禀赋、产业结构、城市发展定位、所处区域差异性及其是否可获取社会经济、能源、低碳实施方案和空气质量达标规划等公开量化信息，结合 2012–2018 年全国城市大气污染物及二氧化碳排放清单中排放热点城市。选取服务型城市北京市、深圳市；偏轻工业型城市济南市、成都市、合肥市、苏州市；偏重工业型城市唐山市、郑州市、石家庄市，共 9 个城市作为典型案例城市。



考虑城市资源禀赋、产业结构、城市发展定位、所处区域差异性及其是否可获取社会经济、能源、低碳实施方案和空气质量达标规划等公开量化信息，结合 2012–2018 年全国城市大气污染物及二氧化碳排放清单中排放热点城市。选取服务型城市北京市、深圳市；偏轻工业型城市济南市、成都市、合肥市、苏州市；偏重工业型城市唐山市、郑州市、石家庄市，共 9 个城市作为典型案例城市。从时间上，各城市分别处于社会发展的不同时期，石家庄市、郑州市、唐山市处于工业化进程中后期，

工业基础雄厚，工业体系相对完整，工业产值占国民生产总值比重较高；苏州市、成都市、济南市和合肥市处于工业化进程后期，第三产业发展迅速，现代化开放性产业体系快速构建；北京市、深圳市基本建成现代化开放性产业体系，高新技术发展带动城市经济增长。从空间上，各城市分别是京津冀城市群、珠三角城市群，长江三角洲城市群、四川城市群、中原城市群中经济比较发达的城市，代表重点城市群引领的动力。各案例城市空气质量达标和碳排放达峰情况见表 5-1。

表 5-1 各案例城市空气质量达标和碳排放达峰情况

城市类型		城市特点
服务型	北京市	空气质量达标，碳排放达峰
	深圳市	空气质量达标，碳排放达峰
偏轻工业型	济南市	空气质量未达标，碳排放未达峰
	成都市	空气质量未达标，碳排放未达峰
	苏州市	空气质量达标，碳排放未达峰
	合肥市	空气质量达标，碳排放未达峰
偏重工业型	唐山市	空气质量未达标，碳排放未达峰
	郑州市	空气质量未达标，碳排放未达峰
	石家庄市	空气质量未达标，碳排放未达峰

5.1 综合服务业型城市

5.1.1 北京市“双达”路径分析

5.1.1.1 城市基本概况

北京市作为我国的首都，是全国政治中心、文化中心、国际交往中心、科技创新中心，是一座处于快速发展中的特大城市，总面积 1.64 万平方公里。截至 2020 年底，国民经济生产总值达 3.5 万亿元，常住人口达到 2189 万人，人均 GDP 约

16.5 万美元，汽车保有量达 657 万辆，年能耗达 7545 万吨标准煤（图 5-1）。与 2015 年相比，2019 年北京市的经济总量增长了 57%、机动车保有量增加了 17%、能耗增长了 10%，经济增长的同时也带来了较大的环境压力。

“十三五”时期，北京市能源发展取得积极成效，能源结构不断优化，清洁能源比重持续提高，基本形成多源多向、清洁高效、覆盖城乡的城市能源体系。北京市煤炭消费总量持续压减，加大



图 5-1 2015-2020 年北京市经济社会变化情况

天然气、可再生能源等清洁能源利用，全市优质能源比重由 86.9% 提高到 98.5%，连续 14 年超额完成国家下达的节能目标任务，保持全国省级地区最优水平。城乡供电能力大幅提升，外受电通道输电能力从 1700 万千瓦增加到 3100 万千瓦，全市供电可靠率达到 99.995%。燃气供应体系更加完善，形成“三种气源、七大通道”外送格局，门站接收能力达 1315 万立方米/小时，区区连通管道天然气。构建“集中供热+区域热网”清洁供热体系，基本实现全市平原地区“无煤化”。

自北京市集中开展大气污染防治与 CO₂ 协同减排以来，在经济社会快速发展的同时实现了

大气主要污染物浓度持续下降。2022 年北京市生态环境局发布“2021 年北京市空气质量首次全面达标”，指出自 2013 年以来，北京市大气环境中各项污染物浓度均显著下降（图 5-2）。其中，PM_{2.5}、PM₁₀、SO₂、NO₂ 年均浓度分别下降 63.1%、49.1%、88.7%、53.6%，CO 浓度下降 67.5%，O₃ 浓度下降 18.8%。截止 2021 年，PM_{2.5} 年均浓度为 33 μg/m³，首次达到国家标准，较 2013 年降幅达到 63.1%。2013-2021 年，SO₂ 年均浓度从 27 μg/m³ 降至 3 μg/m³ 的极低水平，降幅达到 88.7%，燃煤污染治理取得显著成效。NO₂ 年均浓度从 56 μg/m³ 降至 26 μg/m³，降幅达

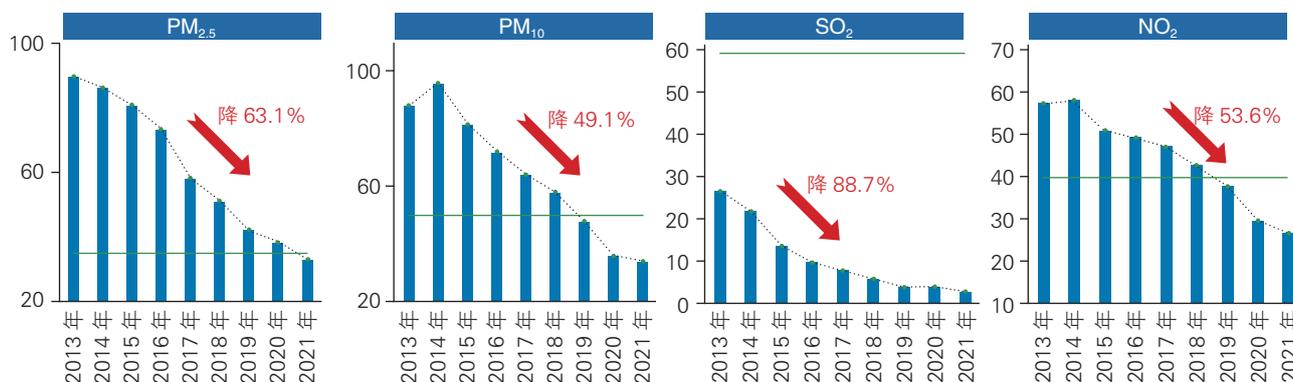


图 5-2 2013-2021 年四项主要污染物年均浓度变化

到 53.6%。全年优良天数占比超过 2/3，重污染发生频率、峰值浓度、持续时间均明显下降。各项大气污染物实现协同改善，北京市空气质量首次全面达标。2020 年，全市万元 GDP 碳排放下降超过 5%，较 2015 年下降 23% 以上，顺利完成“十三五”下降 20.5% 的规划目标。北京市万元地区生产总值二氧化碳排放量保持全国省级最优水平。

5.1.1.2 大气污染物和二氧化碳排放分析

“大气十条”以来，北京市持续推动了能源清洁转型和运输结构优化、大力疏解非首都功能，有效减少了污染物排放。根据北京市主要大气污染物 2013–2018 年排放清单表明，北京市 SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x、VOCs 排放量均呈下降趋势（图 5-3）。其中，SO₂ 下降最明显，下降幅度约 90%，PM₁₀ 和 PM_{2.5} 下降约 60%，主要源于煤炭消费量的大幅削减。其次由于实施严格的机动车管控政策。尽管北京机动车保有量呈现持续增长态势，NO_x 仍下降了 33%。除此之外，北京市淘汰大量涉 VOCs 企业，大力推广 VOCs 源头替代，在溶剂使用增加的情况下，全市 VOCs 排

放量下降 6%。虽然北京市 PM_{2.5} 浓度持续下降，空气质量明显改善，但 2020 年 PM_{2.5} 和 O₃ 仍分别超过国家空气质量二级标准 8%、7%。

当前，北京市大气污染治理正从“结构性减排”向“内涵型减排”转变，大气改善难度越来越大，空气质量改善任务依然艰巨。与此同时，北京市大力压煤有效控制了碳排放量，2018 年 CO₂ 排放量较 2013 年下降了 9%，但随着人民生活水平的提高、第三产业的快速发展，建筑部门、交通部门能耗需求仍将增长，2018 年北京市 CO₂ 排放量较 2017 年增加 11%，未来 CO₂ 排放量仍存反弹风险。

5.1.1.3 减污降碳政策梳理

“十三五”时期，北京市大气污染治理力度大、成效明显，期间修订了《北京市大气污染防治条例》，制定了《机动车和非道路移动机械排放污染防治条例》，发布了《北京市打赢蓝天保卫战三年行动计划》《北京市扬尘管控工作意见》等一系列文件，从能源，产业结构，交通运输调整等 7 大方面出台并落实了大气污染防控措施（表 5-2）。

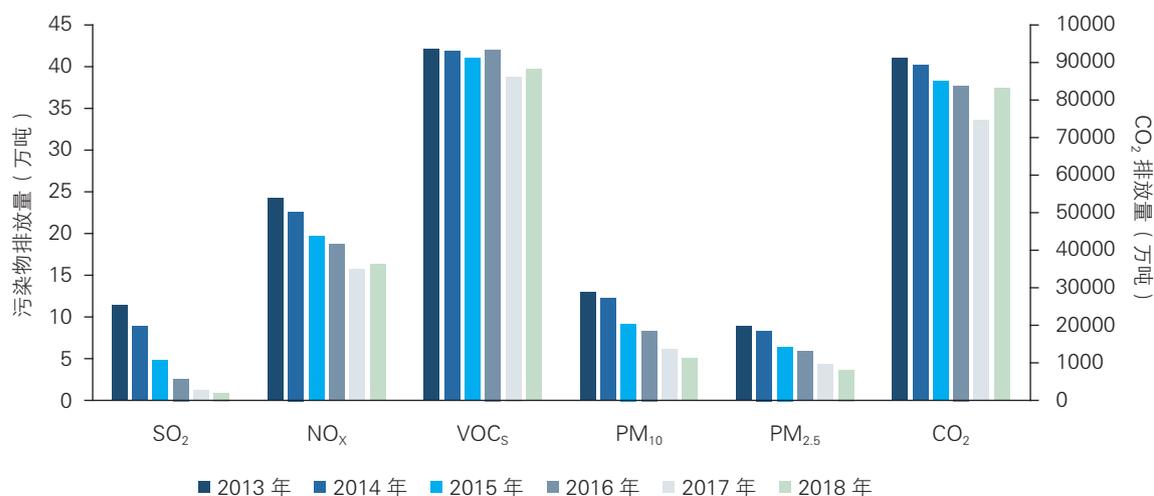


图 5-3 2013–2018 年北京市主要污染物和 CO₂ 排放变化情况

表 5-2 北京市大气污染防治减排措施

政策类型	具体措施	政策类型	具体措施
燃煤锅炉控制	关闭四大燃煤电厂，建设四个天然气热电联产中心	车辆排放控制	淘汰 216.7 万辆“黄标车”（未达到欧 I 和欧 III 标准的汽油和柴油车）
	改造城区 25 兆瓦以下、全市 7 兆瓦以下燃煤设施		实施国六燃油质量标准，低于国三排放标准的市外柴油车禁止在六环路内行驶
居民区的清洁能源	淘汰或取代总容量为 27300 兆瓦的燃煤锅炉	综合处理 VOCs	完成 5.1 万辆出租车三元催化器的更换，1.7 万辆重型柴油车配备壁流式颗粒物捕集器
	降低非高峰期家庭用电价格，建立新的燃气供暖系统		主要的 7 个城区限制使用重污染的非道路车辆
优化产业结构	90 万户家庭从使用煤炭转变为使用燃气或电力	控制扬尘	淘汰有机溶剂涂料、沥青防水材料 and 有机油漆家具制造
	禁止木材和农作物等生物质露天燃烧		机械制造、印刷、涂料和汽车维修行业推广使用低（无）VOCs 高固体和水性涂料
改进管道末端控制	淘汰化工、家具制造、印刷和非金属矿物制品行业 1992 家大型高污染企业，淘汰四分之三的水泥行业企业	控制扬尘	完成燕山公司密封脱焦技术革新、泄漏点检测与修复、成品油生产与储存区专业化管理等 7 个大范围的 VOC 治理项目
	淘汰 11000 家未达到效率、环境、安全标准的小型、集聚、污染工厂		提高道路清洁过程质量和频率，2017 年底，采用机械化清扫面积为 9058 万平方米。占城市道路总面积 88%
改进管道末端控制	实施了 468 个涉及清洁生产和高污染工业部门技术升级的项目	控制扬尘	关闭 310 个混凝土搅拌站，更新煤渣运输车 2 万台
	水泥行业实现彻底脱硝和脱气，加强对非金属矿物制品和化工行业的脱硫改造		超过 1200 个建筑工地配备视频监控系统
	2013 年在所有工业领域推广低氮燃烧，已完成近 21000 兆瓦燃气锅炉和燃油锅炉的低氮燃烧改造		完成附近的平原地区造林近 700 平方公里

为顺利实现“双碳”目标，北京市出台并落实了《北京市“十四五”时期生态环境保护规划》《北京市进一步强化节能实施方案》《北京市深入打好污染防治攻坚战 2022 年行动计划》等系列低碳城市建设措施，从绿色低碳产业体系建设、能源高效低碳利用等 15 个重点领域推行北京市碳减排工作，通过 6 大补贴政策，引导企业转型升级（表 5-3）。

5.1.1.4 协同减排措施效果评估

“十三五”以来，北京市坚持以习近平生态文明思想为指导，落实京津冀协同发展战略和北京城市总体规划，聚焦细颗粒物（PM_{2.5}）污染，

以超常规的措施和力度治理大气污染，同时也为全市碳达峰工作打下了扎实的基础。

能源结构调整实现重大突破。北京市建成四大热电中心，全面淘汰燃煤机组，提升可再生能源发电，大力引入绿色外电，实现本地电力生产清洁化。划定高污染燃料禁燃区，完成约 3 万蒸吨燃煤锅炉改造，实现全市工业企业基本无燃煤；实施民用散煤清洁替代，基本实现全市平原地区“无煤化”。持续开展节能降耗工作，实现能源利用效率全国最优、下降幅度全国最大。“十三五”时期，北京市共压减燃煤近千万吨，新能源和可再生能源应用总量超过 600 万吨标准煤，全市优质能源比重由 2015 年的 86.3% 提高到 2020 年的 98.1%。

表 5-3 北京市碳减排措施

重点领域	工作措施	重点领域	工作措施
政策体系	出台碳达峰碳中和系列政策文件，确定重点领域减碳目标任务，推动产业和能源低碳转型，切实控制温室气体排放，有效减级气候变化	农业	积极发展低碳农业、智慧农业，提升低耗高效农业设施比例。持续推进化肥减量增效，化肥施用总量继续下降，减少甲烷、氧化亚氮等温室气体排放
核算体系	完善温室气体排放统计核算基础，编制市级排放清单，完善碳排放统计体系，探索碳排放分析快报机制，研究开展温室气体排放监测	生态系统	坚持全城多层次增绿固碳，以提升林业碳汇为重点，提升园林绿地碳汇能力，2022年度全市森林资源碳汇能力增加20万吨，全市森林覆盖率达到44.8%。提升农业碳汇，加强耕地资源保护，开展土地综合治理，增加土壤有机碳储量
责任考核机制	强化碳排放控制目标约束作用，完善碳排放总量和强度“双控”机制	全国碳市场	按照国家要求，组织本市纳入全国碳市场的发电、石化、水泥等行业重点排放单位完成数据报送和核查工作，确保发电行业重点排放单位按期完成履约
绿色低碳产业体系	推动科技含量高、能效高、碳排放低的高精尖产业发展	全国碳市场	全力推动全国温室气体自愿减排交易机构承建工作，参与制定交易规则，完成管理系统建设，组织开展交易，服务全国碳市场履约
	优化产业结构，大力培育新能源、新材料、新基建、新能源汽车等战略性新兴产业 严格执行新建数据中心能效标准，推动高能耗数据中心改造		低碳试点示范
能源高效低碳利用	大力开展能源节约和能效提升，严控化石能源消费总量，万元GDP能耗下降率达到国家要求 推动可再生能源规模化利用，大力发展本地热泵、光伏系统，科学开发利用中深层地热供暖，适度发展风电 新增可再生能源发电装机容量10万千瓦 提高绿色电力应用规模，全市外调绿电持续增长，可再生能源消费占比持续上升	低碳试点示范	
建筑领域低碳化	落实建筑节能减碳工作方案，新建政府投资建筑按照超低能耗建筑标准建设；加强公共建筑电耗限额管理。力争累计推广超低能耗建筑150万平方米、完成750万平方米非节能公共建筑节能绿色改造	科技	加强应对气候变化科技创新，开展碳中和路径研究、碳排放管理政策制度及管理支撑技术研究等，支持开展有关储能、电网、材料、氢能及可再生能源利用等低碳技术开发研究
绿色智能供热体系	推进既有燃气供热系统“零碳”改造示范，完成2000万平方米既有建筑智能化供热改造，大力推动可再生能源供热面积持续增长”	宣传	组织环境日、低碳日等宣传活动，利用多种渠道和方式，加大应对气候变化宣传力度 推广高效低碳绿色产品，利用碳普惠等形式，引导市民逐步形成绿色低碳的生活方式和消费理念，培养绿色消费习惯
城市交通体系	扎实推进慢行优先、公交优先、绿色优先，中心城区绿色出行比例力争74.6%，推进运输结构调整，加快实施“公转铁”	资金	加强财政资金对低碳领域政策制定、技术推广、试点项目支持，推动气候投融资试点，营造有利的政策环境，引导社会资金支持绿色低碳转型

产业结构调整取得明显成效。以疏解北京非首都功能为“牛鼻子”，大力推进不符合首都功能定位的一般制造业企业退出，已阶段性累计退出一般制造业企业2154家，同时完成1.2万家“散乱污”企业分类整治和动态清零，推动制造业绿色转型发展。“十三五”期间，北京市三次产业结构由2015年的0.6:19.6:79.8调整为0.4:15.8:83.8，战略性新兴产业占地区生产总值的比重由15.3%提升至24.8%，逐步实现新旧动能转换。

交通运输结构调整稳步推进。坚持以“慢行优先、公交优先、绿色优先”为原则，不断优化市民出行结构。以商品车、钢铁、生活必需品等为重点货类，全市推动实现560万吨货物“公转铁”。持续推动运营车辆能源和排放结构双优化，控制机动车保有量，淘汰老旧机动车109.1万辆，推广新能源车40.1万辆。“十三五”北京市交通运输行业单位能耗和污染物排放较“十二五”分别下降5%和30%。

建筑能效持续提升。突出抓好全过程建筑节能，推进城镇既有非节能居住建筑和农宅节能改造。高标准推广绿色建筑，积极推广超低能耗建筑和装配式建造模式。实施分项、分区计量控制，全面强化建筑运行能耗管理。

留白增绿持续扩大环境容量。大尺度建设城市绿色生态空间，新增城市绿地3600公顷。大力推进京津风沙源治理二期工程，实施太行山绿化三期工程，夯实首都山区绿色生态屏障。重点实施京藏高速、京新高速、六环路、大兴机场高速等公路和京张高铁、市郊铁路怀密线等铁路的生态廊道建设，推进潮白河森林生态景观带建设工程，进一步扩大绿色生态空间容量。

北京市“十三五”期间协同减排效果显著，大气污染物排放总量显著下降的基础上，碳排放降幅明显。大气污染防治措施和碳减排协同措施集中于工业、能源和交通领域。工业方面，通过

产业结构调整助推大气污染物排放减少，重点企业实施超低排放改造SO₂和NO_x减排显著；能源方面，推行总量控制，特别是增加可再生能源发电、加大绿色外电引入替代本地燃煤发电量协同减污降碳效果明显；交通方面，控制机动车保有量、老旧车辆淘汰和新能源替代协同效果显著（表5-4）。

5.1.1.5 “双达”目标

“十三五”时期，北京市空气质量继续改善，但是持续改善生态环境仍面临对标率先实现碳中和目标，绿色低碳转型面临更高要求；空气质量改善成效尚不稳固，PM_{2.5}与O₃协同治理难度加大；区域生态环境问题依然突出，协作共治需深化和创新等困难与挑战。“十四五”时期是生态环境质量改善由量变到质变的关键时期，北京市政府依据《生态环境保护法律法规》《北京城市总体规划(2016-2035)》《北京市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》等编制《北京市“十四五”时期生态环境保护规划》。

规划中要求北京市PM_{2.5}年均浓度降至35μg/m³左右，空气质量优良天数比率稳步提升，基本消除重污染天气。生态涵养区PM_{2.5}年均浓度在稳定达到国家空气质量二级标准基础上进一步下降。主要污染物排放总量持续减少，氮氧化物、VOCs重点工程减排量分别为1.38万吨、0.99万吨以上。碳排放总量率先实现达峰后稳中有降，较峰值下降10%以上。单位地区生产总值二氧化碳排放下降18%左右，可再生能源消费比重达到14%左右。可见未来北京市对于大气污染物治理和二氧化碳减排思路将发生本质改变，碳减排将协同并引领大气污染治理工作，提速空气质量达标进程，减污降碳协同增效对于北京市空气质量达标与碳达峰工作至关重要（表5-5）。

表 5-4 “十三五”北京市协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	☆☆☆
		整治“散乱污”企业	☆☆☆☆☆
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	☆☆☆☆☆
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	☆☆☆
	优化能源结构	淘汰燃煤小锅炉	☆☆☆☆☆
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	☆☆☆
		建设“高污染燃料禁燃区”	☆☆☆
		提高重点行业能源利用效率	☆☆☆
电力	总量控制	燃煤机组替换为燃气机组	☆☆☆
		增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	☆☆☆☆☆
		加大绿色外电引入，减少本地燃煤发电量	☆☆☆☆☆
交通	总量控制	控制机动车保有量	☆☆☆☆☆
	源头管控	淘汰老旧柴油货车	☆☆☆☆☆
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	☆☆☆☆☆
		提高铁路水路货运比例，发展多式联运	☆☆☆
	运输结构调整	建设城市绿色物流体系	☆☆☆
		完善公共交通，提高公共交通出行率	☆☆☆
民用	优化能源结构	实施冬季取暖“煤改电”	☆☆☆☆☆
		实施冬季取暖“煤改气”	☆☆☆
		实施冬季取暖“煤改集中供热”	☆☆☆
		实施冬季取暖“煤改可再生能源”	☆☆☆☆☆
建筑	提高能效	全面执行绿色建筑标准	☆☆
		积极发展超低能耗建筑	☆☆
		实施既有建筑节能改造	☆☆
		全面推广装配式建筑	☆☆
土地利用	用地结构调整	推进绿化碳汇工程	☆☆

表 5-5 “十三五”与“十四五”时期生态环境保护规划目标对比

类别	序号	指标	2020 年现状	2025 年目标
环境质量改善	1	PM _{2.5} 年均浓度	56 μg/m ³	35 μg/m ³ 左右
	2	空气质量优良天数比率	65.70%	稳步提升
	3	氮氧化物排放	总量减少 25%	重点工程减排 >1.38 (万吨)
	4	挥发性有机物排放	总量减少 25%	重点工程减排 >0.99 (万吨)
	5	二氧化硫排放总量减少	35%	/
绿色低碳发展	6	碳排放总量 (亿吨)	/	比峰值下降 10% 以上
	7	可再生能源消费比重	/	14%
	8	单位 GDP 二氧化碳排放降幅	20.50%	18% 左右

5.1.1.6 协同控制政策建议

北京市工业比重较小，服务业比例达83.8%，意味着首都呈现点散面广、业态多元化特点，能源消费服务型、都市型特征明显。为实现空气质量达标和碳排放达峰，必须依靠能源、交通、产业、建筑多方面由化石能源向非化石能源转型，大幅提高终端电气化水平，构建以电力为中心的、多能互补的综合能源系统。

优化能源结构方面，持续调整能源供给结构，提升能源利用效率。到2025年，化石能源消费总量实现稳中有降，全市新增能源消费量优先由新能源和可再生能源保障。推动绿电进京输送通道和配电调峰储能等设施建设。控制化石能源消费总量，严格控制煤炭消费。因地制宜推进剩余村庄及农业生产和公共设施清洁能源改造，完善农村清洁能源供应保障体系。健全清洁取暖设备运维服务机制，防止散煤复烧。有序控制天然气使用规模。增加外部绿色电力调入规模，适度降

低本地燃气机组发电占比。推进油品消费稳中有降。提升能源利用效率完善能源消费总量和强度“双控”制度，强化各区、重点行业、重点用能单位目标责任考核。

低碳交通体系方面，优化交通运输结构，研究制定运输结构优化调整行动计划，积极推进重点大宗物资运输“公转铁”。加快推进车辆“油换电”。优化出行结构，推进轨道交通与地面公交、慢行系统融合发展，构建与绿色出行相适应的交通发展模式。提高生态系统碳汇能力和控制温室气体排放。

绿色低碳产业方面，大力推动产业绿色低碳发展，依托国际科技创新中心建设，大力发展新能源、节能环保等绿色产业，培育绿色发展新动能。加快推进产业绿色提质升级，鼓励绿色发展水平先进的企业积极申报绿色工厂、绿色产品等绿色制造示范单位。着力推进产业结构深度优化，修订北京市新增产业禁止和限制目录以及工业污染行业、生产工艺调整退出及设备淘汰目录，加



大对能耗较高、CO₂和VOCs排放大的工业行业、生产工艺、落后设备的淘汰和限制力度，推动不符合首都功能定位的一般制造业企业动态调整退出。

建筑绿色低碳改造方面，积极推广绿色建筑，提高建筑能效水平，强化建筑运行能耗管理，推进建筑绿色发展条例立法。到2025年，完成既有建筑节能改造面积3.5亿平方米以上，建设超

低能耗、近零能耗建筑0.5亿平方米以上，装配式建筑占当年城镇新建建筑的比例达到30%，全国新增建筑太阳能光伏装机容量0.5亿千瓦以上，地热能建筑应用面积1亿平方米以上，城镇建筑可再生能源替代率达到8%，建筑能耗中电力消费比例超过55%。

总结北京市未来大气污染物和碳减排协同效益的措施（表5-6）。

表 5-6 北京市未来协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
交通	总量控制	控制机动车保有量	★★★★★
		降低机动车使用强度	★★★★★
	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
		优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶
交通	提高能效	提高燃油经济性，减少平均油耗	★★★
		完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★
	运输结构调整	提高铁路水路货运比例，发展多式联运	★★★
		建设城市绿色物流体系	★★★
		发展推广“低排放行驶区域”	★★★★★
电力	总量控制	加大绿色外电引入，减少本地发电量	★★★★★
		增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★
工业	产业结构调整	淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
	优化能源结构	提高重点行业能源利用效率	★★★
建筑	提高能效	实施工业炉窑燃气电能替代	★★★★★
		全面执行绿色建筑标准	★★
		积极发展超低能耗建筑	★★
		实施既有建筑节能改造	★★
		全面推广装配式建筑	★★
民用	源头管控	提倡低碳生活方式	★★★
	优化能源结构	实施冬季取暖“煤改电”	★★★★★
		实施冬季取暖“煤改可再生能源”	★★★★★
土地利用	用地结构调整	推进绿化碳汇工程	★★

备注：★数量代表协同效益程度



5.1.2 深圳市“双达”路径分析

5.1.2.1 城市概况

深圳市是我国四大一线城市和粤港澳大湾区四大中心城市之一，也是全国经济中心城市、科技创新中心、区域金融中心、商贸物流中心。全市总面积 1997.47 平方公里。截至 2019 年底，国民经济生产总值达 2.7 万亿元，常住人口达到 1343.9 万人，人均地区生产总值达到 20.3 万元，

汽车保有量达 348.2 万辆，年能耗达 4534 万吨标准煤（图 5-6）。与 2015 年相比，2019 年深圳市的经济总量增长 54%、人口增长 18%、汽车保有量增加 11%、能耗增长 16%。深圳市人口稠密，社会经济高速发展，资源环境承载压力大，持续改善大气环境质量势在必行。

“十三五”期间深圳节能减排取得了明显成效，单位 GDP 能耗持续下降，2020 年单位 GDP 能耗约为全国平均水平 1/3，全省 1/2。单位 GDP 碳排放约为全国平均水平 1/5、全省 1/3，均达到国内领先、国际先进水平。在产业

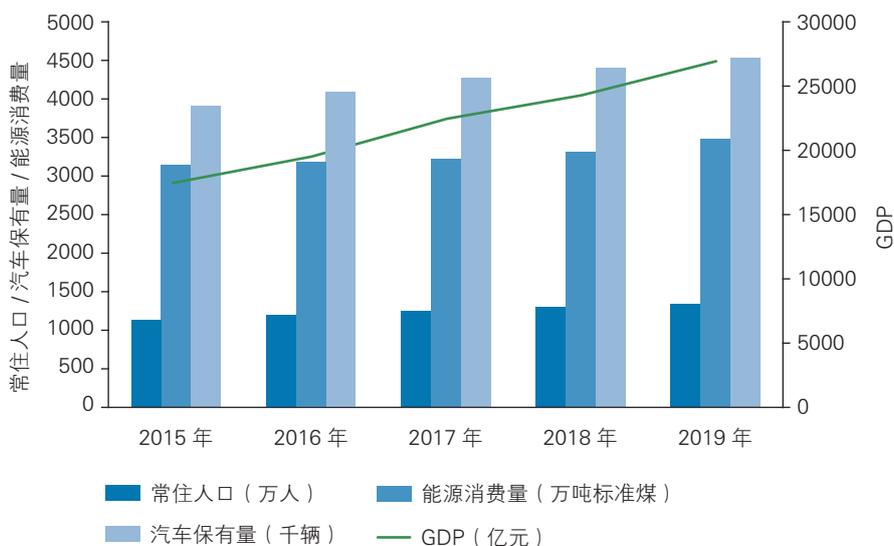


图 5-6 2015–2019 年深圳市经济社会变化情况

领域，深圳产业能级持续提升。2020年先进制造业增加值增长3.9%，高技术制造业增加值比上年增长2.3%，占规上工业增加值比重分别为72%和66%。战略性新兴产业增加值合计1.03万亿元，比上年增长3.1%，占GDP比重37%。现代服务业增加值1.31万亿元，比上年增长6.4%，占GDP比重47%。在交通领域，截至2020年底，深圳市新能源汽车保有量达38万辆，占全市机动车保有量约11%，新车电动化率和保有量电动化率均位于全国领先地位。累计建成各类充电桩超8.3万个，充电桩超5000个，保有装机总功率230万千瓦，公共桩密度全国第一（图5-7）。

深圳市通过综合手段促进污染治理，坚持转型升级、绿色低碳的发展战略，在经济高质量快速增长的同时实现了空气质量大幅改善。2020年，全市PM_{2.5}年均浓度首次实现“10+”，为19μg/m³，较2015年下降11μg/m³，稳定达到世卫组织第二阶段标准，六项污染物均已全面达标。六项污染物中CO、PM_{2.5}降幅最高，分别达38%和37%，NO₂、PM₁₀和SO₂降幅分别为

30%、29%和25%，O₃保持不变。2020年，深圳市综合指数较2015年下降25%，创1988年以来新低。优良天共356天，空气质量优良天数比例达到98%。

5.1.2.2 主要大气污染物和碳排放情况

深圳市通过发展绿色交通、彻底淘汰民用散煤和普通工商业用煤、提高清洁能源使用比例、优化产业结构、执行绿色建筑标准等措施，大气污染治理工作取得明显成效。根据深圳市统计数据计算得到主要大气污染物2013-2018年排放清单表明，深圳市除VOCs排放量有小幅上升外，SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}、NO_x排放量均呈下降趋势。煤炭消费量的大幅削减带来的SO₂排放量下降最明显，下降幅度约28.4%，PM₁₀和PM_{2.5}排放量分别下降约3.3%、0.3%；由于深圳市大力淘汰老旧车辆、推广新能源车，尽管汽车保有量持续增长，NO_x排放量仍下降了约9.1%，但正是由于汽车保有量持续增长加上溶剂使用增长，深圳市虽然大力推广源头替代，淘汰了大量涉VOCs

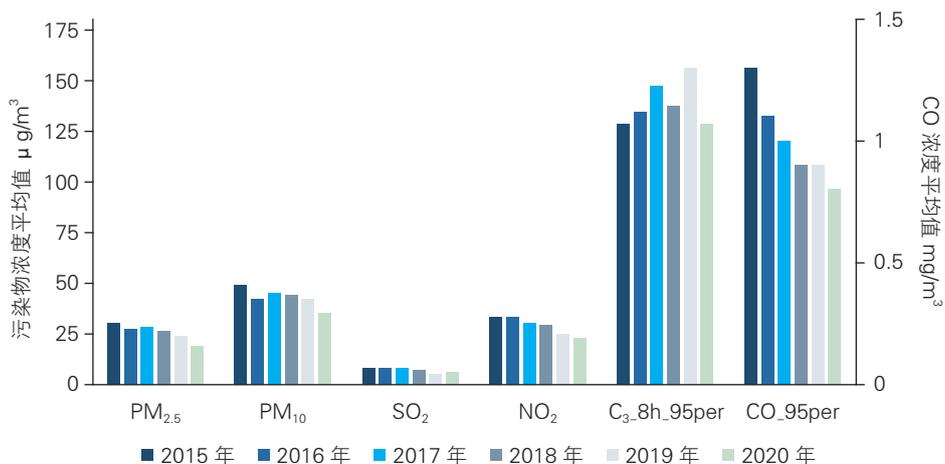


图 5-7 2015-2020 年深圳市空气质量变化情况

企业，但 VOCs 排放量反而上升了 2.1%。目前，深圳市虽已实现了空气质量全面达标，但与世界卫生组织（WHO）给出的最新指导值（ $PM_{2.5}$ 浓度小于 $10 \mu g/m^3$ ）相比仍有很大差距， $PM_{2.5}$ 浓度是 WHO 指导值的 2 倍，仍有很大的改善空间。

深圳市单位 GDP 二氧化碳排放分别为全国平均水平的 1/5，五年下降 23.2%，处于全球先进水平。但作为高速增长的特大型城市，随着人民生活水平和生活质量的提高、第三产业的快速发展，建筑部门、交通部门能耗需求持续增长，深圳市 CO_2 排放量逐年递增，2018 年 CO_2 排放量较 2013 年上升了 23.8%，实现碳达峰依旧面临挑战。为了实现协同“双达”，深圳市需强化统筹，重点推进能源、工业、建筑、交通等领域绿色低碳化发展，推动环境空气质量逐步迈向国际一流，实现碳达峰并保持碳排放量平稳下降（图 5-8）。

5.1.2.3 减污降碳政策梳理

深圳市密集制定了《在用非道路机械用柴油机排气烟度限值及测量方法》《低挥发性有机物含量涂料限值》等标准，修订了《深圳经济特区

机动车排气污染防治条例》《深圳市扬尘污染防治管理办法》，印发了《深圳市大气环境质量提升计划（2017-2020）》《深圳市打好污染防治攻坚战三年行动方案（2018-2020）》，出台了《深圳市新能源汽车推广应用扶持资金管理暂行办法》《深圳市黄标车提前淘汰奖励补贴办法》等一系列文件和补贴政策，以坚持源头防治，综合施策，深入推进大气污染防治攻坚行动，以 $PM_{2.5}$ 和 O_3 协同控制为主线，推动 O_3 稳定步入下降通道，强化多污染物协同治理和区域联防联控，推动大气环境质量继续领跑全国，让“蓝天白云、繁星闪烁”成为常态（表 5-7）。

深圳市坚定不移实施积极应对气候变化国家战略，统筹落实国家碳达峰、碳中和政策体系，加强能耗双控工作，全面加强应对气候变化和生态环境保护相关工作统筹融合，显著增强应对和适应气候变化能力。2022 年 1 月深圳市人民政府正式公布《深圳市生态环境保护“十四五”规划》，以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入贯彻习近平生态文明思想，坚持以人民为中心的发展思想。以实现减污降碳协同增效为总抓手，抢抓“双区”驱动、“双区”叠加、“双改”

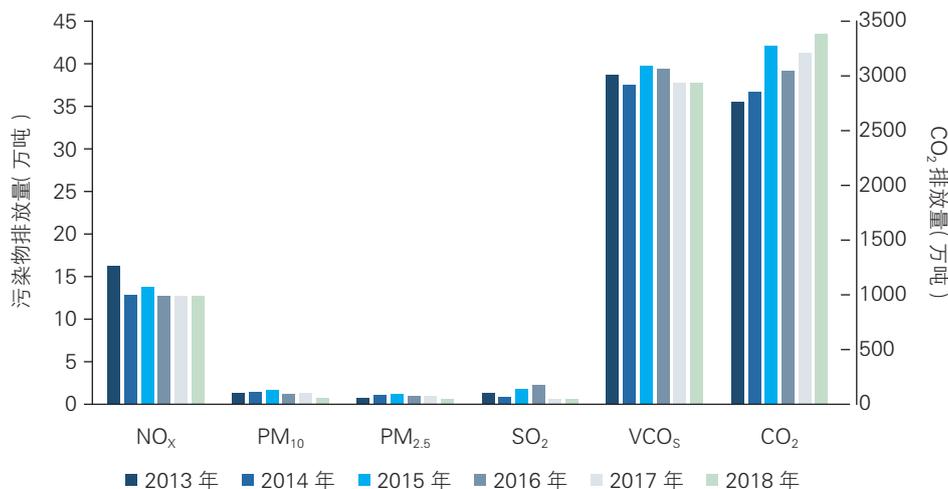


图 5-8 2013-2018 年深圳市主要污染物和 CO_2 排放变化情况

示范和建设中国特色社会主义法治先行示范城市、粤港澳大湾区高水平人才高地等重大历史机遇。推进精准治污、科学治污、依法治污，深入打好污染防治攻坚战，促进经济社会发展全面绿色转型，持续推进生态环境治理体系和治理能力现代化（表 5-8）。

5.1.2.4 协同减排措施效果评估

“十三五”时期，深圳作为国家首批低碳试点城市、可持续发展议程创新示范区，践行“绿水青山就是金山银山”理念，初步形成了具有深圳特色的低碳发展模式，在产业、能源、交通、

表 5-7 深圳市大气污染物控制措施梳理

一级措施	具体措施
深入推进 O ₃ 治理	制定加强 PM _{2.5} 和 O ₃ 协同控制、持续改善空气质量行动计划
	加强重点区域、重点时段、重点领域、重点行业治理 强化分区分时分类差异化、精细化协同管控
优化污染天气应对机制	加强环境空气质量预测预报能力建设，提高 O ₃ 和 PM _{2.5} 预报准确
	建立大气环境质量监测与污染源监控联动机制
	绿色物联网
	健全污染天气预警应急启动、响应和解除机制 完善污染天气区域联合预警机制
提升大气污染科学治理能力	完善现代化环境监测体系
	推动城市大气污染源排放清单编制与更新工作常态化
	开展 O ₃ 形成机理研究和源解析，推进 PM _{2.5} 和 O ₃ 协同治理科技攻关
	开展重点任务、重点项目实施情况和污染防治成效跟踪评估，动态调整优化大气污染防治方案 建立污染排放和气象等数据信息的共享机制，深化大数据挖掘分析和综合研判，精准指导大气污染防治工作部署。
深入推进重点行业挥发性有机物 (VOCs) 治理	新建项目实行 VOCs 现役源两倍削减量替代
	优化涉 VOCs 行业排污许可证申请与核发程序，完善 VOCs 总量控制制度及排放清单动态更新机制
	推进工业企业实施低 VOCs 含量原辅材料替代
	推动园区建设集中涂装中心等 VOCs 集中处理设施
	推进重点企业和园区 VOCs 排放在线监测系统建设
完善 VOCs 管控地方标准体系，禁止生产、销售和使用 VOCs 含量超过限值标准的产品。	
强化电厂和工业锅炉排放治理	新建项目原则上实施氮氧化物等量替代
	全市天然气锅炉基本完成低氮燃烧改造
	严密监控电厂大气污染物排放，进一步提升电厂污染治理水平 探索制定锅炉、电厂污染物排放地方标准

表 5-8 深圳市低碳城市建设措施梳理

一级措施	具体措施	一级措施	具体措施
科学制定碳达峰行动方案	制定碳达峰行动方案和配套措施，推进重点领域节能	推动城市建设绿色发展	节全面落实绿色低碳要求，推进城市绿色有机更新，杜绝大拆大建
	建立健全以碳强度控制为主、碳排放总量控制为辅的制度		大力推广装配式建筑和绿色建筑，推广绿色低碳建材，推动绿色建筑与新型建筑工业化、低碳技术、建筑信息模型 (BIM) 技术等应用
	完善碳排放权交易、碳汇补偿等市场机制		推行绿色建筑运营标识管理
	加大碳达峰目标任务落实情况考核力度，压实压紧工作责任		扩大建筑能耗监测平台覆盖范围，加强公共建筑能耗监测，优化建筑能耗数据管理和应用，提升建筑和基础设施运行管理智能化水平
构建清洁低碳能源体系	继续实施能源消费总量和强度“双控”行动	加强非二氧化碳温室气体管控	提高建筑终端电气化水平
	严格实施节能审查制度，强化节能审查事中事后监管		通过原料替代、过程消减和末端处理等手段积极控制非二氧化碳温室气体排放
	发展氢能、太阳能、风能等新能源		加强非二氧化碳温室气体排放监测
	发展生物质能，探索地热能、潮汐能等非化石能源开发利用		推动生产中逸散温室气体的回收和再利用
	推进电网低碳化、智能化建设		制定实施氢氟碳化物排放控制措施，提高含氟气体的利用效率
推动低碳交通运输体系建设	建设能源产业创新中心、创新联合体等平台，完善本地清洁能源供应机制	创新推动低碳试点示范	加强污水处理和垃圾填埋的甲烷排放控制和回收利用，控制农田和畜禽养殖甲烷和氧化亚氮排放
	推动交通运输结构优化调整，大力发展海铁联运、水水中转业务		开展气候投融资试点
	实施公共交通优先发展战略		加快碳交易市场建设
	发展智能交通和绿色物流，创新绿色低碳、集约高效的配送模式，鼓励新能源载运工具发展		推进多领域低碳试点示范
	加强交通运输领域重点用能单位监督管理，加大交通运输节能技术推广应用力度		强化成品油质量和油品储运铺监管
持续推动工业行业节能提效	推动航空业实施碳减排和碳抵消	深化移动源污染防治	深化机动车污染防治
	到 2025 年，新能源汽车保有量达到 100 万辆左右，新增注册汽车新能源汽车比例达到 60%	强化面源污染防治	加强非道路移动机械污染治理
	严格“两高”产业准入，坚决遏制“两高”项目盲目发展		推进船舶污染防治
	加强高耗能行业能耗管控		持续强化扬尘污染治理，全面落实工地扬尘“7 个 100%”
推动绿色数据中心建设		加强其他面源污染控制	

建筑等方面开展了大量工作，在保证生态环境质量显著改善的同时有效控制了 CO₂ 排放总量。

加快优化产业结构。淘汰低端落后企业 4797 家，完成约 1.47 万家“散乱污”企业整治，同时大力推进绿色低碳产业发展。“十三五”期间，深圳市三次产业结构由 2015 年的 0.1: 41.2: 58.8 调整为 0.1: 37.8: 62.1，产业结构更加合理。2020 年，深圳战略性新兴产业占比达 37%，高技术制造业和先进制造业增加值占规模以上工业增加值的比重分别达 66% 和 72%，每平方公里产出 GDP 居全国大城市首位。

持续优化能源结构。坚持优质清洁能源为主的能源发展战略，形成了以电和 LNG 等清洁能源为主的能源结构。持续削减煤炭用量，拆除高污染锅炉及高污染燃料储存设施，彻底淘汰了民用散煤和普通工商业用煤。电力结构持续优化，禁止新建煤电，大力引入绿色外电，积极发展太阳能、生物质能和风能发电，核电、气电等清洁能源装机容量占全市总装机容量的 77%，高出全国平均水平约 25%。深化和加强建筑、交通、工业、商业、公共机构等重点领域的节能管理，2020 年深圳市单位 GDP 能耗降至 0.17 吨标准煤 / 万元，与发达国家水平相当。

积极优化交通运输结构。倡导“主动停驶，绿色出行”，系统推进轨道、公共、慢行交通三网融合，试点建设“碳币”服务平台。通过摇号和竞价方式配置普通小汽车增量，实现小汽车有序增长。通过强制报废、财政补贴、限行等手段，累计淘汰黄标车和老旧车约 60 万辆。大力推广新能源车，累计推广新能源汽车约 40 万辆，率先实现公交车、出租车、网约车全面纯电动化，是全球新能源汽车推广规模最大的城市之一。实施异地牌照柴油车限行政策，逐步扩大轻型柴油货车限行范围，降低机动车使用强度。推广新能源船舶，提高岸电使用率，具备岸电供应能力的大型船舶深水泊位达到 37 个，岸电使用比例提高至 6.1%，

为全国最高。

大力推进建筑领域节能降碳。大力推广绿色建筑，要求新建民用建筑百分之百执行绿色建筑标准，全市绿色建筑总面积达 1.28 亿平方米，累计 13 个项目获评省级示范项目。建筑节能改造成果显著，累计改造公共机构面积超过 1800 万平方米，占公共机构总建筑面积的 68%，公共机构合同能源管理节能改造面积规模均居全国首位。装配式建筑大幅提升，新建建筑比例从 5% 提高到 38%。

显著提升绿色碳汇。实施重点林业绿化生态工程，绿地面积和覆盖率增长迅速。全市绿化覆盖面积 10.2 万公顷，建成区绿化覆盖率 43.4%，建成区绿地率 37.4%；共有公园 1206 个，公园面积 3.15 万公顷，建成“千园之城”。截至 2019 年 10 月，深圳全市森林面积为 797 平方公里，森林覆盖率达到 40.21%，拥有各类自然保护地 24 个。

近年来深圳市已逐步实现经济发展绿色转型，空气质量和碳排放强度都处于比较领先的水平。作为一个服务业为主的超大型城市，深圳市要持续实现空气质量提标和碳排放达峰，必须抓好多元化能源供给，持续优化能源管理；推动产业结构优化，加快生产方式的变革；同时坚持全民参与，倡导绿色低碳生活方式。

总结深圳市具有大气污染物和碳减排协同效益的政策（表 5-9）。

5.1.2.5 深圳市“双达”目标

深圳市深入贯彻新发展理念，加快构建新发展格局，坚持稳中求进工作总基调，以推动高质量发展为主题，以持续改善生态环境质量为主线，以实现减污降碳协同增效为总抓手，抢抓“双区”驱动、“双区”叠加、“双改”示范和建设中国特色社会主义法治先行示范城市、粤港澳大湾区

表 5-9 深圳市“十三五”协同减排政策总结

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★
		整治“散乱污”企业	★★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
	优化能源结构	严格控制新增燃煤项目	★★★
		淘汰燃煤小锅炉	★★★★★
		燃煤锅炉电能替代	★★★★★
		燃煤锅炉天然气替代	★★★
		实施工业炉窑燃煤电力替代	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	★★★
		提高重点行业能源利用效率	★★★
电力	总量控制	增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★
		加大绿色外电引入，减少本地燃煤发电量	★★★★★
交通	总量控制	控制机动车保有量	★★★★★
		降低机动车使用强度	★★★★★
	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
		推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
	运输结构调整	完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★
建筑	提高能效	全面执行绿色建筑标准	★★
		实施既有建筑节能改造	★★
		全面推广装配式建筑	★★
土地利用	用地结构调整	推进绿化碳汇工程	★★

备注：★数量多代表协同效益明显

高水平人才高地等重大历史机遇，推进精准治污、科学治污、依法治污，深入打好污染防治攻坚战，促进经济社会发展全面绿色转型，持续推进生态环境治理体系和治理能力现代化，不断满足人民日益增长的优美生态环境需要，为率先打造人与自然和谐共生的美丽中国典范奠定坚实基础。

深圳市拟计划到 2035 年，建设成为可持续发展先锋，打造人与自然和谐共生的美丽中国典范，生态环境质量达到国际一流水平，“绿色繁荣、城美人和”的美丽深圳全面建成。绿色生产生活方式更加完善，绿色低碳循环水平显著提升，碳排放达峰后稳中有降。PM_{2.5} 年均浓度不高于 15 μg/m³，生态美丽河湖景象处处可见，城市生

态系统服务功能全面提升，实现环境治理能力现代化（表 5-10）。

5.1.2.6 协同控制政策建议

当前，深圳市空气质量稳定达标，能源强度、碳排放强度持续下降，深圳市要成为“可持续发展先锋”，率先打造人与自然和谐共生的美丽中国典范，还需持续推进空气质量改善和碳排放达峰。但由于深圳市经济总量大，单位面积承载的经济活动远高于全国平均水平，要实现协同“双达”，需优先发展低碳技术，形成低消耗、少排放、能循环、可持续的绿色低碳发展方式，强化统筹，重点推进能源、工业、建筑、交通等领域低碳化发展，实现协同效益最大化。

交通方面，一是大力发展绿色低碳交通。推动“轨道-公交-慢行”设施融合、信息融合、服务融合，倡导绿色低碳生活，推广绿色出行方式，通过提高收费、汽车尾号限行、HOT 收费等方式，提高城市公共交通工具的利用效率。二是优化燃油车结构。通过强制报废、财政补贴、限行等手段，鼓励企业及个人提前淘汰老旧机动车，制定中、重型柴油车总量控制方案。以建设国家节能与新能源汽车示范推广城市为契机，全面推广新能源汽车。借鉴国际先进经验，开展机动车低排区建设，倒逼升级车辆结构。提质增效，提升绿色交通技术应用水平，降低单车油耗。三是

推进非道路移动源污染防治。推广使用电动和天然气动力非道路移动机械，开展深圳机场现有车辆“油改电”工作，探索柴油客轮、港作船、公务船舶等船舶 LNG 改造，加快推动深圳海上国际 LNG 加注中心建设。

能源方面，一是高质量发展清洁低碳能源，充分利用太阳能、风能、潮汐能等可再生能源，打造多能互补综合能源系统。探索海上光伏发电、潮汐能利用，达到沿海国际城市先进水平。二是严格控制煤炭消费，提升现有燃气机组发电时长，提高清洁能源发电装机容量，减少煤电机组发电用煤。三是实施全民节能行动计划，开展能效领跑者引领行动，全面推动交通、工业等重点领域节能降耗。

产业方面，一是严格环境准入，严禁一类环境空气质量功能区（一类区）内新、扩建废气项目，对可能产生废气扰民的新建项目严格环评审批。根据《深圳市产业结构调整优化和产业导向目录（2016 年修订）》对水泥相关制品、屠宰建设等 50 余项限制发展类项目禁止投资新建和简单扩大再生产。二是持续优化产业升级，大力发展新一代信息技术等战略性新兴产业，加快培育由互联网、大数据、人工智能等技术催生的新业态，推进高新区、高技术产业基地、先进制造业基地和优势传统产业基地融合发展。

建筑方面，一是全面深化建筑绿色节能，提高新建建筑的绿色星级标准，扩大装配式建筑应用规模，推广发展超低能耗建筑。二是控制建筑

表 5-10 深圳市“十四五”气态污染物及 CO₂ 指标

类别	序号	指标	单位	2025 年目标值
环境质量改善	1	环境空气质量优良天数比例	%	97.5
	2	PM _{2.5} 年均浓度	μg/m ³	18
	3	氮氧化物排放量累计下降	%	完成国家和省下达任务
	4	挥发性有机物排放量累计下降	%	
绿色低碳发展	5	单位 GDP 二氧化碳排放降低	%	完成国家和省下达任务
	6	单位 GDP 能耗降低	%	完成国家和省下达任务

规模，稳步开展建筑建设，合理保证建设时序。三是加大既有居民和公共建筑的节能和绿色化改造，大规模、高水平推动既有建筑绿色化改造与可再生能源建筑。四是以市场化手段提升建筑运营质量，加大公共建筑能耗限额制度、建筑碳交易、合同能源管理机制等实施力度。

绿化碳汇，以国际一流为目标，以创立国家生态园林城市为契机，全面提升深圳城市绿化水平。经过规划建绿、植树添绿、空中增绿、见缝

插绿，大幅提升城市绿量。渠道拓展城市绿化空间，积极推广屋顶、垂直面绿化、人行天桥绿化和生态停车场绿化，强化立交桥护栏绿化和桥体绿化，构建立体化的城市绿化格局。完善“自然公园—城市公园—社区公园”三级公园体系和“省立—城市—社区”三级绿道网络，为市民提供多层次、多功能、互联互通的绿色福利空间。

深圳市未来大气污染物和碳减排协同效益政策（表 5-11）。

表 5-11 深圳市未来协同减排政策总结

部门	领域	具体措施	协同效益	
交通	总量控制	控制机动车保有量	★★★★★	
	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★	
	提高能效	提高燃油经济性，减少平均油耗	★★★	
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★	
	运输结构调整		建设城市绿色物流体系	★★★
			发展推广“低排放行驶区域”	★★★
			完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	★★★	
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★	
	优化能源结构	严格控制新增燃煤项目	★★★	
电力	总量控制	提高重点行业能源利用效率	★★★	
		增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★	
建筑	提高能效	燃煤机组替换为燃气机组	★★★	
		全面执行绿色建筑标准	★★	
		积极发展超低能耗建筑	★★	
		实施既有建筑节能改造	★★	
民用	源头管控	全面推广装配式建筑	★★	
		提倡低碳生活方式	★★★	
土地利用	用地结构调整	推进绿化碳汇工程	★★	

备注：★数量多代表协同效益明显

5.2 偏轻工业型城市

5.2.1 济南市“双达”路径分析

5.2.1.1 城市基本概况

济南市作为山东省省会，济南都市圈核心城市，国务院批复确定的环渤海地区南翼的中心城市。截至 2019 年，地域总面积 10244.45 平方千米，常住人口为 9202432 人。

2021 年全市生产总值为 11432.22 亿元，同比增长 7.2%，两年平均增长 6%，全市经济运行实现稳中向好、量质齐升，高质量发展取得新的成效。产业结构和能源结构调整步伐不断加快，在产业结构和能源结构调整方面采取了一系列有力措施，绿色发展成效显著。2020 年全市天然气消费占比 6.2%；非化石能源消费占比 2.9%，能源消费更加低碳清洁。规模以上工业企业增加值能耗累计下降 51.8%；新增绿色建筑面积 6716.1 万平方米，居全省首位；新能源及

清洁能源公交车占比达 88.9%，双燃料车和纯电动出租车占比达 81.6%；公共机构人均综合能耗下降 20.4%。济南市万元 GDP 能耗累计下降 35.8%，下降幅度位列全省第一，节能降碳卓有成效（图 5-9）。

通过采取了一系列扎实有效的工作，济南市实现了环境质量的持续改善。2020 年，济南市城区环境空气良好以上天数 227 天，空气质量优良率 62.0%，重度及以上污染天数 10 天，占全年总天数的 2.7%，较 2015 年下降 68.8%，城区环境空气中 PM₁₀、PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO、O₃ 年均浓度分别为 86 μg/m³、47 μg/m³、12 μg/m³、35 μg/m³、1.5mg/m³、184 μg/m³，其中 SO₂、NO₂、CO 年均浓度达到《环境空气质量标准》二级标准，PM_{2.5} 年均浓度提前达到三年行动计划目标要求，但 PM₁₀、PM_{2.5}、O₃ 年均浓度依旧分别超标 0.23 倍、0.34 倍、0.15 倍。从变化趋势上看，主要污染物浓度进一步下降，O₃ 污染仍较突出。PM₁₀、

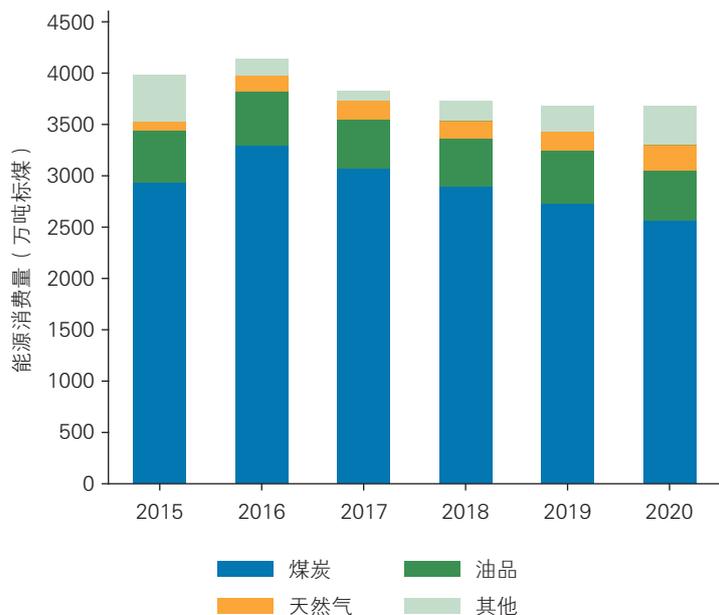


图 5-9 2015-2020 年济南市能源结构变化

PM_{2.5}、SO₂、NO₂、CO 年均浓度较 2015 年分别下降 40.6%、42.7%、75.5%、22.2%、37.5%，O₃ 年均浓度较 2015 年上升 17.2%（图 5-10）。

5.2.1.2 大气污染物和二氧化碳排放特征

济南市能源消费量大，大气污染物与碳排放量高，当前整体处于由经济高速增长向高质量发展的转型攻坚期，生产生活方式变革面临巨大不确定性。大气污染防治工作已经进入攻坚期和深水区，末端治理减排的边际成本越来越高，而深入推进产业、能源、运输、用地等方面的结构调整又存在诸多困难；科学治霾、精准治污的需求日益增长，大气污染状况较为严峻，环境承载压力巨大。

大气污染物排放方面，2019 年济南市主要大气污染物 SO₂ 排放量 2.80 万吨，NO_x 排放量 11.23 万吨，VOCs 排放量 11.70 万吨，PM₁₀ 排放量 17.63 万吨，PM_{2.5} 排放量 6.58 万吨，NH₃ 排放量 5.25 万吨。其中，化石燃料固定燃烧源、

工艺过程源为 SO₂ 的主要排放源，在总排放量中占比为 57.1%、40.1%；移动源、工艺过程源、化石燃料固定燃烧源为 NO_x 的主要排放源，在总排放量中占比分别为 44.1%、37.4%、17.5%；工艺过程源、移动源、溶剂使用源为 VOCs 的主要排放源，在总排放量中分别占比为 57.7%、13.8%、11.9%；扬尘源、工艺过程源、化石固定燃烧源为 PM₁₀ 的主要排放源，在总排放量中占比分别为 62.0%、27.7%、6.7%；工艺过程源、扬尘源、化石燃料固定燃烧源为 PM_{2.5} 的主要排放源，在总排放量中占比分别为 39.7%、38.3%、12.7%；农业源、废弃物处理源、工艺过程源为 NH₃ 的主要排放源，在总排放量中占比为 81.2%、9.2%、7.3%。

二氧化碳排放方面，2015–2019 年，由于煤炭消费总量的不断下降，对济南市能源消费领域碳排放的影响十分明显，全市碳排放总量的变化趋势和煤炭消费产生的 CO₂ 排放趋势保持了较高的一致性。2016 年，济南市（含莱芜市）CO₂ 排放量为 10201.5 万吨，是近年来碳排放量最高的



图 5-10 2015–2020 年济南市空气质量变化

年份。此后 2017–2018 年全市碳排放总量受产业结构调整及济钢等高能耗企业关停搬迁等因素影响，能源消费出现明显下降。2019 年全市能源消费领域 CO₂ 排放 9011.47 万吨，比 2015 年下降了 9.47%。

从具体能源看，煤炭消费产生的 CO₂ 排放出现波动并下降，2019 年 CO₂ 排放量比 2015 年下降了 10.21%，但煤炭消费产生的 CO₂ 占济南市 CO₂ 排放总量的占比变化很小，5 年内平均占比为 84.61%，煤炭仍然是对济南市碳排放贡献影响最大的能源品种。油品对济南市碳排放的影响仅次于煤炭，近 5 年油品消费产生的 CO₂ 排在总量和排放占比方面均有所增加。天然气和净调入电力产生的碳排放占比较小，但增长迅速，2015–2019 年，天然气消费产生的 CO₂ 排放平均占比仅为 2.33%，但排放总量增长了 46.39%。净调入电力对应的碳排放平均占比 3.74%。综上，煤炭仍然是济南市能源消费领域中碳排放的主要来源，虽然其排放总量在近年来不断降低，但煤

炭消费产生的碳排放量仍达到了其他能源碳排放总量的 5 倍左右，是全市碳排放的最大来源，也是未来减碳的重要着力点（图 5–11）。

从消费领域来看，在不考虑居民生活的情况下，2018 年工业领域是济南市能源消费的主要部门，其能源消费量远远高于农业、建筑业、交通运输、批发零售业等领域，工业也是 CO₂ 排放的主要来源，是未来控制碳排放的关键领域。

5.2.1.3 减污降碳政策梳理

为保障环境空气质量持续改善，济南市出台并落实了《济南市“十三五”节能减排综合工作方案》《济南市生态环境保护“十三五”规划》《济南市打赢蓝天保卫战三年行动方案暨大气污染防治行动计划》《济南市加强污染源头防治推进“四减四增”三年行动方案》等系列大气污染控制措施，从六大方面入手，深入开展大气污染防治工作（表 5–12）。

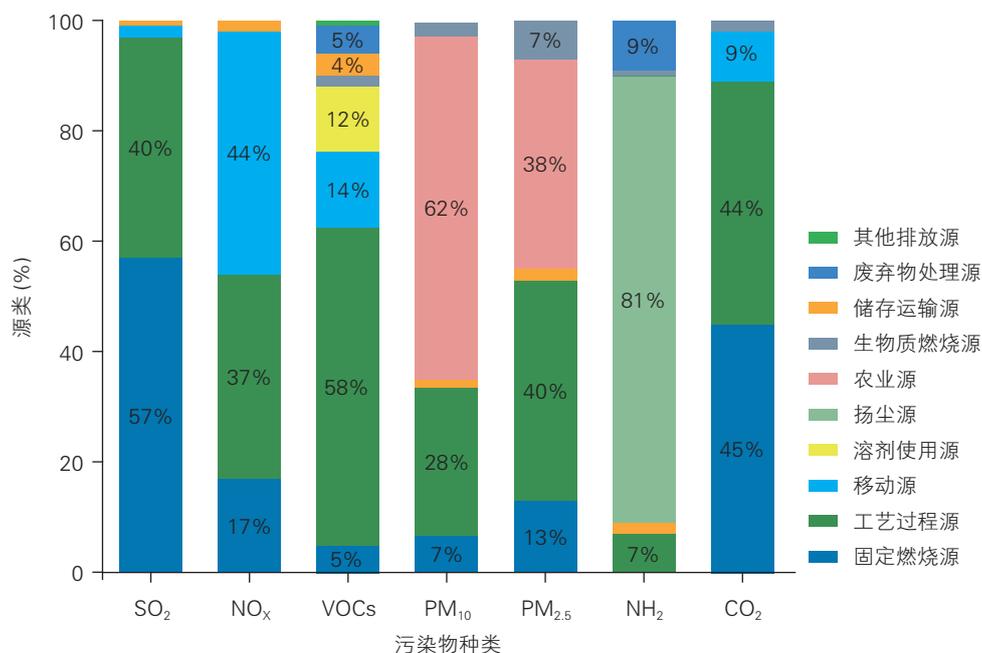


图 5–11 济南市各大气污染物及 CO₂ 排放源构成

表 5-12 2015-2020 年济南市大气污染控制措施

一级措施	二级措施	三级措施	一级措施	二级措施	三级措施	
突出源头防控强化环境约束	实施生态环境空间管控	全面落实主体功能区规划	加强生态保护注重生态修复	重点加强南部山区生态保护	严格限制建设用地规模	
		划定城市生态环境安全三条约束性底线			加强林木保育	
		健全生态环境空间管控的相关机制			重点开展二环南路沿线山体生态建设	
		加强建设项目环评审批，引导传统产业绿色转型升级			建设黄河沿岸生态隔离带	
	充分发挥环境倒逼作用，促进产业结构调整	制定城市建成区重污染行业企业退出方案		建设城市生态隔离带	建设巨野河沿岸生态隔离带	
		重点行业产能控制，积极化解过剩产能				合理规划玉符河两岸建成区面积
		实施煤炭消费总量控制，推进煤炭清洁高效利用				构建北大沙河沿线崮云湖-园博园-大沙河入黄河口湿地景观带
	协同推进能源结构调整	加快全市燃煤锅炉淘汰(改造)和超低排放改造工作		修复保护自然生态环境	抓好林业生态建设与生态修复工作	
		加大清洁能源替代力度				加强城市绿地保护，完善城市绿线管理
		优化供热热源结构，提高集中供热率				加强城市生态廊道建设
合理控制资源能源消耗	推进建筑节能，降低供热能耗	防范环境风险保障环境安全	完善环境风险防范体系建设	加强风险评估与源头防控		
	持续推行重点行业清洁生产审核			严格环境风险预警管理		
综合治理污染改善环境质量	推进大气污染综合治理，持续改善环境空气质量	贯彻国家《大气污染防治行动计划》要求	加强政策引导完善保护机制	推动重金属污染防治	开展全市涉重企业重金属污染调查	
		深化工业大气污染治理		强化危险废物安全处置	加强危险废物全过程监管	
		推进网格化、精细化管理，大力开展城市扬尘综合整治		改革完善总量控制制度并持续实施	以重大减排工程为主要抓手开展总量减排工作	
		推进餐饮污染防治		落实企业主体完善污染治理	推进控制污染物排放许可制改革	
		加强移动源污染防治		逐步健全排污权交易相关机制		
	开展农村污染综合整治，改善农村环境质量	加快农村环境综合整治	增强创新驱动提升环保能力	增强环境监测能力，构建生态环境监测网络	加强环境执法能力建设	
		推进农村生活垃圾污染防治				加大环保宣传教育力度
		推进畜禽养殖业污染防治				
		加强中小企业污染控制				
		控制农业面源污染				
推广农业生产废弃物综合利用	重视环保科研工作，大力推动科技创新					

为顺利实现“双碳”目标，济南市出台并落实了《济南市低碳发展工作方案》等系列低碳城市建设措施，在实现大气污染物减排的同时，共同推进温室气体与污染物协同控制（表 5-13）。

5.2.1.4 协同减排措施效果评估

为推进绿色发展，济南市紧紧围绕“打造四个中心，建设现代泉城”中心任务，以提高能源利用效率和改善生态环境质量为目标，以推进供给侧结构性改革和实施创新驱动发展战略为动力，加快新旧动能转换，促进形成节约资源和保护环境的产业结构、生产方式和生活方式，为建设生态文明提供有力支撑，实现高质量发展，在部分空气质量改善政策实施的同时带来了显著的碳减排效益。

产业结构调整方面，促进传统产业转型升级，加快新兴产业发展。深入实施济南市推进工业转

型升级行动计划和 12 个重点行业转型升级实施方案，促进制造业高端化、智能化、绿色化、服务化。构建绿色制造体系，不断优化工业产品结构。支持重点行业改造升级，严禁产能严重过剩行业的增加产能项目。实施逐步加严的污染物排放标准，提高清洁生产和污染治理水平。充分发挥生态环保倒逼引导作用，优化产业布局，推动传统产业转型升级，提升产业层次和核心竞争力。2020 年第三产业增加值同比增长 3.7%，达到 6248.58 亿元，占地区生产总值比重达 61.6%，高新技术产业产值占规模以上工业产值比重达到 55.29%，高于全省平均水平 10.2%，规模以上六大高耗能行业能耗大幅下降，2019 年与 2015 年相比，工业增加值能耗降低率已达到 21.79%，提前完成三年行动方案确定的 20% 目标，新能源及节能环保产业等绿色低碳产业持续发展壮大，成为支柱产业。

表 5-13 2018-2020 年济南市低碳城市建设措施

领域	一级措施	具体措施	领域	具体措施
构建现代低碳经济体系	发展绿色低碳产业	发展优势低碳产业集群	构建低碳生态环境	全面提升碳汇能力
		构建农业绿色循环产业体系	构建低碳生态环境	有效控制城乡环境碳排放水平
	推动工业绿色低碳转型	发展优势低碳服务业	加强低碳科技创新	加快应对气候变化技术研发
		发展低碳循环产业	加强低碳科技创新	强化低碳技术推广应用
建设低碳高效能源体系	优化发展化石能源	调整优化产业结构	低碳发展体制	完善碳排放总量管理体系
		协同推进降碳治污		完善统计监测体系
	积极发展绿色低碳能源	集约利用煤炭资源		加强碳排放权交易能力建设
		加强天然气供储销体系建设		完善低碳激励政策
深入推进节能降碳	强化能源总量控制	深化低碳试点示范		
	强化能源节约利用	强化统筹协调		
打造低碳品质生活	推进建筑领域低碳发展		强化保障落实	强化碳排放强度下降目标责任考核
	推动交通绿色发展			加强机构和人才队伍建设
	倡导绿色低碳生活方式			营造绿色低碳氛围
				积极推动开放合作

能源结构优化方面，努力压减煤炭消费总量，逐步降低煤炭消费比重。大力推动煤炭清洁高效利用，推广使用优质煤、洁净型煤，推进煤改气、煤改电，鼓励利用可再生能源、天然气、电力等优质能源替代燃煤使用。推动太阳能大规模发展和多元化利用，增加清洁低碳电力供应。加快推进“外电入济”，接纳市外来电，平衡市内外电力资源。在居民采暖、工业与农业生产等领域推进天然气、电能替代，减少散烧煤和燃油消费。2020年，能源结构明显改善，煤炭占能源消费比重下降到63%，天然气提高到10%，新能源和可再生能源提高到4%，油品消费稳定在23%左右，市外来电占全社会用电量的比重达到50%，单位地区生产总值能耗降低率五年累计达到35.8%，超额完成省下达任务目标18.8%，单位GDP二氧化碳排放强度比2015年下降32%，完成下降20.5%的目标要求。

工业污染深度治理方面，拓展“工业绿动力”计划实施范围，从燃煤锅炉向建材、煤化工等重点用煤行业拓展，从太阳能工业光热利用向太阳能光电利用等领域拓展，推进煤炭清洁化利用和新能源高效利用。加强高能耗行业能耗管控，推进企业能源管理中心建设，推广工业智能化用能监测和诊断技术。2020年，工业能源利用效率和清洁化水平显著提高，规模以上工业企业单位增加值能耗比2015年降低20%以上，电力、建材、化工、轻工、机械等重点耗能行业能源利用效率达到或接近国内先进水平。实施燃煤电厂超低排放改造工程，加强电力、水泥、石化、钢铁、玻璃、有色等重点行业大气污染治理，钢铁行业所有烧结机（球团）配套建设脱硫、高效除尘设施，开展烟气脱硝示范。

交通运输结构调整方面，提升运输装备大型化、专业化和标准化水平，加快淘汰高能耗、低效率的老旧车辆。加强公交都市建设，促进交通用能清洁化，大力推广清洁能源和新能源汽车，

推进加气站、充电站等设施建设。将绿色低碳新理念、新技术、新工艺、新材料融入交通基础设施，全面推进绿色低碳交通基础设施向纵深发展，推进高速公路ETC建设。2020年，全市铁路货运量5798万吨，与2017年相比，增加836万吨；淘汰国三营运柴油货车6814辆，超额完成省下达的淘汰5906辆目标任务。高速公路收费站ETC车道覆盖率达到100%。全市营运客车、营运货车、营运船舶单位运输周转量和城市客运单位客运量综合能耗在2015年基础上分别下降2.1%、6.8%、6%和10%，CO₂排放分别下降2.6%、8%、7%和12.5%。新能源和清洁能源车辆比例在2015年基础上显著提高，新增重型货车、营运客车、公交车、出租车中清洁能源和新能源车辆比例分别达到20%、30%、70%、100%，累计推广应用新能源汽车和清洁能源汽车3000辆。

农业农村节能方面，鼓励引导农机具报废更新，加快淘汰老旧农业机械，推广农用节能机械、设备，发展节能型设施农业。推进节能及绿色农房建设，结合农村危房改造，稳步推进农房节能及绿色化改造，推动城镇燃气管网向农村延伸和省柴节煤灶更新换代，因地制宜采用生物质能、太阳能等解决农房采暖、炊事、生活热水等用能需求，提升农村能源利用的清洁化水平。2020年，全市农村地区基本实现稳定可靠的供电服务全覆盖，鼓励农村居民使用高效节能电器。

建筑低碳转型方面，建立绿色建筑全生命周期管理模式，新建建筑全部执行绿色建筑标准，开展市级绿色生态示范城区城镇建设，全面促进绿色建筑规模化区域化发展。严格执行居住建筑节能75%、公共建筑节能65%标准，积极发展超低能耗建筑。2020年，新增绿色建筑4000万平方米以上，新建节能建筑5000万平方米以上，完成既有居住建筑节能改造1300万平方米以上，公共建筑节能改造240万平方米以上。

济南市达标情景下不同领域控制措施带来的减污效益和减碳效益呈现显著差异性。总体来看，产业结构调整、能源结构优化有较强的减污降碳协同效应；其他治理项目如扬尘、农业面源、工业污染治理等的协同效益不显著或不存在。

5.2.1.5 “双达”目标

2021年济南市人民政府印发济南市“十四五”生态环境规划保护的通知，到2025年，生产生活方式绿色转型成效显著，能源资源利用效率大幅提高，生态系统稳定性明显增强，生态环境质量显著改善，基本建成生态济南。同时展望2035年，绿色生产生活方式广泛形成，碳排放达峰后稳中有降，生态环境根本好转，人与自然和谐共生的美丽泉城建设目标基本实现。总体形成节约资源和保护环境的空间格局，绿色低碳发展水平显著提高，主要污染物排放总量大幅减少，应对气候变化能力显著增强，重污染天气基本消除，城乡人居环境明显改善（表5-14）。

通过合理优化产业、能源、交通运输和农业投入与用地结构，加快推进绿色低碳发展，引领新动能成为经济发展主引擎。通过合理配置能源资源、大幅提高利用效率，确保碳排放强度持续

降低，加快形成绿色低碳的生活方式。

5.2.1.6 协同路径选择

构建减污降碳协同评估体系，量化济南市PM_{2.5}达标情景下，各项控制措施减污降碳协同关系。在达标情景下对20个主要行业和措施分析发现，减污效益最大的5个行业措施分别为扬尘等面源治理、民用散煤替代、水泥行业产能压减与深度治理、工业无组织排放管控、畜禽养殖治理；协同降碳效益最大的5个行业措施分别为钢铁行业、工业煤炭压减及能源利用效率提升、石化电厂搬迁、电力热力行业产能压减与改造、民用散煤替代。从削减单位PM_{2.5}浓度的减排成本来看，畜禽养殖、扬尘治理、煤矿淘汰、工业企业无组织排放管控、水泥行业等治理措施削减单位PM_{2.5}浓度的减排成本较低。石化、电厂等重污染企业搬迁改造、移动源污染防治、运输结构调整等措施削减单位PM_{2.5}成本较高。

从协同控制优先序列来看，燃煤锅炉淘汰、畜禽养殖治理、散乱污整治等领域措施，具有较大的减污潜力，同时减排经济成本相对较低。电力、钢铁、交通运输等减排潜力逐渐由末端治理向能源结构、产业调整等前端结构调整转变，协同降碳效果同样显著（表5-15）。

表 5-14 济南市“十四五”生态环境保护主要指标

类别	序号	指标	2020 年现状	2025 年目标
环境质量改善	1	城市细颗粒物 (PM _{2.5}) 浓度 (μg/m ³) *	47	完成省分解任务
	2	城市空气质量优良天数比率 (%) *	62	完成省分解任务
绿色低碳发展	3	单位地区生产总值二氧化碳排放降低 (%)	[32]	完成省分解任务
	4	单位地区生产总值能源消耗降低 (%) *	[35.8]	完成省分解任务
污染物排放总量控制	5	挥发性有机物排放总量减少 (%)	—	
	6	氮氧化物排放总量减少 (%)	[27.4]	

注：①加“[]”指标为五年累计数。

②带*的指标“十四五”统计口径较“十三五”有调整。

③单位地区生产总值二氧化碳排放量降低(%)指标2020年完成数值暂为预计数。

表 5-15 济南市未来减污降碳协同优先序列表

部门	领域	具体政策	协同控制优先级
电力	末端控制	电厂超低排放改造	★★★
	总量控制	新建项目禁止配套建设自备燃煤电站除热电联产外，禁止审批新建燃煤发电项目	
	提高能效	“上大压小”淘汰落后产能减少输电损失	★★★★
	能源结构	大力发展可再生电力资源	
工业	末端控制	工业提标改造、对于重点行业、生物质锅炉推动实施超低排放改造	★★★
		工业企业无组织排放管控	★★★★
		挥发性有机物综合治理	★
	错峰生产	重点排污单位在冬季调整生产经营活动，减少或暂停排放大气污染物的生产、作业	★★★★
	提高能效	工业技术升级和清洁生产	
		能源利用效率提升，燃煤燃气锅炉电气化	★★★★
	能源结构	推进工业锅炉节能改造	
		淘汰燃煤小锅炉	★★★★★
		水泥、钢铁等重点行业压减过剩产能、淘汰落后产能整治“散乱污”企业	★★★★★
	产业结构	石化电厂等重污染企业搬迁改造	★★
发展低能耗，高附加值的高新技术			
限制能源密集行业投资（铸造、合成氨、水泥等）		★★★★★	
民用	优化能源结构	民用散煤替代	★★★★
建筑	需求控制	提倡低碳生活方式	★★
	提高能效	全面执行绿色建筑标准	★★★★
		实施住宅节能改造、提高房屋保温性能	
能源结构	电气化比例提高	★★	
交通	需求控制	控制机动车燃油燃气车保有量	★★★★★
	末端控制	加严机动车排放标准、淘汰老旧车辆	★★★★★
		油品升级	★
	提高能效	提高燃油经济性	★★★
	能源结构	推广新能源和清洁能源车辆、工程机械	★★★★★
	运输结构	提倡公共交通出行	★★★
		优化调整货物运输结构	
面源	用地结构	农业源（禽畜养殖）治理	★★★★★
		扬尘综合治理、禁止秸秆焚烧	★★★

5.2.1.7 协同控制政策建议

济南 PM_{2.5} 达标控制情景呈现减污与降碳双轮驱动态势，常规减污措施贡献占比 54%，结构调整等降碳措施占比 46%，全市 4% 热点网格（400 个）贡献了全市超过 90% 的 CO₂ 排放，以及 60% 以上的 SO₂、NO_x、VOCs 排放，是实施减污降碳协同增效的重点控制区域。电力、钢铁、交通运输、民用等均是济南大气污染物和 CO₂ 排放的主要来源，应作为协同治理的重点领域和部门予以关注。

基于不同阶段空气质量改善要求和碳达峰碳减排目标，筛选减污降碳主要路径、关键措施，具体政策建议如下：

1. 促进产业结构优化升级，重点针对钢铁（含焦化）、电力热力、水泥及其他工业炉窑等环节，强化落实现有环境准入要求、淘汰落后低效和过剩产能、控制重点行业产能、优化产业空间布局等政策措施。

① 电力热力行业：重点是各类燃煤锅炉的产能控制和清洁能源替代。

② 钢铁行业：重点是落后产能淘汰及产量控制。严格实施《济南市钢铁产业“十四五”发展

规划》。

③ 其他行业：铸造行业淘汰使用煤炭及其制品的冲天炉；工业炉窑产能压减和整合升级；水泥行业、氮肥行业等产能及产量控制。

2. 推动能源清洁低碳转型，能源结构优化各项措施中，煤炭压减措施和民用散煤替代措施协同控制效果评估综合排序最为靠前。推荐优先采用实施煤炭消费压减、民用散煤替代、提高能源利用效率等措施。

3. 推进交通领域协同增效，运输结构调整及移动源污染防治在各项措施中具有最大的协同降碳指数，建议将燃油车的电动化替代与电能的清洁化措施相结合，进一步发挥两者的协同减污降碳效果。

4. 强化工业源深度治理，将碳排放指标纳入大气污染控制措施评价体系，逐步实施重点污染源末端治理设施“协同双控”。鼓励排污单位采用低碳污染控制措施，逐步淘汰高碳排放、较低大气污染物去除率的工艺设施。

5. 优化实施其他减排措施，扬尘面源和农业面源治理领域具有较大的大气污染物减排潜力，同时减排的经济成本相对较低，建议优先实施。



5.2.2 成都市“双达”路径分析

5.2.2.1 城市基本概况

成都市作为四川省省会，成渝地区双城经济圈核心城市，国务院批复确定的国家重要高新技术产业基地、商贸物流中心和综合交通枢纽、西部地区重要的中心城市，地域面积 1.434 万平方公里，常住人口 2119.2 万人。

“十三五”期间，成都市经济总量快速增长，经济质量明显提高，全市地区生产总值（GDP）从 2015 年的 10801 亿元增长到 2020 年的 17717 亿元，实现 GDP 增长保持 10.5% 年均增速（2021 年全市 GDP 离 2 万亿元大关只有一步之遥），在全国主要城市中保持绝对领先优势，综合竞争力百强排名中名列第四，新一线城市排名中稳居榜首。随着成都市落后产能淘汰，工业化进程已处于后期，三次产业进展迅速，现代化开放性产业体系快速构建，新经济赋能城市转型发展引力场作用持续彰显。化石能源消费总量方面整体呈波动上升态势，年均增加 2.8%，以电

力为主的能源消耗结构进一步强化，调入电力持续增加至 38%。截至 2020 年，成都市煤品消费持续降低，油品、天然气和电力消费持续增长，以油品消费为主的化石能源消耗结构占比提升至 32%（图 5-12）。目前，成都能源消费结构变化大致遵循城市经济社会发展，未来，油品、天然气和电力消费将呈现上涨趋势，煤炭消费总量有望保持缓慢下降并趋于平稳。

2020 年成都市综合质量指数为 4.41，较 2015 年下降 25.6%，在全国 168 城市中排名提升了 17 位，超额完成“十三五”提出的总体目标和量化指标，《打赢蓝天保卫战三年行动计划》圆满收官，实现了优良天数稳定上升，主要污染物浓度持续下降。一是优增劣减，蓝天质量不断提高。2020 年 102 天空气质量优，首次“破百”，较 2015 年增加 65 天，重度污染天数大幅下降。冬季改善效果显著，1-2 月消除重度污染，夏、秋季优良天数稳定略有上升。二是主要污染物浓度持续下降。2020 年 PM_{2.5} 浓度 41 μg/m³，PM₁₀ 浓度为 64 μg/m³，分别较 2015 年累积下降 28% 和 33.3%，连续两年达到国家限值（70 μg/m³）；NO₂ 浓度 37 μg/m³，较 2015 年下

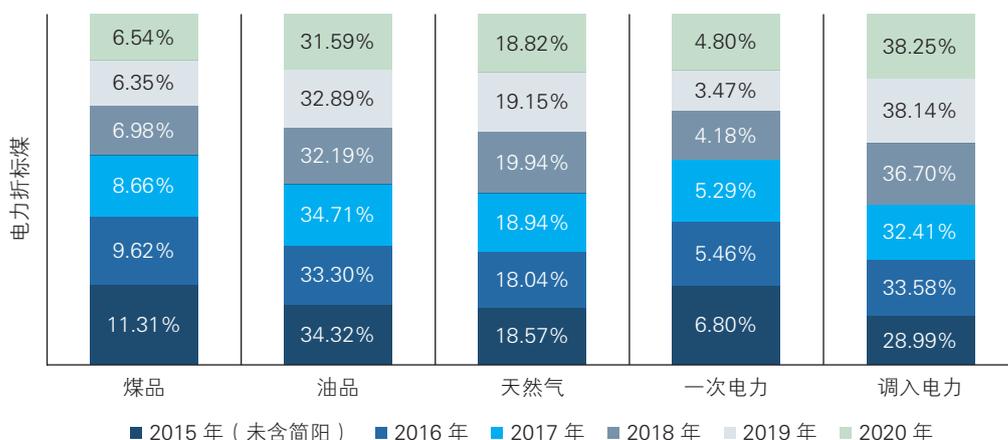


图 5-12 2015-2020 年成都市能源消费结构变化

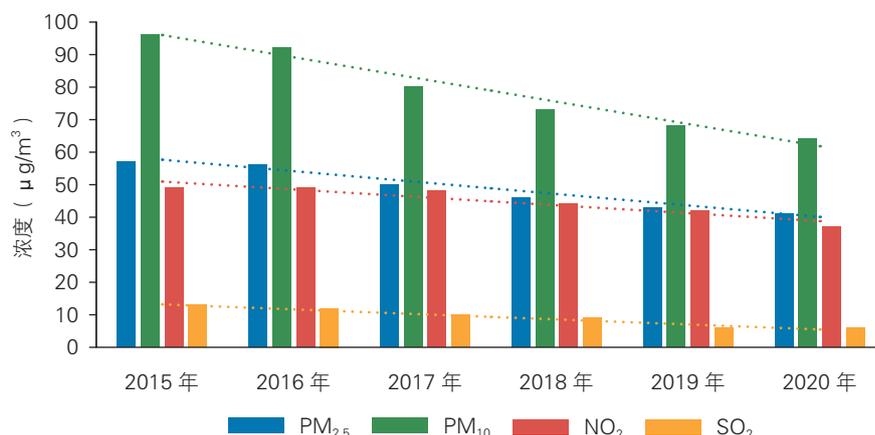


图 5-13 2016-2020 年成都市污染物浓度变化趋势

降 24.5%，实现首次达标；SO₂ 浓度 6 μg/m³，连续 3 年保持个位数（图 5-13）。

5.2.2.2 大气污染物和二氧化碳排放特征

大气污染物排放方面，“十三五”期间，除 VOCs 在 2018 年之后有所回升外，其他大气污染物均呈大幅度下降趋势。PM_{2.5} 减排得益于燃煤控制，

化石燃料固定烧源排放量下降了 82%，总体呈先下降后上升态势。PM₁₀ 受城市施工面积逐渐增加，扬尘源略有上升。SO₂ 排放量从 6 万吨下降至约 0.8 万吨，降幅度超过 85%，其中工艺过程源贡献超过 50%，化石燃料固定燃烧源贡献显著降低。NO_x 排放量先升后降，2017 年达到峰值后持续降低，五年间累计下降 21%，移动源为主要贡献源，且占比持续增加，至 2020 年占比超过 85%（图 5-14）。

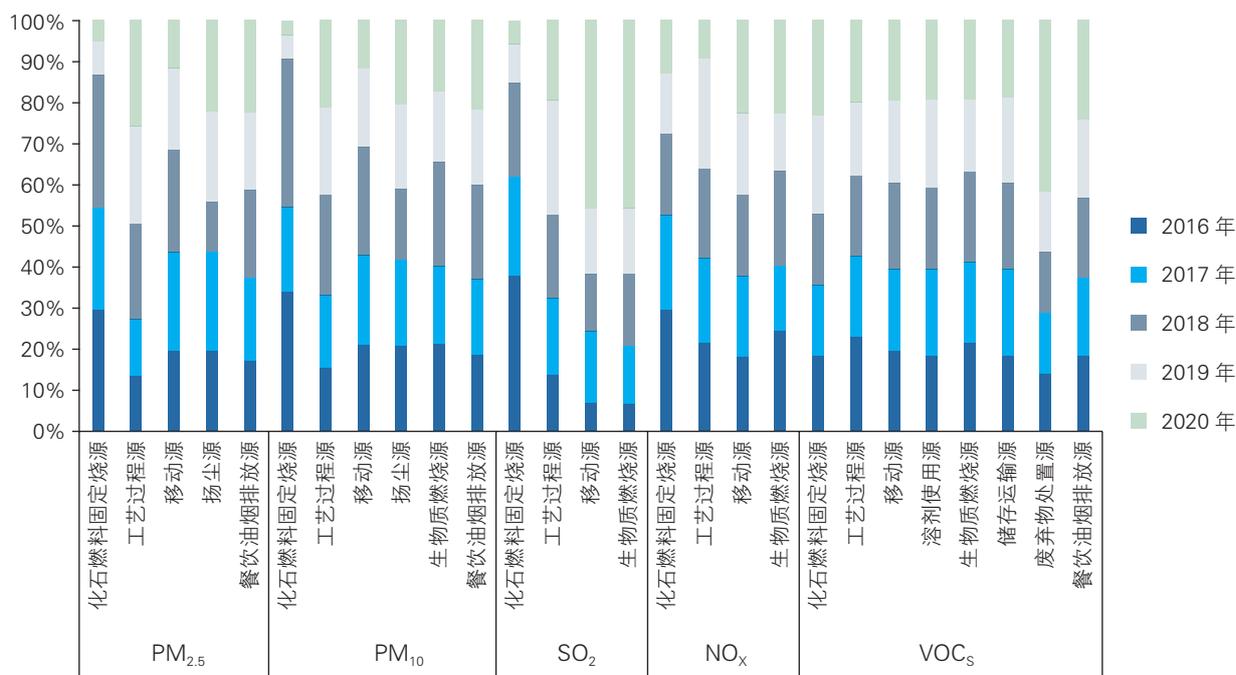


图 5-14 2016-2020 年成都市污染物排放趋势

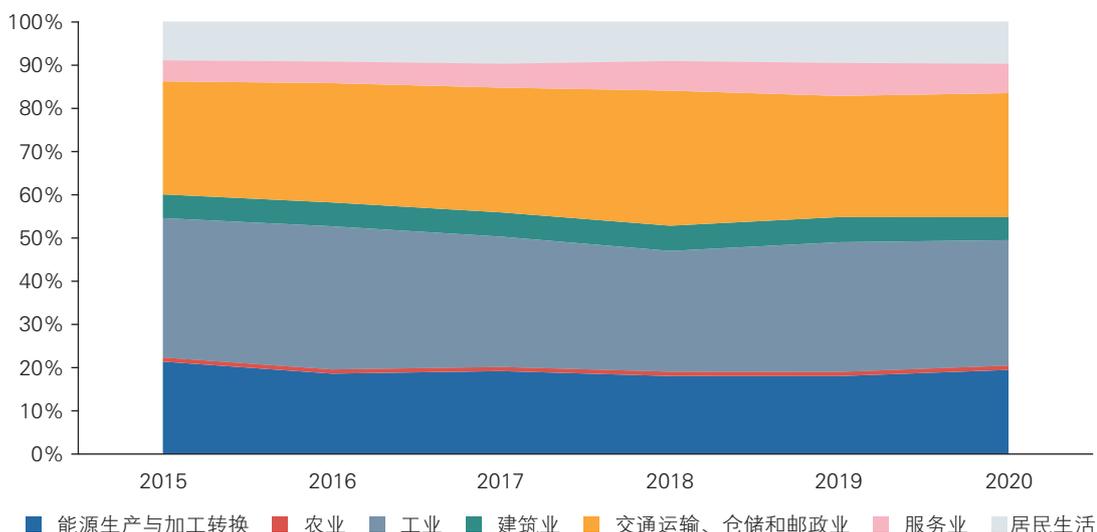


图 5-15 2015-2020 年成都市分领域碳排放趋势

二氧化碳排放方面，2015-2020 年，成都市化石能源活动碳排放总量（含调入电力排放）由 5163 万吨增长到 5756 万吨，年均增长 120 万吨左右，煤品排放呈快速下降趋势；油品和天然气排放呈总体上升趋势，分别上涨至 2779 万吨和 1492 万吨，约占整个能源活动排放 50% 和 26%，油品成为 2020 年最主要的化石能源；调入电力排放提升 600 万吨，碳排放增长趋势与能源趋势一致。根据成都市 2020 年能源平衡表细分领域数据，成都市工业和交通运输两大领域二氧化碳排放占比近 60%，能源生产和建筑领域碳排放占比均在 20% 左右，以上领域将是成都市实现碳达峰目标的关键（图 5-15）。

目前成都市能源消费强度控制较好，实现单位 GDP CO₂ 排放和人均 CO₂ 排放“双低”，单位 GDP CO₂ 排放量（0.38 吨/万元）仅高于北京和深圳，人均 CO₂ 排放量（2.75 吨/人）在全国十大城市中最低。交通领域能源消费量在 2010-2018 年间增长 100%，2020 年油品消费占社会能源消费总量比重高达 31%，移动源或将成为未来成都市大气污染物和 CO₂ 排放仅次于工业源的主要来源之一。

5.2.2.3 减污降碳政策梳理

成都市经济发达、人口众多、能源消费量大，大气污染物与碳排放量高，受区域盆地地形与气象条件影响，成都大气污染状况较为严峻，环境承载压力巨大。为保障环境空气质量持续改善，成都市出台并落实了《成都市空气质量达标规划》等系列大气污染控制措施，共 6 大类，25 小类，62 项大气污染防治措施（表 5-16）。

为顺利实现“双碳”目标，成都市出台并落实了《成都市低碳城市试点实施方案》《成都市碳排放达峰路径研究》等系列低碳城市建设措施，在实现大气污染物减排的同时，与低碳城市建设“636”工程（构建绿色低碳的产业、能源、城市、碳汇、消费和制度 6 个方面，36 条具体措施）共同推进温室气体与污染物协同控制（表 5-17）。

5.2.2.4 协同减排措施效果评估

成都市为推进绿色发展、建设美丽四川、筑牢长江上游生态屏障，实现高质量发展，在产业、能源、交通等方面开展了大量工作，部分空气质

表 5-16 2015-2020 年成都市大气污染控制措施

一级措施	二级措施	措施内容
优化产业结构与布局	严控“两高”行业	淘汰落后产能 化解产能过剩
	优化产业结构	发展现代产业体系 优化调整产业布局
强化工业污染综合防治	散乱污清理整治	加快“散乱污”企业清理整治 各行业污染物排放标准
	工业污染源全面达标排放	重点行业监督抽测 涉气污染源监管执法 全面实行工业污染源清单制管理模式
	超低排放改造	火电和钢铁行业超低排放改造 水泥和平板玻璃行业深度治理
	挥发性有机物综合治理	重点行业企业原辅材料替代 重点行业企业分类治理 工业园区和企业集群综合治理
强化工业污染综合防治	挥发性有机物综合治理	石化行业监管 汽修行业污染治理 干洗行业监管 加油站(储油库)监管 重点行业无组织排放排查 重点行业生产工艺及物料运输过程
	工业企业无组织排放管理	总量和强度“双控” 重点用能企业改造 重点园区改造
优化能源消费结构	煤炭消费总量控制	发展清洁能源和新能源
	提高能源利用效率	燃煤锅炉淘汰 煤改电 煤改气 煤改其他清洁能源
建筑低碳转型	清洁能源替代	既有建筑节能改造
	燃煤锅炉综合整治	装配式建筑 绿色建筑
	既有建筑改造	
	推行新型建筑	

一级措施	二级措施	措施内容
优化交通运输结构	调整货物运输结构	优化货物运输结构 控制机动车燃油燃气保有量 违规运渣车辆清退
	优化运输车队结构	严控燃油货车入城证 新能源和清洁能源汽车 充电站(桩)建设 淘汰黄标车 淘汰老旧车辆
	提升油品质量	油品质量升级 油品质量抽检
	提高燃油经济性	提高燃油经济性
	机动车监管	提升新车排放标准 在用车尾气排放超标检测
	非道路移动机械监管	备案登记、监督排查 农业机械监管治理
	港口及机场岸电使用	划设高排放非道路移动机械禁止区 港口及机场岸电使用
加强面源污染治理	扬尘综合治理	工业扬尘综合治理 扬尘在线视频监控 打造绿色标杆工地 道路扬尘管控 餐饮油烟污染 露天烧烤监管
	生活源污染监管	腊肉熏制监管 宗教祭祀监管 烟花爆竹监管
	秸秆综合利用	秸秆禁烧管控
	农业源污染治理	农药化肥减量控害 实施畜禽粪污综合利用
	城市绿化建设	城市绿化工程 露天矿山综合整治

表 5-17 2015-2020 年成都市低碳城市建设措施

领域	具体措施	领域	具体措施
构建绿色低碳产业体系	做强绿色低碳制造业 壮大绿色低碳服务业 加快发展新经济产业 积极发展低碳循环产业	构建绿色低碳消费体系	构建低碳政务体系 倡导绿色低碳生活方式 推进生活垃圾分类收集 积极开展低碳宣教活动
	强化能源消耗总量和强度“双控” 实施清洁能源替代		健全目标考核制度 完善能源及碳核查报告机制
构建绿色低碳能源体系	多措并举降低用能成本 加快清洁能源设施建设 推动可再生能源利用	构建绿色低碳制度能力体系	构建“蓉城碳惠”机制 拓展公众低碳应用场景 构建项目开发和消纳机制
	加快优化城市空间布局 完善城市绿色交通体系 积极推广新能源汽车		深化低碳产品认证制度 支持绿色低碳技术创新平台建设 加强绿色低碳技术研发和应用
构建绿色低碳城市体系	着力提升绿色建筑品质 全面推进装配式建筑 推行绿色施工和既有建筑改造	加强对低碳城市建设工作的统筹规划	加强低碳发展数据核算与管理 加强低碳发展能力培训 深化绿色低碳示范单位创建
	推进大府绿道建设 推进园林绿地增汇 推进河湖湿地增汇		确保低碳城市建设和生态环境保护工作协同推进 营造绿色低碳发展的浓厚氛围

量改善政策实施的同时带来了显著的碳减排效益。

产业结构调整方面，截至2020年，成都市三次产业结构为3.6:30.8:65.6，结构趋于优化，现代产业体系逐渐构建。瞄准“5+5+1”重点产业细分领域，切实发挥14个产业生态圈和66个产业功能区的引领聚集效应，推动产业链向高端升级。完成11个行业4400余家企业绿色绩效考核工作、小微企业义诊和“一厂一策”方案编制，清理“散乱污”工业企业1.6万家，淘汰落后产能398户。

能源结构优化方面，实施清洁能源替代攻坚，大力发展“清洁能源+”。实现全域燃煤锅炉清零，累计淘汰1873台燃煤锅炉，减少170万吨燃煤，完成共1181蒸吨锅炉“气改电”或低氮燃烧改造。强化能耗双控，开展重点用能单位“百千万”行动，降低能源要素成本，万国数据等8家企业纳入精准扶持输配电价政策实施范围，华为、英特尔等11家企业纳入全水电直接交易名单。

工业污染深度治理方面，全面完成火电和钢铁行业超低排放改造，3家水泥企业 NO_x 浓度稳定达到 100 mg/m^3 ，石化行业完成100台罐区呼吸阀提标和6台罐区内浮顶罐浮盘改造工程以及71万个密封点的LDAR工作，推进77户重点企业和5个重点园区VOCs清洁原料替代工作。

交通运输结构调整方面，深入推进“东进、南拓、西控、北改、中优”差异化协同发展。以14个TOD示范项目引领城市空间结构优化和公共服务体系重构，促进产城融合、职住平衡。淘汰老旧车辆14.1万辆，推广新能源汽车13.7万辆，完成建设充电站653座，充电桩2.5万个。轨道交通运营里程397.5公里，公交专用里程1014公里，公共交通出行分担率达到53%。

面源治理方面，全市汽修企业共2054个喷烤漆房均安装VOCs治理设备，613家汽修企业全面投入水性漆。强化道路机械化清扫，提高机械化作业率，加大餐饮油烟执法检查力度。优化公园城市总体规划，坚持“全域增绿”，加快推

进标志性生态工程，完善五级城市绿化体系，打造“绿肺、绿道、绿轴、绿环、绿缀”生态空间，留出城市通风廊道38条，天府绿道已建成4238公里。

建筑低碳转型方面，大力推广装配式建筑和绿色建筑，已入选国家绿色建筑发展最佳城市十强。提升施工扬尘精细化管理水平，打造440余个绿色标杆工地，安装工地扬尘在线视频监控2000余个。

“十三五”减排措施和低碳城市建设协同措施集中于工业与交通领域，协同控制成效主要体现在能源加工及转化、工业、交通三大方面。工业方面，通过工业重点企业达标排放、工业窑炉改造和末端治理助推大气污染物排放减少，重点企业实施超低排放改造 SO_2 和 NO_x 减排显著，特别是工业煤改气、改电协同减污降碳效果明显；交通方面，老旧车辆淘汰和新能源替代协同效果显著（表5-18）。

5.2.2.5 “双达”目标

2018年印发《成都市空气质量达标规划》后，成都市大力推进大气污染治理工作，环境空气质量效益显著，目前各项污染物改善进展均明显快于达标规划中设定的目标。2020年， PM_{10} 和 NO_2 年均浓度均已低于达标规划中设定的2027年目标值（ $67\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 和 $40\text{ }\mu\text{g/m}^3$ ）； $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度已低于规划中2022年目标值（ $44\text{ }\mu\text{g/m}^3$ ），但 O_3 年评价值在 $160\pm 10\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 的范围内呈波动趋势，仍有一定超标风险，影响全面达标目标实现。《四川省“十四五”生态环境保护规划》提出，2025年力争全省域内空气质量全面达标，基本消除重污染天气。《成都市“十四五”生态环境保护规划》提出，2025年全市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度控制在 $35\text{ }\mu\text{g/m}^3$ 以下。省、市两级的“十四五”规划目标均已明确成都市需在“十四五”期间实现环境空气质量全面达标，

表 5-18 成都市减排措施和低碳城市建设协同措施梳理表

领域	措施	NO _x 减排量 (t)	SO ₂ 减排量 (t)	VOCs 减排量 (t)	CO ₂ 减排量 (t)
工业	末端治理设施	/	/	5837	/
	锅炉煤改气	182	18	108	21755
	锅炉低氮改造	100	/	/	/
	锅炉改电	128	44	/	1350
	工业窑炉改造	168	213	559	432
	绿色绩效评级	63	42	1118	432
	义诊帮扶	/	/	280	/
	重点企业减排	6757	2992	/	/
	小计	7398	3309	7903	23969
	交通	油品提升	325	/	638
标准提升		2576	/	756	1318
黄标车淘汰		4139	/	1084	4276
新能源替代		4209	/	683	15408
小计		11249	/	3161	21002

达标年份将早于达标规划中设定的 2027 年。

2017 年印发《成都市低碳城市试点实施方案》指出，成都市 2025 年之前实现碳达峰，成为国内低碳发展先进城市。2021 年印发《成都市国民经济和社会发展的第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》、2022 年印发《中共成都市委关于以实现碳达峰碳中和目标为引领优化空间产业交通能源结构促进城市绿色低碳发展的决定》等均确定了成都市将力争 2030 年前实现碳达峰目标。

基于成都市最新规划部署，空气质量达标目标可能优先于碳达峰目标实现。但是随着“双碳”目标的明确，“十四五”及之后成都市大气污染治

理的思路将发生本质改变，碳减排将协同并引领大气污染治理工作，提速空气质量达标进程，减污降碳协同增效对于成都市空气质量达标与碳达峰工作至关重要。未来，经济社会快速发展仍将持续推动成都市 CO₂ 排放量增加，抵消增量对能耗强度下降与能源结构调整提出了更高的要求。随着经济发展逐步放缓，经济增长对 CO₂ 排放的正向推动将逐步减弱，能耗强度下降对“十四五”和“十五五”成都市碳减排的推动作用也将明显弱于“十三五”，为推动成都市碳排放在 2030 年前达峰，在持续提升能效的情况下，能源结构深度优化将成为推动碳达峰的核心抓手（表 5-19）。

表 5-19 成都市“十四五”生态环境保护主要指标

指标类型	序号	指标名称	2020 年现状	2025 年目标
环境治理	1	空气质量优良天数比率 (%)	77.1	>83.7
	2	细颗粒物 (PM _{2.5}) 年均浓度 (μg/m ³)	42.5	<35
	3	氮氧化物重点工程减排量 (万吨)	—	1.0700
	4	挥发性有机物重点工程减排量 (万吨)	—	0.7410
应对气候变化	5	单位 GDP 二氧化碳排放降低 (%)	21	完成省政府下达目标任务
	6	单位 GDP 能源消耗降低 (%)	14.2	

注：①各项指标最终目标以省政府下达为准

②空气质量优良天数比率和细颗粒物 (PM_{2.5}) 年均浓度指标的基准值是 2018-2020 年的平均值。

5.2.2.6 协同控制政策建议

面临空气质量达标和碳排放达峰双重压力，从排放贡献看，成都市道路移动源和建材行业对主要大气污染物和碳排放均有较大贡献，民用部门和能源部门对碳排放有较大贡献，非道路移动源、扬尘源和其他工业对部分大气污染物贡献显著，在总量控制角度以上部门或行业为重点对象。从排放空间看，成都中心城区、都江堰市区等人员活动密集区域和主要路网交通源排放为CO₂排放热点地区，电厂、水泥厂等大型点源及工业集聚区所在地为主要热点网格。未来成都市需从产业、能源、交通、建筑方面，更深层次地激活生产要素，促进新旧动能转换，考虑到中心城区碳排放量大、人口密集导致环境健康风险较大，应重点关注中心城区的协同治理，在实现经济持续增长的同时，实现空气质量达标和碳排放达峰。

产业方面，持续提升产业绿色低碳水平。近年来成都市三次产业占比较为稳定，并未发生明显变化，短期内无法大幅降低二产比重，需要优化工业制造业结构以降低碳排放。未来需持续开展落后低效和过剩产能淘汰工作，严格控制粗钢、平板玻璃、砖瓦等行业产能，着眼于本地水泥需求，压减水泥产能产量，研究水泥行业退出可行性。盘活高污染、高耗能企业土地资源，实施腾笼换鸟、换道领跑。大力发展光伏、锂电、节能环保产业，依托绿色低碳产业为成都市低碳转型注入内生动力。强化主导产业建圈强链，大力发展集成电路、新型显示、高端软件、创新医药、轨道交通等先进制造重点产业链。

能源方面，加快构建清洁低碳能源体系。严格落实能源消费总量和强度“双控”，大力推进减煤、控油、稳气、增电、发展新能源。成都市需持续压减燃煤消费，重点削减散煤、工业炉窑等非电用煤。提高金堂电厂效率，实施电厂环保节能改造，

降低电厂自用电率和碳排放量，在保障用电需求的情况下，稳步降低发电量并适时考虑金堂电厂外迁。加大外电入蓉，推进川西水电、北光伏风电输入通道扩容，不断强化外电吸纳能力和电网整体供电能力。积极推进可再生能源发展，因地制宜发展风电、光电、抽水蓄能等清洁能源，加快清洁能源供电配套设施建设，疏解新增用电需求。

交通方面，加快形成绿色低碳运输方式。交通部门NO_x和CO₂排放总量巨大，是减污降碳协同减排的主要部门。未来将全面优化传统能源汽车限行限号政策，划设低碳交通示范区，推动新能源车普及，实现公共领域车辆新能源化，抑制燃油机动车保有量快速增长态势，通过价格、行政等工具大幅提升新能源车销售占比，力争2025年实现新能源车累计保有量达80万辆。加快老旧机动车淘汰更新，全面实施轻型和重型车国6b排放标准，淘汰国三及以下排放标准柴油货车。创新货物运输服务模式，加快发展多式联运，建设集约化、共享化、智慧化物流节点设施，推进绿色货运配送示范城市建设。提高城市交通运输管理，以持续优化公共交通结构、提高公共交通供给为核心，构建绿色低碳出行体系，提升通行效率，提高燃油经济性，引导居民优先使用绿色低碳方式出行。

建筑方面，推动绿色建筑高质量发展。随着成都市城镇化率不断提高，建筑能耗持续增加，未来将以城镇新建民用建筑为对象，因地制宜提高建筑节能标准，加大绿色建筑推广力度，新建民用建筑全面执行绿色建筑标准。提高装配式建筑占比，推进既有居住建筑节能改造，稳步提升可再生能源应用占比。实施超低能耗、低碳（零碳）建筑试点示范，打造绿色建筑全产业链，推动成都市绿色建筑产业结构优化升级，提倡低碳生活方式，形成崇尚绿色生活的社会氛围。

此外，应不断完善“碳惠天府”碳普惠机制和政策保障体系，推动2030年前碳排放达峰行

动方案，科学确定能源、工业、交通运输、居民生活等重点领域碳达峰路线图、时间表，健全重污染天气分级分类科学管控的应对机制，做好成都市都市圈、成渝地区双城经济圈大气污染与二

氧化碳减排协同治理。

成都市未来大气污染物和碳减排协同效益措施（表 5-20）。

表 5-20 成都市未来协同减排措施梳理表

部门	领域	具体政策	协同控制优先级
电力	末端控制	电厂超低排放改造	★★★
	总量控制	新建项目禁止配套建设自备燃煤电站除热电联产外，禁止审批新建燃煤发电项目	
	提高能效	“上大压小”，淘汰落后产能减少输电损失	★★★★
	能源结构	大力发展可再生电力资源	
工业	末端控制	工业提标改造、对于重点行业推动实施超低排放改造挥发性有机物综合治理	★★★
	错峰生产	重点排污单位在冬季调整生产经营活动，减少或暂停排放大气污染物的生产、作业	★★★★
	提高能效	工业技术升级和清洁生产 淘汰燃煤小锅炉、推进工业锅炉节能改造	★★★
	能源结构	淘汰燃煤小锅炉、老旧燃煤燃气锅炉电气化	★★★★★
	产业结构	水泥、钢铁等重点行业压减过剩产能、淘汰落后产能 整治“散乱污”企业 发展低能耗，高附加值的高新技术 限制能源密集行业投资	★★★★★
建筑	需求控制	提倡低碳生活方式	★★
	提高能效	全面执行绿色建筑标准 实施住宅节能改造、提高房屋保温性能	★★★
	能源结构	电气化比例提高	★★
交通	需求控制	控制机动车燃油燃气车保有量	★★★★★
	末端控制	加严机动车排放标准、淘汰老旧车辆 油品升级	★★★★★
	提高能效	提高燃油经济性	★★★
	能源结构	推广新能源和清洁能源车辆、工程机械	★★★★★
	运输结构	提倡公共交通出行 优化调整货物运输结构	★★★
面源	用地结构	扬尘综合治理、禁止秸秆焚烧、农业源治理	★★★

备注：★数量代表协同效益程度



5.2.3 苏州市“双达”路径分析

5.2.3.1 城市基本概况

苏州市是国家历史文化名城和风景旅游城市，国家高新技术产业基地，长江三角洲重要的中心城市之一，地域面积 8657.3 平方公里。截至 2019 年底，全市国民经济生产总值约 2 万亿元，人均 GDP 超 18 万元，常住人口 1075.0 万人，汽车保有量 417.7 万辆，规模以上工业企业能源消费总量达 9000 万吨标煤（图 5-16）。与 2015 年相比，2019 年苏州市的经济总量增长

了 33%、人口增长了 1%、机动车保有量增长了 56%、规模以上企业能耗增长了 9%。由于人口密集，工业经济体量巨大，交通运输规模不断增长，苏州市在社会经济快速发展的同时要持续改善大气环境质量面临着诸多挑战。

为走出一条经济高质量发展和大气环境质量改善互促并进的绿色发展之路，近年来，苏州市在完成国家和省大气污染防治工作的基础上，通过各项大气污染综合治理措施的实施，苏州市空气质量明显改善，2020 年综合指数较 2015 年下降 35%，优良率提升 18%，PM_{2.5} 浓度降低至 33 μg/m³，首次达到国家环境空气质量二级

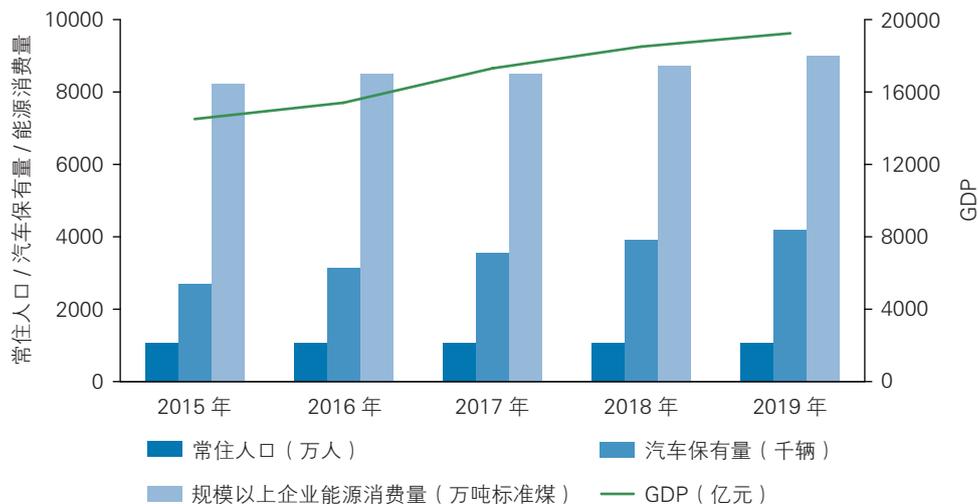


图 5-16 2015-2019 年苏州市经济社会变化情况

标准。六项污染物均呈改善趋势，其中 SO₂ 浓度降幅最高，达到 71%，PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂ 浓度降幅约 40%，O₃ 浓度降幅最低，为 4%（图 5-17）。

5.2.3.2 大气污染物和二氧化碳排放分析

苏州市通过大力削减低效产能、淘汰燃煤锅炉、开展重点行业深度治理、实施移动源污染

攻坚及扬尘整治提升等措施较好地实现了大气污染物减排。根据主要大气污染物 2013–2018 年排放清单表明：苏州市主要大气污染物排放量除 VOCs 外均呈下降趋势。其中，以 SO₂ 排放量降幅最高，达 74.0%；PM₁₀、PM_{2.5} 降幅次之，分别为 51.8% 和 50.7%；NO_x 降幅为 36.4%；由于溶剂使用量增加，VOCs 治理效果不佳，VOCs 排放量上升 8.3%（图 5-18）。苏州市空气质量随着大气污染物排放削减而大幅改善，但 O₃ 浓度

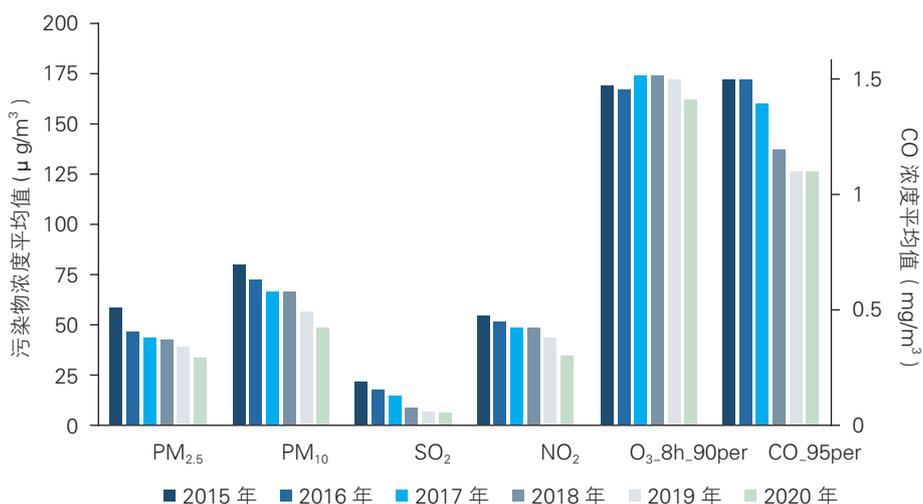


图 5-17 2015–2020 年苏州市空气质量变化情况

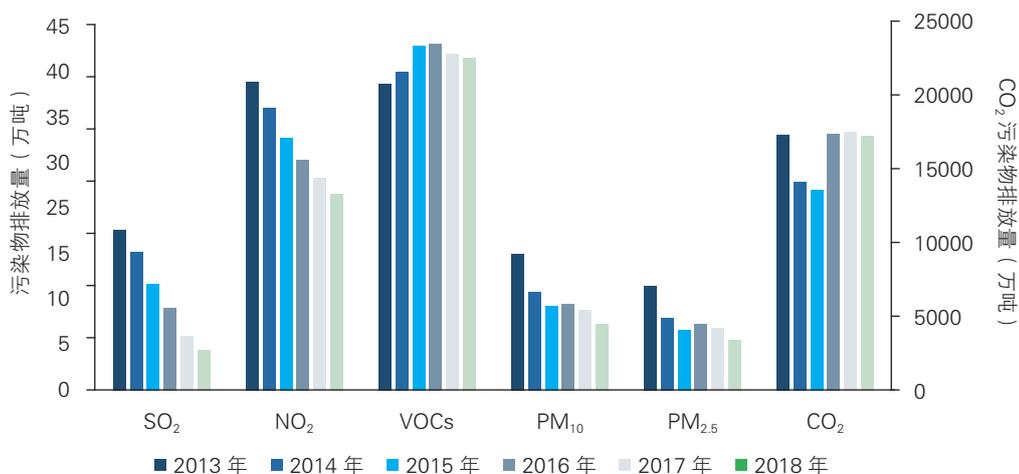


图 5-18 2013–2018 年苏州市主要大气污染物和 CO₂ 排放变化情况

仍超过国家二级标准限值 1.3%，且仍有进一步上升的风险，亟需加强前体物 NO_x 与 VOCs 的控制。同时，苏州市 2019 年原煤消耗较 2015 年仅下降 0.7%，压煤成效不佳。随着建筑、交通能耗增长，自 2016 年苏州市 CO₂ 排放量大幅反弹，2018 年较 2015 年 CO₂ 增加 27.4%，实现碳达峰仍面临挑战。为实现空气质量稳定达标和碳达峰目标，苏州市提出了 2025 年实现 PM_{2.5} 年均浓度 28 μg/m³、O₃ 浓度达标，GDP 能耗下降率和非化石能源一次能源消费比重达到省级分解任务。

5.2.3.3 减污降碳政策梳理

“十三五”期间，苏州市践行“强富美高”

新江苏建设先行军、排头兵目标，始终坚持生态优先、绿色发展，在经济社会高质量发展的同时，生态环境保护各项工作取得显著成效，生态环境质量明显改善。苏州市根据地方特色探索防治途径，编制实施了《苏州市打赢蓝天保卫战三年行动计划实施方案》《苏州市高污染燃料锅炉大气污染整治实施方案》《苏州市机动车排气污染防治工作方案》和《苏州市工业炉窑大气污染综合治理方案》《苏州市关停不达标企业、淘汰落后产能、改善生态环境三年专项行动计划》等系列文件，为实现大气污染物排放有效削减，尽快扭转大气环境质量下降不利形势，苏州市空气质量强化提升行动已全面打响（表 5-21）。

为顺利实现“双碳”目标，江苏省委、省政

表 5-21 苏州市大气污染防治减排措施

一级措施	二级措施	具体措施
强化煤炭消费总量控制	严控煤炭消费总量	落实《苏州市煤炭消费总量削减方案》 禁止审批新建燃煤发电项目
	优化集中供热布局	调整现有燃煤电厂布局 加大天然气供应
	加强清洁能源供应保障	合理开发利用风能、太阳能、生物质能、地热能等清洁能源
加强工业废气污染协同治理	全面整治燃煤锅炉	贯彻落实《苏州市高污染燃料锅炉大气污染整治实施方案》 加快重污染企业环保搬迁改造
	实施重点行业提标改造	整治高污染排放行业 严格执行重点行业主要大气污染物排放标准
	整治挥发性有机物	
深化交通污染防治	推进交通运输低碳发展	推广公共交通 制定实施新能源汽车推广计划
	加强机动车尾气污染防治	限制机动车排放 淘汰老旧车辆
	开展船舶和非道路移动机械污染控制	淘汰超标排放船舶 起重机“油改电”
严格控制扬尘污染	严格控制施工扬尘	
	严格控制道路扬尘	积极开展码头、堆场扬尘治理行动
强化油烟污染防治	规划餐饮经营店 餐饮单位安装油烟净化器	
抓好秸秆综合利用	改变现有简单秸秆利用模式	禁止秸秆露天焚烧 秸秆资源化利用
推进区域联防联控	完善领导小组工作制 完善重污染天气应急保障	

府先后出台了《关于推进生态文明建设工程的行动计划》《江苏省生态文明建设规划》等文件，苏州市严格贯彻执行《江苏省“十三五”节能减排综合实施方案》，同时也先后出台了《苏州市生态文明建设规划》《苏州市生态文明建设三年

行动计划》《“十三五”生态环境保护规划》等文件，推进生态文明建设“十大工程”，采取了一系列低碳城市建设举措推动生态文明发展（表5-22）。

表 5-22 苏州市碳减排措施

一级措施	二级措施	具体措施
优化产业和能源结构行动计划	促进传统产业转型升级	产业互联网化
		构建绿色制造体系
		强化节能环保标准约束
		推动重点行业改造升级
		淘汰不达标企业
		推动新领域、新技术、新产品、新业态、新模式蓬勃发展
	加快新兴产业发展壮大	支持技术装备和服务模式创新
		政励发展节能环保技术咨询服务
		建立节能环保产业调查制度，开展节能环保产业常规调查统计
		打造一批节能环保产业基地
		鼓励发展具有核心竞争力和自主知识产权的低能耗高附加值高端装备制造、新一代信息技术和节能环保等战略性新兴产业以及生产性服务业，推进新能源和能源互联网产业快速发展
		认真执行国家、省级政策
		从严控制燃煤发电项目
		逐步扩大禁燃区
推动能源结构优化提升	大力发展清洁能源	
	全面实施能源替代	
加强工业节能	贯彻实施《江苏省工业领域能效领跑行动实施方案》	
	加强工业领域电力需求侧管理	
强化建筑节能	落实《江苏省绿色建筑发展条例》	
	加快推进综合交通运输体系建设	
促进交通运输节能	推广甩挂运输、“互联网+物流”等先进组织模式，提高物流效率，降低车辆空驶率	
	大力发展公共交通	
重点领域节能行动计划	推进商贸流通领域节能	推动零售、批发、餐饮、住宿、物流等企业建设能源管理体系
		建立级色节能低碳运营管理流程和机制
		加快淘汰落后用能设备，实施照明、制冷和供热系统节能改造
	推进农业农村节能	贯彻级色商场标准
		加快淘汰老旧农业机械
		推广农用节能机械、设备和渔船，发展节能农业大棚
	加强公共机构节能	推进节能、绿色农房建设
		新建建筑全部达到绿色建筑标准
	强化重点用能单位	推进公共机构以合同能源管理方式实施节能改造
		落实国家重点用能单位“百千万”行动工作部署
	强化重点用能设备节能管理	加强高耗能特种设备节能审查和监管，构建安全、节能、环保“三位一体”的监管体系
		建立全省统一编号的燃煤锅炉清单
		锅炉生产、经营、使用等全过程节能环保监督标准化管理
		严把新锅炉市场准入关
实施节能重点工程	重点工程推进能源综合梯级利用	

5.2.3.4 协同减排措施效果评估

“十三五”期间，是苏州创新引领转型、改革促进发展，建成具有较强综合竞争力的国际化大都市的关键时期，对标习近平总书记描绘的“富强美高”（经济强、百姓富、环境美、社会文明程度高）美好愿景，以改善环境质量为核心，以转变发展方式为路径，以生态保护为重点，苏州市在产业、能源、交通、用地等方面开展了大量工作，在实现空气质量改善的同时也带来了显著的碳减排效益。

产业方面，苏州市坚持“调高、调轻、调优、调强、调绿”发展理念，实施传统产业改造升级。严格环境准入，淘汰低端落后产能企业2600余家，清理整顿“散乱污”企业5.3万余家，让存量变绿色发展增量。三次产业结构由2015年的1.5:48.6:49.9调整为2020年的1.0:46.5:52.5，实现“三二一”的产业结构体系；发展壮大高新技术产业及新兴产业，2020年苏州市高新技术产业、战略性新兴产业占规模以上工业总产值比重分别达50.9%和55.7%。

能源方面，强化煤炭消费总量控制，严格控制电力行业煤炭消费新增量，除热电联产外，禁止审批新建燃煤发电项目，大力压减昆山、张家港、太仓、常熟、吴江等地30万千瓦以下燃煤机组数量。重点削减非电行业煤炭消费总量，扩大燃煤小锅炉“禁燃区”范围，累计淘汰4400多台燃煤锅炉；强化高能耗项目源头管控，严格项目能评审查制度，多举措开展节能工作，不断提升能源利用效率。发展清洁能源和新能源，天然气、水电、核电、风电等清洁能源消费量占能源消费总量的比例提升至24.3%。2020年单位GDP能耗累计下降18%，单位GDP二氧化碳排放较2015年下降21.5%。

交通方面，优化调整货物运输结构，提高铁路水路货运比例，推进集约高效的运输模式发

展；完善公共交通服务体系，提高公共交通分担率；加快车船结构升级，推广使用新能源汽车4.3万辆，强化用车排放检验和维修治理，淘汰高污染车辆27万余辆；强化船舶和非道路移动机械污染控制，严格执行长三角水域船舶排放控制区管理政策，完成内河港口码头岸电设施建设280余套。

用地方面，推进“绿色苏州”建设，加强公园绿地、防护绿地、城市绿廊及城郊大环境绿化建设，构建沿长江、京杭大运河、环太湖绿色廊道系统，建设产业集中区绿化隔离带和高标准农田林网。新增森林抚育31.9万亩，陆地森林覆盖率达30.2%，市区建成区绿化覆盖率达43%，建成首个“国家生态园林城市群”（表5-23）。

5.2.3.5 “双达”目标

苏州市严格落实《江苏省“十三五”控制温室气体排放实施方案》要求，将碳排放强度下降指标层层分解，按期对各地碳排放下降任务开展审核，确保任务落地、工作落实。经省生态环境厅考核，2018年、2019年全市单位地区生产总值二氧化碳排放量分别为1.11吨/万元和1.08吨/万元，同比分别下降4.92%和4.96%，超额完成4.73%的年度下降目标。同时，苏州市主要污染物排放总量持续下降，生态环境质量明显改善。控制温室气体排放考核综合得分持续位居全省前列。人民群众对生态环境满意率再创新高，从2015年的81.7%上升到2020年的91.8%。

苏州市以碳排放强度目标下降为中心，以产业低碳转型升级为主线，持续推动经济结构优化、节能减排等方面工作，深化拓展低碳城市试点、全国低碳日宣传、碳市场基础建设等工作，在江苏省各设区市控制温室气体排放目标责任考核中成绩位于全省前列，取得全省综合得分第一名和第二名的优异成绩。

表 5-23 “十三五”苏州市协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益	
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	★★★	
		整治“散乱污”企业	★★★★★	
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★	
	工业	优化能源结构	发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
			严格控制新增燃煤项目	★★★
			建设“高污染燃料禁燃区”	★★★
			淘汰燃煤小锅炉	★★★★★
	交通	源头管控	实施工业炉窑燃煤天然气替代	★★★
			提高重点行业能源利用效率	★★★
			淘汰老旧柴油货车	★★★★★
推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶			★★★★★	
电力	总量控制	提高铁路水路货运比例，发展多式联运	★★★	
		完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★	
土地利用	用地结构调整	严格控制燃煤机组新增装机规模	★★★	
		加快淘汰 30 万千瓦以下燃煤机组	★★★★★	
		增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★	
		推进绿化碳汇工程	★★	

★数量代表协同效益程度

未来，苏州市将持续推进国家低碳试点城市试点工作，加强应对气候变化与生态环境保护、大气污染防治等工作的有衔接，强化了与节能减排、数据统计工作的统筹协调。“十四五”时期是生态环境质量改善由量变到质变的关键时期，苏州市政府依据《中华人民共和国环境保护法》《江苏省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《江苏省“十四五”生态环境保护规划》《苏州市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》等相关法律法规、规划计划，组织编制《苏州市“十四五”生态环境保护规划》。

规划中要求苏州市 2025 年 $PM_{2.5}$ 年均浓度降至 $28 \mu g/m^3$ 左右，空气质量优良天数比率 86% 以上，相比 2020 年，新增设了对臭氧浓度和非

化石能源占一次能源消费比重的限制，体现了苏州市对大气污染防治和碳减排两方面的决心（表 5-24）。

5.2.3.6 协同控制政策建议

当前，苏州市空气质量虽有明显改善，但大气治理成效还不稳固，例如环境质量持续改善压力较大，空气质量优良天数比例对标国内同属经济发达地区还有一定差距； O_3 年均浓度未达国家二级标准，超越 $PM_{2.5}$ 成为影响空气质量达标的首要污染物，仍需进一步加大 O_3 主要来源，比如 VOCs、机动车尾气等治理的力度，低碳发展仍存在较大进步空间。未来仍需在产业、能源、交通、建筑和用地等方面持续强化提升，推动经济高质

表 5-24 “十三五”与“十四五”时期生态环境保护规划目标对比

类别	序号	指标名称	单位	规划目标 2020 年	规划目标 2025 年
环境质量改善	1	空气质量达到优良天数的比例	%	≥ 73.9	86
	2	PM _{2.5} 年均浓度	μg/m ³	下降比率 [≥ 20]	28
	3	O ₃ 日最大 8 小时第 90 百分位数浓度	μg/m ³	无	160
	4	重度及以上污染天数下降比例	%	[≥ 25]	
	5	二氧化硫排放量削减比例	%	[20]	完成省下达任务
	6	氮氧化物排放量削减比例	%	[20]	完成省下达任务
	7	挥发性有机物排放量削减比例	%	[20]	完成省下达任务
绿色低碳发展	8	万元 GDP 能耗下降率	%	无	完成省下达任务
	9	非化石能源占一次能源消费比重	%	无	12

注：[] 内数字为五年内累计值。

量发展和生态环境质量持续改善，实现经济持续增长的同时协同实现空气质量达标和碳排放达峰，率先建设充分展现“强富美高”新图景的社会主义现代化强市。

产业方面，苏州市作为国家高新技术产业基地，仍需坚持创新深化转型。严格执行国家高耗能、高污染和资源型行业准入条件，制定更严格的产业准入门槛；依法淘汰落后产能，推进钢铁、化工、建材、铸造等行业落后产能淘汰，全面深化“散乱污”企业排查和整治工作。同时，坚持创新核心地位，有效提升科创水平，加快产业智能化、数字化、绿色化、服务化改造，构建绿色低碳循环经济体系，以科技创新为苏州市低碳转型发展提供重要支撑。

能源方面，苏州市高耗能工业行业能源消费占比较高，煤炭等化石燃料依然占主导，需持续控制煤炭消费总量。严格新建、改建、扩建用煤项目煤炭管控，推进煤炭消费总量负增长。持续推进热电整合，加快关停整合 30 万千瓦及以上热电联产电厂供热半径 30 公里范围内的燃煤锅炉和小热电机组，大力应用新技术新工艺，持续降低供电煤耗。加大燃煤锅炉淘汰力度，持续开展工业炉窑清洁能源替代。提升清洁能源占比，优化风能、太阳能开发布局，因地制宜发展生物质能。

推动高载能行业以及重点用能单位深化节能改造，提升能源利用水平。积极普及节能知识，促进全民节能，鼓励购买节能产品。

交通方面，苏州市机动车保有量在全国城市中名列前茅（排名第四），一方面应控制燃油机动车保有量的增长，制定实施车辆限牌、限行、限牌照使用年限等控制措施，降低高排放老旧机动车存量，加快淘汰国三及以下排放标准营运柴油货车；另一方面完善城市公交系统，大力发展城市轨道交通，提高公共交通出行分担率；同时，加大新能源和清洁能源车辆推广应用力度，推进城市建成区新增和更新的公交、环卫、邮政、出租、通勤、轻型物流配送车辆使用新能源或清洁能源汽车。目前货物运输仍以公路运输为主，应完善交通运输网络，推进煤炭、建材、矿石等运输“转公为铁、转公为水”，加快钢铁、电力等重点企业铁路专用线建设，提高铁路、水运交通的运输占比。持续推进港口码头和船舶的供用电建设，推广使用电、天然气等新能源或清洁能源船舶。

建筑方面，随着经济社会的发展，人民生活水平提高，建筑能耗随之增加，应全面推广绿色建筑建设要求，实现新建民用建筑 100% 执行绿色建筑标准。有序推进既有居住建筑节能改造工

作，并将节能改造与旧城功能优化提升相结合。深入发展超低能耗(被动式)建筑、近零能耗建筑，提高建筑可再生能源应用比例。强化建筑运行用能管理，加强能耗监测平台和节能监管体系建设。

用地方面，苏州市以创建国家生态园林城市为抓手，基本建成类型丰富、功能完善、布局合理的城市绿地系统。未来需持续推动生态绿化建设，开展沿江、环湖、沿河、沿路和村庄绿化行动，提升河、湖、水库等防护林体系建设水平，推进高速铁路、高速公路、高等级公路沿线绿色通道

建设和丘陵岗地森林恢复。

总的说来，苏州市作为偏高新技术型城市，创新能力强，未来应持续增强产业科技创新策源功能，加快产业智能化改造和数字化转型，大力培育生物医药、新一代信息技术、人工智能、新材料、新能源、节能环保等先进制造业集群。同时，挖掘节能和能效提升的巨大潜力，开展交通和建筑等领域的减排行动。

总结苏州市未来大气污染物和碳减排协同效益的措施(表 5-25)。

表 5-25 苏州市未来协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	★★★
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★
		整治“散乱污”企业	★★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
	优化能源结构	严格控制新增燃煤项目	★★★
		淘汰燃煤小锅炉	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤电能替代	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	★★★
		建设“高污染燃料禁燃区”	★★★
		提高重点行业能源利用效率	★★★
交通	总量控制	控制机动车保有量	★★★★★
	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
	运输结构调整	提高铁路水路货运比例，发展多式联运	★★★
电力	总量控制	完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★
		严格控制燃煤机组新增装机规模	★★★
	提高能效	加快淘汰 30 万千瓦以下燃煤机组 增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★ ★★★★★
建筑	提高能效	加快高效发电技术研发和应用，压减单位供电煤耗	★★★
		全面执行绿色建筑的设计标准	★★
		积极发展超低能耗建筑	★★
民用	源头管控	实施既有建筑节能改造	★★
		提倡低碳生活方式，实施节能产品补贴	★★★★
土地利用	用地结构调整	推进绿化碳汇工程	★★

备注：★数量代表协同效益程度

5.2.4 合肥市“双达”路径分析

5.2.4.1 城市基本概况

合肥市作为安徽省省会，长三角城市群副中心城市，是具有国际影响力的创新之都，全国首个科技创新型试点城市，地域面积 1.14 万平方公里。2019 年合肥市国民经济生产总值接近 1 万亿元，常驻人口 818.9 万人，年能耗达到 2409 万吨标煤（图 5-19），2021 年，合肥市国民经济生产总值达到 1.14 万亿元，为过去十年全国发展最快的城市，GDP 增速为 213.3%，位居全国第一。合肥市在安徽省各市科技创新发展指数排名第一、城市综合竞争力排名第一。江淮大众新能源汽车中国生产基地和研发中心总部、蔚来汽车中国总部落户合肥，“中国声谷”入驻企业超 1000 家，智能可穿戴设备出货量全球第一。建成世界首条 10.5 代面板和玻璃基板生产线，全球最薄 0.12 毫米电子触控玻璃实现量产。作为城市之间流量竞争的重要入口，高铁

在合肥市建设数量位于全国第 4 位，2021 年已开通高铁站 10 座。合肥市 2019 年机动车保有量达到 217.6 万辆，较 2015 年增加了 86%。在城市飞速发展的同时，环境也承载着巨大的压力，然而环境空气质量持续改善。

作为“万亿俱乐部”的新成员，合肥在经济跑出“黑马速度”之时，绿色发展同样“抢眼”。经过持续努力和投入，合肥市空气质量显著改善，2020 年综合指数较 2015 年下降 24%，优良率大幅度提升，重度及以上污染天数清零。六项污染物中 SO₂ 降幅最高，达到 56%；PM_{2.5}、CO 和 PM₁₀ 降幅分别为 46%、39% 和 37%，但 NO₂ 和 O₃ 显著上升，分别上升 18% 和 33%（图 5-20）。在亚洲清洁空气中心“2021 中国蓝天观察论坛”上发布的《大气中国 2021：中国大气污染防治进程》中显示，在纳入评分的 168 个重点城市中，合肥市跃升综合评分排名榜首。

5.2.4.2 大气污染物和二氧化碳排放特征

根据合肥市统计数据计算 2013-2018 年主要大气污染物排放清单表明，合肥市主要大气污染

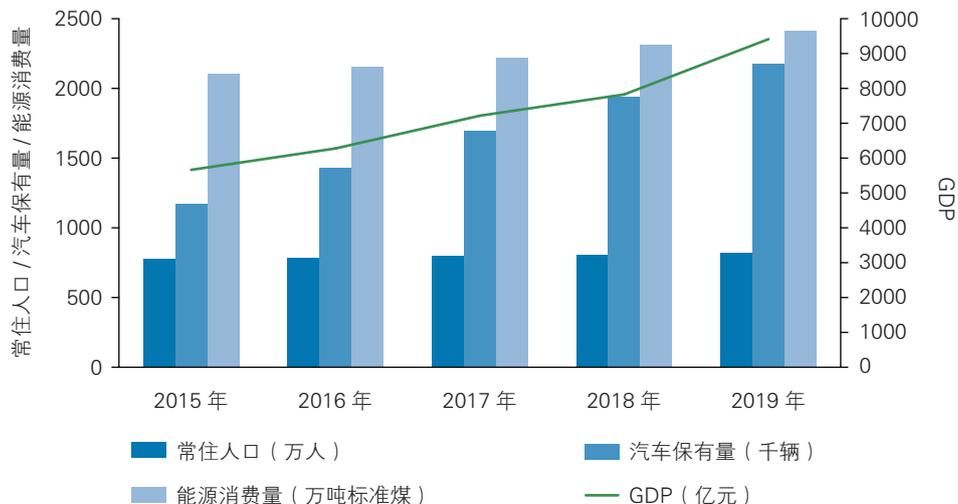


图 5-19 2015-2019 年合肥市经济社会变化情况

物除 VOCs 外，各项污染物排放均呈下降趋势。以工业燃煤锅炉、电力、钢铁、水泥整治、散煤替代等为主的措施较好地实现了 SO₂ 减排，促进了 PM_{2.5}、PM₁₀ 和 NO_x 减排，2013–2018 年 SO₂ 排放量降幅近 60%，PM_{2.5} 和 PM₁₀ 降幅在 25% 以上，NO_x 下降近 20%，但 2016 年后以上污染物均减排幅度收窄；与此同时，2013–2018 年

VOCs 排放量上升近 20%（图 5–21）。虽然合肥市主要大气污染物排放大幅削减、空气质量逐步改善，但 2020 年合肥市 PM_{2.5} 仍超过国家空气质量二级标准 3%。与此同时，随着近年来煤炭消费量的增长，合肥市 CO₂ 排放量上升近 40%，实现碳达峰仍面临巨大挑战。为实现空气质量达标和碳达峰目标，合肥市需加快推进绿色低碳发展。

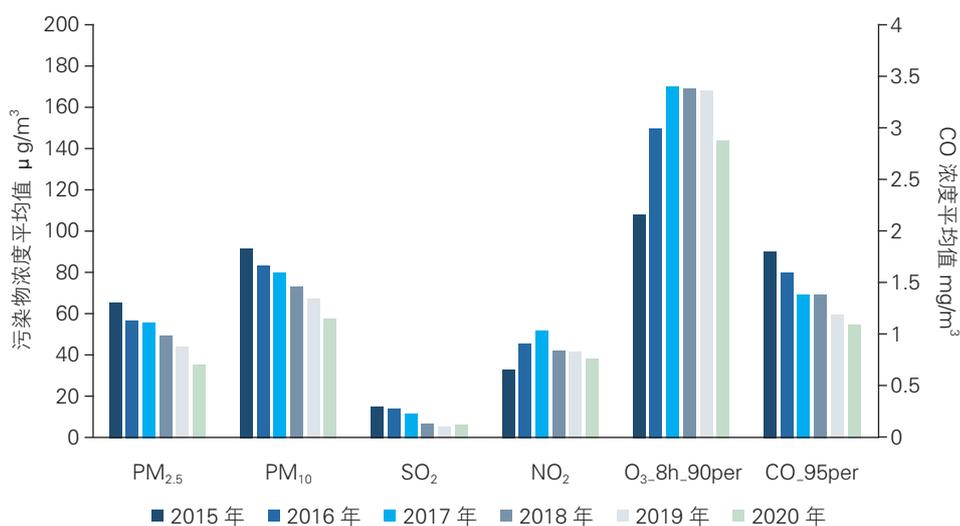


图 5–20 2015–2020 年合肥市空气质量变化情况

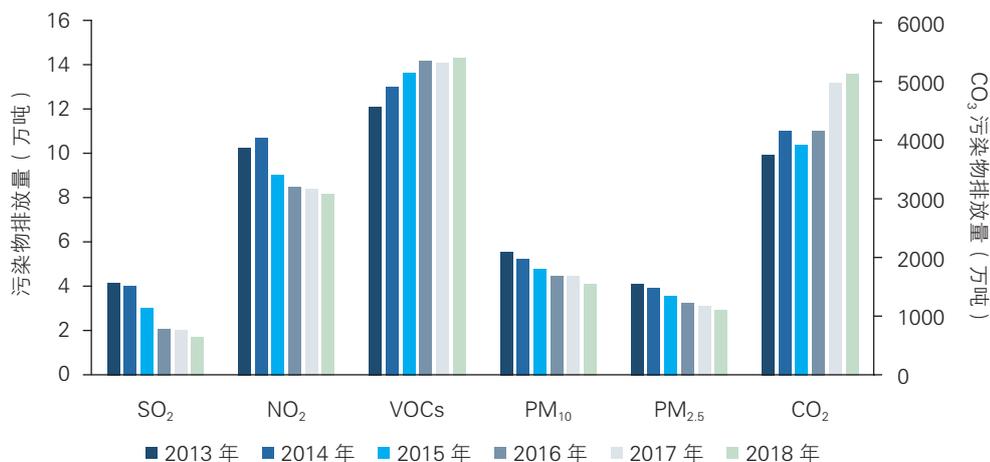


图 5–21 2013–2018 年合肥市主要污染物和 CO₂ 排放变化情况

5.2.4.3 减污降碳政策梳理

合肥市是全国打赢蓝天保卫战的重点地区，为了加快改善全市空气质量，打赢蓝天保卫战，以及打造具有国际影响力的创新之都。自 2013 年原环境保护部发布《大气污染防治行动计划》以来，

合肥市结合实际情况，制定了《合肥市打赢蓝天保卫战三年行动计划实施方案》，具体包括出台《合肥市机动车排气污染防治管理办法》《合肥市扬尘污染防治管理办法》，修订《合肥市大气污染防治条例》、发布《合肥市 2020 年散煤治理和商品煤质量管理工作方案》等文件（表 5-26）。

表 5-26 2016-2020 年合肥市大气污染控制措施

一级措施	二级措施
调整优化产业结构，推进产业绿色发展	优化产业布局
	严控“两高”行业产能
	强化“散乱污”企业综合整治
加快调整能源结构，构建清洁低碳高效能源体系	深化工业污染治理
	大力培育绿色环保产业。加快发展新动能
	继续实施煤炭消费总量控制
	实施“煤改气”和“以电代煤”
	开展燃煤锅炉综合整治
	加强散煤治理
积极调整运输结构，发展绿色交通体系	提高能源利用效率
	加快发展清洁能源和新能源
	优化调整货物运输结构
	加快车船结构升级
优化调整用地结构，推进面源污染治理	加快油品质量升级
	强化移动源污染防治
	推进露天矿山综合整治
	加强扬尘综合治理
	加强秸秆综合利用和氨排放控制
	持续强化烟花爆竹禁放工作
	开展秋冬季攻坚行动
实施重大专项行动，大幅降低污染物排放	打好柴油货车污染治理攻坚战
	开展工业炉窑治理专项行动
	实施 VOCs 专项整治行动
	强化区域联防联控，有效应对重污染天气
	加强重污染天气应急联动
	夯实应急减排措施
	实施大宗物料错峰运输

为加快推进合肥市低碳城市试点建设，实施绿色发展行动计划，培植生态文明新优势，合肥市人民政府围绕《安徽省合肥市低碳城市试点实施方案（2016-2020年）》，制定《合肥市低碳城市试点建设工作方案》（表5-27）。

5.2.4.4 协同减排措施效果评估

合肥市为实现高质量发展，打造“五高地一示范”（具有国际影响力的创新高地、全国重要的先进制造业高地、具有国内领先优势的数字经济高地、内陆开放新高地、优质优良宜居宜业的

表 5-27 2016-2020 年合肥市低碳城市建设措施

一级措施	二级措施	具体措施
构建低碳发展政策制度体系	建立低碳发展基	制定促进低碳发展政策措施，建立实施效果跟踪评价机制
	编制低碳发展和 编制《合肥市低碳 产品和技术推》	编制碳数据管理信息平台建设实施方案，建立碳排放数据管理平台 引导低碳技术和产品研发，支持绿色低碳产品生产、销售和消费，鼓励企业开展碳标识和低碳产品认证
加快产业低碳化发展	推进工业领域节能 减碳	对电、热生产及供应企业、水泥、煤化工等高耗能行业实施能源总量控制，压缩控制高耗能行业规模 加强重点领域、重点环节节能低碳技术改造 优化农业空间布局
	发展壮大战略性新 兴产业	加强农田水利基础设施建设 推进单功能的传统农业向多功能现代农业转型升级 改造提升传统优势产业 提速发展现代服务业 加快发展现代生态循环农
构建现代低碳能源 体系	培育优化能源结构	大力发展新能源 建设清洁、低碳、安全、高效的现代能源体系
推动低碳公共体系 建设	推广低碳建筑	打造低碳交通
		全面推进太阳能、浅层地热能、空气能等可再生能源应用 积极推进碳排放交易
持续推进资源高效 循环利用	大力发展循环经济	加快推进园区循环化改造，提高主要资源产出率、土地产出率和资源循环利用率 加快废旧物资回收系统建设，形成再生资源规范回收、资源聚集和规模高效利用的产业链条
	推进再生资源综合 利用	加强对废水、废气、餐厨垃圾及余压余热的回收利用 加强秸秆综合利用 严格土地节约集约利用
倡导低碳绿色生活 方式和消费模式	加强教育宣传平	宣传推广节能低碳相关知识
	开展低碳社区创建	鼓励科研机构、学校联手社区开展节能低碳主题活动 促使居民形成少开车、少开空调、节约水电、垃圾分类回收等低碳生活方式 扩大低碳工作影响力

生态高地,在全面从严治党上当好示范),在产业、能源、交通等方面开展了大量工作,部分空气质量改善政策实施的同时带来了显著的碳减排效益。

产业方面,淘汰落后产能 394 万吨,清理整顿“散乱污”企业 1832 家,同时大力发展以新型显示、集成电路、智能语音等产业为主的新兴信息技术产业,战略新兴产业对全市规模以上工业增加值贡献率由 38.8% 提高到 76.9%,三次产业结构由 2015 年的 4.7: 54.7: 40.6 调整为 3.3: 35.6: 61.1。

能源方面,划定大面积高污染燃料禁燃区,禁燃区内逐步实现无煤化,全市基本淘汰 35 蒸吨以下燃煤锅炉及茶水炉、经营性炉灶、储粮烘干设备等燃煤设施。在陶瓷、玻璃、铸造等行业积极推进天然气替代煤气化工程。实施餐饮烧烤、流动摊位、草莓种植业及畜禽养殖业等生活散煤管控。同时发展清洁能源和新能源,建成各类分布式光伏电站超过 2.4 万个。2019 年单位 GDP 能耗累计下降 18%,超额完成省定“十三五”下降 17% 的目标任务;单位 GDP 二氧化碳排放强度比 2015 年下降 27%,超额完成省定“十三五”

下降 19% 的目标任务。

交通方面,不断调整货物运输结构,以合肥港口为重点,加快铁路、高等级公路与港区的连接线建设,推进公路与铁路和水路的联运,减少重型柴油货车排放。为逐步实现车船结构升级,全市淘汰黄标车 5.8 万辆,推广新能源车辆 5.6 万辆,市区范围内所有新增及更换的公交车均为新能源车。

“十三五”期间合肥市大气污染物和碳减排协同效益措施(表 5-28)。

5.2.4.5 “双达”目标

《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》实施以来合肥市空气质量保持“双降一升”,2020 年,全市 PM_{2.5}、PM₁₀ 分别为 36、58 μg/m³,比 2015 年分别下降 42.4%、33.1%;空气质量优良率 85%,较 2015 年提升了 13 个百分点,但大气环境形势总体依然严峻。整体来说,合肥市部分污染物浓度指标改善幅度不大甚至有所反弹,与 2016 年相比,2019 年 NO₂ 浓度基本持平,O₃ 浓度上升 20.48%,O₃ 污染问题

表 5-28 “十三五”协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	整治“散乱污”企业	★★★★★
		淘汰落后、低效产能,压减过剩产能	★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
	优化能源结构	建设“高污染燃料禁燃区”	★★★
		淘汰燃煤小锅炉	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	★★★
交通	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★
	运输结构调整	提高铁路水路货运比例,发展多式联运	★★★
民用	优化能源结构	加快农业设施和服务业燃煤电能替代	★★★★★
		加快农业设施和服务业燃煤天然气替代	★★★

备注:★数量代表协同效益程度

日渐突出。2016年全市PM_{2.5}为首要污染物的天数占比为50.5%，O₃为24.8%，NO₂为14.2%，PM₁₀为13.6%；2019年全市PM_{2.5}为首要污染物的天数占比为33.9%，O₃为44%，NO₂为14.9%，PM₁₀为8.5%。可见，PM_{2.5}为首要污染物的天数在“十三五”期间呈现下降趋势，O₃、NO₂为首要污染物的天数在“十三五”期间呈现上升趋势，尤其O₃上升了19.2个百分点。

目前安徽省计划在2025年将全省空气PM_{2.5}浓度控制在35 μg/m³以下，省碳达峰实施方案尚未出台，合肥市尚无对应其他城市的市级《“十四五”生态环境保护规划》文件发布，缺少2025年PM_{2.5}浓度、碳排放等环境空气质量和低碳约束性指标。

5.2.4.6 协同控制政策建议

面临空气质量达标和碳排放达峰双重压力，合肥市作为偏高新技术型城市，单位能耗、GDP碳排放水平较低，未来应重点加大研发投入，发挥产业集群效应，壮大新一代信息技术、高端装备制造、新能源汽车和新能源产业等低碳产业，有助于减少传统行业煤炭消费，提高能源效率水平，推动协同减排。

合肥将继续提升空气环境质量，实施新一轮空气质量提升行动，谋划实施一批VOCs和NO_x重大减排工程，推进生产和污染防治设施双电量监控、柴油货车门禁系统和餐饮油烟在线监测试点，严控秸秆焚烧，推进机动车及非道机械污染治理。推动制定2030年前碳排放达峰行动方案，科学确定能源、工业、交通运输、城乡建设、农业农村、居民生活等重点领域碳达峰路线图、时间表，谋划实施一批重大改革、重大项目、重大政策。做好合肥都市圈、长三角区域大气污染与二氧化碳减排协同治理，健全重污染天气分级分类科学管控的应对机制。未来，合肥市将在产业、能源、交通、建筑方面，

更深层次地激活生产要素，促进新旧动能转换，推动经济高质量发展，在实现经济持续增长的同时，实现空气质量达标和碳排放达峰。

产业方面，合肥市为现代制造业基地，进一步调整产业结构，在产业上培育壮大节能环保、循环经济、清洁生产、清洁能源等绿色新产业新业态。一方面，制定更严格的产业准入门槛；另一方面，推进钢铁、水泥、化工、焦化等行业落后产能淘汰，严格控制印染、造纸、化纤、制革、橡胶、塑料等行业产能，全面开展“散乱污”企业集群综合整治。同时，坚持以实施创新驱动发展战略为主线，着力推动产业技术创新和绿色低碳转型升级。

能源方面，合肥市能源结构已形成光伏发电、光热、生物质和地热利用等可再生能源多元发展态势，但一次能源消费仍以化石燃料为主，且近年来煤炭消费量仍呈上升趋势。因此，合肥市仍需大力发展风电、光伏等可再生能源，推动非化石能源从补充性能源向替代性能源转变，合力控制煤炭消费总量。新建耗煤项目实行煤炭减量替代，推进煤电节能减排，严格控制燃煤机组新增装机规模，扩大天然气开发利用规模，更大力度实现节能减碳。坚持内外并举，推进省外电力、油气资源进入。加大燃煤锅炉淘汰力度，持续开展工业炉窑清洁能源替代。持续开展散煤清理整治，扩大城市高污染燃料禁燃区范围。推动用能绿色化发展，开展煤电节能行动，进一步提高工业能源利用效率和清洁化水平。坚持发展循环经济，以技术革命推动能源转型，以科技助力“碳达峰、碳中和”。

交通方面，合肥市作为全国综合性交通枢纽，目前货物运输仍以公路运输为主，未来应当发挥水运、铁路在大宗物资中长距离运输中的骨干作用，大幅提高水路、铁路货运比例。由于合肥市机动车保有量增长迅速，随着交通排放逐渐增加，需合理控制燃油机动车保有量，加快轨道交通建设，优化公共交通基础设施，大幅度提高公共交通出行率。

推进城市建成区新增和更新的环卫、邮政、出租、通勤、轻型物流配送车辆使用新能源汽车。加快淘汰国三及以下排放标准营运柴油货车、采用稀薄燃烧技术和“油改气”的老旧燃气车辆。

建筑方面，随着合肥市城镇化率不断提高，建筑能耗持续增加，未来将以城镇新建民用建筑为对象，推动绿色建筑高质量发展，因地制宜提高建筑节能标准，加大绿色建筑推广力度，新建民用建筑全面执行绿色建筑标准。提高装配式建筑占比，新建保障性住房全部使用装配式建造方式。进一步推进既有居住建筑节能改造，积极发展超低能耗建筑，稳步提升可再生能源应用占比。实施超低能耗、低碳（零碳）建筑试点示范，进一步扩大绿色建材应用，打通绿色建筑规划、设计、施工、监理、运维等环节。打造绿色建筑全产业链，

推动合肥市绿色建筑产业结构优化升级，形成崇尚绿色生活的社会氛围。

除此之外，合肥市将在低碳策源上做“加法”，围绕支持使用减污降碳技术、清洁生产、环保管家、合同能源管理、低碳技术攻关及应用等方面出台有关政策，扶持节能环保产业发展；在碳汇能力上做“加法”，将“林长制”与生态碳汇目标结合起来，纳入绿地总体规划布局；在智慧平台发展上做“加法”，提供数据整合、供需对接、咨询诊断、成效评估等基础服务功能，为政府数字治理和企业工业互联网应用提供支撑；在低碳行动上做“加法”，积极倡导全民绿色低碳生活。注重绿色低碳生活理念的宣传和培养，支持、鼓励绿色低碳交通出行。

总结未来合肥市具有大气污染物和碳减排协同效益的措施（表 5-29）。

表 5-29 未来协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	★★★★
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★
		整治“散乱污”企业	★★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★★
	优化能源结构	严格控制新增燃煤项目	★★★★
		淘汰燃煤小锅炉	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤电能替代	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	★★★★
交通	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
	运输结构调整	提高铁路水路货运比例，发展多式联运	★★★★
		完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★★
电力	总量控制	严格控制燃煤机组新增装机规模	★★★★
		加快淘汰 30 万千瓦以下燃煤机组	★★★★★
	提高能效	增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★
建筑	提高能效	全面执行绿色建筑设计标准	★★★
		积极发展超低能耗建筑	★★★
		实施既有建筑节能改造	★★★
		全面推广装配式建筑	★★★

备注：★数量代表协同效益程度

5.3 偏重工业型城市

5.3.1 唐山市“双达”路径分析

5.3.1.1 城市概况

唐山市是典型的传统资源型重工业城市，产业基础雄厚，被誉为“中国近代工业的摇篮”和“中国北方瓷都”，是全国重要的钢铁大市，钢铁产能约占全国的13%。地域面积13472平方公里，截至2019年底，国民经济生产总值6890.0亿元，常住人口796.4万人，汽车保有量213.8万辆，全社会能源消费量达1.1亿吨标准煤（图5-22）。与2015年相比，2019年唐山市的经济总量增长了35%、人口增长了2%、机动车保有量增长了39%、能耗增长了11%。长期的重工业化发展在给

唐山带来可观的经济效益的同时，也使这座城市面临着大气污染治理和节能降碳的双重压力。

“十三五”期间，唐山市空气质量改善明显，2020年空气质量综合指数5.87，较2015年下降35%；优良天数246天，较2015年增加90天；六项污染物除O₃持平外，其余污染物均呈改善趋势，其中SO₂降幅最高，达63%，PM_{2.5}、CO和PM₁₀降幅分别为40%、38%、36%，NO₂降幅相对偏低，为25%（图5-23）。虽然唐山市大气污染治理取得了一定成效，但除SO₂和CO达标外，PM_{2.5}、PM₁₀、NO₂及O₃浓度分别超过国家二级标准40%、29%、15%和14%，空气质量达标压力大。2020年空气质量综合指数在168个城市中排名倒4，在337个城市中排名倒8，空气质量改善需求迫切。

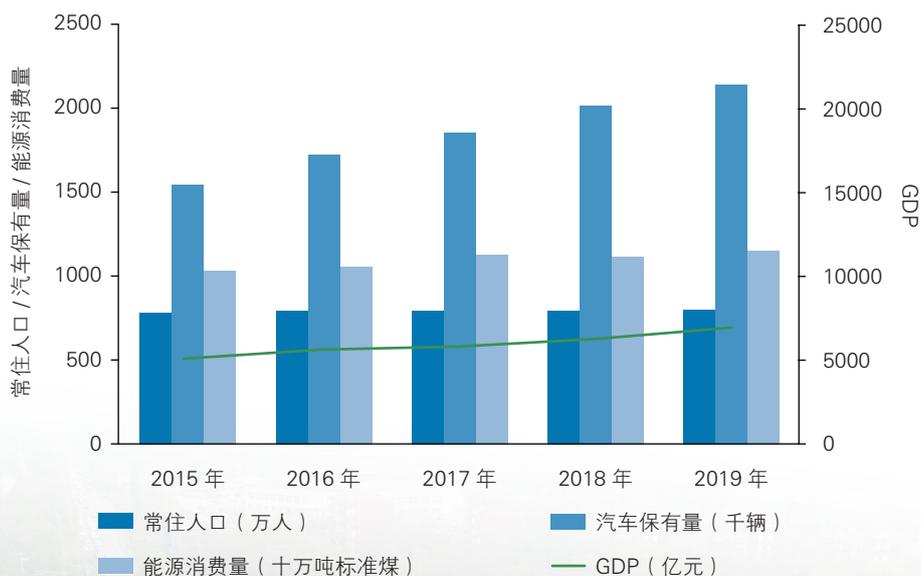


图 5-22 2015–2019 年唐山市经济社会变化情况

5.3.1.2 主要大气污染物和碳排放情况

唐山市严格落实“大气十条”和蓝天保卫战重点任务，推进产业结构、能源结构、运输结构、用地结构优化调整以及工业污染深度治理，狠抓“源头防治”、“生产过程控制”和“末端治理”，有效实现污染物减排。根据唐山市统计数据计算得到的主要大气污染物 2013–2018 年排放清单表明：唐山市主要大气污染物排放除 VOCs 外均呈下降趋势。其中以 SO₂ 排放下降最为明显，下降幅度近 60%，PM₁₀、PM_{2.5} 和 NO_x 排放量下

降 30% 以上；近年来由于溶剂使用量增加，虽然 2015 年后加大挥发性有机物管控力度，2018 年 VOCs 排放量仍较 2013 年增加 4%（图 5–24）。随着主要污染物排放量的减少，唐山市空气质量逐步改善，但 NO₂、PM₁₀、PM_{2.5} 和 O₃ 仍未达标，空气质量排名长期位居倒数，空气质量改善任务艰巨，亟待进一步加强污染减排工作。与此同时，唐山市通过控制钢铁、电力、建材等主要行业耗煤量，2018 年 CO₂ 排放量较 2013 年下降 5%，但自 2015 年起唐山市粗钢、钢材、水泥等主要工业产品产量呈现逐年增长趋势，未来 CO₂ 排放

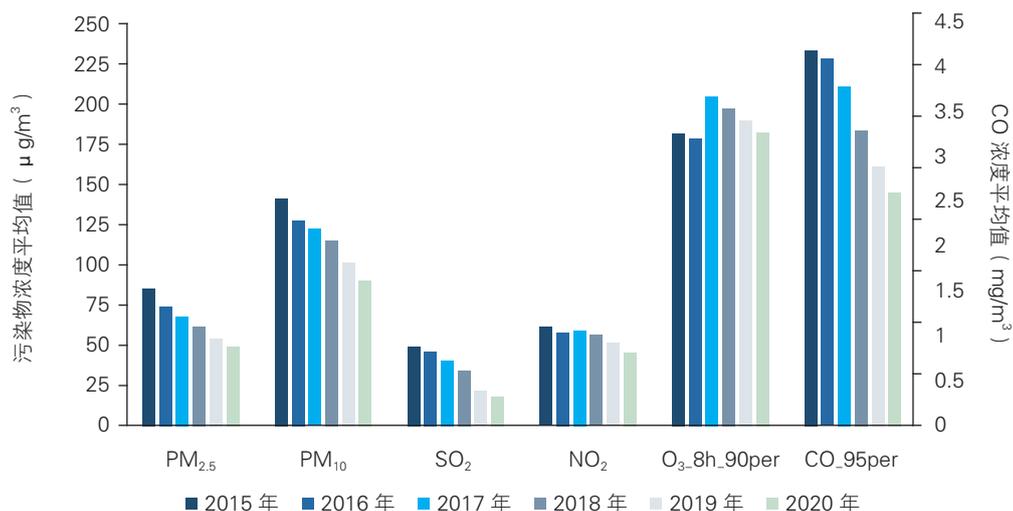


图 5–23 2015–2020 年唐山市空气质量变化情况

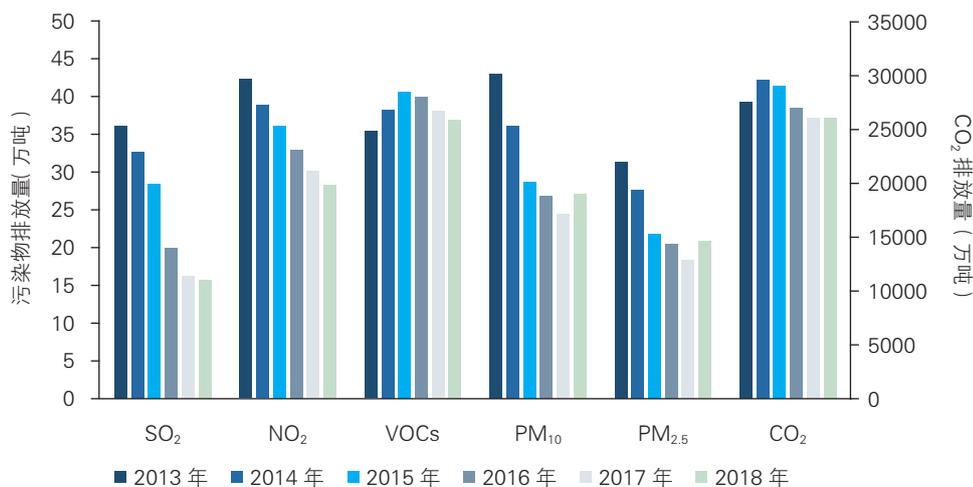


图 5–24 2013–2018 年唐山市主要大气污染物和 CO₂ 排放变化情况

量仍存反弹风险。为加速碳排放达峰和空气质量达标进程,唐山市需扎实推进源头管控、能效提升、结构调整等协同减排措施,努力实现减污降碳协同效应。

5.3.1.3 减污降碳政策梳理

为推进大气污染综合治理,改善全市环境空气质量,唐山市编制实施了《唐山市打赢蓝天保卫战暨“退出后十”三年行动工作方案》《钢铁、焦

表 5-30 唐山市大气污染物控制措施梳理

一级措施	具体措施
调整产业结构	调整优化产业结构,积极稳妥去产能 严控“两高”行业新增产能
加强产业布局调整	取励企业兼并重组 有序推进园区、县城建成区内污染企业退出 推进生产力向沿海转移 实施城区重污染企业搬迁或关闭工作
加强能源结构调整	发展传统能源产业 控制煤炭消费总量 实施煤炭替代工程 全面整治燃煤锅炉 严格控制劣质煤炭的使用 加强建筑节能改造和工程建设 积极推进清洁能源使用
加强大气环境基础设施建设	提高城市环境管理 完善互联互通燃气管网 完善城镇集中供热管网 完善城市路网体系
加强工业企业污染治理	全面提升全市钢铁行业污染治理水平 加大对焦炭生产中备煤、炼焦、煤气和化学产品回收、余热利用等各工序大气污染物排放的专项治理 水泥行业强化粉尘处理 挥发性有机物综合治理
加强面源污染综合整治	强化施工扬尘管理 推进堆场扬尘管理 全面整治混凝土搅拌站 深化矿山扬尘治理 加强农村面源污染整治 加强道路扬尘治理 强化餐饮油烟治理
加强移动源污染防治	强化机动车环保管理 建成道路车辆污染监测体系 强力推进燃油品质升级
加强大气环境精细化管理	加强大气环境科技支撑 强化重污染天气应急与应对 加强工业企业生产调控

化、水泥行业全流程烟气达标治理工作方案》《唐山市锅炉治理专项实施方案》《唐山市重型柴油车污染治理工作方案》等系列攻坚方案，并出台了《唐山市大气污染防治若干规定》《唐山市露天焚烧管理及惩罚办法（试行）》《唐山市生态建设与环境保护“十三五”规划》等政策法规（表 5-30）。

唐山市政府为深入贯彻落实党中央、国务院

和省委、省政府决策部署，大力推动节能减排，全面完成省达“十四五”节能减排目标任务，加快推进全市经济社会绿色低碳发展，助力实现碳达峰、碳中和目标，根据《河北省人民政府关于印发河北省“十四五”节能减排综合实施方案的通知》编制《唐山市“十四五”节能减排综合工作实施方案》（表 5-31）。

表 5-31 唐山市低碳城市建设措施梳理

一级措施	内容
重点行业绿色化改造工程	加快重点行业的节能改造升级 焦化行业加快高效精馏系统、高温高压干熄焦等节能技术推广应用 推进高效烟气除尘和余热回收一体化技术 统筹数据中心余热资源与周边区域热力需求，实现余热综合高效利用 推进绿色数据中心、5G 通信基站等新型基础设施绿色升级
产业园区节能环保提升工程	科学编制产业园区开发建设规划，推进园区循环化改造，全面提高能源资源产出率和循环化水平 支持园区建设电、热、冷、气等多能源协同的综合能源项目 推动重点用能单位能源管控中心和能源在线监测系统建设 鼓励优先利用可再生能源，推行热电联产、分布式能源及光伏储能一体化应用 加快产业园区和集群污染综合整治
城镇绿色节能改造工程	开展“无废城市”“废旧物资循环利用体系示范城市”创建 推广被动式超低能耗建筑 持续推进可再生能源建筑应用
交通物流节能减排工程	推广应用太阳能、风能等清洁能源和绿色低碳技术 加大氢燃料汽车、电动汽车推广力度 大力发展智能交通，探索运用大数据优化运输组织模式
农业农村节能减排工程	加快太阳能、生物质能、风能、空气源热能等可再生能源在农业生产和农村生活中的应用 加快农房节能改造和绿色农房建设，推广节能环保灶具 推进废弃物资源化利用，加快废旧农膜回收处理
公共机构能效提升工程	开展公共机构既有建筑围护结构、供热、制冷、照明等综合型用能系统和设施设备节能改造，持续提升能源利用效率 逐步淘汰老旧公务用车，优先采购使用节能和新能源汽车，完善充电配套设施 在公共机构重点用能单位推行能耗定额管理 加大太阳能、地热能、空气能等可再生能源和热泵、高效储能技术推广力
煤炭清洁高效利用工程	加大高排放行业减煤力度 推动煤炭清洁高效利用 严格落实煤炭减量替代政策，严格控制新增产能的新改扩建耗煤项目 深入开展煤电机组超低排放改造，推进煤电机组节煤降耗改造、供热改造灵活性改造“三改联动”

5.3.1.4 协同减排措施效果评估

“十三五”时期，唐山市全面落实习近平总书记提出的“三个努力建成”、“三个走在前列”重要指示和省委“两个率先”、建设高质量发展示范区要求，在推动唐山经济转型升级的同时，以改善环境质量为目标，解决生态环境领域突出问题为导向，严格落实大气污染防治措施，全力改善环境空气质量，积极应对气候变化，推动绿色低碳发展。

产业结构调整迈出大步伐。化解过剩产能，破解钢铁围城、重化围城、污染围城问题取得重大突破，压减退出炼钢产能 3938 万吨、炼铁产能 2635 万吨、焦炭产能 1108 万吨、水泥产能 260 万吨、平板玻璃产能 600 万重量箱。严控“两高”行业新增产能，禁止新建和扩建钢铁、火电、炼焦、水泥、铁合金冶炼等 11 个工业项目。实施“散乱污”企业清理整治专项行动，实现“散乱污”动态清零。“十三五”期间，三次产业结构由 2015 年的 8.7: 56.5: 34.8 调整为 8.2: 53.2: 38.6，战略性新兴产业年均增长 17% 以上，高新技术产业年均增长 13% 左右，高新技术企业数量是 2015 年的 7 倍，成功入选全国首批老工业城市和资源型城市产业转型升级示范区。

能源结构调整进程不断加速。扩大高污染燃料禁燃范围，强化高污染燃料禁燃区管理。全面整治燃煤锅炉，全市范围内基本实现 35 蒸吨/时及以下燃煤小锅炉动态清零。淘汰关停环保、能耗或安全不达标的 30 万千瓦以下燃煤机组。以居民冬季采暖、炊事和设施农业用煤为重点对象，以城市区域“煤改气、煤改电”、农村地区洁净燃料替代和清洁利用、流通领域提升质量为重点工作，加强散煤污染治理，平原农村地区清洁取暖基本实现“全覆盖”。积极推进清洁能源使用，进一步提高天然气在一次能源消费结构占比。2019 年唐山市单位 GDP 能耗累计下降 15%。

交通运输结构持续优化。强力推进重点钢铁

企业铁路专用线建设，制定实施《唐山地区疏港铁矿石铁路运输实施方案》，2020 年底唐山市钢铁企业疏港铁矿石具备全面实现“公转铁”能力。进一步完善沿海水运网络，加快推进曹妃甸港区煤码头及配套航道等工程建设，提升煤炭水路运输能力。淘汰高排放老旧车辆，大力推广新能源车。完善城市路网体系，积极发展公共交通，公交出行分担率达到 25% 以上。

建筑节能取得成效。严格执行建筑节能标准，城镇新建建筑全面执行居住建筑 75% 节能标准和绿色建筑标准，当年度竣工建筑面积中绿色建筑占比由 2017 年 35.7% 提升至 2019 年的 79.9%。积极开展装配式建筑试点示范项目建设，2017 年被列为全国首批“国家装配式建筑示范城市”，截至 2019 年底，唐山市累计实施装配式建筑 707.4 万平方米。探索被动式超低能耗建筑建设，唐山市现存被动式超低能耗建筑总量达 15.1 万平方米。

碳汇能力不断增强。唐山市以创建国家森林城市为抓手，开展了国土绿化三年行动，实施了通道绿化、荒山绿化、沿海绿化、森林村镇创建、环企绿化、矿山修复绿化、城区绿色空间拓展等 10 大造林工程，全市新造林 120 多万亩，有林地面积达到了 765 万亩，森林覆盖率 37.9%。城市建成区绿化覆盖率达到 41.5%，人均公园绿地面积达到 15.5 平方米。

总结唐山市具有大气污染物和碳减排协同效益的政策（表 5-32）。

5.3.1.5 唐山市“双达”目标

“十四五”期间，生态文明建设实现新进步，美丽唐山建设取得明显进展，生态环境保护主要目标（表 5-33）。

绿色低碳转型成效显著。国土空间开发保护格局得到优化，绿色低碳发展加快推进，能源资源配置更加合理、利用效率大幅提高，单位地区

表 5-32 唐山市“十三五”协同减排政策总结

部门	领域	具体措施	协同效益		
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	☆☆☆		
		整治“散乱污”企业	☆☆☆☆☆		
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	☆☆☆☆☆		
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	☆☆☆		
	优化能源结构	淘汰燃煤小锅炉	☆☆☆☆☆		
		燃煤锅炉电能替代	☆☆☆☆☆		
		燃煤锅炉天然气替代	☆☆☆		
		建设“高污染燃料禁燃区”	☆☆☆		
		民用	优化能源结构	实施冬季取暖“煤改电”	☆☆☆☆☆
				实施冬季取暖“煤改气”	☆☆☆
加快农业设施和服务业燃煤电能替代	☆☆☆☆☆				
加快农业设施和服务业燃煤天然气替代	☆☆☆				
电力	总量控制	加快淘汰 30 万千瓦以下燃煤机组	☆☆☆☆☆		
交通	源头管控	淘汰老旧柴油货车	☆☆☆☆☆		
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	☆☆☆☆☆		
	运输结构调整	提高铁路水路货运比例，发展多式联运	☆☆☆		
土地利用	用地结构调整	完善公共交通，提高公众公交出行率	☆☆☆		

表 5-33 “十四五”时期生态环境保护规划目标

类别	序号	指标	2020 年现状	2025 年目标
环境质量改善	1	细颗粒物 (PM _{2.5}) 浓度 *	49 μg/m ³	40 左右 (μg/m ³)
	2	空气质量优良天数比率 *	68.1%	70 以上 (%)
	3	氮氧化物重点工程减排量	/	3.8 万吨
	4	挥发性有机物重点工程减排量	/	1.4 万吨
绿色低碳发展	5	单位地区生产总值二氧化碳排放降低	/	18%
	6	单位地区生产总值能源消耗降低	/	16.50%
	7	非化石能源占能源消费总量比例	/	1.3 左右 (%)

*: 基于 11 个国家空气质量自动监测站的实况值

生产总值能源消耗和碳排放强度持续降低，简约适度、绿色低碳的生活方式加快形成。

生态环境质量持续改善。主要污染物排放持续减少，环境空气质量全面改善，优良天数比率持续提高，基本消除重污染天气。水环境质量稳步提升，水生态功能初步得到恢复，海洋生态环境稳中向好，城乡人居环境明显改善。

生态服务功能稳步提升。生态安全屏障更加牢固，生物多样性得到有效保护，自然保护地体系逐步完善，生态环境支撑区建设取得明显成效，积极创建国家生态文明建设示范市。

环境风险得到有效防控。土壤污染风险得到有效管控，危险废物和新污染物治理能力明显增强，核与辐射环境风险有效管控，防范化解生态环境风险能力显著增强。

现代环境治理体系加快形成。生态环境监管和应急能力突出短板加快补齐，共建共治共享的生态环境治理体系更加健全，生态环境治理效能得到新提升。

5.3.1.6 协同控制政策建议

唐山市作为偏重工业型城市，煤炭消费量大、工业污染排放量大，未来应着力推进产业结构调整，持续压减过剩产能，推动传统产业升级改造，加快发展战略性新兴产业和现代服务业。严格控制煤炭消费总量，提高重点行业能源利用效率。同时，加快交通、建筑、用地等重点领域调整优化。

总结唐山市具有大气污染物和碳减排协同效益的措施（表 5-33）。

表 5-33 唐山市未来协同减排政策总结

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	☆☆☆
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	☆☆☆☆☆
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	☆☆☆☆
	优化能源结构	严格控制新增燃煤项目	☆☆☆☆
		实施工业炉窑燃煤电能替代	☆☆☆☆☆☆
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	☆☆☆☆
交通	源头管控	淘汰老旧柴油货车	☆☆☆☆☆☆
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	☆☆☆☆☆☆
	运输结构调整	完善公共交通，提高公共交通出行率	☆☆☆☆
		提高铁路水路货运比例，发展多式联运	☆☆☆☆
民用	优化能源结构	建设城市绿色物流体系	☆☆☆☆
		实施冬季取暖“煤改电”	☆☆☆☆☆☆
电力	总量控制	实施冬季取暖“煤改气”	☆☆☆☆
		严格控制燃煤机组新增装机规模	☆☆☆☆
		增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	☆☆☆☆☆☆
建筑	提高能效	加大绿色外电引入，减少本地燃煤发电量	☆☆☆☆☆☆
		全面执行绿色建筑标准	☆☆
		积极发展超低能耗建筑	☆☆
		实施既有建筑节能改造	☆☆
土地利用	用地结构调整	全面推广装配式建筑	☆☆
		推进绿化碳汇工程	☆☆

备注：★数量多代表协同效益明显



5.3.2 郑州市“双达”路径分析

5.3.2.1 城市概况

郑州市是河南省省会、特大城市、中原城市群核心城市，工业门类丰富，水泥、耐材、有色金属加工业等以矿产资源为依托的重工业产业规模总量较大。郑州市地域面积 7446 平方公里，截至 2019 年底，全市国民经济生产总值约 11589.7 亿元 占全省 GDP 总额的 21.36%，人均

GDP 超 11 万元，常住人口 1035.2 万人，汽车保有量 385.6 万辆，规模以上工业企业能源消费总量达 1371 万吨标煤（图 2-25）。郑州市第三产业较去年增值 6831.8 亿元，比去年增长 7.15%，第三产业产值占全市 GDP 总额的 59%，成为郑州市的支柱型产业。与 2015 年相比，2019 年郑州市经济总量增长了 59%、人口增长了 8%、机动车保有量增长了 56%，而规模以上企业能耗降低了 32%，说明产业逐步由高能耗产业向低碳产业转型。2020 年（含巩义）煤炭消费总量约 1974 万吨，比省定控制目标减少约 363 万吨，

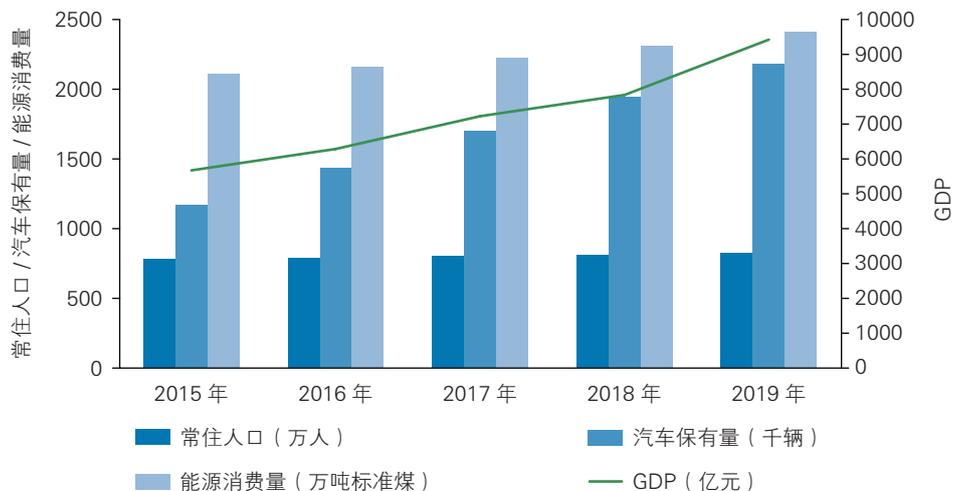


图 5-25 2015-2019 年郑州市经济社会变化情况

比 2015 年（3023 万吨）削减约 1049 万吨，下降约 34.7%，超额完成省定“十三五”煤炭消费减量目标任务。

郑州市深入贯彻习近平生态文明思想，牢固树立“绿水青山就是金山银山”的发展理念，在全市经济总量成功突破万亿元、人均收入突破 10 万元、城市人口突破千万的同时全市大气环境质量持续改善。2020 年综合指数较 2015 年下降 40.0%，空气质量综合指数在全国 168 个重点城市中稳定退出后 20 位，实现了历史性突破。空气质量优良天数达到 230 天，增加了 90 天，重污染天数从 48 天下降至 11 天，下降 77.1%，自 2019 年 3 月份以来消除了严重污染天气。六项污染物除 O_3 外均呈改善趋势，其中 SO_2 降幅最高，达到 72.7%， PM_{10} 、 CO 、 $PM_{2.5}$ 、 NO_2 降幅分别为 49.7%、48.1%、46.9% 和 32.8%（图 5-26）。

“十四五”期间，环境污染防治工作进入新阶段，生态环境质量改善进入由量变到质变的关键时期，对标美丽中国建设郑州市仍然存在以下短板：

一是生态环境质量与目标定位还有差距。 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和臭氧浓度尚未达到大气环境质量

二级标准，且臭氧浓度较高，对空气质量影响较大。目前部分支流河段还存在污水直排现象，市控断面仍未全部达到考核要求，农村地区还偶有黑臭水体出现。

二是结构性污染矛盾较为突出。全市水泥、耐材、砖瓦、刚玉等传统行业依然较多，高耗能、高排放、低产出的企业依然大量存在，化石能源消费和碳排放依然处于上升阶段。全市机动车保有量已突破 430 万辆，位于全国第六，每年仍以 40 万辆的速度快速增长；交通枢纽地位、批发市场云集带来的重型货车污染问题突出。

三是环境基础设施建设及城市管理存在短板。中心城区部分区域雨污混流仍然存在，排水管网老化现象较为普遍。一些已建成的农村污水处理设施存在“建而不运”问题，未充分发挥治污效益。垃圾焚烧、污泥处置、危险废物处置能力接近饱和，生活垃圾分拣中心和回收利用体系尚未完全建立。恶臭、道路扬尘治理及噪声管控效果仍需进一步提升。

四是现代化环境治理体系尚未建成。政府主导、企业主体、社会组织和公众参与的多元共治环境治理体系有待加快构建和完善。科研投入和

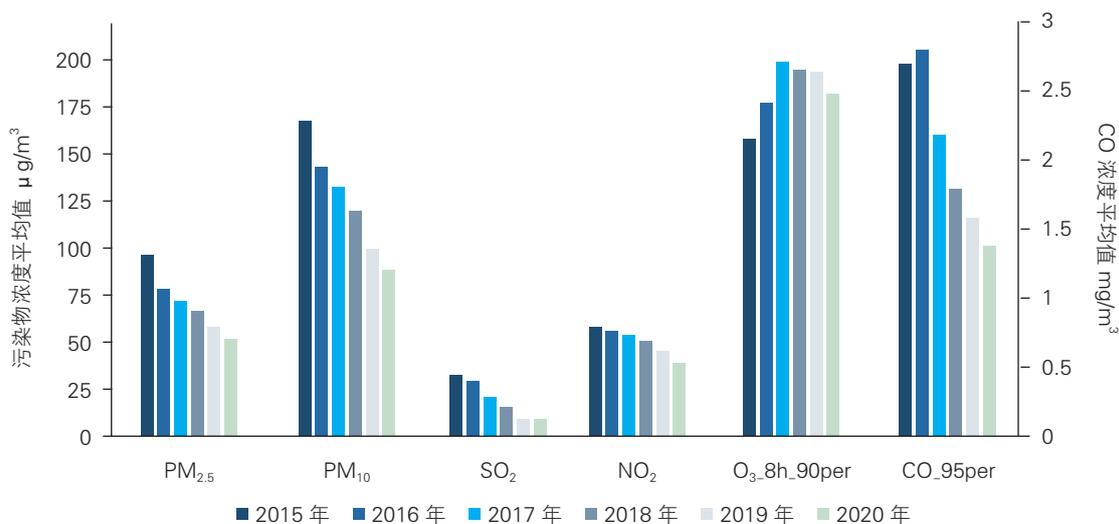


图 5-26 2015-2020 年郑州市空气质量变化情况

区县（市）生态环境监测力量仍需加强，监督执法任务较重，环保智慧平台建设仍显滞后。

5.3.2.2 大气污染物和二氧化碳排放特征

郑州市通过大力压减水泥、碳素等低效产能、开展重点行业超低排放、关停城区燃煤机组、淘汰老旧车辆、实施清洁取暖、加强扬尘管控等一系列措施较好地实现了大气污染物减排。根据主要大气污染物 2013–2018 年排放清单表明：郑州市主要大气污染物排放量除 VOCs 外均呈下降趋势。以 PM_{2.5} 排放量降幅最高，达 71.7%；PM₁₀、SO₂ 降幅次之，分别为 70.5% 和 70.0%；NO_x 降幅为 41.2%。由于郑州市近年来大力发展生物及医药产业、汽车及装备制造业、铝及铝精深加工业，虽然已开展 VOCs 综合整治工作，但 VOCs 排放量仍上升 7.8%（图 5–27）。目前郑州市空气质量距全面达标仍有一定距离，2020 年郑州市 PM_{2.5}、PM₁₀、O₃-8h-90per 浓度仍分别超过国家空气质量二级标准 45.7%、20.0% 和 13.8%。同时，郑州市大力压煤虽有效控制了碳排放量增长，2018 年 CO₂ 排放量较 2013 年下降了 4%，但 2017 年郑州市获批国家

中心城市，将打造国际综合枢纽、物流中心，这意味着交通运输量将急剧增加，城镇化率将快速提高，交通和建筑行业碳排放将持续增长，郑州市碳达峰面临较大压力。为实现空气质量达标和碳达峰目标，郑州市需持续推进能源、产业、交通结构调整，实现大气污染物和温室气体协同减排。

5.3.2.3 减污降碳政策梳理

自 2013 年国务院发布《“十三五”生态环境保护规划》以来，郑州市结合实际情况，编制实施了《郑州市 2019–2020 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》《郑州市 2019 年重型车管控专项行动方案》等系列攻坚方案，并出台了《郑州市“十三五”生态环境保护规划（2016—2020 年）》《新环保法》等政策法规（表 5–34）。

为顺利实现“双碳”目标，河南省委、省政府先后出台了《河南省“十三五”节能低碳发展规划》等文件，郑州市严格贯彻执行《河南省“十三五”节能低碳发展规划》，同时采取了一系列低碳城市建设举措推动生态文明发展（表 5–35）。

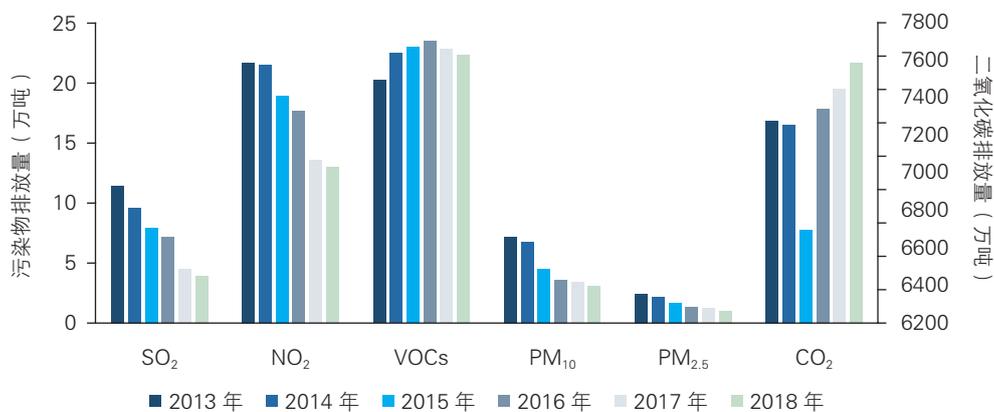


图 5–27 2013–2018 年郑州市主要污染物和 CO₂ 排放变化情况

表 5-34 2016-2020 年郑州市大气污染控制措施

一次措施	内容
实施城市空气质量清单式管理	建立大气污染源排放清单 实施空气质量达标管理
降低燃煤污染影响	削减燃煤总量 开发利用新能源 强化锅炉污染治理 全面禁烧散煤 深化“禁燃区”建设管理 提高燃煤煤质
加大工业污染治理力度	加强重点行业企业整治监管 加大电厂污染治理和监管力度 开展重点行业深度治理
严抓机动车污染治理	淘汰重污染车辆 加强非道路移动污染源治理 加强机动车环保管理
强化扬尘污染防治	防控施工工地扬尘 防治道路扬尘 严控露天堆场扬尘 治理物业小区扬尘 严控农村焚烧污染
开展挥发性有机物综合整治	强制重点行业清洁原料替代 实施工业挥发性有机物综合整治 控制面源挥发性有机物污染
强化重污染天气应急应对纳入全市政府突发事件应急管理体系	

表 5-35 2016-2020 年郑州市低碳城市建设措施

一级措施	内容
加快非化石能源发展	积极推进太阳能高效利用 有序推动风能资源开发利用 因地制宜开发地热能 提升生物质能利用水平 着力推进氢能发展 积极推进水电绿色发展 安全有序发展核能
促进化石能源绿色转型	加快火电结构优化升级 推动化石能源绿色低碳开采
推动能源生产绿色化	推进能源加工储运提效降碳 大力发展能源低碳循环经济
促进用能方式低碳化	推动重点行业绿色低碳用能 促进生活领域用能方式绿色转型 加快农村生产生活电气化
提升节能降碳管理能力	完善能耗强度和总量双控制度 持续推进煤炭消费替代

通过对比各类措施发现，对SO₂减排贡献最高的措施是工业提标改造，约占减排总量的38.5%，对NO_x减排贡献最高的措施是移动源污染防治，约占减排总量的52.9%，对VOCs，减排贡献最高的措施是挥发性有机物治理，约占减排总量的33.5%，对NH₃减排贡献最高的是农业面源治理，约占减排总量的86.5%，对PM_{2.5}减排贡献最高的措施是扬尘综合整治，约占减排总量的41.1%，对CO₂减排贡献最高的措施是电力结构调整及深度治理，约占减排总量的55.4%（图5-28）。

5.3.2.4 协同减排措施效果评估

大气十条以来，郑州市围绕燃煤、工业、机动车、扬尘和面源治理，持续开展大气污染防治攻坚，实现了高质量发展与生态环境保护双统筹，也带来了十分显著的碳减排效益。

产业方面，郑州市坚持调整存量与优化增量并举，加快产业转型升级。严格控制“两高”行业产能，积极压减低效产能，削减钢铁产能260万吨、水泥101万吨、电解铝51万吨、煤炭2038万吨，实现“散乱污”企业动态清零，工业

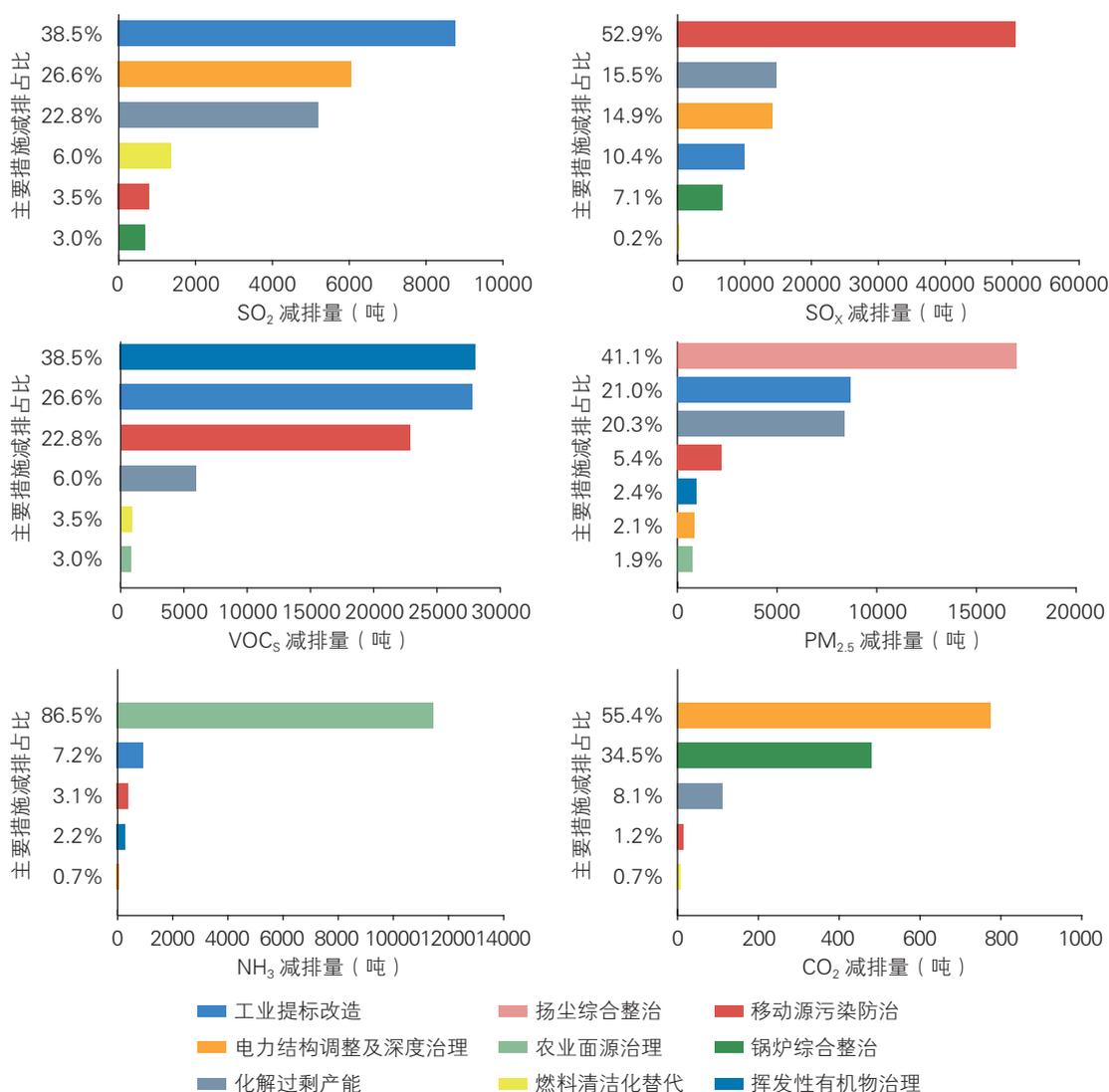


图 5-28 主要措施对污染物和 CO₂ 减排的贡献评估

企业全部开展绿色绩效评价。全力发展高质量制造业，已形成电子信息、汽车、装备制造、新材料、现代食品、铝及铝精深加工 6 个千亿级主导产业集群，2020 年高技术产业比重提升到 33.3%，六大高载能产业比重从 40.2% 下降到 26.2%，三产比例由 2015 年的 2.1: 49.5: 48.4 调整到 2019 年的 1.3: 39.7: 59.0。

能源方面，严格控制电力行业耗煤，实现主城区燃煤机组“清零”，可再生能源发电装机容量达 50 万千瓦左右，接受域外来电规模达到 200 亿千瓦时以上。大力削减非电行业耗煤，严格控制新增燃煤项目，划定“高污染燃料禁燃区”，全市非电燃煤锅炉“清零”，推动工业炉窑燃料清洁化，全部取缔燃煤热风炉、热电联产供热管网覆盖范围内的燃煤加热、烘干炉（窑）。积极推进清洁取暖，实施荥阳国电、新密裕中电厂、豫能热电“引热入郑”工程，完成“双替代”32 万户；推动地热、再生水等 54 个清洁取暖项目，实现城区、城乡接合部、所辖县和平原地区农村清洁取暖 100% 全覆盖，“十三五”全市共削减燃煤 20% 以上。

交通方面，形成以轨道交通、快速公交为骨干，常规公交为主体，慢行交通为延伸的一体化城市公共交通服务体系，提高公共交通分担率。加快老旧车淘汰力度，共淘汰黄标车 14 万辆，国三车约 2 万辆，禁止四环以内使用国四及以下柴油货车运输物料。通过单双号限行，加快推进大围合区域市场外迁，降低机动车使用强度。大力推广新能源车，市区公交车全部新能源化，推广新能源网约车 6370 辆，更新新能源出租车 8400 辆。

建筑方面，新建建筑全部按照一星绿色建筑标准设计建造，政府投资的公益性建筑必须达到二星级及其以上标准。积极开展既有建筑节能改造，鼓励推广建设超低能耗建筑示范项目，完成超低能耗建筑面积示范项目不少于 60 万平方米。

用地方面，大力实施生态防护林建设工程，高水平建设平原生态涵养区。实施全域绿化主体工程，推进通道绿化、沿黄绿化，在城市功能疏解、更新和调整中腾退的空间，优先用于留白增绿。推广立体绿化、屋顶绿化，多渠道拓展城市绿化空间，加大城市绿量。“十三五”市区绿化面积增加 8755 万平方米，全市绿化覆盖率由 40.1% 提高到 41.2%。

“十三五”期间郑州市大气污染物和碳减排措施协同效益（表 5-36）。

5.3.2.5 “双达”目标

“十三五”以来，生态环境质量明显向好。大气环境质量改善明显，2020 年，郑州市空气质量优良天数比例达到 63%，比 2015 年增加 92 天，增幅在全省排名第三；可吸入颗粒物（ PM_{10} ）、细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）年均浓度累计下降幅度达到 49.7%、46.9%，改善率在全省排名均为第一；在全国 168 个重点城市空气质量排名中稳定退出后 20 位，圆满完成“十三五”规划目标和打赢蓝天保卫战三年行动计划目标，取得了大气污染防治攻坚以来最好的成绩。

污染防治攻坚成绩凸显。全市实现非电燃煤锅炉“清零”和平原地区散煤动态“清零”，累计关停 227 万千瓦煤电机组。水泥、耐材、钢铁等重点行业实现超低排放全覆盖，1 蒸吨以上燃气锅炉基本完成低氮改造。水泥行业深度治理、高污染车辆淘汰、重型柴油车监控、非道路移动机械污染治理、建筑施工场地扬尘污染整治等工作走在全国前列。目前郑州市计划在 2025 年将全省空气 $PM_{2.5}$ 浓度控制在 $40 \mu g/m^3$ 以下，空气质量优良率达到 66% 以上。省碳达峰实施方案尚未出台，《郑州市碳达峰实施方案》正在编制中，市级方案处于修改完善阶段，碳达峰年份相关数据仍在测算，尚未明确（表 5-37）。

表 5-36 “十三五” 协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	★★★
		整治“散乱污”企业	★★★★★
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
	优化能源结构	严格控制新增燃煤项目	★★★
		建设“高污染燃料禁燃区”	★★★
		淘汰燃煤小锅炉	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	★★★
		提高重点行业能源利用效率	★★★
		加快淘汰 30 万千瓦以下燃煤机组	★★★★★
电力	总量控制	增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★
		加大绿色外电引入，减少本地燃煤发电量	★★★★★
民用	优化能源结构	实施冬季取暖“煤改电”	★★★★★
		实施冬季取暖“煤改气”	★★★
		实施冬季取暖“煤改集中供热”	★★★
		实施冬季取暖“煤改可再生能源”	★★★★★
交通	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
	优化能源结构	降低机动车使用强度	★★★★★
		推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
	运输结构调整	完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★
建筑	提高能效	全面执行绿色建筑标准	★★
		积极发展超低能耗建筑	★★
		实施既有建筑节能改造	★★
土地利用	用地结构调整	推进绿化碳汇工程	★★

备注：★数量代表协同效益程度

表 5-37 “十三五” 与 “十四五” 时期生态环境保护规划目标对比

类别	序号	指标	单位	2020 年目标	2025 年目标
环境质量改善	1	空气质量优良天数比例	%	60%	66%
	2	细颗粒物年均浓度	μg/m ³	62	/
	3	可吸入颗粒物年均浓度	μg/m ³	109	40
	4	二氧化硫	/	减排 <30.59>%	/
	5	氮氧化物	/	减排 <37.01>%	重点工程减排 <19075> 吨
	6	重点行业挥发性有机物	/	减排 <10>%	重点工程减排 <10327> 吨
绿色低碳发展	7	煤炭消费总量下降	%	减排 <15>%	/
	8	单位地区生产总值二氧化碳排放降低比例	%	完成省定目标	完成省定目标

注：<> 为 5 年累计值

5.3.2.6 协同控制政策建议

郑州市传统能源资源依存性企业总量较大，重点企业在线监控排放量占全省十分之一，SO₂、NO_x、烟粉尘总排放量在全省排第2位，产业结构较重。与其他国家中心城市产业结构对比，郑州市产业发展模式仍有待大力优化。随着郑州迈

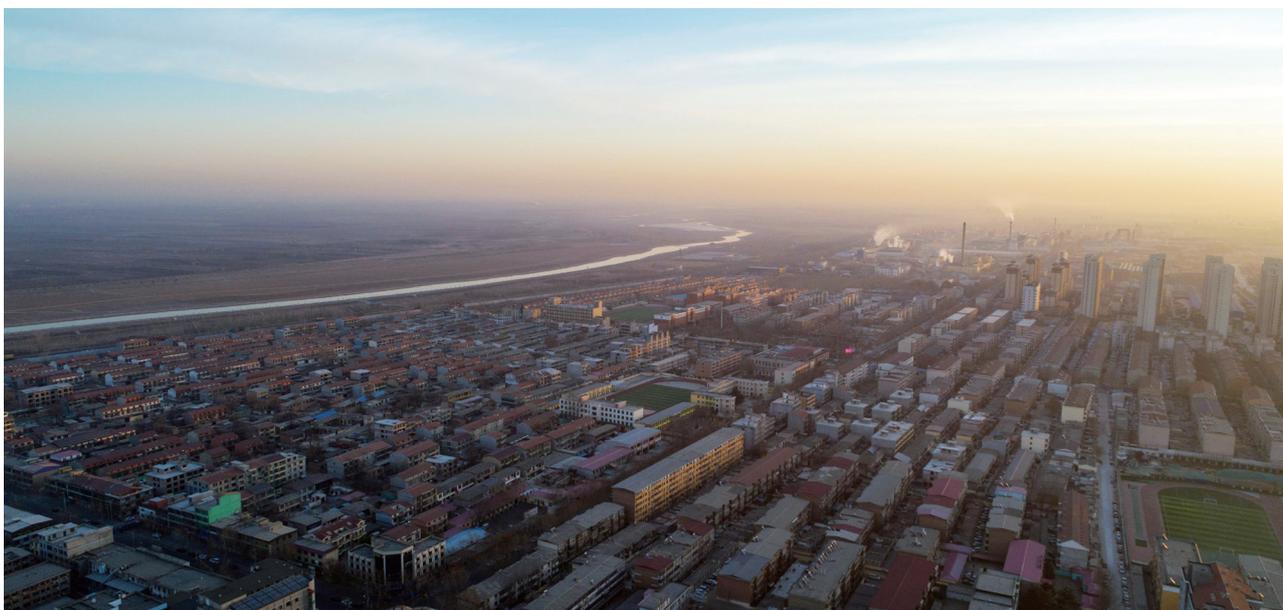
入“万亿俱乐部”，实现经济增长与环境污染脱钩，发展战略性新兴产业，是高质量发展的必然要求。随着国家中心城市的建设，郑州市必将优化城市布局，严控高污染高耗能行业，加快化解过剩产能和淘汰落后产能，对传统行业进一步提升整合，并持续优化能源、交通结构。

总结未来郑州市具有大气污染物和碳减排协同效益的措施（表5-38）。

表 5-38 未来协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	☆☆☆
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	☆☆☆☆☆
	优化能源结构	发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	☆☆☆
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	☆☆☆
交通	总量控制	控制机动车保有量	☆☆☆☆☆
		降低机动车使用强度	☆☆☆☆☆
	源头管控	淘汰老旧柴油货车	☆☆☆☆☆
		推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	☆☆☆☆
	优化能源结构	完善公共交通，提高公共交通出行率	☆☆☆
		提高铁路水路货运比例，发展多式联运	☆☆☆
		建设城市绿色物流体系	☆☆☆
运输结构调整	发展推广“低排放行驶区域”	☆☆☆☆	
电力	总量控制	加快淘汰30万千瓦以下燃煤机组	☆☆☆☆☆
		增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	☆☆☆☆☆
	提高能效	加大绿色外电引入，减少本地燃煤发电量	☆☆☆☆☆
民用	优化能源结构	加快高效发电技术研发和应用，压减单位供电煤耗	☆☆☆☆☆
		实施冬季取暖“煤改集中供热”	☆☆☆
		实施冬季取暖“煤改可再生能源”	☆☆☆☆☆
		加快农业设施和服务业燃煤电能替代	☆☆☆☆☆
建筑	提高能效	加快农业设施和服务业燃煤天然气替代	☆☆☆
		全面执行绿色建筑标准	☆☆
		积极发展超低能耗建筑	☆☆
		实施既有建筑节能改造	☆☆
土地利用	用地结构调整	全面推广装配式建筑	☆☆
		推进绿化碳汇工程	☆☆

备注：★数量代表协同效益程度



5.3.3 石家庄市“双达”路径分析

5.3.1.1 城市概况

石家庄市是河北省省会，是全省政治、经济、科技、金融、文化和信息中心，也是全国最重要

的医药工业基地和纺织基地，工业门类齐全，形成了以医药、纺织、石油化工、装备制造、食品、冶金、建材等为主的工业经济体系。2021 年底，石家庄市地域面积 14530 平方公里。2019 年石家庄全市生产总值 5809.9 亿元，比 2015 年增长 36.26%。其中，第三产业增加值 3528.7 亿元，增长 9.8%，占生产总值的比重为 60.7%。为石家庄

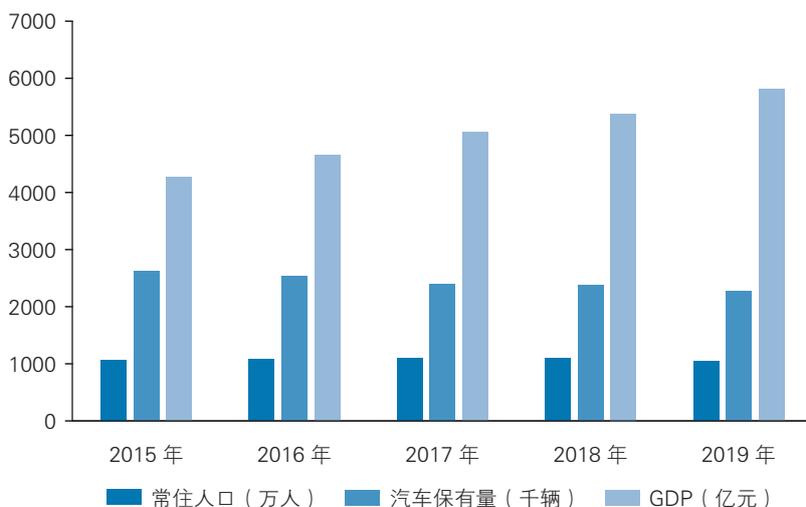


图 5-29 2015-2019 年石家庄市 GDP 规模与增长率

市支柱产业。石家庄市人均生产总值 52859 元，和去年相比增长 5.9%。全市能源消费 2262.69 万吨标准煤（图 5-29）。石家庄市全年公路货物运输总量为 5.2 亿吨，比上年增长 0.2%。公路货物运输周转量为 2369.8 亿吨公里，增长 1%。和 2015 年相比，石家庄市的经济总量上升 36%，能源消费量下降 13%，说明石家庄市节能减排措施实施效果显著。

自 2013 年国务院发布实施《大气污染防治行动计划》以来，石家庄市空气质量整体上呈改善趋势，空气质量优良率由 2014 年 31.2% 上升至 2018 年 43.8%。石家庄市是全国空气污染最严重的城市之一，也是空气污染最严重的省会城市。石家庄市综合指数列全国 168 城市倒数第二位，且长期处于后位。在河北省范围内，石家庄市是环境空气质量污染最重的城市，2018 年在河北省 11 个城市空气质量状况排名中，位居倒数第 1 位。

2019 年石家庄市乡镇大气污染特征以颗粒物为主，石家庄市环境空气质量综合为 4.93，同比 2018 年下降了 10.2%。首要污染物 $PM_{2.5}$ 年均浓度为 $72 \mu g/m^3$ ，超过国家二级标准年均浓度限值 80%； PM_{10} 年均浓度为 $118 \mu g/m^3$ ，超过

国家二级标准年均浓度限值 68.6%； NO_2 年均浓度为 $46 \mu g/m^3$ ，超过国家二级标准年均浓度限值 15%； O_3 日最大 8 小时平均浓度第 90 百分位数为 $206 \mu g/m^3$ ，超过国家二级标准 28.75%（图 5-30）。

截止至 2019 年底，石家庄市共有四种污染物（ $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 和 O_3 ）未达到国家环境空气质量二级标准； SO_2 和 CO 年均浓度已经达到国家环境空气质量二级标准要求，其年均浓度分别为 $16 \mu g/m^3$ 和 $2.4 mg/m^3$ ，需进一步确保稳定达标并持续改善。

5.3.3.2 大气污染物和二氧化碳排放特征

2018 年石家庄市主要大气污染物 BC、CO、 CO_2 、 NH_3 、 NO_x 、OC、 PM_{10} 、 $PM_{2.5}$ 、 SO_2 和 VOCs 的排放量分别为 0.78 万吨、111.7 万吨、8121.8 万吨、5.5 万吨、19.8 万吨、1.4 万吨、8.5 万吨、5.3 万吨、6.4 万吨、22.4 万吨（图 5-31）。 SO_2 排放量从 27.5 万吨下降至约 6.4 万吨，降幅达到 76.7%，其中民用燃烧源贡献 33.7%，工业锅炉燃烧源贡献显著降低。 NO_x 排放量不

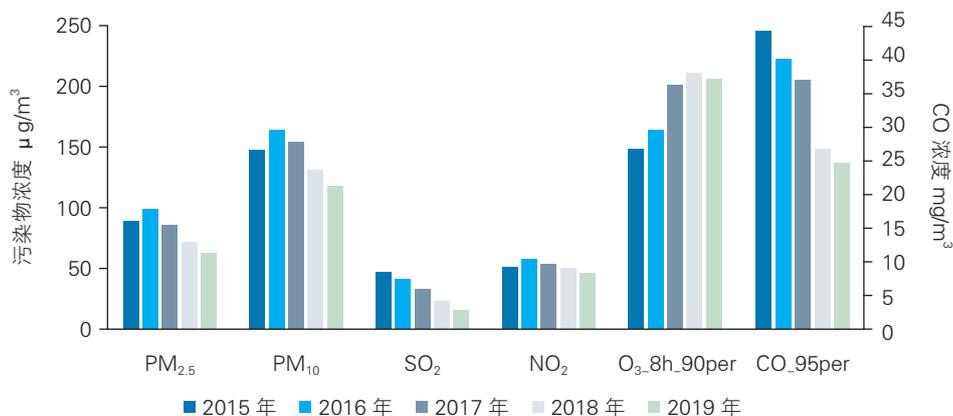


图 5-30 2015-2019 年石家庄市各污染物年度指标统计

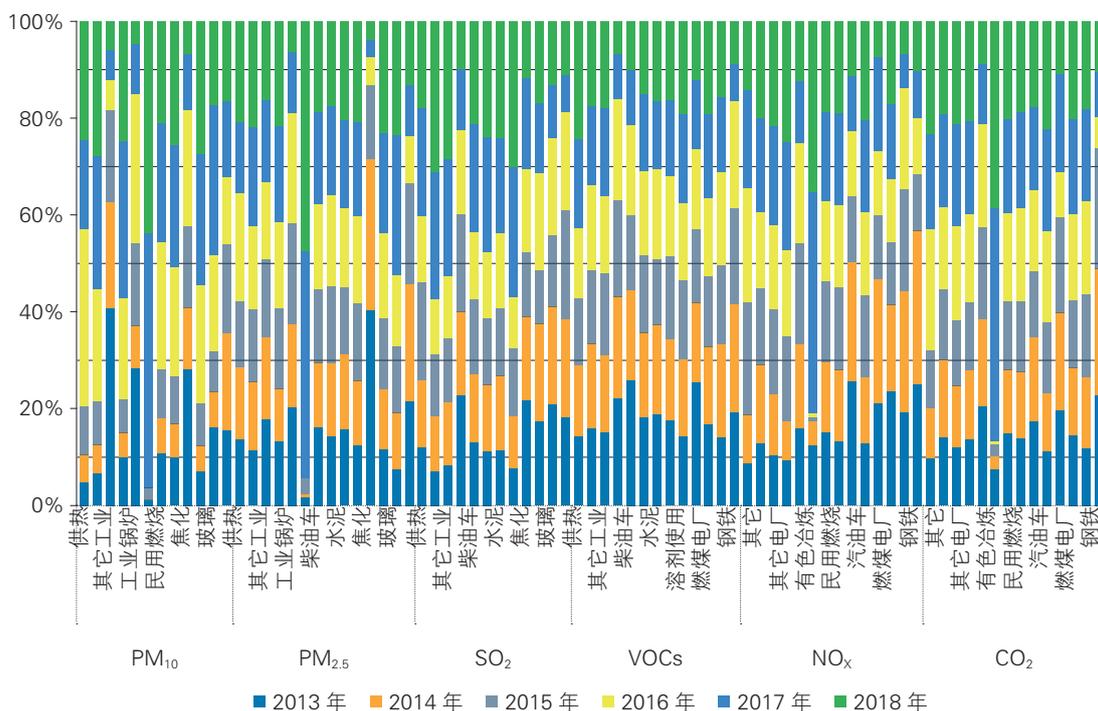


图 5-31 2013-2018 年石家庄市大气污染物排放行业贡献率变化趋势

断下降，从 2013 年的 30 万吨下降到 2018 年的 19.8 万吨。下降幅度为 34%，移动源为主要贡献源，且占比持续增加，至 2018 年占比达到 29.6%。二氧化碳排放方面，2013-2018 年，二氧化碳排放量呈下降趋势。和 2013 年相比，二氧化碳减排 2542.3 吨，下降幅度 23.8%。燃煤电厂排放源贡献最大，除 2014、2015 年小幅下降外，总体呈现上升趋势。2018 年燃煤电厂排放源贡献大约 40% 的排放量。油气生产过程中，排放了大量的 VOCs，占整个地区 VOCs 排放量的 50%。钢铁行业是 PM₁₀ 主要的排放源。2018 年，钢铁行业贡献了大约 67% 的 PM₁₀ 排放量。该行业需要加快基础设施的淘汰升级工作。

5.3.3.3 减污降碳政策梳理

自 2013 年原环境保护部发布《大气污染防治行动计划》以来，石家庄市结合实际情况，制

定了《石家庄市国民经济和社会发展第十三个五年规划》，具体包括出台《石家庄市能源发展“十三五”规划》等文件，发布《石家庄市打赢蓝天保卫战三年行动计划（2018-2020 年）》等文件（表 5-39）。

石家庄市制定了《石家庄市“十三五”节能减排综合工作方案》等文件。降碳措施整理(表 5-40)。

通过对比各类措施发现，对 SO₂ 减排贡献最高措施是燃料清洁化替代，约占减排总量的 29.8%，对 NO_x 减排贡献最高的措施是移动源污染防治，约占减排总量的 42.2%，对 VOCs 减排贡献最高的措施是挥发性有机物治理，约占减排总量的 33.3%，对 PM_{2.5} 减排贡献最高的措施是化解过剩产能，约占减排总量的 26.0%，对 NH₃ 减排贡献最高的是农业面源治理，约占减排总量的 89.7%，对 CO₂ 减排贡献最高的措施是电力结构调整及深度治理，约占减排总量的 39.8%（图 5-32）。

表 5-39 2016-2020 年石家庄市大气污染控制措施

一级措施	二级措施	具体措施
着力优化功能布局，推进产业绿色发展	“散乱污”企业综合整治，深化“散乱污”企业排查动态管理和专项整治行动	加强在用柴油车排放检测
		开展高排放车后处理改造升级工作
积极调整运输结构，发展绿色交通体系	打好柴油货车污染治理攻坚战	对环保排放不达标的重型货运车辆不予办理道路运输证
		严格落实重点用车企业和物流企业的治污责任
	大力淘汰老旧车辆	
	加快推广应用新能源汽车	积极推广新能源汽车
	加快油品质量升级	全面完成车用油品质量提升
		强化油品质量监管
	推进露天矿山综合整治	加强油气回收治理
		强化矿产资源规划管理
	加强扬尘综合治理	加快矿山修复绿化
		深化建筑扬尘整治
加强道路扬尘综合整治		
严格管控渣土运输		
积极调整运输结构，发展绿色交通体系	加强工业料堆场管理	
	建立扬尘污染相关的培训交流制	
	推进裸露土地管控和环境绿化	实施城市土地硬化和复绿
	完善降尘监测和考评体系	制定统一的监测标准和规范，进行监测和考核
	严禁垃圾露天焚烧	完善城乡垃圾处置体系，推进城乡一体化垃圾治理
加强秸秆综合利用	开展农村生活垃圾治理三年行动，因地制宜选取治理模式和治理技术	
	严格管控秸秆焚烧	

一级措施	二级措施	具体措施
深化重点行业污染治理，推动企业绿色升级	持续推进工业污染源全面达标排放	全面推进工业企业废气污染治理
	大力推进企业清洁生产审核	实行《清洁生产审核办法》
	推进各类园区综合治理	对开发区、工业园区、高新区等进行集中整治，限期进行达标改造，减少工业集聚区污染
	加快重点行业超低排放改造	加强工业企业污染排放监督管理，深入实施工业企业排放达标计划 有序推进钢铁、焦化行业超低排放改造
	实施燃煤电厂深度治理	实施电厂有色烟羽治理
	加快锅炉综合整治	淘汰小型燃煤锅炉
		推进燃煤锅炉超低排放改造 加大生物质锅炉和燃油、燃气锅炉深度治理
	开展工业炉窑专项治理	制定工业炉窑综合整治实施方案，全面排查工业 严格排放标准要求，加大对不达标工业炉窑的淘汰力度 实施工业炉窑深度治理 全面淘汰环保工艺简易、治污效果差的单一脱硝设施
	推进工业企业污染防治全过程监管	实施工业企业污染防治设施分表计电
	强化无组织排放控制管理	开展钢铁、焦化、建材、火电、有色、铸造、石化等重点行业无组织排放 排查工作
	开展 VOCs 综合治理专项行动	加强 VOCs 排放源头控制
		深化推进重点行业 VOCs 治理
强化 VOCs 无组织排放管控		
加强工艺过程无组织排放控制		
全面推行泄漏检测与修复 (LDAR) 制度 加强储存、装卸过程中逸散排放控制 加大餐饮油烟治理力度		

表 5-40 2016-2020 年石家庄市低碳城市建设措施

一级措施	二级措施	具体措施
加快调整能源结构， 打造清洁化能源体系	构建清洁取暖体系	扩大集中供热覆盖范围
		有序推进工业集中供热
		加快清洁能源供热热源建设
		加强农村清洁能源供暖
	削减煤炭消费总量	严控煤炭消费总量
		有序压减电厂用煤
		严格进行高污染燃料禁施区管理
	加强散煤综合治理	推进煤炭清洁利用
		加强散煤综合治理
	火电行业结构调整	实施禁煤区发电企业关售
提高接收外送电比例		
推进可再生能源利用	严格治理自备电厂	
	削减电力行业低效产能	
	提高清洁能源使用比重，积极发展可再生能源	
	积极开发太阳能资源	
加强清洁能源供应保障	科学合理利用地热资源	
	加快天然气供应能力建设	
提高能源利用效率	保障电力安全稳定供应	
	实施能源消耗总量和强度双控行动	
	加强重点能耗行业节能	
科学规划城区功能	积极推进建筑节能	
	优化城市空间布局	
着力优化功能布局， 推进产业绿色发展	优化产业布局	推进“三线一单”编制工作
		严格建设项目环境准入
	坚定不移化解过剩产能	严格控制新增燃煤项目建设
		推进传统行业兼并重组
		推进重点行业产能压减
	实施工业企业退城搬迁	合理布局、科学选址，分批分期实施关停搬迁
		化工、建材、铸造、机械加工、生物医药、装备制造等行业企业逐步进入工业因区
大力发展节能环保产业	壮大绿色产业规模，发展节能环保产业、清洁生产产业、清洁能源产业，发展新动能	
	培育壮大新能源汽车产业	

5.3.3.4 协同减排措施效果评估

“十三五”期间，石家庄市围绕产业结构调整、能源结构调整、机动车污染管控、臭氧污染管控、扬尘污染管控等多方面深度治理大气污染，努力从源头减少污染物排放；石家庄市生态环境得到显著改善，蓝天越来越多，河水越来越清，生态越来越好。

产业方面，压减火电产能任务 15.3 万千瓦（任务涉及到的高新热电、藁城天意和华电石热均按

要求完成机组拆除任务，等待省级验收）；关停敬业集团 1 座 588 立方米高炉和 1 座 80 吨转炉，完成省下达钢铁去产能任务；3 家重污染企业退城搬迁工作，已完成 2 家；石钢市区主厂区已关停到位。开展“散乱污”企业整治，排查发现新增“散乱污”企业 104 家，其中关停取缔类 103 家，整改提升类 1 家。

能源方面，积极推进清洁取暖工作，气代煤涉及 9 个县（市），87264 户居民，电代煤涉及 11 个县（市、区），33614 户居民，目前已全部完工。1-9 月份，全市规上工业煤炭消费同比减

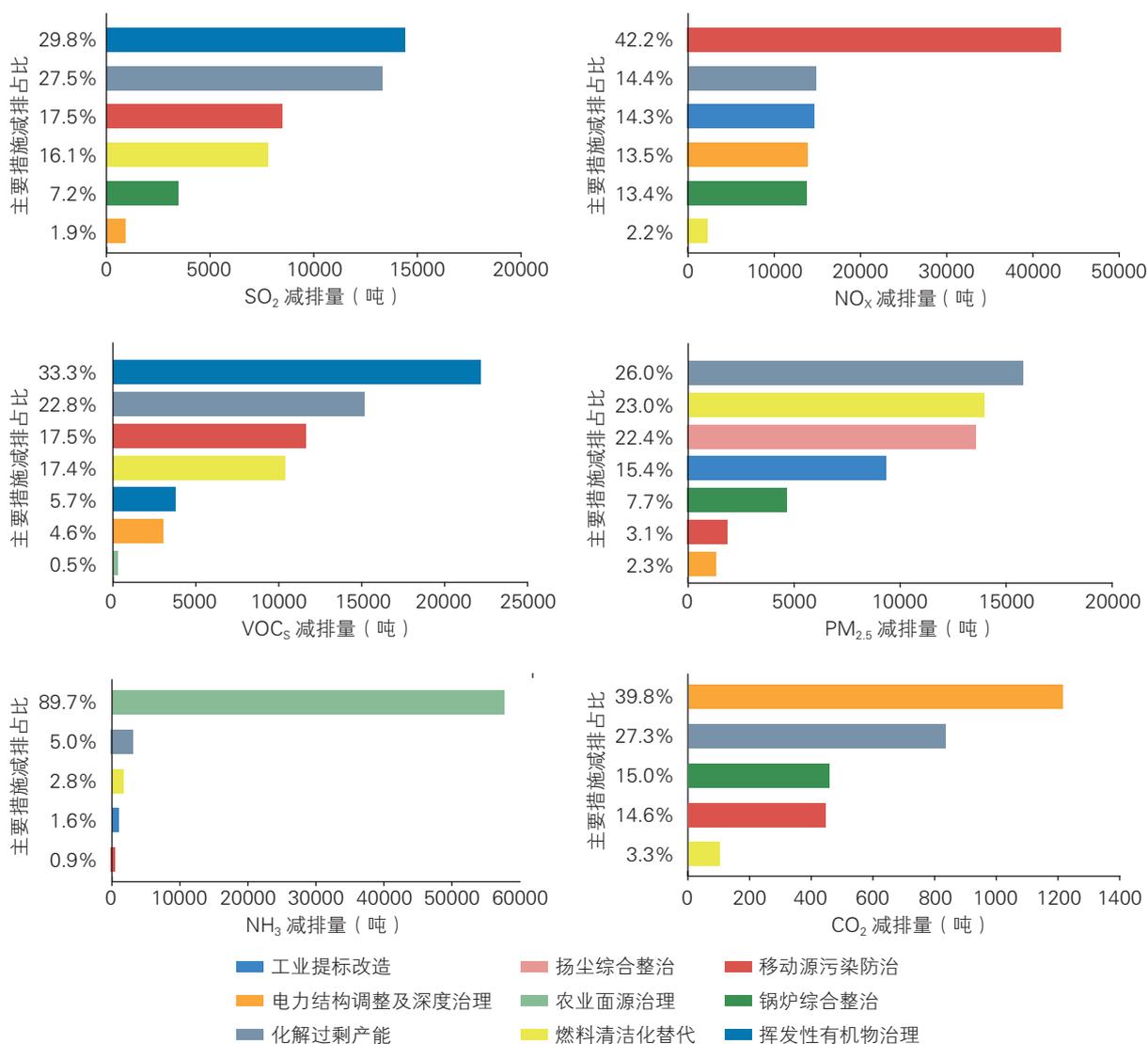


图 5-32 主要措施对污染物和 CO₂ 减排的贡献评估

少 228 万吨。推广洁净型煤，截至目前，全市型煤成品库存 10.3592 万吨，已配送到户 18.5170 万户，配送量 21.6130 万吨。持续推动锅炉治理，燃气锅炉氮氧化物治理任务 731 台，实际完成治理 888 台；生物质锅炉治理任务 90 台、燃油（醇基）锅炉治理任务 61 台，均已完成治理任务。

交通方面，截至 11 月份，共抽检重型柴油车 147224 辆，劝返 4854 辆，处罚超标车辆 1794 辆；具备条件的国四及以上排放标准重型柴油货车远程在线监控系统已全部完成设备安装并实现联网。

用地方面，持续加大对建筑工地的督导检

查，截至目前，共整改工地 1104 个，立案处罚 198 起、共罚款 410.3 万元。持续推进五星级工地评选工作，共评选 22 个项目 29 个标段。对主城区 43 条道路进行黄土裸露整治，整治面积约 30 万平方米。加强城区道路水洗机扫力度，城区道路机械化清扫率已达到 90%，县城建成区机械化清扫率已达到 85%，县（市、区）主干道机械化清扫率达到 100%。持续推进 279 处责任主体灭失矿山迹地修复绿化工作，目前 234 处完成验收。

“十三五”期间石家庄市大气污染物和碳减排措施协同效益（表 5-41）。

表 5-41 “十三五”协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	★★★
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
	优化能源结构	严格控制新增燃煤项目	★★★
		实施工业炉窑燃煤电能替代	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	★★★
交通	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
	运输结构调整	完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★
	提高重点行业能源利用效率	提高重点行业能源利用效率	★★★
民用	优化能源结构	建设城市绿色物流体系	★★★
		实施冬季取暖“煤改电”	★★★★★
电力	总量控制	实施冬季取暖“煤改气”	★★★
		严格控制燃煤机组新增装机规模	★★★
		削减电力行业低效产能	★★★★★
建筑	提高能效	实施禁煤区发电企业关停	★★★★★
		全面执行绿色建筑标准	★★
		积极发展超低能耗建筑	★★
		实施既有建筑节能改造	★★

5.3.3.5 “双达”目标

石家庄市的大气污染物浓度较高，即使“十三五”期间，大力整治大气污染，所有污染物浓度指标均有不同幅度下降，但是仍有多项污染物指标超标。目前石家庄市“十四五”环境保护规划文件正在编纂中。

石家庄市是全国重要的重工业基地，环境污染相对其他城市较为严重，近年来，全市在环境污染治理方面投入不断增加，相关减污降碳协同性工作正在进行中。

5.3.3.6 协同控制政策建议

石家庄市政府持续开展蓝天保卫战。编制生态环境保护、大气污染防治“十四五”规划，落实“退倒十”方案，优化调整产业、能源、运输结构，大力度压煤、减排、控车、抑尘，强化工业领域、塑料污染治理，实施多种大气污染物协同控制，推进重点行业无组织排放源治理，加快推进企业退城搬迁，严防“散乱污”企业死灰复燃。加强移动源排放控制，推进道路扬尘污染防治，加大道路工程施工污染防治力度，

强化非道路移动机械管控力度，常态化开展重型柴油货车尾气净化装置排放达标整治，严格落实汽车排放检验与维护（I/M）制度，有效减少尾气排放。强化扬尘精细化管控，全市建筑工地全面落实“六个百分之百”“两个全覆盖”，推动具备条件的城市道路“水洗机扫”全覆盖，强化线性工程扬尘治理，抓好矿山、砂场、工业企业堆料场扬尘防治，严禁秸秆垃圾露天焚烧。积极有效应对重污染天气，强化重污染天气区域联防联控，实施绩效评级差异化减排，实行生态环境监管正面清单制度，深入开展重点行业差异化精准治理，严禁“一刀切”式停限产。2021年全市PM_{2.5}控制在54 μg/m³左右，同比下降6%以上。

同时扎实推进碳达峰、碳中和。科学制定“碳达峰、碳中和”行动方案和配套措施。加强减污降碳协同，严控新增高碳工业行业产能，开展重点行业低碳化改造，推广应用控制碳排放新技术、培育碳捕集、利用和封存试点示范，配合做好重点企业温室气体排放数据报送系统建设，构建市、县企业互联互通的温室气体核算、报告、核查体系，积极推进碳排放权交易。2021年单位GDP二氧化碳排放下降率完成省下达任务。

表 5-42 “十四五”时期生态环境保护规划目标

类别	序号	指标名称	单位	2020年现状	2025年目标
环境质量改善	1	细颗粒物（PM _{2.5} ）年均浓度	μg/m ³	44.8	37
	2	城市空气质量达标天数比率	%	66.9	75
	3	氮氧化物重点工程减排量	万吨	/	14.05
	4	挥发性有机物重点工程减排量	万吨	/	5.64
应对气候变化	5	单位地区生产总值二氧化碳排放量降低	%	/	达到国家要求
	6	单位地区生产总值能源消耗降低	%	/	达到国家要求
	7	非化石能源占能源消费总量比例	%	/	13以上

表 5-43 石家庄市未来协同减排政策总结

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	★★★
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
	优化能源结构	严格控制新增燃煤项目	★★★
		实施工业炉窑燃煤电能替代	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	★★★
		提高重点行业能源利用效率	★★★
交通	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
	运输结构调整	完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★
	运输结构调整	提高铁路水路货运比例，发展多式联运	★★★
	运输结构调整	建设城市绿色物流体系	★★★
民用	优化能源结构	实施冬季取暖“煤改电”	★★★★★
		实施冬季取暖“煤改气”	★★★
电力	总量控制	严格控制燃煤机组新增装机规模	★★★
		增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★
		加快淘汰 30 万千瓦以下燃煤发电机组	★★★★★
建筑	提高能效	全面执行绿色建筑标准	★★
		积极发展超低能耗建筑	★★
		实施既有建筑节能改造	★★
		全面推广装配式建筑	★★

备注：★数量多代表协同效益明显



6 不同类型城市协同减排路径

服务型城市的特点是服务型企业占比大，工业企业占比较少，重工业企业逐步外迁，碳排放总量和强度基数不高，协同减排必须依靠交通、能源、产业、建筑等多方面由化石能源向非化石能源转型，大幅提高终端电气化水平，构建以电力为中心的、多能互补的综合能源系统，同时实现电力行业低碳转型。轻工业型城市，虽然轻工业能耗水平一般较重工业和能源生产行业低，但工业和服务业整体占比较高，碳排放总量基数不低，以主要提供生活消费品和制作手工工具的工业为支柱产业，是我国出口的传统优势产业。该类型城市创新能力相对较强，未来应当稳定发展传统轻工业产品，大力推动轻工业产业升级，同时加快高新技术产业发展，持续增强产业科技创新策源功能，加快产业智能化改造和数字化转型，大力培育生物医药、新一代信息技术、人工智能、新材料、新能源、节能环保等先进制造业集群。

6.1 综合服务业型城市

北京、深圳等服务型城市的特点是服务型企业占比大，工业企业占比较少，重工业企业逐步外迁，碳排放总量和强度基数不高，协同减排必须依靠交通、能源、产业、建筑等多方面由化石能源向非化石能源转型，大幅提高终端电气化水平，构建以电力为中心的、多能互补的综合能源系统，同时实现电力行业低碳转型。

交通方面，把绿色交通作为发展方向，控制机动车总量，倡导绿色低碳生活，降低机动车使用强度；不断升级车辆结构，推广有序引导老旧

机动车淘汰报废，全面推广新能源汽车、船舶、非道路移动机械。能源方面，提高可再生能源比重，加大绿色电力调入力度，在多领域实施电能替代，加大电力在终端能源消费中比重。产业方面，继续调整优化产业结构，大力发展“高精尖”产业，引导企业向绿色化、智能化、数字化方向转型升级。建筑方面，主要包括采用节能材料进行施工，安装节能环保电器设备，对老旧房屋进行节能改造。由于服务型城市人均生活水平较高，因此要加大宣传，倡导低碳生活方式，同时加大绿化碳汇。

表 6-1 综合服务业型城市主要协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
交通	总量控制	控制机动车保有量	★★★★★
		降低机动车使用强度	★★★★★
	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
电力	总量控制	加大绿色外电引入，减少本地发电量	★★★★★
		增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★
工业	产业结构调整	淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
建筑	提高能效	全面执行绿色建筑标准	★★
		积极发展超低能耗建筑	★★
		实施既有建筑节能改造	★★
		全面推广装配式建筑	★★
民用	源头管控	提倡低碳生活方式	★★
土地利用	用地结构调整	推进绿化碳汇工程	★★

备注：★数量多代表协同效益明显

6.2 偏轻工业型城市

成都、济南等轻工业型城市，虽然轻工业能耗水平一般较重工业和能源生产行业低，但工业和服务业整体占比较高，碳排放总量基数不低，以主要提供生活消费品和制作手工工具的工业为支柱产业，是我国出口的传统优势产业。该类型城市创新能力相对较强，未来应当稳定发展传统轻工业产品，大力推动轻工业产业升级，同时加快高新技术产业发展，持续增强产业科技创新策源功能，加快产业智能化改造和数字化转型，大力培育生物医药、新一代信息技术、人工智能、

新材料、新能源、节能环保等先进制造业集群。

另外，由于轻工业准入门槛较低，多数产品产能供过于求，还可能存在一些不规范的“散乱污”小企业，应当推进轻工业企业产业集群化，提高生产效率，降低生产成本与能耗，深度挖掘节能和能效提升的巨大潜力。能源方面，轻工业型城市应推动民用散煤清洁能源替代，实施住宅节能改造、提升住宅保暖性能。交通方面，应当提高燃油经济性以及在公用车辆中推广清洁能源车辆。

表 6-2 偏轻工业型城市主要协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	★★★
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
		整治“散乱污”企业	★★★★★
交通	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
	运输结构调整	提高铁路水路货运比例，发展多式联运	★★★
		完善公共交通，提高公共交通出行率	★★★
电力	总量控制	严格控制燃煤机组新增装机规模	★★★
		加快淘汰 30 万千瓦以下燃煤机组	★★★★★
	提高能效	增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★
建筑	提高能效	加快高效发电技术研发和应用，压减单位供电煤耗	★★★
		全面执行绿色建筑标准	★★
		积极发展超低能耗建筑	★★
		实施既有建筑节能改造	★★
		全面推广装配式建筑	★★

备注：★数量多代表协同效益明显

6.3 偏重工业型城市

唐山、郑州等重工业城市高耗能企业多，工业耗煤量大，单位 GDP 碳排放强度相对较高。从整体战略来看，在供给侧结构性改革的大背景下，去产能政策对支柱产业产能过剩状况严重的重工业型城市会造成经济上的压力，这些城市应当培育转换新动能、抓紧发展新机遇，实现转型发展。

重工业型城市一方面应当优先从水泥、钢铁、化工、有色金属等高耗能、高污染的重点行业的

基础设施入手，通过技术升级、节能改造、压减过剩产能和淘汰落后产能降低重工业基础设施的能源强度；另一方面应广泛开展工业锅炉改造、电机系统节能、工业余热利用等提高支柱产业能源效率。交通方面，重工业型城市由于涉及钢铁、建材、焦化、化工等行业的大宗物料运输，应当重点推动柴油货运汽车“公转铁、公转水”和多式联运，进一步优化大宗货物运输方式。

表 6-3 偏重工业型城市主要协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	严格控制高污染高耗能行业环境准入	★★★
		淘汰落后、低效产能，压减过剩产能	★★★★★
		发展节能环保、新能源等绿色低碳产业	★★★
	优化能源结构	严格控制新增燃煤项目	★★★
		实施工业炉窑燃煤电能替代	★★★★★
		实施工业炉窑燃煤天然气替代	★★★
交通	源头管控	淘汰老旧柴油货车	★★★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
	运输结构调整	提高铁路水路货运比例，发展多式联运	★★★
电力	总量控制	严格控制燃煤机组新增装机规模	★★★
		增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★

备注：★数量多代表协同效益明显

6.4 能源生产型城市

能源生产型城市依托当地资源开发建立起庞大的工业体系,为我国建立独立完整的工业体系、促进国民经济发展作出了突出贡献。然而,这类城市的可持续发展面临着严峻挑战,资源开发与经济社会发展、生态环境保护之间不平衡、不协调的矛盾日益突出。

能源生产型城市应当提高资源深加工水平,积极谋划布局战略性新兴产业,加快推进新型工业化。成熟型、衰退型和再生型能源生产型城市则应当发展支柱型接续替代产业,逐步增强可持续发展能力。

能源生产型城市存在单位产品排放水平很高的基础设施,仅依靠提高支柱行业基础设施的能效就能产生较为可观的协同减排效益,因此可优先从重点治理能源行业超大排放强度基础设施入手,重点推进支柱产业的节能减排与技术升级。

同时加大淘汰落后产能力度,逐渐改变高消耗、高排放的粗放型生产方式。此外,应当促进资源节约与综合利用,提高资源采选回收水平、强化废弃物综合利用。

我国煤炭储量丰富,许多能源生产型城市是煤炭型城市,这些城市的煤炭物流成本低、价格相对便宜,且销售渠道多、采购方便,煤炭供应相对有保障,所以人均散煤使用量更高。对于处于煤炭产区的能源型城市,如果改用电/气存在资源不足或成本过高的问题,可主要通过提升煤质和燃烧效率来推动协同减排,同时重点监管流通销售环节,严控劣质煤进入市场。

交通方面,应当加严机动车排放标准、提高燃油经济性以及在公用车辆中推广清洁能源车辆。能源生产型城市由于涉及大宗物料运输,因此还应当重点管控货运汽车,进一步优化大宗货物运输方式。

表 6-4 能源生产型城市主要协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	加大产业结构调整力度,扩大商业与服务业在经济发展中的占比和影响,构建多元化产业体系	★★★★★
		淘汰燃煤小锅炉,推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代	★★★★★
	能源结构调整	推进产业间配套协作,实现资源的多层次转化增值,打造新产业集群 提高能源行业清洁能源比例,提高发电效率 提高资源采选回收水平,强化废弃物综合利用	★★★★★ ★★★★★ ★★★★★
交通	源头管控	加严排放标准、提高燃油经济性	★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆、非道路移动机械和船舶	★★★★★
电力	总量控制	加快淘汰 30 万千瓦以下燃煤机组	★★★★★
	提高能效	增加可再生能源发电替代本地燃煤发电量	★★★★★
		加快高效发电技术研发和应用,压减单位供电煤耗	★★★
建筑	提高能效	进行民用节能灶改造和房屋节能改造,提高能源利用效率	★★★
		推动低碳工业园区和高新技术园区的建设、发展循环经济	★★★★★
民用	优化能源结构	进行燃煤清洁能源替换,如煤改电、煤改气	★★★
		推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料,给予相应补贴	★★★
		重点监管流通销售环节,严控劣质煤进入市场	★★★

备注: ★数量多代表协同效益明显

6.5 旅游型城市

旅游型城市集中在吉林、甘肃、湖南、贵州、广西等省份，人口较少，工业化程度、城镇化程度以及经济发展水平相对较低。多数旅游型城市位于生态保护区或旅游区，空气质量较好，对全国碳排放量贡献不到 2%。因此，这一类型城市的协同减排压力相对较小。规划与总体目标仍然以在保护生态的前提下发展经济为主，未来可因地制宜提升旅游休闲等服务功能，建设生态友好

型产业体系。工业方面，旅游型城市可能由于经济发展和技术水平限制，基础设施的能源强度相对较高，应当淘汰燃煤小锅炉，提高能效和清洁能源利用比例。此外，西部一些旅游型城市的空气污染主要来自于沙尘天气等自然因素，可主要通过加强生态建设、植树造林等措施，防治风沙、增加碳汇，实现进行协同减排。

表 6-5 旅游型城市主要协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	因地制宜发展特色产业	★★★★
		淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代	★★★★★
	能源结构调整	淘汰落后小火电	★★★★★
交通	源头管控	加严排放标准、提高燃油经济性	★★★
	优化能源结构	推广新能源车辆，首先在公用车例如出租车中推广纯电动汽车和混合动力汽车。	★★★★
电力	产业结构调整	发展清洁能源体系	★★★★
建筑	提高能效	进行民用节能炉灶改造和房屋节能改造，提高能源利用效率	★★★★
民用	优化能源结构	进行燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气	★★★★
		推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料，给予相应补贴	★★★
	生态	加强生态建设，植树造林	

备注：★数量多代表协同效益明显

6.6 农业型城市

农业型城市具有第一产业占比较高的特征，包括了重要的粮食产地和林业资源型城市。农业型城市的经济发展水平较低，但往往具有优越的自然生态禀赋或区位，未来可以以边境贸易、旅游等第三产业为先导，积极发展高新技术产业。同时，发展低碳农业，提升农业的产出率、资源利用效率和现代化水平，加强废弃物综合利用。

工业方面，目前农业型城市工业基础设施的能源强度相对较高，应当尽量提高能效和清洁能源利用比例。对于处于可开发地区的农业城市，

未来在工业化进程中应当尽量建设低碳节能的基础设施。民用方面，农业型城市应将加强对散煤流通销售环节的监管，推广洁净民用燃料和新型清洁高效燃煤炉具的使用，实施住宅节能改造、提升住宅保暖性能。在有条件的地区，也可进行燃煤清洁能源替换。交通方面，应当加严机动车排放标准、提高燃油经济性以及在公用车辆中推广清洁能源车辆。同时，加强农业机械排放和能耗标准，推广清洁能源农业机械。

表 6-6 农业型城市主要协同减排措施总结表

部门	领域	具体措施	协同效益
工业	产业结构调整	淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造和清洁能源替代	★★★★★
		提高能源行业清洁能源比例，提高发电效率	★★★★
交通	能源结构调整	大力发展高效节能锅炉窑炉、电机及拖动设备、余热余压利用和节能监测等节能装备	★★★★★
		加严排放标准、提高燃油经济性	★★★
		优化大宗货物运输方式，针对重型货车进行治理	★★★
建筑	源头管控	加强农业机械排放和能耗标准，推广清洁能源农业机械	★★
		进行民用节能炉灶改造和房屋节能改造，提高能源利用效率	★★★
民用	提高能效	进行燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气	★★★
		推广洁净型煤、兰炭、清洁焦等燃烧效率和热值高且较为清洁的民用燃料，给予相应补贴	★★★
农业	优化能源结构	重点监管流通销售环节，严控劣质煤进入市场	★★★
		提高使用化肥、农药的效率	★★
	提高资源利用率	科学处理农业废弃物，对秸秆、沼气等农业生产中的副产品进行资源再生和能源利用	★★★★★

备注：★数量多代表协同效益明显

7 结论与展望



7.1 结论

综合服务型城市最有可能先实现“双达”目标。

排放量位于前 20% 的城市集中在重点区域，如“2+26”城市及汾渭平原。全国城市排放高度不均等，排放量前 10% 的城市贡献了 27.9%–34.2% 的二氧化碳及主要污染物排放。分城市类型来看，综合服务业型城市整体排放规模最大，大气污染物和碳排放强度最低。农业型、旅游型城市整体碳排放规模最小。农业型城市排放强度较高，与经济相对不发达、污染控制较弱有关。旅游型城市的碳排放强度较低，但 PM_{2.5} 排放强度显著高于除农业型外的其他类型城市。偏能源生产加工型城市和偏重工业型城市的排放规模和排放强度整体大于偏轻工业型城市，说明偏能源生产加工型城市和偏重工业城市的产业结构更“重”，高耗能、高污染行业更为集中。

尽管 2012–2018 年全国碳排放上升了 7.6 亿吨，仍然有 129 个城市（28.9%）在此期间实现了碳排放下降。从碳排放与经济发展脱钩的情况来看，2012–2018 年间我国 60% 以上的城市未能实现 GDP 增长与碳排放的解耦合。同时，城市人均 GDP 和人均碳排放间整体呈现正相关关系，尚未出现库兹涅茨曲线的倒 U 型特征，说明即使发展水平较高的城市碳减排工作也仍有待进一步推进。进一步分析城市碳“达峰”情况发现，2012–2018 年间，133 个（30.3%）城市未出现“峰值”。237 个（69.7%）的城市曾经在 2018 年以前出现“峰值”，但其中 166 个城市在“峰值”年至 2018 年间未能保持碳排放持续下降趋势，在 2019–2020 年全国碳排放继续上升的背景下尚不足以判断它们碳排放已经达峰。分不同类型城市来看，偏能源生产加工型和综合服务业型城市中未出现“峰值”的城市占比高于其它类型城市，反映了它们推进碳达峰工作难度可能较大。从部门贡献来看，工业锅炉、水泥部门的减排是推动

大部分城市出现“峰值”的主要原因，而火电、工业锅炉部门碳排放增长则是导致大部分城市碳排放反弹的原因。

2012–2018 年，中国开展的清洁空气行动推动全国 87.5%–95.8% 的城市实现了 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 排放下降。其中，“2+26”城市和汾渭平原的 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 减排成效最为显著，珠三角的 PM_{2.5} 平均减排比例和长三角的 NO_x 平均减排比例则低于全国其它城市。对 VOCs 的针对性控制起步较晚，2012–2018 年间全国仅有 33.5% 的城市实现 VOCs 减排。

我国城市 CO₂ 的排放与主要污染物排放具有协同性，大气污染防治区域和碳排放高值区高度重合。综合来看，有 127 个城市实现了 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 CO₂ 的协同减排，65 个城市实现了 VOCs 和碳协同减排。分城市类型来看，农业型和综合服务业型城市的实现协同减排的情况最不理想。分部门来看，除了机动车碳排放在所有城市中都出现增加外，其它部门都在不同程度上实现了协同减排，其中焦化、有色金属、水泥部门实现协同减排的城市数量较多，油气生产、平板玻璃、民用等部门实现协同减排的城市数量较少。

碳达峰和提前达峰目标可分别推动全国 40.9% 和 77.1% 的城市在 2030 年前实现碳达峰，到 2030 年相对强化治污情景可推动中国年均人口加权平均 PM_{2.5} 浓度进一步下降 1.2 和 3.0 μg/m³。碳达峰与空气质量改善协同治理目标下，通过强化民用散煤替代、民用建筑节能、机动车电气化等污染减排协同度较高的协同措施，全国碳排放能在 2025 年达到峰值，75% 的城市实现碳达峰；同时，可额外实现 7.9 μg/m³ 的中国年均人口加权平均 PM_{2.5} 浓度下降效益。

7.2 减排措施总结

综合服务型城市的单位 GDP 碳排放水平是所有类型城市中最低的，但由于具有较高的经济发展水平和人口数量，排放绝对量较高。服务型城市工业部门的协同减排重点集中在提供二次能源的能源生产工业（发电和供热）以及部分重工业，具体措施包括淘汰老旧基础设施、技术升级以及清洁能源替换。

轻工业的能耗水平一般较重工业和能源生产行业为低。这一类型城市未来应当稳定发展传统产品，大力推动轻工业产业技术升级，同时加快高新技术产业发展。由于轻工业准入门槛较低，多数产品产能供过于求，还可能存在一些不规范的散乱污小企业，应当推进轻工业集群化，提高生产效率，降低生产成本与能耗。

重工业城市的高耗能企业多，工业耗煤量大，单位 GDP 碳排放强度相对较高，空气质量问题日益严峻。重工业型城市应当优先从水泥、钢铁、化工、有色金属等高耗能、高污染的重点行业的基础设施入手，通过技术升级、节能改造、压减过剩产能和淘汰落后产能降低支柱重工业基础设施的能源强度，提高清洁能源利用比例。同时，应当提高电力、热力生产行业的加工转化效率，

淘汰落后的小火电机组，鼓励工业企业自备电厂煤改气、采用热电联产及建设分布式能源站。

能源生产型城市存在单位产品排放水平很高的基础设施，仅依靠提高支柱行业基础设施的能效就能产生较为可观的协同减排效益，因此可优先从重点治理能源行业超大排放强度基础设施入手，重点推进支柱产业的节能减排与技术升级。同时加大淘汰落后产能力度，逐渐改变高消耗、高排放的粗放型生产方式。

旅游型城市人口较少，工业化程度、城镇化程度以及经济发展水平相对较低。这一类型城市的协同减排压力相对较小。规划与总体目标仍然以在保护生态的前提下发展经济为主，未来可因地制宜提升旅游休闲等服务功能，建设生态友好型产业体系。

农业型城市的经济发展水平较低，但往往具有优越的自然生态禀赋或区位，未来可以发展边境贸易、旅游等第三产业。目前农业型城市工业基础设施的能源强度相对较高，应当尽量提高能效和清洁能源利用比例。对于处于可开发地区的农业城市，未来在工业化进程中应当尽量建设低碳节能的基础设施。

7.3 城市“双达”建议

前文中6类城市可进一步归纳为资源型城市、工业型城市和服务型城市（如图8-1所示），分别代表城市化和工业化进程的不同阶段。资源型城市提供全国大量煤炭、石油、天然气等一次能源，以及电力、热力等二次能源以及粮食作物，为我国建立独立完整的工业体系、促进国民经济发展作出了突出贡献。但是资源型城市处于工业

化的初期，受经济发展和技术水平限制，资源型城市工业基础设施的能耗较高。在“碳达峰，碳中和”的整治号召下，资源型城市的可持续发展面临着严峻挑战，资源开发与经济社会发展、生态环境保护之间不平衡、不协调的矛盾日益突出。资源型城市包括农业型、旅游型和能源生产型城市。整体来看，资源型城市应当发展低碳农业，

因地制宜发展特色产业，将资源多层次转化，深度加工，增加产品附加值；优先发展高新技术行业，增强可持续发展能力。工业方面，资源型城市的基础设施能耗较高，应当淘汰燃煤小锅炉，提高能效和清洁能源利用比例。交通方面，应当提升农业机械排放标准和能耗标准。民用方面，资源型城市的市场上存在大量散煤违法销售现象，应当加强流通销售环节监管力度，严控劣质煤进入市场。

随着经济发展，城市对各种原材料加工品的需求日益增长，带动了工业的出现和发展，城市也相应的演化出新的类型——工业型城市。工业型城市的第二产业比较发达，工业型城市又可细分为重工业城市和轻工业城市。其中重工业城市为国民经济各部门提供物质技术基础的主要生产资料，该类型城市特点是高耗能企业多，工业耗煤量大，单位 GDP 碳排放强度相对较高，空气质量问题日益严峻。轻工业城市主要提供生活消费品和手工工具，轻工业的能耗水平一般较重工业和能源生产行业为低。整体来看偏重工业型城市

在削减产能的同时应当发展高新科技产业，为未来发展谋求动力，偏轻工业城市应当整治“散乱污”企业，推进轻工业集群化，降低成本与能耗。民用方面，工业型城市中市场上违法销售散煤的现象得到遏制，应当实施住宅节能改造、提升住宅保暖性能，同时进行进行燃煤清洁能源替换，如煤改电、煤改气。交通方面，应当控制燃油车数量淘汰老旧车，推广新能源车辆。

服务型城市单位 GDP 的能耗是最低的。服务业城市工业部门的协同减排重点集中在提供二次能源的能源生产工业以及部分重工业，具体措施包括淘汰老旧基础设施、技术升级以及清洁能源替换。民用方面，服务型城市的城区终端用能已经高度电气化，人均污染物排放量较低。市场上违法销售散煤的现象的到彻底解决。交通方面加快淘汰高污染、高能耗的老旧车辆；出台相应补贴政策，在公用和民用领域大力推广新能源汽车。以北上广深为代表的人口稠密且处于大气污染防治区域的服务型城市可采取限购等措施机动车保有总量。



图 7-1 城市不同发展阶段的“双达”策略

免责声明

- 若无特别声明，报告中陈述的观点仅代表作者个人意见，不代表能源基金会的观点。能源基金会不保证本报告中信息及数据的准确性，不对任何人使用本报告引起的后果承担责任。
- 凡提及某些公司、产品及服务时，并不意味着它们已为能源基金会所认可或推荐，或优于未提及的其他类似公司、产品及服务。

Disclaimer

- Unless otherwise specified, the views expressed in this report are those of the authors and do not necessarily represent the views of Energy Foundation China. Energy Foundation China does not guarantee the accuracy of the information and data included in this report and will not be responsible for any liabilities resulting from or related to using this report by any third party.
- The mention of specific companies, products and services does not imply that they are endorsed or recommended by Energy Foundation China in preference to others of a similar nature that are not mentioned.



中国城市空气质量达标与碳排放达峰方法及案例研究

Reaching Air Quality Standard And Carbon Peak In Chinese Cities:
Methodology And Case Studies