



河北省“十四五”大气污染防治与 温室气体协同控制策略研究

Research on the Cooperative Control
Strategy of Air Pollution and
Greenhouse Gas in Hebei Province
during the 14th five-year Plan

清华大学

2022.12.28

Tsinghua University

目录

第 1 章 引言	1
第 1 节 项目背景	1
第 2 节 排放清单构建方法	3
1.2.1 技术综述	3
1.2.2 排放因子	8
1.2.3 清单模型	9
第 3 节 污染治理措施评价方法	12
1.3.1 方法概述	12
1.3.2 排放计算	14
1.3.3 数值模拟	15
1.3.4 成本分析	20
第 4 节 能源与排放动态预测方法	24
第 2 章 大气污染物与温室气体排放现状	28
第 1 节 总量趋势	28
第 2 节 排放结构	31
2.2.1 部门贡献	31
2.2.2 能源贡献	36
第 3 节 排放驱动	41
第 4 节 部门特征	45
第 5 节 时空分布	58

第 3 章 大气污染治理措施效果与成本量化	67
第 1 节 措施整理	67
第 2 节 措施效果	69
3.2.1 排放变化	69
3.2.2 浓度变化	72
第 3 节 措施成本	74
第 4 节 协同评价	75
第 5 节 减煤评估	78
第 4 章 “十四五”减污降碳政策分析	84
第 1 节 “十四五”政策梳理	84
4.1.1 措施梳理	84
4.1.2 指标梳理	104
第 2 节 京津冀政策对比	108
4.2.1 措施对比	108
4.2.2 指标对比	111
第 5 章 大气污染物与温室气体排放预测与协同减排路径 ..	118
第 1 节 预测方法	118
第 2 节 情景设定	119
第 3 节 指标设定	122
第 4 节 参考路径	124

第 5 节 协同路径	129
第 6 章 问题与建议	138
第 1 节 问题总结	140
第 2 节 政策建议	146

第1章 引言

第1节 项目背景

党中央、国务院高度重视大气污染防治工作，要求把低碳发展作为我国经济社会发展的重大战略和生态文明建设的重要途径，有效控制温室气体排放。习近平总书记多次对打好污染防治攻坚战做出重要指示，对全面加强生态环境保护提出新要求。河北省委、省政府全面贯彻落实党中央、国务院关于大气污染防治工作的战略部署，以习近平生态文明思想为指引，坚持生态优先、绿色发展导向，以环境空气质量改善为核心，在推进产业、能源、运输和用地结构优化调整，实施重大污染减排工程等方面进展显著，大气污染防治工作取得积极成效。但河北省大气环境形势总体依然十分严峻，面临诸多问题：一是煤炭占比偏高，能源供应和消费结构导致能源利用效率较低；二是产业布局不尽合理，唐山、邯郸钢铁企业聚集，石家庄煤电围城，邢台重工业园区围城，钢铁、电力、工业园区布局与城市共融发展问题突出；三是重点行业产品产量反弹，2020年在新冠疫情对社会经济造成剧烈冲击的大背景下，河北省的钢铁、水泥等重点行业产品产量不降反升；四是交通运输结构以公路运输为主，公路货运比例为85.69%，显著高于全国平均水平。总之，河北省以煤为主的能源结构、高耗能的产业结构和公路为主的运输结构造成 NO_x 、 SO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等污

染物排放量居高不下。未来，在经济发展和快速城市化背景下，河北省面临着来自空气污染和气候变化问题的双重挑战。为进一步深入贯彻习近平生态文明思想，坚决打好污染防治攻坚战，巩固河北省大气污染防治成果，开展本项研究工作，旨在促进河北省大气污染物和温室气体协同减排，助力河北省大气环境质量的持续改善与社会经济的绿色低碳发展，为相关政策的制定提供科技支撑。

本项目的目标有二：

(1)利用河北省“十三五”期间大气污染防治措施费用效果评估的技术方法，在排放预测模型框架下，分行业构建减排成本分析模型，分析河北“十三五”措施的减排成本。

(2)利用温室气体和常规污染物的协同管控技术分析方法，在“十四五”期间能源消费量预测结果基础上，结合有关法规、政策及标准对新建污染源、现役污染源的污染治理要求，考虑各行业的各类控制措施，探究河北省“十四五”温室气体和空气污染物排放的协同控制路径，为推进政策拟定及政府决策提供科学合理的依据。

考虑以上技术目标，本项目的技术路线如图 1-1 所示：

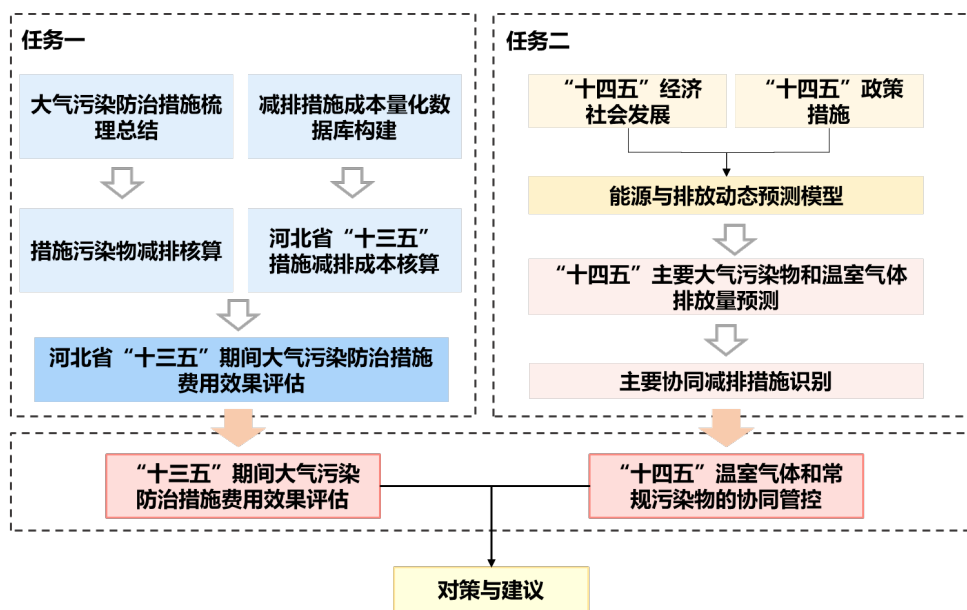


图 1-1 项目总体技术路线

第2节 排放清单构建方法

1.2.1 技术综述

大气污染物排放清单（以下简称排放清单）指各种排放源在一定时间跨度和空间区域内向大气排放的污染物量的集合。它描绘了地气通量和海气通量变化，刻画了大气痕量组分从不同介质的释放过程，是研究全球生物地球化学循环（如碳、氮、硫、铁元素循环）、分析大气组分变化、解释大气观测资料的重要数据基础，对研究大气反应历程、理解污染形成机制具有重要意义。

在空气质量管理方面，排放清单是识别污染来源、制定减排方案、评估治理效果的重要工具；高质量的排放清单是各个国家进行空气质量管理的基礎。以美国和欧洲为例，美国于 1963 和 1970 年分别颁布实施了《清洁空气法》和《清洁空气修正法》，由美国环保局主导逐

步建立清单编制的方法框架、完备的数据库、排放源处理模型和清单校验制度，在此基础上开发了国家排放清单（National Emission Inventory, 简称 NEI）。欧洲于 20 世纪 80 年代起开始进行排放清单的开发，采用各欧洲国家统一公开的方法学编制了 CORINAIR 和 EMEP（The European Monitoring and Evaluation Programme）系列排放清单，覆盖了欧洲 30 多个国家和 200 多种主要的人为排放源，保障了污染控制措施制定的科学性和有效性。IGAC 主导的大气化学核心研究也曾阐明，大气污染物通过一系列物理和化学转化影响大气组分，形成对全球气候、生态和人群健康的单向作用或双向反馈，最终影响经济社会发展策略以调控和管理污染物排放。在这一过程中，认识并理解大气污染物排放既是研究工作的基础和出发点，也是政策管理的落脚点。

排放清单根据研究角度和计算尺度不同，具有多种分类方法。根据排放来源可分为人为源排放清单和天然源排放清单，人为源排放指由人类活动引起的大气污染物排放过程，如燃料燃烧、工业生产、氮肥施用、涂料使用等生产和生活活动；天然源排放指产生大气污染物排放的自然现象，如火山喷发、高空闪电、植被排放。人为源和天然源排放强度和时空范围差异较大，与天然源相比，人为源排放持续而集中，SO₂、NO_x、CO₂ 等主要大气污染物和温室气体均由人为源排放主导。根据研究尺度，可分为全球、区域和局地排放清单。全球清单一般在国家尺度建立，基于宏观经济部门计算主要大气污染物排放，

一般覆盖的排放源种类较少；区域清单在国家或区域尺度建立，计算尺度在省或州一级，排放源类型具体到行业；局地清单一般在城市尺度建立，排放源类型和计算尺度高度细化。近年来出现了将各地区精度最好的区域或局地清单拼接构建大尺度、高分辨率清单的技术方法，该方法形成的排放清单既能覆盖全球或半球尺度，又能在重点地区获取与区域或局地清单相当的数据精度，是当前研究热点之一。

图 1-2 总结了排放清单技术研究现状和主要进展。排放清单技术主要解决排放清单“从无到有”的问题，即如何基于合适的排放源分类体系构建排放表征模型，对主要影响因素建模参数化，最终建立完整排放清单。该方向目前形成了一系列共性技术方法，包括排放动态表征、不确定性评估、历史趋势重构、未来排放预测等清单技术方法，以及排放源处理模式和高分辨率清单技术等与大气化学模型的对接技术。共性技术方法在局地和全球/区域尺度的应用面临不同数据基础和技术挑战，分别形成多源数据同化的局地清单技术特点和大尺度、长序列、多视角的全球/区域清单技术特点。建立大尺度、高分辨率的排放清单已成为排放清单技术方法的研究热点和学术前沿

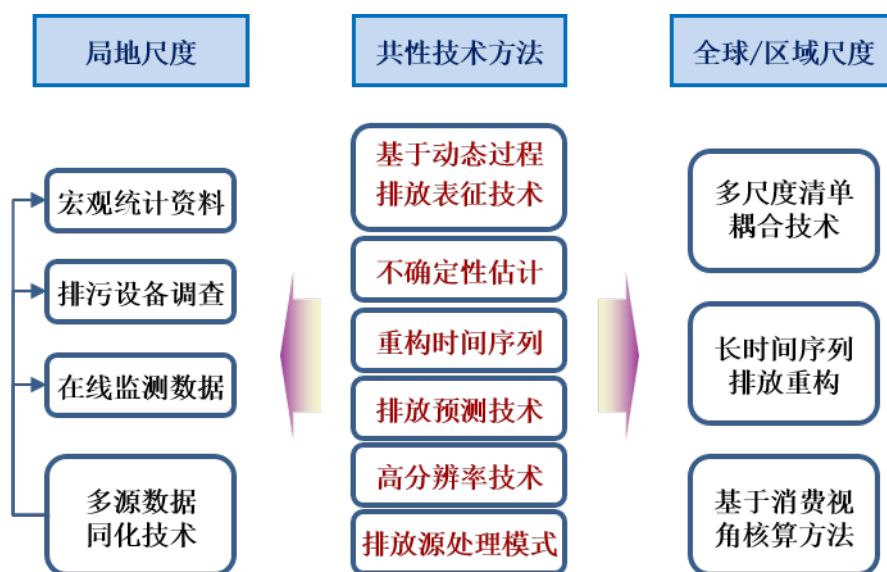


图 1-2 排放清单技术方法

图 1-3 展示了排放特征分析的主要技术特点。该类研究主要从排放组成、时变特征和空间分布三个方面展开，分别对应排放量、时间变化和空间分布三个维度，从整体研究排放强度特征及排放产生的时空范围。

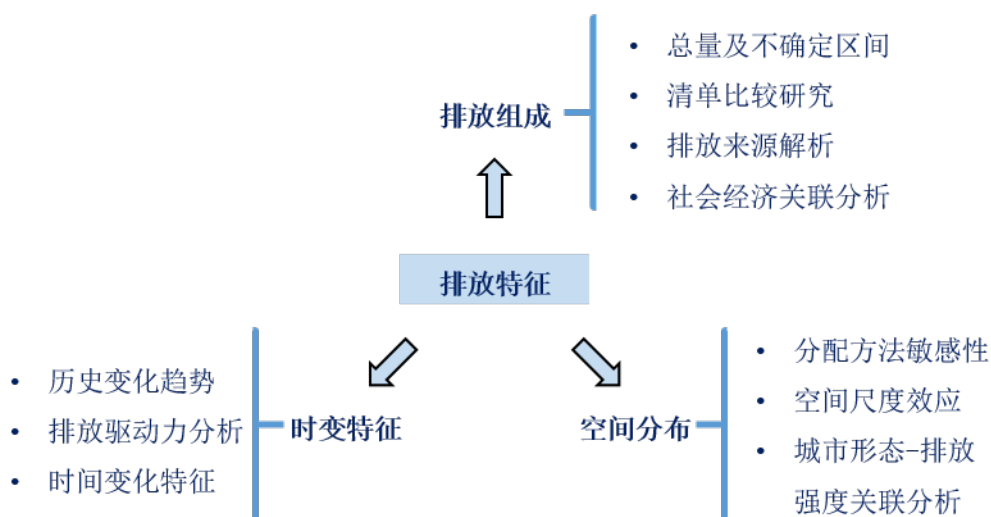


图 1-3 排放特征分析研究

排放组成研究侧重分析排放总量、不确定区间和排放部门分布，通过不同清单比较研究寻找清单改进方向。排放时变特征关注排放年

际和月际变化，分析排放变化的主要驱动力和影响因素，同时关注排放小时变化，反映排放源强的动态活动特征。排放空间分布研究关注排放分布形态，包括排放空间化方法及排放空间分布规律。需要特别指出的是，随着高分辨率排放清单技术的发展，排放空间分布研究逐渐呈现出新的研究视角和成果。例如，基于高分辨率排放强度分布与城市发展形态的关联分析，探索有助于形成低排放区的城市形貌特征，为制定可持续的城市发展策略提供支持。多尺度高分辨率排放清单比较研究发现，排放空间分布在不同分辨率下存在显著的“尺度效应”，即排放空间分布特征对网格大小高度敏感，某一网格尺度只能代表相应分辨率的排放分布规律，某一空间分布特征也只能在特定网格尺度表现出来，这是清单空间分布不确定性的来源之一。

我国在排放清单领域的研究进展与国际学术前沿相比仍有一定差距，尤其是排放清单在管理决策中的应用水平与发达国家相比存在较大差距。在研究进展方面，高分辨率清单技术进展相对缓慢，尚未形成完备的技术方法和坚实的数据基础，建立的清单分辨率和排放表征精度与世界先进水平相比仍存在一定差距。在管理决策方面，由于高分辨率清单普遍缺乏，通常将宏观区域清单降尺度嵌套到城市和局地应用，以此为基础开展空气质量管理。但该方法存在较大的数据偏差，无法有效支撑科学管理决策。因此，积极开展高分辨率清单技术方法及精度评估研究，开发大尺度的高分辨率排放清单，具有重要的科学价值和现实意义。

1.2.2 排放因子

排放因子是构建排放清单的重要组成部分，排放因子的估算是排放清单不确定性的重要来源之一。

排放因子获取方法一般包括实测法、物料衡算法和文献调研法。

实测法是指针对重点排放源开展实际排放系数测试，获取反映研究区域污染源实际特征的排放因子数据的方法。应在排放源正常运行条件下开展测试，以捕捉源类的平均排放水平。

物料衡算法是指通过对输入和输出物质详细分析确定产生系数，再结合污染控制设备或措施的去除效率获取排放因子，大型和中型燃煤设备的 SO_2 和颗粒物，以及溶剂使用源的 VOCs 排放因子可采用物料衡算法估算。

受测试条件与方法适用性的限制，多数源类排放因子需通过文献调研法来获取。此处所指的文献，不仅包括已发表的科研论文与学术报告，也包括已建成的排放因子库。国外主流的排放因子库有《美国 AP-42 排放因子手册》、《欧盟 EMEP/EEA 排放因子库》、《IPCC 国家温室气体清单指南》。国内排放因子库可参考《排放源统计调查产排污核算方法和系数手册》、《城市大气污染源排放清单编制技术指南》、《省级温室气体清单编制指南》。

本研究采用文献调研与排放实测相结合的方法，建立了本土化的主要大气污染物与温室气体排放因子库，并应用在河北省排放清单的编制中。根据研究建立的排放源分类分级体系，逐源开展文献调研工

作，搜集了国内外排放因子测试结果以及主流排放因子库数据，建立了排放因子数据优选规则，综合评定排放因子测试值的质量等级，最终逐源确定能够表征河北省大气污染与温室气体排放特点的排放因子。

1.2.3 清单模型

中国多尺度排放清单模型（Multi-resolution Emission Inventory for China，简称 MEIC）由清华大学开发并维护，旨在构建高分辨率的中国人为源大气污染物及二氧化碳排放清单，为相关科学研究、政策评估和空气质量管理提供基础排放数据支持。

MEIC 是基于自下而上技术方法构建的排放清单模型框架，包括了统一源分类分级体系、排放因子数据库、排放动态表征技术、多尺度高分辨率排放源模式、清单云计算平台等多个组成部分，实现了从建立排放清单所需的基础数据开始，到生成空气质量模型需要的排放数据立方体这一完整过程的动态连续处理，可完成多年度、不同空间尺度、多化学组分的排放清单开发以及与空气质量模型之间的无缝对接。

MEIC 模型涵盖了固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源和废弃物处理源等多个大类人为排放源。每类排放源按照部门/行业、燃料/产品、燃烧/工艺技术以及末端控制技术分为四级，自第一级至第四级逐级建立完整的排放源分类分级体系，以第四级作为排放清单的基本计算单元。共计包括了 700 多种人为排放源。

针对我国污染源技术水平跨度大、构成复杂且更替速度快的特点，MEIC 模型建立了基于技术和动态过程的排放表征方法，定量解析了主要大气污染物排放与燃烧技术、工艺技术和污染控制技术更替之间的多维响应关系，构建了能源消耗-工艺过程-排放特征之间的动态耦合模型，建立了第四级排放源与活动水平、工艺技术和排放因子数据库的完整映射，通过捕捉活动水平的变化和工艺技术的演变，实现排放清单的动态计算和快速更新。

对于电力、水泥、钢铁等主要工业排放源，MEIC 模型采用基于工艺过程的排放表征方法，按逐个排污设备计算大气污染物的排放量。对于同一个排污设备，模型追踪了其全生命周期中的工艺技术演变过程，从而能够动态表征由于活动水平变化、技术进步、排放标准加严等因素引起的排放变化。

对于民用源，MEIC 模型基于覆盖中国大多数省份上万份入户调查数据，系统修正了能源统计年鉴中民用散煤和生物质燃料消耗量的统计误差，为民用源排放表征模型的建立提供了更为准确的活动水平及技术分布参数化方案，减少了民用源排放清单的不确定性。

对于道路机动车排放源，MEIC 采用了包括气温、湿度、海拔、工况等参数的排放表征模型，结合逐时气象场、机动车排放因子模型、路网信息和交通流数据，构建了高分辨率机动车动态排放清单，将机动车排放清单的时空分辨率分别从年提高到小时、从省提高到县。

MEIC 模型通过自主研发的多尺度高分辨率排放源模式完成网格

化排放清单的开发以及与空气质量模型的无缝对接。MEIC 排放源模式包括时间分配、空间分配、化学成分分解三个模块。时间分配模块在第三级排放源层面建立排放月变化系数、周变化系数和日变化系数，将年排放量分配到小时。空间分配模块在第三级排放源层面上分点源和面源建立水平和垂直方向上的排放分配方法，将排放量分配到与空气质量模型对应的三维网格。化学成分分解模块基于源特征谱-化学机制映射关系开发，将 NMVOC 和颗粒物排放分配到单个组分并映射到化学机制物种。

本项目依托 MEIC 排放清单，结合重点行业总量核查全口径数据、环境统计数据，对 2015-2020 年河北省全域及其下辖 11 个地级市（包括石家庄、承德、张家口、秦皇岛、唐山、廊坊市、保定市、沧州市、衡水、邢台、邯郸，地理分布见图 1-4）主要大气污染物与温室气体的部门排放变化特征与地区分布差异开展分析研究。

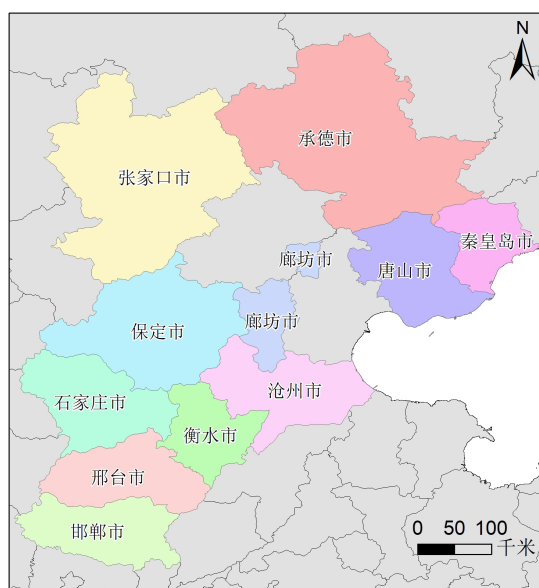


图 1-4 河北省行政区划

第3节 污染治理措施评价方法

1.3.1 方法概述

由于工业化及交通工具的迅速发展，城市化进程加快，导致煤、石油、天然气等化石燃料大量消耗，带来了大气环境污染。世界气象组织（WMO）自 2001 年起就对城市空气污染及不同排放控制策略的影响评估等内容开展了研究。已有研究主要从定量分析和定性分析两个角度探讨大气污染控制政策对空气质量影响。

定性分析，是指通过观测测量或文献调研，获取所需的污染物浓度数据或其他表征空气质量的指标，比较污染控制政策执行前后的各项污染物浓度或空气质量指标的变化情况，进行简要、直观的对比分析。定性分析由于没有综合考虑同种污染控制政策对多种污染物的作用、不同污染控制政策对污染物的协同影响、气象条件变化造成的差异等其他影响空气指标的因素，结果通常存在较大的不确定性。

定量分析，是指采用基于回归模型的统计学方法、基于实际活动水平的排放清单方法、或基于空气质量模型的数值模拟方法，量化研究大气污染控制政策的实施影响。在基于回归模型的统计分析定量研究方面，研究者通常采用回归分析计量建模的方法，常见的有 OLS 回归方法和 DID 双重差分法。OLS 回归方法可以分析因素之间更高次幂或交互影响，但会忽视其他治理污染政策的影响，忽略内生性问题。DID 双重差分法要求实验组和控制组除了待研究的政策外，其他方面要具有一定的相似性，否则会产生有偏回归结果，因此控制组的选择

至关重要。

随着基础数据的不断丰富与相关模型的不断改进，研究者们就利用排放清单模型和空气质量模型评估大气污染治理措施的环境效益形成了成熟的方法学。措施效益后评估的思路可概括为，通过固定能源消耗、产品产量、控制技术等因素保持在历史时期的水平，定量不同维度的历史变化对区域大气污染物排放与浓度的影响。利用空气质量模型模拟控制措施对空气质量改善的贡献时，评估结果的准确性与排放源清单的可靠性密切相关。本项目将基于详实的基础数据，运用MEIC 排放清单模型捕捉各类措施对不同源类排放的动态影响。

大气污染治理是一项艰巨复杂的任务，措施的实施需要大量资金投入。近年来，《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》先后实施，我国空气质量明显改善，这一过程中各级政府与企业投入了大量人力、物力、财力。生态环境部环境规划院曾对《大气污染防治行动计划》的投入成本进行测算，考虑了产业结构与布局调整、能源清洁利用、工业污染治理、锅炉改造与治理、面源污染治理、机动车污染治理、监管能力建设等 7 个方面政策共计 21 项措施，发现全国 30 个省 2013-2017 年《大气污染防治行动计划》实施总费用为 16511 亿元。考虑到实施成本对政策选择的重要影响，本项目使用减排成本核算模型，计算了各项措施的实施成本，为决策者提供更多有益参考。

1.3.2 排放计算

本项目收集整理了河北省“十三五”期间实施的主要空气污染治理措施（如“大气污染行动防治计划”“蓝天保卫战”、北方清洁采暖改造、钢铁行业超低排放改造等），通过对政策内容、实施细则、目标责任书的细致整理，从能源结构调整（电力结构调整、民用燃料清洁化）、产业结构调整（落后产能淘汰、散乱污企业整治）、运输结构调整（公转铁、交通清洁化、机动车排放标准升级、老旧车辆淘汰）、用地结构调整（农业源、扬尘源综合整治）、末端治理工程（电力、钢铁、焦化等行业超低排放改造、工业末端治理升级）5 大方面提取措施细节与量化参数，并汇总为燃煤锅炉整治、民用能源清洁化、落后产能淘汰、散乱污企业清理整治、移动源排放管控、农业综合治理、扬尘综合治理、工业提标改造、电厂超低排放改造、挥发性有机物源头替代、重点行业挥发性有机物治理共计 11 项措施。

根据年度实施情况自查报告及其附表、重点行业总量核查数据、大气污染防治目标责任书等资料，逐条分析、量化每则细化措施对能源消费数据、能源效率、工业产品产量、技术分布和末端控制水平的影响，在此基础上，依托 MEIC 排放清单模型测算河北省 2016-2020 年间 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及 VOCs 等主要污染物以及温室气体的变化状况，具体技术路线如图 1-5 所示。

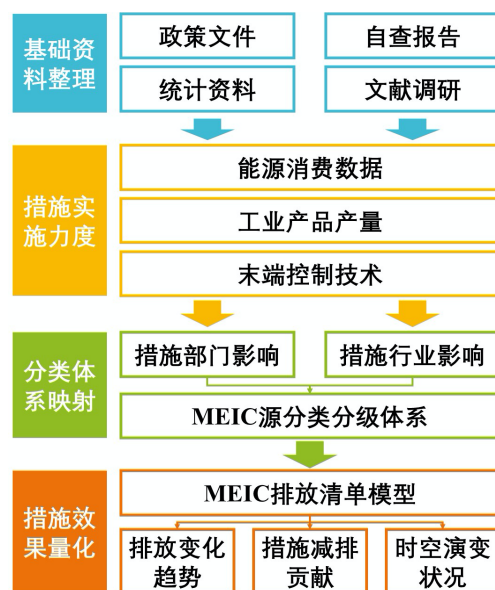


图 1-5 污染治理措施效果量化技术路线图

对不同措施减排量与减排贡献进行逐一量化的方法是：

- （1）假设到 2020 年未实施该措施，则与该措施相关的能效水平、技术水平和末端控制水平均维持 2015 年时的状态；
- （2）基于该假设得到 2020 年相关源类的活动水平与排放因子，核算出对应的大气污染物与温室气体排放量，即 2020 年未执行该措施的无控排放量；
- （3）通过对比 2020 年的无控排放量与实际排放量，即可分析出该措施的减排量与减排贡献，为后续空气质量改善与成本评估提供基础数据。

1.3.3 数值模拟

大气颗粒物是由悬浮于大气中的固—液多种粒子组成的粒径、形状和化学组成各异的复杂体系。PM_{2.5} 是空气动力学直径小于 2.5μm 的细模态粒子，能够进入肺泡对人体造成严重的健康影响，是目前最

受关注的大气污染物。大量的流行病学研究证实暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 中会对人体健康造成不良的影响，包括增加心血管疾病与呼吸道疾病的发病概率甚至造成人群过早死亡。目前研究认为 $\text{PM}_{2.5}$ 对人体健康的负面影响并不存在浓度阈值下限。此外，由于粒径范围与可见光波长范围接近， $\text{PM}_{2.5}$ 对可见光具有很强的散射能力，会造成能见度的显著下降，引发灰霾天气。另一方面， $\text{PM}_{2.5}$ 还会通过改变地表辐射强迫和影响云微物理特性改变地、气辐射收支平衡，进而对气候系统和局地天气系统产生影响。同时， $\text{PM}_{2.5}$ 沉降也会对生态系统产生一定的负面影响。

对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染变化的评估通常以长时间序列的地面观测数据为基础。但在 2012 年之前， $\text{PM}_{2.5}$ 并不属于《中国环境空气质量标准》关注的污染物，因此以往的环境空气质量常规监测并未将 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度纳入监测范畴，政府环境公报中也未对 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度进行报道，仅有少数科研机构对开展了 $\text{PM}_{2.5}$ 的监测工作，并在部分研究成果中报告 $\text{PM}_{2.5}$ 了浓度结果。然而这些研究存在空间覆盖有限、时段覆盖各异、观测手段不一等问题，不利于定量评估空气质量的变化情况。

空气质量模式（大气化学传输模式）是一种获取环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空分布的有效工具，能够提供时空连续的近地面 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度信息，被广泛用于空气质量评估工作。环境 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度由大气污染物排放速率和气象条件决定，并受到大气物理过程和大气化学过程的影响。空气质量模式（大气化学传输模式）基于当前科学研究对大气物理和化

学过程的认知，利用数值模拟的方法，将与空气质量相关的大气物理化学过程进行参数化，进而定量描述大气污染物的迁移和转化的模型。空气质量模型具有计算消耗大且精度较低的劣势，但能够提供完整时空序列的模拟结果，这点其他类型的数据集难以实现。同时，空气质量模型能够通过调整排放清单和气象参数来设计敏感性实验，更好地服务于政策评估的相关研究。

空气质量模型的研究始于 20 世纪 60 年代，随着研究的逐步深入，对大气过程的理解也逐渐加深，空气质量模式也已发展至第三代。第一代模型从高斯扩散模型衍生而来，采用简单线性机制，缺少或仅采用简单的化学反应模块，代表模型包括 ISC（Industrial Source Complex Model）、CALPUFF 和 EKMA（Empirical Kinetics Modeling Approach）。第二代模型以欧拉网格模型为基础，相比于第一代模型显著改进了化学模块的表现能力，用于研究酸沉降和光化学污染等“单一污染问题”，但缺少大气污染过程之间的耦合。第二代模型的代表模型包括 UAM（Urban Airshed Model）、RADM（Regional Oxidant Model）和 ROM（Regional Acid Deposition Model）。第一代和第二代模型的化学模块均无法详细描述大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的生成机制，难以准确模拟 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空分布。建立在“一个大气”思想基础上的第三代空气质量模型则能够将多种污染物的物理、化学过程统一在一个模型框架内，使空气质量模型能够用于研究“多尺度多污染问题”，显著增加了空气质量模型对决策支持的可靠性。目前研究多采用第三代空气质量

模型进行空气质量模拟和决策评估，常用的模型包括 CAMx（Comprehensive air quality model with extensions）、CMAQ（Community Multi-scale Air Quality Model）、WRF-Chem（Weather Research and Forecasting model coupled to Chemistry）以及 GEOS-Chem（Goddard Earth Observing System-Chemistry）。

WRF 模型（Weather Research and Forecasting model）是为满足大气科学研究和业务化预报需求由美国国家大气研究中心（NCAR，National Center for Atmospheric Research）主持开发的下一代中尺度数值天气预报系统。WRF 模型包含两个动态求解系统，分别是由美国国家大气研究中心开发的 ARW（Advanced Research WRF）和由美国国家环境预报中心（NCEP，National Centers for Environmental Prediction）开发的 NMM（Nonhydrostatic Mesoscale Model）。目前多数研究采用 ARW 动态求解系统的 WRF 版本来进行气象参数的模拟。本项目参考当前主流研究，采用基于 ARW 动态求解系统的 WRF 模型来模拟中国地区气象参数的变化情况，为后续空气质量模拟提供气象场输入。CMAQ 模型（Community Multi-scale Air Quality model）是由美国环保署（EPA，Environmental Protection Agency）主持开发的第三代空气质量模型，能够支持多尺度多污染物浓度的模拟。

本项目利用 WRF-CMAQ 搭建空气质量模拟框架，再现了河北省 2015 年-2020 年的空气质量，分析了河北省“十三五”期间主要大气污染治理措施对对空气质量改善的贡献，技术路线如图 1-6 所示。

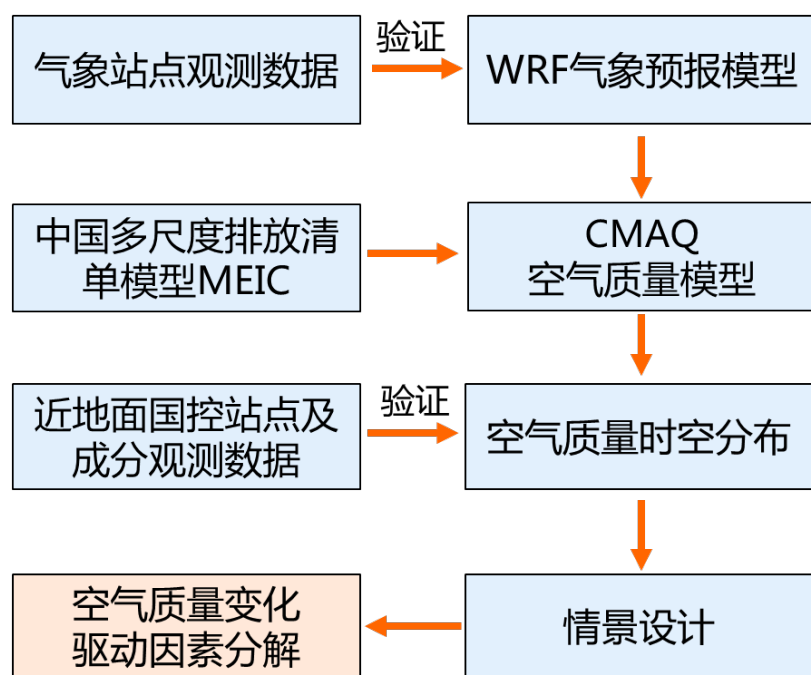


图 1-6 空气质量模拟技术路线

根据 1.3.2 节获得的主要措施减排量与减排贡献，本项目设计了一个基准模拟实验和 11 个敏感性模拟实验来定量 11 项减排措施对空气质量改善的贡献。基准实验采用 2020 年气象条件和 2020 年实际排放量获得 2020 年基准 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟值。针对某个具体措施的敏感性实验，是在基准实验的基础上，在人为源排放中加上该措施的减排量（即未实施该措施时的人为源排放量），同样使用 2020 年的气象条件驱动 CMAQ 模拟，获得敏感性实验的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟值。敏感性实验模拟结果与基准实验模拟结果的差值即为基于模拟的该措施对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献。在此基础上，利用观测到的 2015-2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度实际下降量对基于模拟的措施贡献进行归一化处理，得到每类措施对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献。

1.3.4 成本分析

环境政策的成本分析是对环境政策制定和实施后对经济社会发展和生态环境等方面所产生的费用进行科学评判的一种行为，被广泛应用于各种项目方案的评价之中。20 世纪 70 年代以来世界范围内多次发生环境公害事件促使经济学家寻求更加有效的方式对环境质量变化的危害和治理效益进行评价，成本核算方法得到了快速发展和应用。美国、欧盟、日本等国家已形成了全面系统的费用分析技术指南和工作规程，且在环境决策中被普遍应用。然而，在中国，环境政策的成本分析尚未引起足够重视，相关研究尚处于起步阶段。已有的部分研究聚焦于污染物减排量的评估，或是单项的末端治理成本，缺乏环境政策整体费用的系统性分析。当前，我国已在大气污染治理方面投入了较大成本，随着治理进程的深入，污染物减排空间逐渐收窄，减排难度日益增大，下一阶段大气污染治理边际递减效应将逐步显现。从成本核算的视角评估措施的减排效益，可以识别出具有较高边际收益的措施，以便于决策者在政策制定过程中优选经济有效的治理方式实现环境质量的改善目标。

为合理测算政策减排成本，本项目基于中国近年来的能源转型与污染治理成本信息，在省级尺度上建立了中国减排成本核算模型。模型的方法学框架如图 1-7 所示，包含减排成本计算和减排成本数据库两个主体模块；由综合评估能源模型提供未来的能源使用量、可再生能源发电量、终端用电设施及用电量、CCS 技术比例等信息；由未来

排放预测模型提供未来各排放源活动水平变化、生产/燃烧技术分布演化、污染去除技术分布演化等信息。

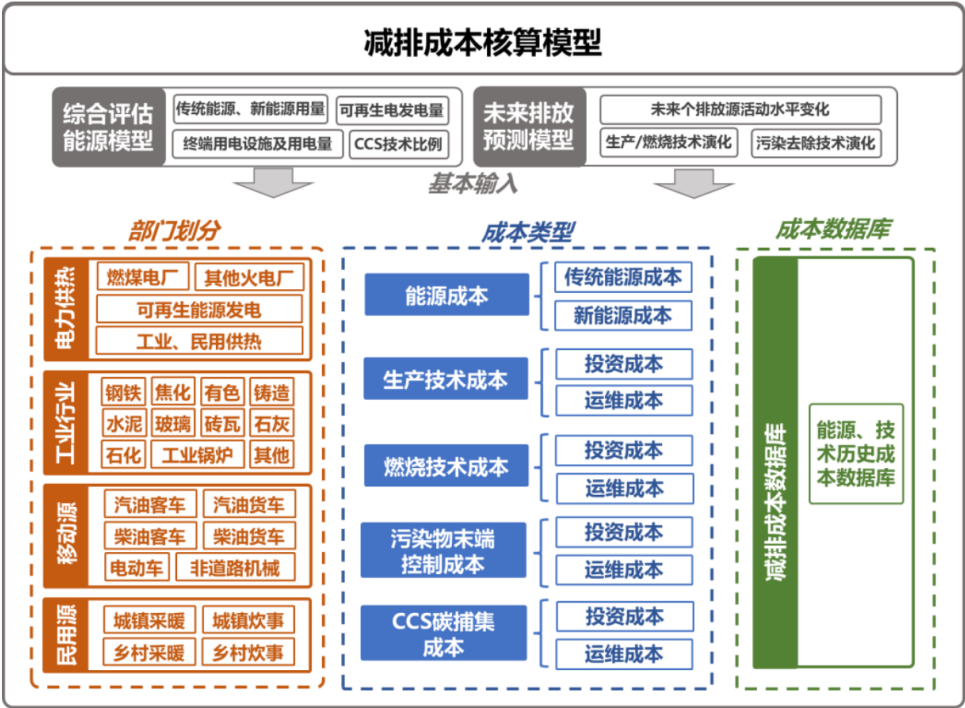


图 1-7 减排成本核算模型框架

从部门划分看，减排成本核算模型针对电力供热、工业行业、移动源、民用源分别构建，共分 28 个精细化部门；其中燃煤电厂、钢铁、水泥、石化在设备层面构建，汽/柴油客/货车在车辆层面构建，其他精细行业则在技术层面构建。相较多数已有的成本曲线模型，其依据污染物减排量和不同减排率区间下的单位成本来计算技术减排成本，本项目构建的减排模型可以更真实地刻画未来不同路径下技术演替的实现成本。

从成本类型看，减排成本主要包括各行业减排技术的投资成本、运维成本，和能源消耗成本。其中，减排技术包括新型生产技术、燃烧技术、污染物末端控制技术、CCS 碳捕集技术等；能源类型包括煤、

石油、天然气等传统化石能源和可再生能源、电力、氢能、生物质能等新能源。

在成本数据库方面，通过文献调研、项目报告数据采集等方式，在全国和省级层面上收集了近年来不同行业的各类生产技术、燃烧技术、碳捕集与封存技术、污染物末端治理技术成本数据和燃料（燃煤、燃油、新能源等）成本数据，构建了源分类完整、时效性强的减排成本数据库。表 1-1 以电力行业减排措施技术投资成本为例，展示了本项目措施成本评估所用的基础数据库。

表 1-1 电力行业减排措施技术投资成本数据库

技术类型	减排技术	投资成本	成本单位
能效提升-燃烧技术	整体煤气化联合循环机组	7200000	CNY/MW
	超超临界机组（100-300MW）	3700000	CNY/MW
	超超临界机组（<100MW）	4800000	CNY/MW
	超超临界机组（>300MW）	3700000	CNY/MW
	循环流化床（CFB）	4000000	CNY/MW
	燃气轮机联合循环（GTCC）	60000000	CNY/MW
	天然气联合循环（NGCC）	3000000	CNY/MW
	电厂二次再热技术	6850	CNY/MW
	汽轮机通流部分改造	10000	CNY/MW
	锅炉排烟余热回收利用	15700	CNY/MW
	凝汽式汽轮机供热改造	260000	CNY/MW
能源转型-可再生能源发电	水力发电	0.42	CNY/kWh
	光伏发电	0.7	CNY/kWh

	风力发电	0.33	CNY/kWh
	地热发电	1	CNY/kWh
能源转型-核电	核电	8500000	CNY/MW
	高效湿法烟气脱硫（>300MW）	151000	CNY/MW
末端治理-SO ₂ 末端去除	高效湿法烟气脱硫（100-300MW）	410000	CNY/MW
	高效湿法烟气脱硫（<100MW）	736000	CNY/MW
	高效 SCR 技术（>300MW）	283703	CNY/MW
末端治理-NO _x 末端去除	高效 SCR 技术（100-300MW）	353460	CNY/MW
	高效 SCR 技术（<100MW）	608240	CNY/MW
	袋式除尘技术（>300MW）	220710	CNY/MW
	袋式除尘技术（100-300MW）	264850	CNY/MW
	袋式除尘技术（<100MW）	309000	CNY/MW
末端治理-颗粒物末端去除	电袋复合除尘（>300MW）	297074	CNY/MW
	电袋复合除尘（100-300MW）	341215	CNY/MW
	电袋复合除尘（<100MW）	385360	CNY/MW

表 1-1 所示的投资成本指新建设施、技术的初始投资成本，包括设备费、安装费、设备翻新、贷款税费等，总投资成本进一步分摊到年，得到年化投资成本。除投资成本外，成本计算中还考虑了运维成本，指所有设施、技术的运行和维护成本，包括工人薪酬支出、原料及相关服务购入费用、设备损耗与维修费用、设备养护费用等。

本项目基于所构建的减排成本核算模型和基础数据库，以 2020 年为基准年，定量分析各类减排措施实施对河北省“十三五”期间能源转型及燃烧技术、生产技术、末端治理技术升级方面的影响，计算河

北“十三五”期间（2016-2020 年）各项措施的减排成本。

第4节 能源与排放动态预测方法

大气成分未来排放情景数据是开展气候变化影响与应对、未来空气质量变化及影响评估、大气污染与气候变化相互作用、减污降碳协同增效等相关领域研究的重要基础。中国是全球温室气体和大气污染物排放大国，在“碳达峰碳中和”背景下的未来排放趋势走向是科学家和决策者共同关心的问题。

国内外学者针对中国未来大气成分排放情景已开展了诸多研究，分析了大气成分排放变化的驱动因素，并在全球（包含中国）和区域尺度构建了一系列排放情景。其中，为支持国际耦合模式比较计划（CMIP）而开发的一系列全球排放情景数据集在相关研究中得到了广泛应用。然而，全球排放情景中对中国的排放刻画往往比较粗糙，难以准确表征中国的复杂排放源体系和及时反映中国排放的快速动态变化。以面向 CMIP6 开发的 SSP-RCP 全球排放情景数据为例，由于其未充分考虑中国自 2013 年“大气十条”实施以来的污染快速治理进程，情景中 2013 年以后中国地区的排放量和变化趋势均与实际情况相差巨大。而国内学者开发的大多数排放情景均未考虑与全球社会经济情景（SSP）和气候目标约束（RCP）的衔接，且目前尚没有可公开获得的排放情景数据供研究者使用。

针对上述问题，清华大学开发了中国未来排放动态评估模型（Dynamic Projection model for Emissions in China，简称 DPEC）。模型旨在评估社会经济发展、全球气候治理、碳达峰碳中和目标、减污降碳协同等一系列背景下中国主要大气成分（包括主要大气污染物及温室气体）的未来排放动态变化，为相关领域科学研究和政策评估提供基础数据支持。

DPEC 模型以 MEIC 模型为基础，后者为前者提供了基础排放计算框架；精细化排放源分类（共计 814 个精细排放源）；各源历史长时间序列的活动水平、技术分布、末端控制和排放量信息。在此基础上，考虑各行业未来潜在的能源结构转型和生产技术升级（如超超临界发电机组、电炉炼钢、国七排放标准燃油车、天然气车、电动车等），DPEC 模型进一步拓展为 1701 个精细化排放源。根据各排放源基础数据的可获取度与详细度、不同排放源的技术演替特征，DPEC 模型细分为燃煤电厂、水泥厂、钢铁厂、工业锅炉、机动车、其他燃料发电部门、供热部门、其他工业部门、非道路移动源、溶剂使用源、民用源、农业源共计 12 个子模型，在统一的方法框架（图 1-8）、气候环境政策约束、社会经济发展驱动下，在省级尺度上动态预测中国未来大气污染物与温室气体的排放变化。

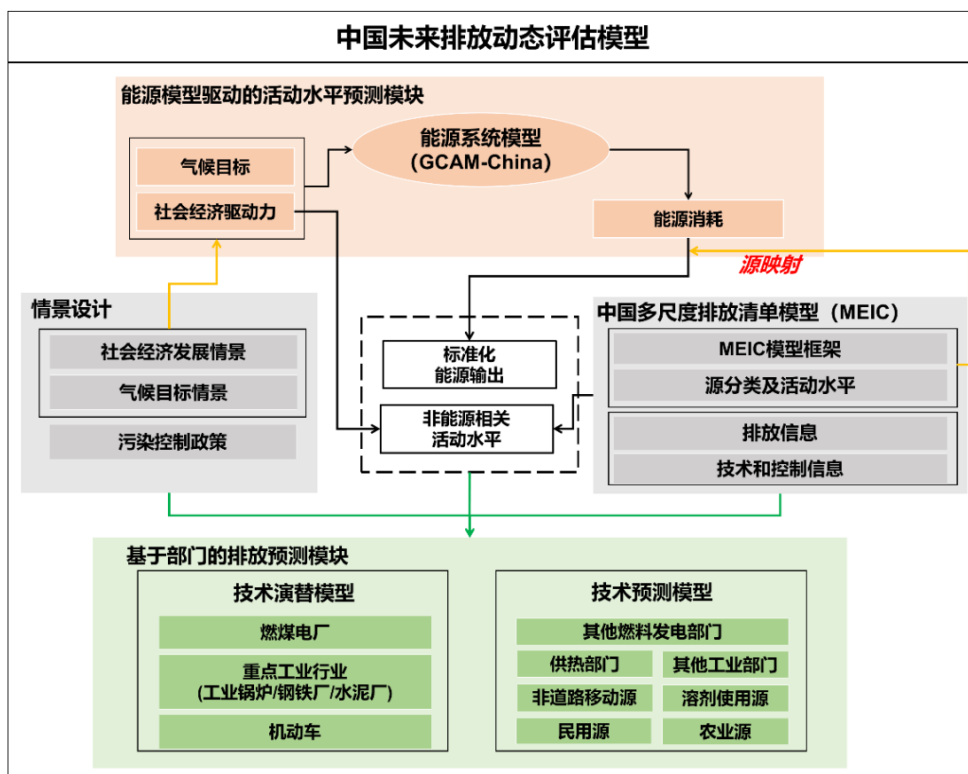


图 1-8 中国未来排放动态评估模型方法学框架

DPEC 模型包含两个主要模块，即能源模型驱动的活动水平预测模块和基于精细部门技术发展的排放预测模块。在活动水平预测模块中，研究选用了综合评估模型 GCAM 的中国分省嵌套版本 GCAM-China（version5.2）来提供不同气候目标与能源转型政策约束、以及社会经济发展驱动下中国未来分省的能源消耗、产品产量等活动水平预测。通过校正 GCAM-China 模型的基准年参数，系统修正全球综合评估模型能源情景的基准年偏差。通过开发模型数据接口，将社会经济情景（SSP）、气候目标约束（RCP 辐射强迫、碳达峰碳中和碳排放约束）下的未来能源需求与供应、社会经济驱动预测逐一映射至排放预测模块，动态预测各类气候治理情景下中国未来能源相关的活动水平变化，并提供与精细化排放预测模型无缝连接的标准化能源输出。

非能源相关的活动水平则基于 MEIC 模型中的历史信息与相关驱动因素的未来变化共同预测。在排放预测模块中，研究集成了已有的基于技术的各排放预测子模型。这些子模型主要分为两类：一类是基于技术的演替模型，包括燃煤电厂、水泥厂、钢铁厂、工业锅炉、机动车演替模型。其中燃煤电厂、水泥厂、钢铁厂在点源设备层面构建，机动车在县级车队层面构建。该类模型以详细的历史技术分布、服役时间为预测起点，在自然淘汰和退役政策的双重作用下，动态预测相关行业未来的技术演替与排放变化。第二类是基于技术的预测模型，包括其他燃料发电等剩余七个部门的子模型。受历史技术分布与服役时间数据缺失的影响，这些行业难以建立技术演替模型；因此仅在省级尺度上预测了这些行业在未来淘汰政策作用下的技术分布与排放变化。

本项目基于 DPEC 模型，充分考虑未来能源结构、产业结构、排放因子和污染控制技术的演化、以及社会经济发展规划与相关政策，预测河北省“十四五”期间温室气体排放量和 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及 VOCs 等主要大气污染物排放量。

第2章 大气污染物与温室气体排放现状

第1节 总量趋势

根据 MEIC 排放清单结果（表 2-1），2015-2020 年间，河北省主要大气污染物排放量均有所下降，SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 排放量分别从 113.26、185.10、68.59、174.18、52.77 万吨下降至 53.74、156.91、41.64、138.69、43.20 万吨。温室气体的排放量有所上升，CO₂ 排放从 2015 年的 7.69 亿吨增长至 2020 年的 8.06 亿吨。

表 2-1 河北省 2015-2020 年主要大气污染物与温室气体排放总量（单位：万吨）

年份	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	CO ₂
2015	113.26	185.10	68.59	174.18	52.77	76899.29
2016	95.95	182.57	62.61	173.47	50.98	78350.99
2017	80.44	180.10	57.28	165.36	50.99	76530.26
2018	73.35	178.32	53.80	158.83	45.75	79408.88
2019	63.97	172.24	48.57	150.39	42.82	81441.28
2020	53.74	156.91	41.64	138.69	43.20	80617.16

2015-2020 年间，河北省 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 排放量分别下降了 52.55%、15.23%、39.30%、20.37%、18.13%，同期地区生产总值、能源消费量、民用汽车拥有量、钢材产量、水泥产量则分别上升了 37.16%、5.36%、62.53%、24.07%、29.96%（图 2-1）。这说明，“十三五”时期，河北省在社会经济持续快速发展的同时，实现了大气污染物的有效减排，取得了环境保护与经济发展的双赢。

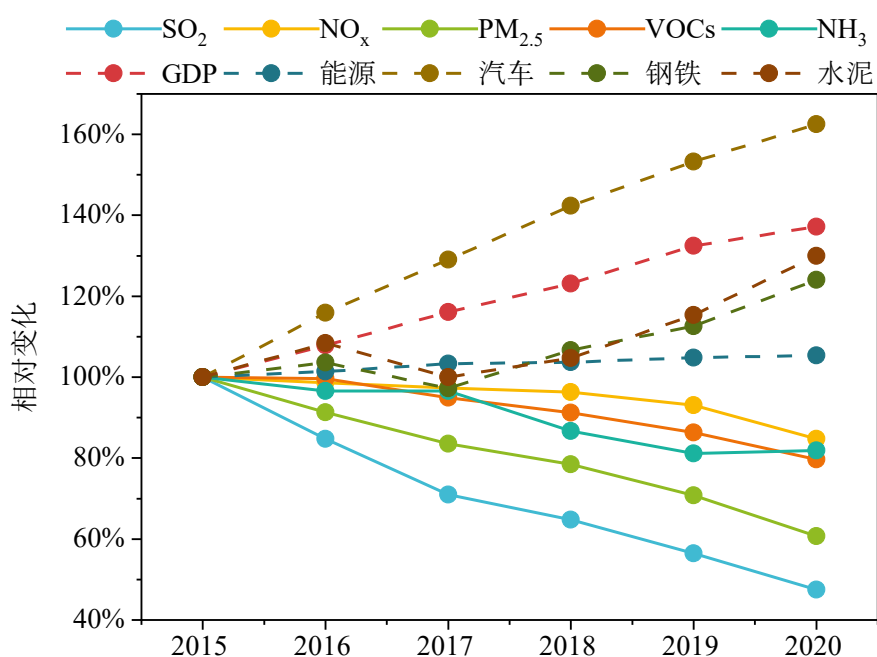


图 2-1 河北省 2015-2020 年主要大气污染物排放量与经济指标变动趋势

将河北省“十三五”期间主要大气污染物与温室气体的减排幅度，与同时期国内其他省级行政区进行对比，如图 2-2 所示。2015-2020 年间，河北省的 VOCs 排放下降了 20.37%，降幅位列全国第一。全国多数省级行政区的 VOCs 排放均有所下降，但上海、宁夏、新疆、江西、西藏的 VOCs 排放有所上升。河北省的 PM_{2.5} 和 NH₃ 排放分别下降了 39.30% 和 18.13%，降幅均位列全国第八。除西藏外，其他省级行政区的 PM_{2.5} 排放量均有所降低，其中河南降幅最大，达到了 49.26%。NH₃ 排放普遍下降，其中北京降幅最大，达到了 41.33%，但西藏、新疆、宁夏、青海的 NH₃ 排放有所上升。河北省的 CO₂ 排放小幅增长了 4.83%，将变化率从小至大排列，其位列全国第十一位。海南省的 CO₂ 排放降幅最大，达到了 17.96%。对 NO_x 排放而言，河北省的降幅为 15.23%，位列全国第十六位。全国所有省级行政区的 NO_x

排放均有所下降，其中西藏降幅最大，达到了 39.67%。河北省的 SO₂ 排放下降了 52.55%，降幅位列全国第十七位。全国所有省级行政区的 SO₂ 排放均有所下降，其中北京降幅最大，达到了 75.43%。

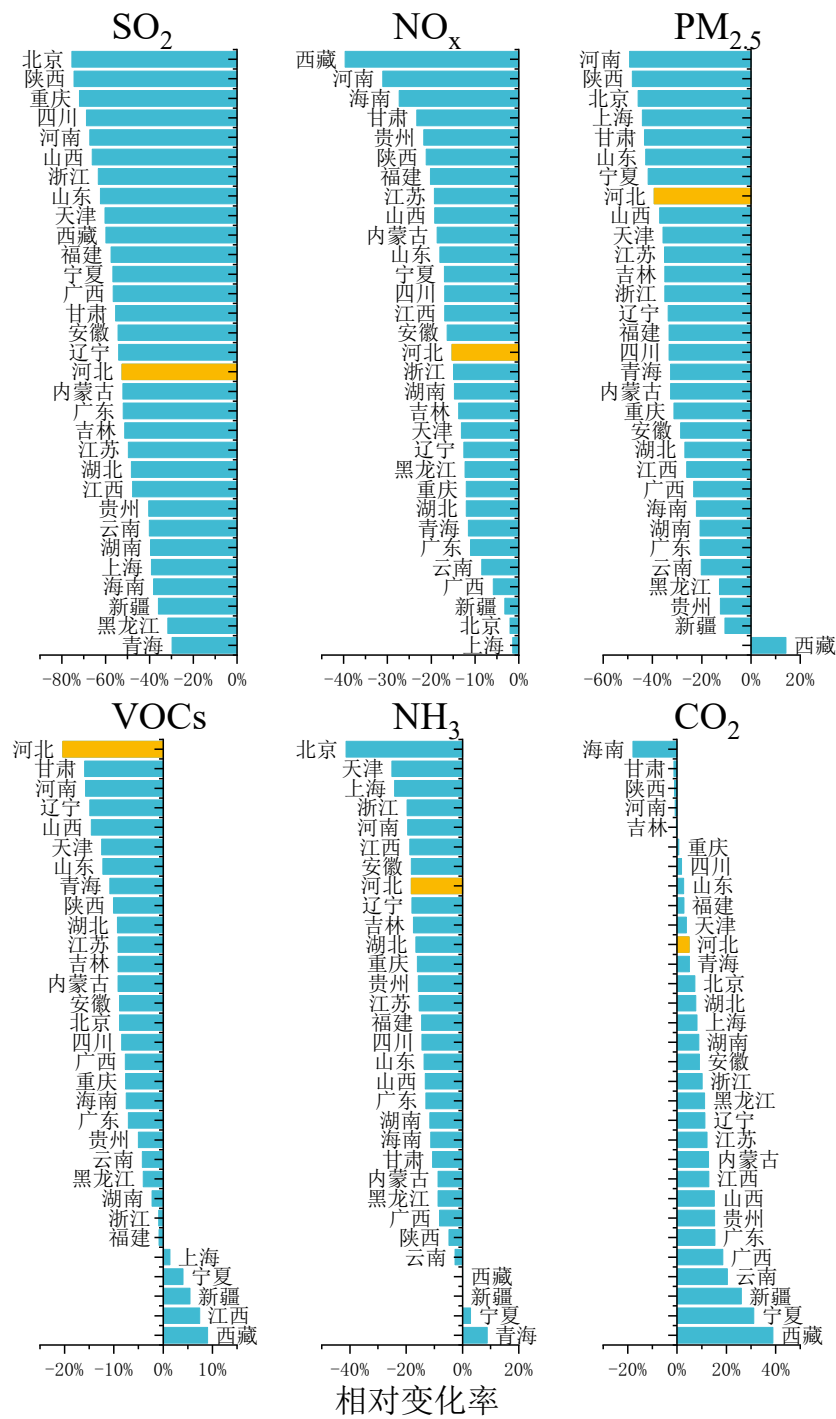


图 2-2 全国各省份 2015-2020 年主要大气污染物与温室气体排放变动趋势

第2节 排放结构

2.2.1 部门贡献

本项目将区域人为源排放划分为电力、工业、交通、民用、农业、溶剂使用共计 6 大部门。图 2-3 展示了河北省 2015-2020 年主要大气污染物与温室气体分部门排放变化状况。总体而言，工业源、交通源、电力源是主要的大气污染物与温室气体排放源。但具体到不同的排放物种，总量走势与分担结构存在着一定差异，以下将分别进行阐述。

研究期内，河北省 SO₂ 排放量持续下降，从 2015 年的 113.26 万吨降至 2020 年的 53.74 万吨，总降幅达到了 52.55%，年均降幅为 13.81%，且年际变化不大。从分部门的排放变化来看，2015-2020 年间，电力、工业、交通、民用源的 SO₂ 排放量分别从 10.12、77.90、1.24、24.01 万吨降至 4.42、41.93、0.81 和 6.59 万吨，降幅分别为 56.37%、46.18%、34.28%、72.56%。民用源的排放降幅最大，交通源降幅最小。从分部门的排放构成来看，2015 年电力、工业、交通、民用源对 SO₂ 排放的贡献率分别为 8.94%、68.78%、1.09%和 21.20%，工业源的排放贡献率最高，民用源次之。之后，工业源的排放贡献率继续上升，至 2020 年增长至 78.01%，同时交通源的贡献率增至 1.51%。电力源与民用源的排放贡献有所下降，2020 年时分别降至 8.22%和 12.26%。

NO_x 排放在 2015-2020 年间，从 185.10 万吨下降至 156.91 万吨，降幅为 15.23%，年均降幅为 3.20%。从降幅的年际变化看，2015 至

2019 年间为 1.78%，2020 年降幅较大，为 8.90%。2020 年 NO_x 排放的大幅下降，与新冠疫情对社会经济的冲击密切相关。不同部门的排放变化各有增减。电力源 NO_x 排放量从 2015 年的 25.00 万吨增长至 2019 年的 26.78 万吨，并在 2020 年降至 25.48 万吨，研究期内增幅为 1.92%。同期，工业、交通、民用源的 NO_x 排放量分别从 94.30、59.40、6.40 万吨下降至 74.96、51.86、4.61 万吨，降幅分别为 20.51%、12.70%、27.89%。民用源的排放降幅最大，工业源次之。从分部门的排放构成来看，2015 年电力、工业、交通、民用源的 NO_x 排放分担率分别为 13.50%、50.95%、32.09%、3.46%，在 2020 年时分别为 16.24%、47.77%、33.05%、2.94%。工业源和交通源是河北省 NO_x 排放的主要排放源，且交通源的排放贡献还在上升，应引起足够重视。

2015-2020 年，PM_{2.5} 的排放量从 68.59 万吨下降至 41.64 万吨，降幅相对较高，达到了 39.30%。PM_{2.5} 排放的年均降幅为 9.46%，但年际变化存在波动，2015 至 2019 年间为 8.26%，2020 年同样受新冠疫情影响，降幅高达 14.28%。各部门的排放量普遍下降，电力、工业、交通、民用源的 PM_{2.5} 排放量分别从 2015 年的 3.23、35.66、3.75、25.95 万吨降至 3.11、24.67、3.23、10.63 万吨，降幅分别为 3.74%、30.82%、13.86%、59.04%。民用源的排放降幅最大，工业源次之。从分部门的排放构成来看，2015 年时，电力、工业、交通、民用源的 PM_{2.5} 排放分担率分别为 4.70%、51.98%、5.47%、37.84%。之后电力、工业、交通源的贡献率在 2020 年分别增至 7.46%、59.24%、7.77%，

民用源贡献率降至 25.53%。工业源与民用源是 PM_{2.5} 排放的主要贡献源。

VOCs 排放量在 2015 到 2020 年间从 174.18 万吨下降至 138.69 万吨,总降幅居中,为 20.37%。年均降幅为 4.42%。从年际变化来看,VOCs 排放的下降速度越来越快,年降幅从 2016 年的 0.41%上升到了 2020 年的 7.78%。这一方面是由于产业结构升级和控制措施的施行,另一方面是由于 VOCs 排放相关行业活动水平增速的放缓。从部门层面来看,电力源的 VOCs 排放量从 2015 年的 0.22 万吨增长至 2020 年的 0.24 万吨,增幅为 8.70%。这一时期,其他部门的排放量均有所下降,工业、交通、民用、溶剂使用源的 VOCs 排放量分别从 42.29、34.11、28.12、69.44 万吨降至 36.25、23.46、14.86、63.89 万吨,降幅依次为 14.29%、31.22%、47.17%、7.99%。民用源排放降幅最大,交通源次之。从部门的排放构成来看,电力、工业、交通、民用、溶剂使用源在 2015 年时对 VOCs 排放的贡献率分别为 0.12%、24.28%、19.58%、16.15%、39.86%,在 2020 年时对 VOCs 排放的分担率分别为 0.17%、26.14%、16.92%、10.71%、46.06%。溶剂使用源和工业源是 VOCs 排放的主要贡献源,且贡献率处于上升状态。

NH₃ 排放量在 2015 至 2020 年间从 52.77 万吨下降至 43.20 万吨,总量降幅为 18.13%,年均降幅为 3.83%。NH₃ 排放的年变化率存在波动,最低为-10.29%,最高为 0.89%。从分部门的排放变化来看,2015-2020 年间,工业、民用、农业源的 NH₃ 排放量分别从 1.90、1.35、

49.24 万吨降至 1.55、1.10、40.24 万吨，降幅分别为 18.79%、19.01% 和 18.28%，差异不大。同时，交通源的 NH_3 排放从 0.28 万吨上升至 0.32 万吨，增幅为 16.76%。从分部门的排放构成来看，农业源是 NH_3 排放的首要贡献源，贡献率在 93.00%到 93.76%之间波动。工业源和民用源的贡献率位列第二、三位，2015 年至 2020 年间，分别从 3.61% 和 2.57%下降至 3.58%和 2.54%。交通源对 NH_3 排放的贡献率最小，但从 0.52%增长到了 0.75%，呈现上升趋势。

根据以上分析，2015-2020 年间河北省主要的大气污染均呈现下降趋势，但这一时期当地的 CO_2 排放量从 76899.29 万吨稳步攀升至了 80617.16 万吨，增幅为 4.83%，年均增幅为 0.97%。从年际变化来看， CO_2 排放的变化率在-2.32%和 3.76%之间波动。从分部门排放的变化来看，电力、工业、交通源的 CO_2 排放量分别从 15491.13、49960.68、6163.78 万吨增长至 16750.34、53892.17、6711.22 万吨，增幅分别为 8.13%、7.87%、8.88%。民用源的 CO_2 排放则从 5283.71 万吨降至 3263.42 万吨，降幅为 38.24%。换言之，“十三五”期间河北省民用源的减排对 CO_2 排放增长的遏制具有极为重要的意义。从部门的排放构成来看，2015 年时，电力、工业、交通、民用源对 CO_2 排放的分担率分别为 20.14%、64.97%、8.02%、6.87%。2020 年，电力、工业、交通的源的 CO_2 排放分担率上升至 20.78%、66.85%、8.32%，民用源的分担率下降至 4.05%。工业源和电力源是 CO_2 排放的主要贡献源，且贡献率处于上升状态。

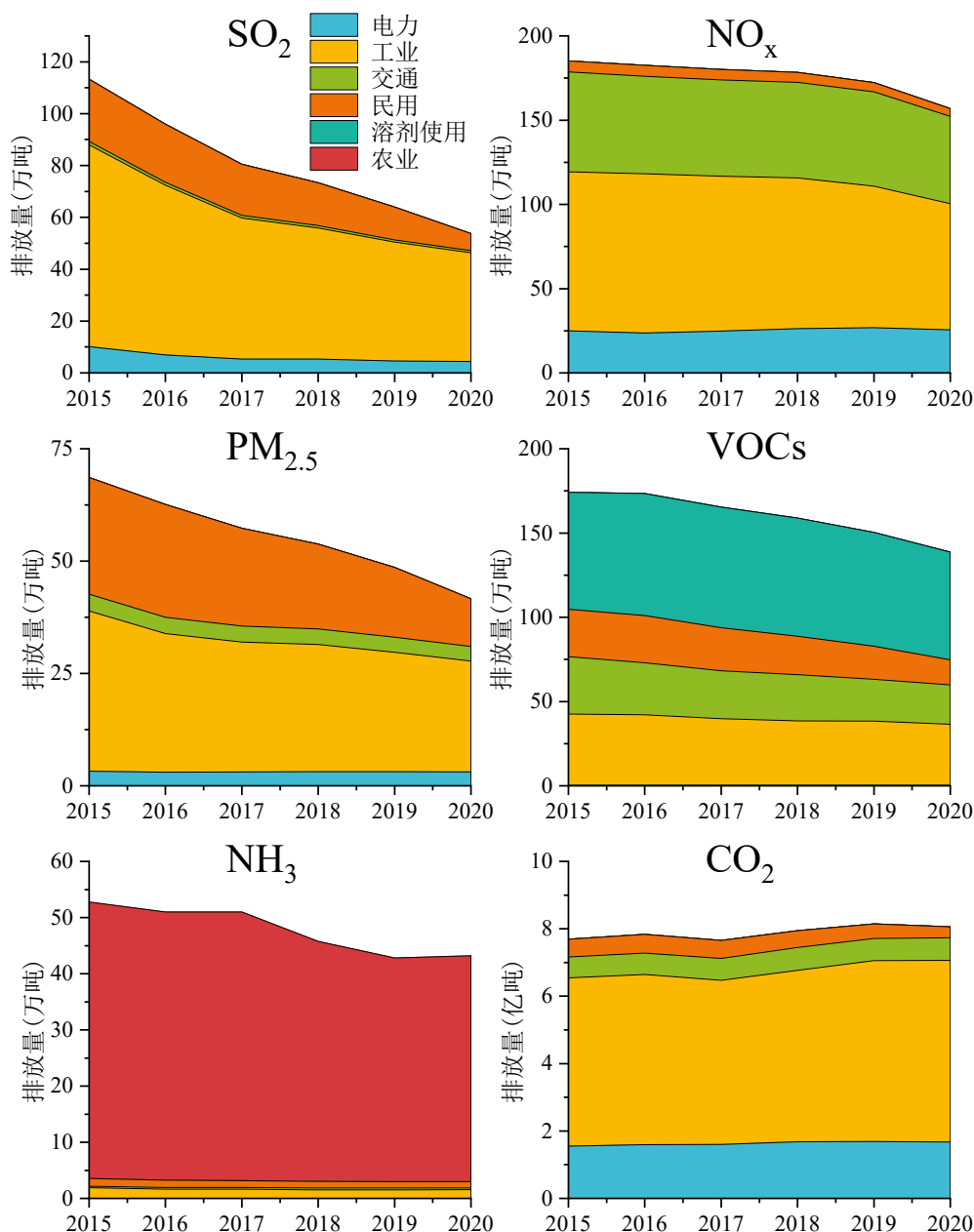


图 2-3 河北省 2015-2020 年主要大气污染物与温室气体分部门排放变化

总结以上分析结果,可以发现工业源和民用源是 SO_2 排放的主要贡献源,且工业源的贡献率仍在上升。 NO_x 排放主要来自于工业源和交通源,且交通源的贡献率仍在上升。 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的主要贡献源为工业源与民用源,其中工业源的贡献率仍在上升。溶剂使用源和工业源是 VOCs 排放的主要来源,且二者的贡献率仍在上升。农业源是 NH_3

排放的首要贡献源，且贡献率维持着相对稳定。工业源和电力源是 CO₂ 排放的主要贡献源，且贡献率仍处于上升状态。需要指出的是，民用源在各类主要大气污染物和 CO₂ 排放中，贡献率均有所下降，在河北省“十三五”时期大气污染治理工作中扮演着重要角色。

2.2.2 能源贡献

温室气体和大气污染物的同根同源，很大程度上可归因于能源的燃烧利用。本节将区域能源使用划分为煤炭、石油、天然气、生物质四个类别。本节主要考虑能源燃烧利用带来的直接排放，涉及到 2.2.1 节中的电力、工业、交通、民用部门。本节首先分析能源燃烧利用作为整体对区域大气污染与温室气体总排放的贡献，然后分析不同能源类型对各类排放物种的贡献。

图 2-4 展示了 2015-2020 年间，河北省能源的燃烧利用对大气污染与温室气体总排放的贡献。总体而言，能源利用对 NO_x 和 CO₂ 排放的贡献较大，研究期内累积贡献分别达到了 86.56%和 93.32%。能源利用对 SO₂、PM_{2.5} 和 VOCs 排放的累积贡献也相对较高，分别为 55.84%、54.77%、37.19%，但逐年贡献均呈现出了较为明显的下降趋势。能源利用对 NH₃ 排放的贡献显著低于其他污染物与 CO₂，研究期内累积贡献仅为 3.20%。这是因为 NH₃ 排放主要来自于农业源中畜禽养殖与氮肥施用过程，与能源燃烧利用缺乏直接关联。

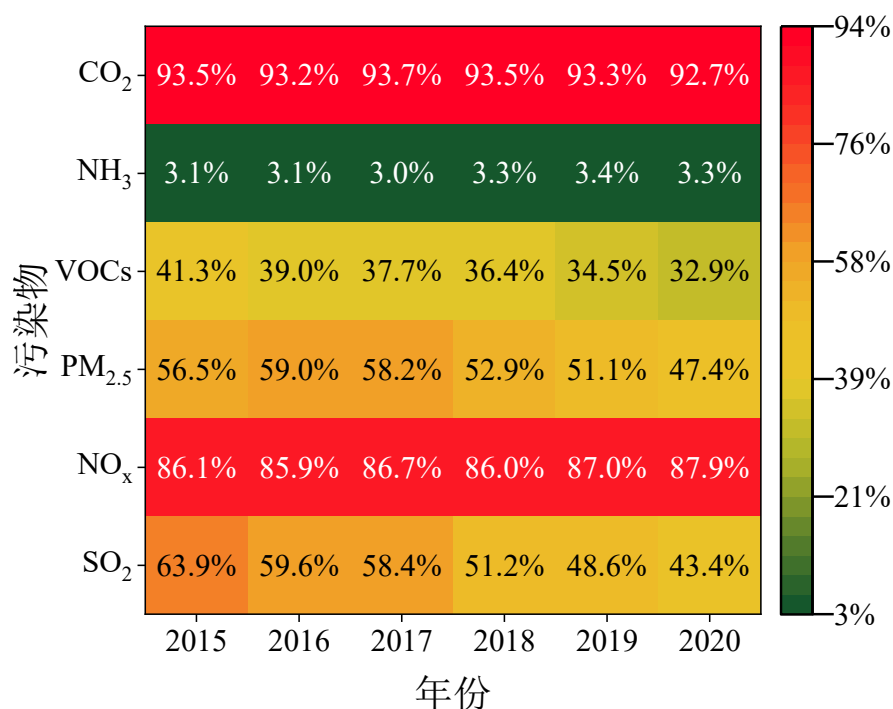


图 2-4 河北省 2015-2020 年能源燃烧利用对大气污染与温室气体总排放的贡献

以下详细讨论 2015-2020 年河北省能源燃烧利用导致污染物与温室气体排放的总量趋势与分担结构状况。

能源燃烧利用带来的 SO₂ 排放持续下降，从 2015 年的 72.36 万吨降至 2020 年的 23.30 万吨，总降幅达到了 67.80%，年均降幅为 20.23%，除 2020 年由于疫情冲击降幅为 25.00%外，其他年份降幅变化不大。从分燃料的排放变化来看，2015-2020 年间，煤炭、石油、生物质的 SO₂ 排放量分别从 69.92、2.29、0.15 万吨降至 21.65、1.53、0.13 万吨，降幅分别为 69.04%、33.22%、17.79%。煤炭排放降幅最大，生物质排放降幅最小。从排放结构来看，2015-2020 年间，煤炭、石油、生物质对 SO₂ 排放的贡献率分别为 95.50%、4.19%、0.31%。尽管近年来排放降幅显著，但煤炭仍然是 SO₂ 的首要贡献源。

能源利用相关的 NO_x 排放在研究期内从 159.31 万吨下降至

137.86 万吨，总降幅为 13.47%。除 2020 年受疫情影响降幅为 8.00% 外，其他年份降幅变化不大，均值为 1.52%。煤炭、石油、生物质的 NO_x 排放量分别从 2015 年的 95.57、60.62、1.77 万吨，降至 2020 年的 80.99、53.49、1.44 万吨，降幅分别为 15.25%、11.77%、18.60%。天然气 NO_x 排放在研究期内从 1.35 增至 1.94 万吨，增幅高达 43.23%。排放增量主要来源于民用燃气，这是由于民用散煤双替代中“煤改气”导致的。从排放结构来看，2015-2020 年间，煤炭、石油、天然气、生物质对 NO_x 排放的贡献率分别为 59.74%、38.10%、1.11%、1.05%。煤炭和石油分别为 NO_x 排放的首要与次要贡献源。

2015-2020 年，能源燃烧利用导致的 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量从 38.77 万吨下降至 19.74 万吨，总降幅为 49.10%。 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的年降幅逐渐扩大，从 2016 年的 4.71% 增至 2020 年的 20.55%。尽管 $\text{PM}_{2.5}$ 排放在 2020 年的大幅下降有疫情冲击的因素，但其在研究期内的有效削减主要得益于民用散煤的替代。各类燃料的排放量普遍下降，煤炭、石油、生物质的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量分别从 2015 年的 25.93、3.82、9.03 万吨降至 9.08、3.30、7.36 万吨，降幅分别为 64.96%、13.62%、18.55%。煤炭排放的降幅最大，生物质燃烧次之。从排放构成来看，2015 年时，煤炭、石油、生物质的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放分担率分别为 66.86%、9.84%、23.29%，之后的 2020 年，煤炭的分担率降至 46.03%，石油和生物质的分担率分别增至 16.71% 和 37.27%。煤炭和生物质分别为 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的首要与次要贡献源。

能源利用相关的 VOCs 排放量在 2015 到 2020 年间，从 71.99 万吨下降至 45.60 万吨，总降幅为 36.67%。VOCs 排放的下降速度越来越快，年降幅从 2016 年的 6.10% 增至 2020 年的 12.13%。不同燃料的 VOCs 排放量各有增减。煤炭、石油、生物质的 VOCs 排放量分别从 2015 年的 23.68、34.12、14.15 万吨降至 2020 年的 10.50、23.47、11.50 万吨，降幅分别为 55.66%、31.22%、18.69%。同期天然气的 VOCs 排放量从 0.05 万吨增至 0.13 万吨，增幅高达 177.97%。天然气 VOCs 排放上升的原因与 PM_{2.5} 排放类似。从排放构成来看，2015-2020 年，煤炭的贡献率从 32.89% 降至 23.02%，石油、天然气、生物质的贡献率则分别从 47.40%、0.06%、19.65% 升至 51.47%、0.28%、25.23%。煤炭贡献率降幅显著，其他燃料的贡献率相对上升。石油和煤炭分别为 PM_{2.5} 排放的首要与次要贡献源。

由能源燃料利用带来的 NH₃ 排放较少，且处于下降状态，从 2015 年的 1.63 万吨降至 2020 年的 1.42 万吨，总降幅为 12.94%。NH₃ 排放的年降幅波动不大，均值为 2.73%。研究期内，石油的 NH₃ 排放量从 0.28 万吨增至 0.32 万吨，增幅为 16.76%，生物质的 NH₃ 排放量从 1.35 万吨降至 1.10 万吨，降幅为 19.01%。石油 NH₃ 排放的上升，主要来自于汽油车，NH₃ 是其尾气处理反应的副产物。从排放构成来看，2015 年时，石油和生物质对 NH₃ 排放的贡献率分别为 16.96% 和 83.04%，2020 年时的贡献率分别为 22.75% 和 77.25%。生物质的排放贡献率有所下降，但仍为首要贡献源。

通过以上分析可知，2015-2020 年间，河北省由能源燃烧利用导致的大气污染物排放总体呈现下降趋势，但同期 CO₂ 排放仍然波动上升，从 2015 年的 71899.16 万吨增至 2019 年的 76011.23 万吨，然后 2020 年受疫情影响降至 74722.94 万吨，研究期内的增幅为 3.93%，年际变化率在-1.83%和 3.62%之间波动。从燃料类型的视角来看，煤炭、石油、天然气的 CO₂ 排放量均有所上升，2015-2020 年间分别从 63482.91、6888.33、1527.92 万吨增至 64525.58、7278.85、2918.50 万吨，增幅分别为 1.64%、5.67%、91.01%。研究期内，不同燃料对 CO₂ 排放的贡献变动不大，煤炭是 CO₂ 排放的最大来源，分担率为 87.28%，石油次之，为 9.71%，天然气最小，仅为 3.01%。

综合以上分析结果，发现河北省能源燃烧利用主导了区域的 NO_x 和 CO₂ 排放，对 SO₂、PM_{2.5} 和 VOCs 排放的贡献也相对较高。从排放结构来看，煤炭是 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 CO₂ 的主要贡献源，石油和生物质分别为 VOCs 和 NH₃ 的主要贡献源。尽管当前煤炭排放占比较高，但其对应的污染物降幅也较为明显，与之相对的是，天然气的 SO₂、VOCs、CO₂ 的排放均呈现显著的上升趋势。这种此消彼长，主要源于清洁取暖的有效推进，民用散煤量被大幅压减，但同时由于“煤改气”的存在，天然气的使用相应上升。“煤改气”本质上是用相对清洁的天然气取代煤炭，民用取暖方式由散煤改为天然气后，该源类的大气污染物与碳排放总体呈下降趋势。

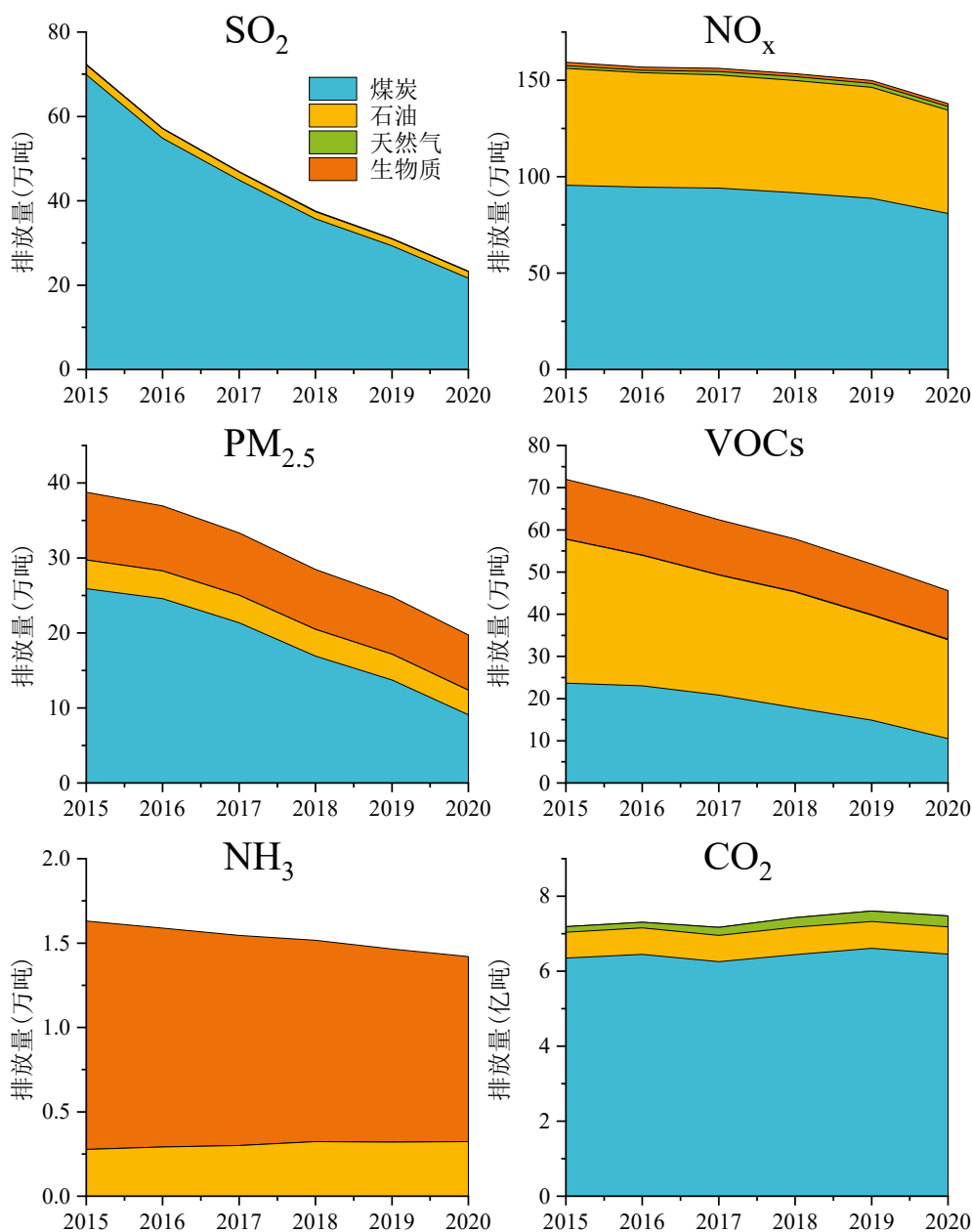


图 2-5 河北省 2015-2020 年主要大气污染物与温室气体分能源类型排放变化

第3节 排放驱动

第 2 节描述了河北省“十三五”期间大气污染物与温室气体的排放变化与部门构成，本节在 6 大部门层面上，对河北省 2015-2020 年主要大气污染物与温室气体排放变化进行了分解，以考察排放变化的驱动因素。以下为本项目驱动因素分析的具体方法。

首先将不同年度间排放总量的变化分解为排放减量与排放增量，公式如下：

$$EC_p = EI_p + ED_p \quad \text{公式 2-1}$$

式中，EC 为不同年度间区域的总排放变化量，p 为排放种类，本项目中为 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂；EI 为总排放增量；ED 为总排放减量。

其次，计算排放增量与排放减量。所谓总排放增量，是指研究时段内排放上升的各子源排放增量之和，而总排放减量，是指排放下降的各子源排放减量之和，公式如下：

$$EI_p = \sum_i EI_{p,i}$$

$$ED_p = \sum_i ED_{p,i}$$

公式 2-2

式中，i 为子源类型，本节中包括电力、工业、交通、民用、农业、溶剂使用源共 6 类。

最后，计算子源对排放变化的驱动力。如果研究时段内子源 i 的排放上升，则计算其对排放增长的驱动力，如果子源 i 的排放下降，则计算其对排放削减的驱动力，公式如下：

$$DFI_i = \frac{EI_{p,i}}{EI_p}$$

$$DFD_i = \frac{ED_{p,i}}{ED_p}$$

公式 2-3

式中，DFI 为排放增长驱动力，DFD 为排放削减驱动力，单位为%。

根据公式 2-1 到公式 2-3 中提出的方法，对河北省 2015 和 2020 两年间的排放变化进行分解，结果如图 2-6 所示。各类污染物和 CO₂ 的排放部门构成不同，不同部门各类污染物与 CO₂ 的排放削减难度也不同，以下将分别进行论述。

2015-2020 年间，河北省 SO₂ 排放量从 113.26 万吨降至 53.74 万吨，总排放减量为 59.52 万吨。这期间电力、工业、交通、民用的排放量均有所下降，排放减量分别为 5.70、35.97、0.42、17.42 万吨，对总排放变化量的贡献分别为 9.58%、60.43%、0.71%、29.27%。由此可见，工业源为最主要的 SO₂ 排放削减驱动力，其次为民用源。

河北省 NO_x 排放量从 2015 年的 185.10 万吨降至 2020 年的 156.91 万吨，总排放变化量为 28.19 万吨，其中总排放增量为 0.48 万吨，来自电力源，总排放减量为 28.67 万吨，来自工业、交通和民用源。电力源对排放增量的贡献为 100%。工业、交通、民用源的排放减量分别为 19.34、7.55、1.78 万吨，对排放削减的贡献分别为 67.46%、26.32%、6.22%。工业源与交通源是 NO_x 排放削减的主要驱动力。

研究期内，河北省 PM_{2.5} 排放量从 68.59 万吨降至 41.64，总排放减量为 26.95 万吨。这期间电力、工业、交通、民用的排放量均有所下降，排放减量分别为 0.12、10.99、0.52、15.32 万吨，对总排放变化量的贡献依次为 0.45%、40.77%、1.93%、56.85%。因此民用源是 PM_{2.5} 排放削减最重要的驱动力，工业源次之。

2015 年至 2020 年间，河北省 VOCs 的排放量从 174.18 万吨降至

138.69 万吨，总排放变化量为 35.49 万吨，其中总排放增量为 0.02 万吨，来自电力源，总排放减量为 35.51 万吨，来自工业、交通、民用、溶剂使用源。电力源对排放增量的贡献为 100%。工业、交通、民用、溶剂使用源的排放减量分别为 6.04、10.65、13.27、5.55 万吨，对排放削减的贡献分别为 17.02%、29.99%、37.36%、15.62%。民用源是 VOCs 排放削减最重要的驱动力，之后依次为交通源、工业源和溶剂使用源。

研究期内，河北省 NH₃ 排放量从 2015 年的 52.77 万吨降至 2020 年的 43.20 万吨，总排放变化量为 9.57 万吨，其中总排放增量为 0.05，来自交通源，总排放减量为 9.62 万吨，来自工业、民用、农业源。交通源对排放增量的贡献为 100%。工业、民用、农业源的排放减量分别为 0.36、0.26、9.00 万吨，对排放削减的贡献分别为 3.72%、2.68%、93.60%。农业源是 NH₃ 排放削减的首要驱动力，工业源和民用源的对 NH₃ 排放削减的贡献均相对较小，且差异不大。

2015 至 2020 年间，河北省 CO₂ 排放量从 76899.29 万吨增长至 80617.16 万吨，总排放变化量为 3717.86 万吨，其中总排放增量为 5738.15 万吨，来自电力、工业、交通源，总排放减量为 2020.29 万吨，来自民用源。电力、工业、交通源的排放增量分别为 1259.21、3931.49、547.45 万吨，对排放增长的驱动力分别为 21.94%、68.51%、9.54%。民用源贡献了全部的 CO₂ 排放削减。简而言之，工业源和电力源在助推 CO₂ 排放增长，民用源则在抑制 CO₂ 排放增长。

综合以上分析结果，可以发现：工业源和民用源是 SO₂ 削减的主要驱动力；工业源和交通源是 NO_x 削减的主要驱动力；民用源和工业源是 PM_{2.5} 削减的主要驱动力；民用源和交通源是 VOCs 削减的主要驱动力；农业源是 NH₃ 削减的首要驱动力；工业源和电力源是 CO₂ 排放增长的主要驱动力，民用源则是 CO₂ 排放削减的唯一驱动力。

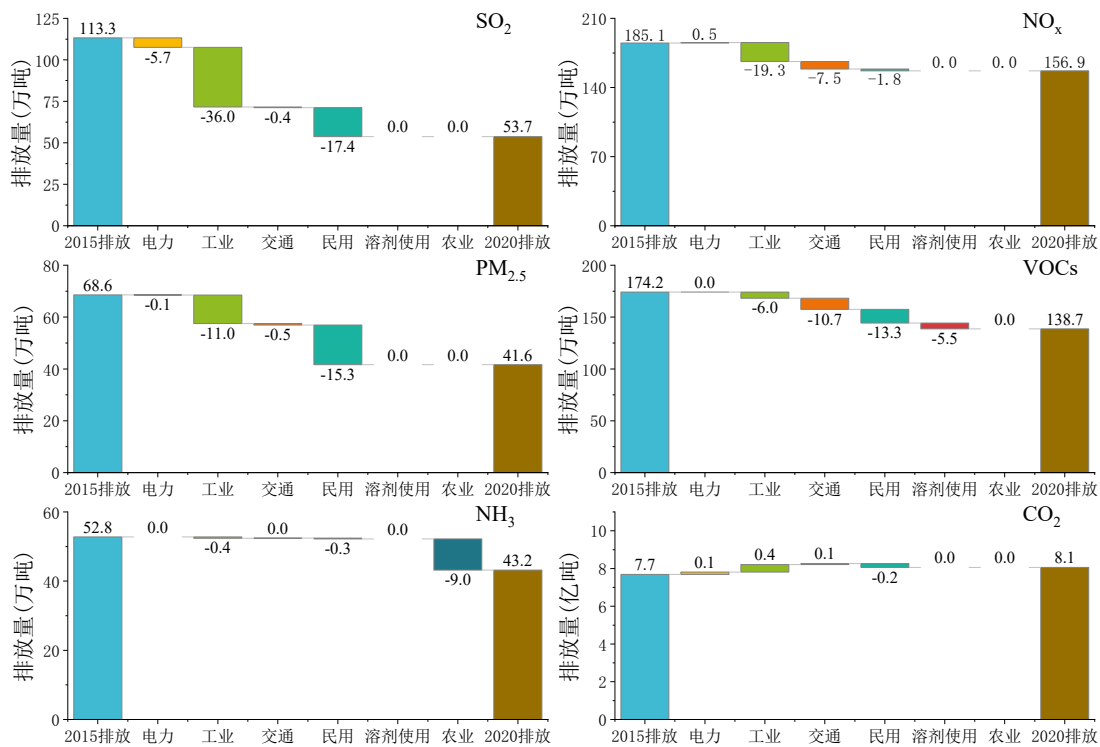


图 2-6 河北省 2015-2020 年主要大气污染物与温室气体排放变化驱动分析

第4节 部门特征

第 2 节和第 3 节分别在 6 大部门层面描述了河北省 2015-2020 年间大气污染物与温室气体的排放变化、构成以及驱动力。但是对实际的大气污染治理工作而言，6 大部门的划分仍然较为粗糙。为更精细的表征排放状况，本节对 6 大类排放源进行细分，将其拓展为 38 类精细排放源。表 2-2 展示了各大类排放源包含的精细排放源。

表 2-2 大类排放源对应的精细排放源列表

大类排放源	精细排放源
电力	燃煤电厂、其他电厂
工业	燃煤工业锅炉、其他工业锅炉、燃煤工业供热、其他工业供热、燃煤民用供热、其他民用供热、钢铁、有色金属、水泥、玻璃、其他非金属、石油化工、油气储运、纺织纤维、食品饮料、废弃物处理
交通	汽油机动车、柴油机动车、非道路移动源
民用	城市民用燃煤、城市民用燃油、城市民用燃气、农村民用燃煤、农村民用燃油、农村民用燃气、农村生物质
溶剂使用	建筑喷涂、车辆喷涂、木材喷涂、药品制造、其他工业、印刷印染、生活溶剂、农药使用
农业	氮肥施用、畜禽养殖

根据第 2 节的分析结论，各大类排放源对不同大气污染物及温室气体的排放量的存在差异。本项目根据大类源的排放贡献，筛选出关键的排放物种进行分析。以下将分源类进行讨论。

2015-2020 年间，电力源对 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 VOCs 、 CO_2 的排放贡献分别为 7.65%、14.42%、5.63%、0.14%、20.68%，针对电力源选取 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO_2 共四类排放物种进行分析，如图 2-7 所示。燃煤电厂是电力源 SO_2 的最重要排放源，排放贡献在 99.98% 以上，研究期内排放量从 10.12 万吨降至 4.42 万吨。研究期内，燃煤电厂的 NO_x 排放量从 16.45 万吨降至 12.62 万吨，其他电厂的排放量从 8.55 万吨增至 12.86 万吨。相应的，燃煤电厂和其他电厂对电力源 NO_x 排放的贡献率在 2015 年时分别为 65.80% 和 34.20%，之后在 2020 年，燃煤电厂的贡献率降至 49.53%，其他电厂的贡献率上升至 50.47%。

PM_{2.5} 排放几乎全部来于燃煤电厂，其分担率接近 100%，排放量从 2015 年的 3.23 万吨降至 2020 的 3.11 万吨。燃煤电厂同时也是 CO₂ 的最重要排放源，排放贡献在 99.92%以上，且研究期内排放量上升了 8.16%，从 15478.57 万吨增长至 16741.51 万吨。

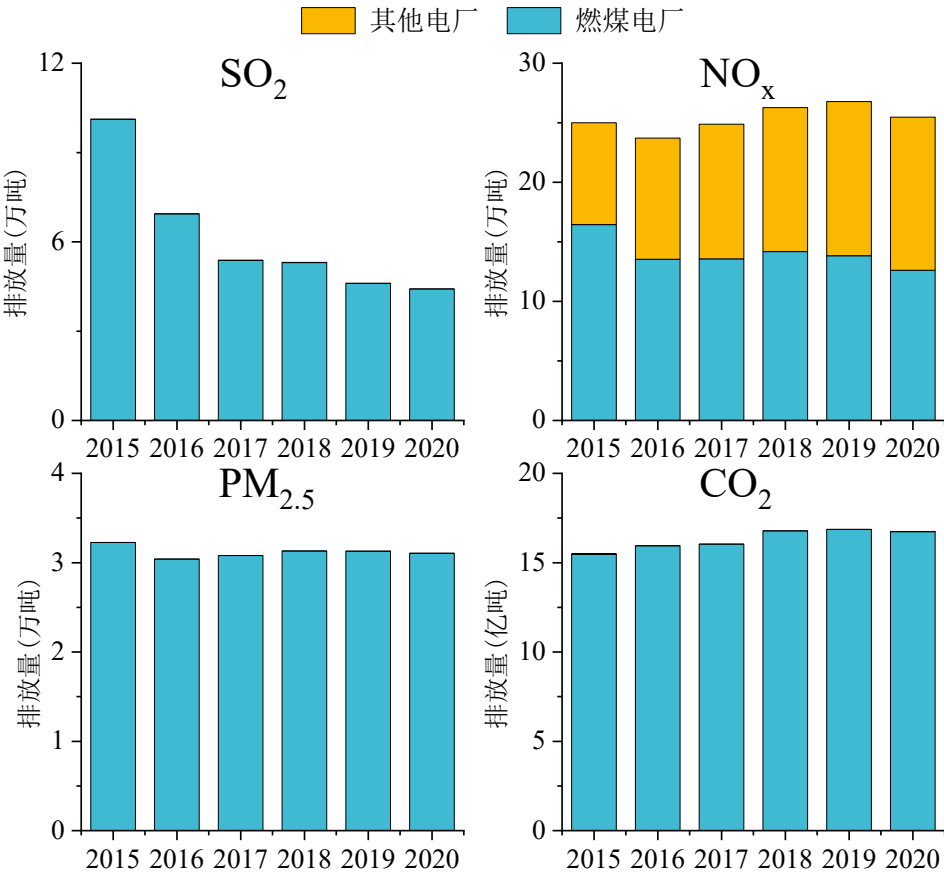


图 2-7 河北省 2015-2020 年电力源 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 CO₂ 排放状况

研究期内，工业源对 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂ 的排放贡献分别为 69.90%、50.14%、52.59%、24.61%、3.42%、65.00%，可知工业排放对几乎所有排放物种均具有较高贡献，以下逐一进行分析，如图 2-8 所示。

燃煤工业锅炉和钢铁是工业源 SO₂ 的主要排放源，二者的排放量

在研究期均有所下降,分别从 2015 年的 29.97 和 32.88 万吨降至 2020 年的 7.64 和 25.96 万吨,降幅分别为 74.50%和 21.05%。燃煤工业锅炉的 SO₂ 排放降幅显著高于钢铁行业,反映到分担率上,可以发现 2015 年时燃煤工业锅炉和钢铁对工业源 SO₂ 排放的贡献率分别为 38.48%和 42.21%,之后在 2020 年,燃煤工业锅炉的贡献率降至 18.23%,钢铁行业的贡献率则上升至 61.91%。

燃煤工业锅炉、燃煤工业供热和钢铁是工业源 NO_x 排放的主要贡献源。其中,燃煤工业锅炉和钢铁的 NO_x 排放量在研究期内分别从 48.42 和 15.87 万吨降至 35.32 和 11.71 万吨,降幅分别为 27.07%和 26.22%。同期,燃煤工业供热的 NO_x 排放量则从 8.01 万吨增至 8.08 万吨,增幅为 2.58%。这种排放增减反映到分担率上,可以发现,2015 年时燃煤工业锅炉、燃煤工业供热、钢铁对 NO_x 排放的贡献率分别为 51.35%、8.50%、16.83%,之后燃煤工业锅炉和钢铁的排放贡献率在 2020 年分别下降至 47.12%和 15.62%,燃煤工业供热的排放贡献率在同期则增至 10.78%。

燃煤工业锅炉、钢铁、水泥是工业源 PM_{2.5} 排放的主要贡献源,三者的 PM_{2.5} 排放量在研究期内均有所下降,分别从 4.88、21.68、3.68 万吨下降至 1.86、16.81、2.14 万吨,降幅分别为 61.92%、22.47%、41.72%。钢铁行业 PM_{2.5} 排放的降幅显著低于燃煤工业锅炉和水泥行业。从排放贡献的角度分析,2015 年时燃煤工业锅炉、钢铁、水泥对工业源 PM_{2.5} 排放的贡献率分别为 13.69%、60.81%、10.31%。之后燃

煤工业锅炉和水泥行业的贡献率在 2020 年分别降至 7.53%和 8.68%，钢铁行业的贡献继续上升，增至 68.15%，进一步强化了其工业 PM_{2.5} 排放首要贡献源的地位。

燃煤工业锅炉、钢铁、石油化工是工业源 VOCs 排放的主要贡献源，三者的 VOCs 排放量在研究期内均有所下降，分别从 9.48、12.99、9.27 万吨下降至 6.97、12.69、8.68 万吨，降幅依次为 26.49%、2.31%、6.32%。钢铁和石油化工行业的 VOCs 排放的降幅显著低于燃煤工业锅炉。从排放贡献的角度分析，2015 年时燃煤工业锅炉、钢铁、石油化工对工业源 VOCs 排放的贡献率分别为 22.42%、30.72%、21.92%。之后燃煤工业锅炉的贡献率在 2020 年时降至 19.23%，钢铁与石油化工行业的贡献率则在 2020 年时分别上升至 35.02%和 23.95%。

工业源 NH₃ 排放主要来源于石油化工和废弃物处理。石油化工行业的 NH₃ 排放量在研究期内从 1.64 万吨降至 1.23 万吨，降幅为 24.93%。废弃物处理源的 NH₃ 排放量则从 2015 年的 0.26 万吨增至 0.31 万吨，增幅为 19.70%。这一排放增减反映到排放结构上，可以发现 2015 年时石油化工行业与废弃物处理对工业源 NH₃ 排放的贡献率分别为 86.25%和 13.75%。2020 年时，石油化工行业的贡献率降至 79.74%，废弃物处理的贡献率上升至 20.26%。

燃煤工业锅炉、其他工业锅炉、水泥是工业源 CO₂ 排放的主要贡献源，三者的 CO₂ 排放量在研究期内均有所上升，分别从 31686.00、10119.92、3923.73 万吨增长至 32553.62、11558.41、4830.73 万吨，

增幅依次为 2.74%、14.21%、23.12%万吨。其他工业锅炉和水泥行业的 CO₂ 排放的增幅显著高于燃煤工业锅炉。从排放贡献的角度分析，2015 年时燃煤工业锅炉、其他工业锅炉、水泥对工业源 CO₂ 排放的贡献率分别为 63.42%、20.26%、7.85%，之后在 2020 年，燃煤工业锅炉的贡献率降至 60.41%，其他工业锅炉和水泥行业的贡献率分别增至 21.45%和 8.96%。

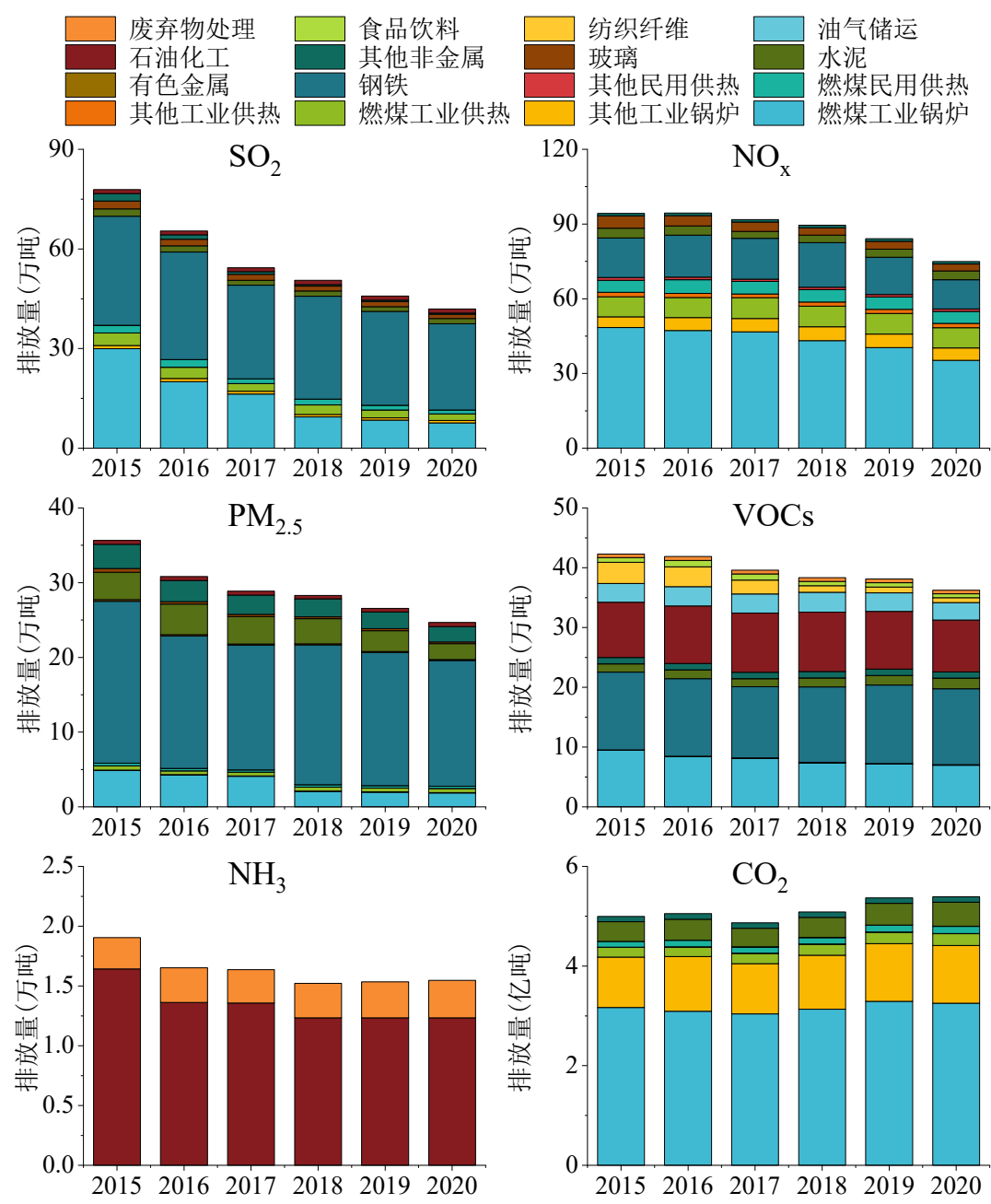


图 2-8 河北省 2015-2020 年工业源 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃ 和 CO₂ 排放状况

研究期内，交通源对 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂ 的排放贡献分别为 1.26%、32.12%、6.34%、17.61%、0.64%、8.27%，本项目选取交通排放的 NO_x、PM_{2.5}、VOCs、CO₂ 共四类排放物种进行分析，如图 2-9 所示。

柴油机动车和非道路移动源是主要的交通 NO_x 排放源，二者的排放量在研究期均有所下降，分别从 2015 年的 46.07 和 10.42 万吨降至 2020 年的 38.89 和 10.27 万吨，降幅分别为 15.59%和 1.43%。柴油机动车的 NO_x 排放降幅显著高于非道路移动源。从排放分担来看，2015 年时柴油机动车和非道路移动源对交通源 NO_x 排放的贡献率分别为 77.55%和 17.54%，至 2020 年，柴油机动车的贡献率降至 74.99%，非道路移动源的贡献率增至 19.81%。

柴油机动车和非道路移动源也是主要的交通 PM_{2.5} 排放源，二者的排放量分别从 2015 年的 2.55 和 0.85 万吨降至 2020 年的 2.16 和 0.80 万吨，降幅分别为 15.24%和 5.75%。柴油机动车的 NO_x 排放降幅高于非道路移动源。从排放构成来看，2015 年时柴油机动车和非道路移动源对交通源 NO_x 排放的贡献率分别为 67.86%和 22.67%。之后在 2020 年时，柴油机动车的贡献率降至 66.77%，非道路移动源的贡献率增至 24.81%。

汽油机动车和柴油机动车是交通源 VOCs 的主要排放源，二者的排放量在研究期均有较为显著的下降，分别从 2015 年的 29.73 和 3.69

万吨降至 2020 年的 21.00 和 1.77 万吨,降幅分别为 29.36%和 52.03%。柴油机动车的 VOCs 排放降幅高于汽油机动车。从排放分担来看,2015 年时汽油机动车和柴油机动车对交通源 VOCs 排放的贡献率分别为 87.15%和 10.83%。之后在 2020 年,汽油机动车的贡献率增至 89.51%,柴油机动车的贡献率降至 7.55%。

汽油机动车和柴油机动车同样是交通源 CO₂ 的主要排放源,且二者的排放量在研究期均有所上升,分别从 2015 年的 2133.53 和 3426.10 万吨增至 2020 年的 2570.59 和 3530.10 万吨,增幅分别为 20.49%和 3.04%。汽油机动车的 CO₂ 排放增幅高于柴油机动车。从排放分担来看,2015 年时汽油机动车和柴油机动车对交通源 CO₂ 排放的贡献率分别为 34.61%和 55.58%。之后在 2020 年,汽油机动车的贡献率增至 38.30%,柴油机动车的贡献率降至 52.60%。

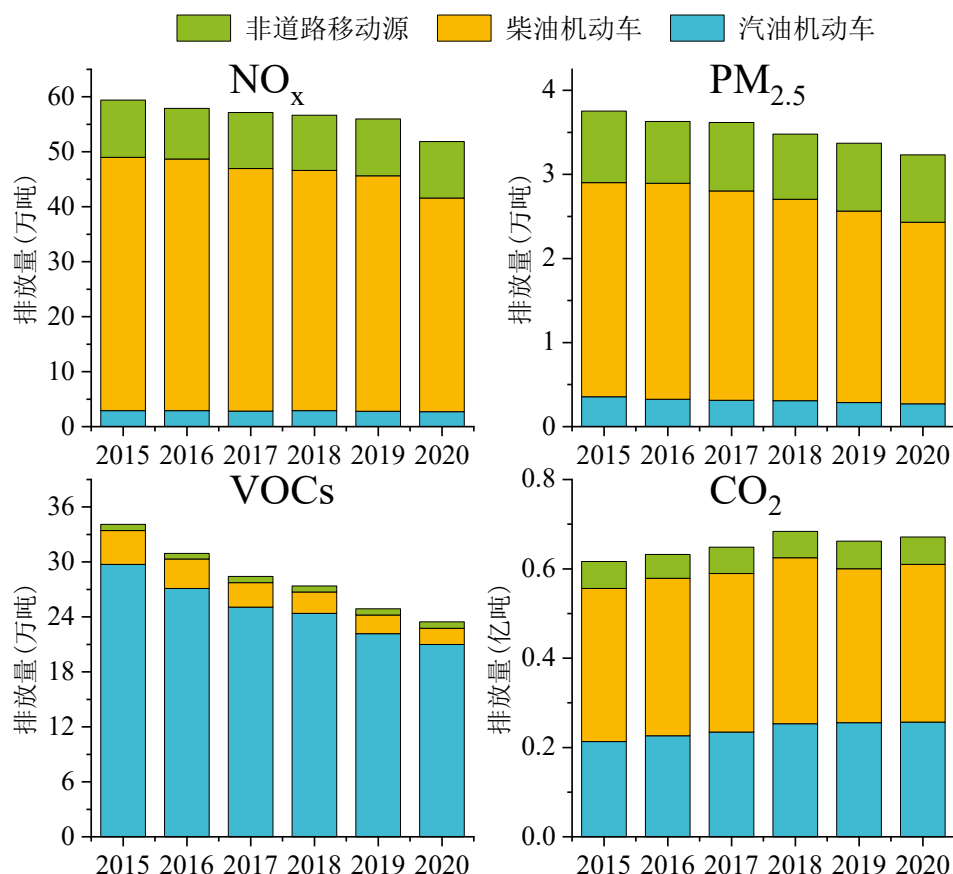


图 2-9 河北省 2015-2020 年交通源 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs 和 CO_2 排放状况

2015 至 2020 年间，民用源对 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs、 NH_3 、 CO_2 的排放贡献分别为 21.19%、3.32%、35.44%、14.45%、2.56%、6.05%，本项目选取民用源排放的 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs、 CO_2 共四类排放物种进行分析，如图 2-10 所示。

城市民用燃煤和农村民用燃煤是民用源 SO_2 的主要排放源，二者的排放量在研究期均有所下降，分别从 2015 年的 3.90 和 19.88 万吨降至 2020 年的 3.06 和 3.38 万吨，降幅分别为 21.44%和 82.98%。城市民用燃煤和农村民用燃煤的 SO_2 排放降幅均相对较高，后者尤为显著。从排放分担来看，2015 年时城市民用燃煤和农村民用燃煤对民用源 SO_2 排放的贡献率分别为 16.24%和 82.82%，至 2020 年，城市民

用燃煤的贡献率升至 46.51%，农村民用燃煤的贡献率降至 51.38%。

农村民用燃煤和农村生物质是民用源 PM_{2.5} 的主要排放源，二者的排放量分别从 2015 年的 15.95 和 9.03 万吨降至 2020 年的 2.53 和 7.36 万吨，降幅分别为 84.11%和 18.55%。农村民用燃煤的 PM_{2.5} 排放降幅显著高于农村生物质。从排放构成来看，2015 年时农村民用燃煤和农村生物质对民用源 PM_{2.5} 排放的贡献率分别为 61.46%和 34.79%。之后在 2020 年时，农村民用燃煤的贡献率大幅降至 23.84%，农村生物质的贡献率则大幅升至 69.19%，成为了民用源 PM_{2.5} 排放的首要贡献者。

农村民用燃煤和农村生物质同样是民用源 VOCs 的主要排放源，二者的排放量分别从 2015 年的 12.92 和 14.15 万吨降至 2020 年的 2.31 和 11.50 万吨，降幅分别为 82.13%和 18.69%。与 PM_{2.5} 排放的走势类似，农村民用燃煤的 VOCs 排放降幅显著高于农村生物质。从排放分担来看，2015 年时农村民用燃煤和农村生物质对民用源 VOCs 排放的贡献率分别为 45.93%和 50.30%。之后在 2020 年，农村民用燃煤的贡献率大幅降至 15.54%，农村生物质的贡献率则大幅升至 77.42%，成为了民用源 VOCs 排放的首要贡献者。

城市民用燃煤、城市民用燃气、农村民用燃煤是民用源 CO₂ 的主要排放源。其中，城市民用燃煤和农村民用燃煤的 CO₂ 排放量在研究期有所下降，分别从 758.08 和 3621.00 万吨降至 598.89 和 647.55 万吨，降幅分别为 21.00%和 82.12%。城市民用燃气的 CO₂ 排放量则上

升显著,从2015年的 595.88 万吨增至 1439.32 万吨,增幅高达 141.55%。

从排放分担来看,2015 年时城市民用燃煤、城市民用燃气、农村民用燃煤对民用源 CO₂ 排放的贡献率分别为 14.35%、11.28%、68.53%。

之后在 2020 年,城市民用燃煤和城市民用燃气的贡献率增至 18.35%和 44.10%。农村民用燃煤的贡献率则大幅下降至 19.84%。

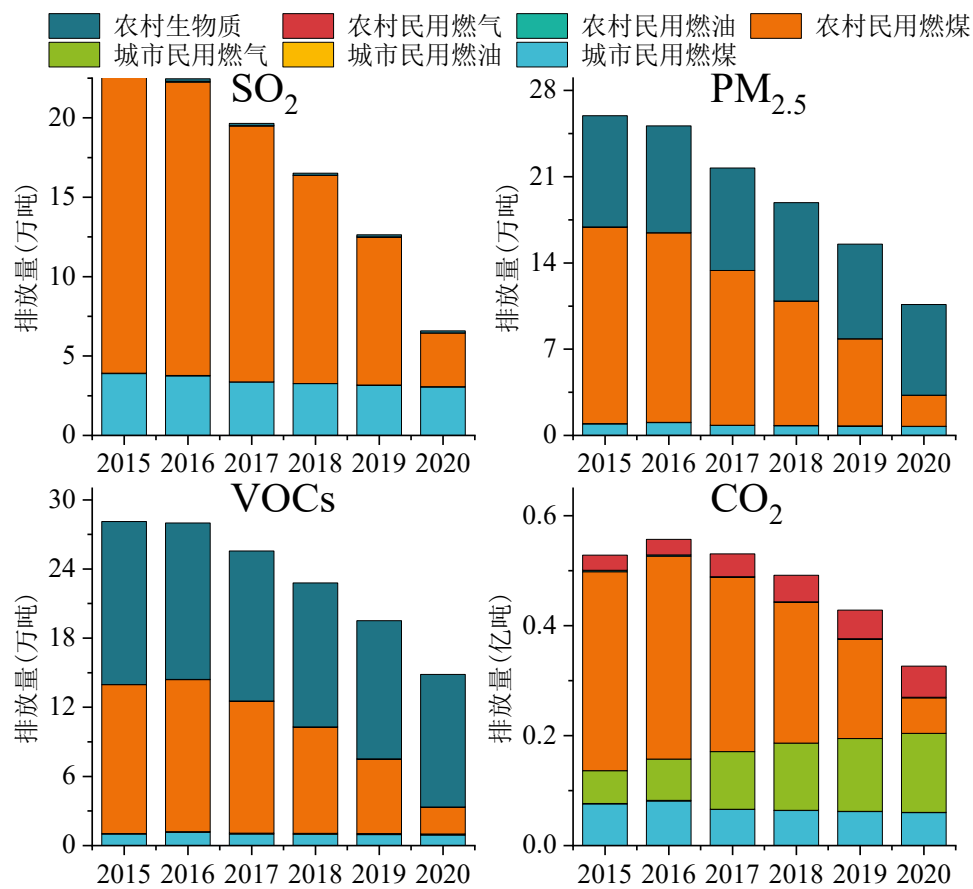


图 2-10 河北省 2015-2020 年民用源 SO₂、PM_{2.5}、VOCs 和 CO₂ 排放状况

农业源仅考虑 NH₃ 排放,研究期内对总量的贡献为 93.38%。如图 2-11 所示,从细分源类来看,氮肥施用和畜禽养殖的排放量均有所下降,分别从 2015 年的 23.42 和 25.82 万吨降至 2020 年的 17.79 和 22.45 万吨,降幅分别为 24.05%和 13.05%。氮肥施用的 NH₃ 排放

降幅高于畜禽养殖。从排放分担来看，2015 年时氮肥施用和畜禽养殖对农业源 NH_3 排放的贡献率分别为 47.57%和 52.43%。之后在 2020 年，氮肥施用的贡献率降至 44.21%，畜禽养殖的贡献率增至 55.79%。尽管这两类源的贡献率有所变动，但幅度不大，保持着相对平稳。

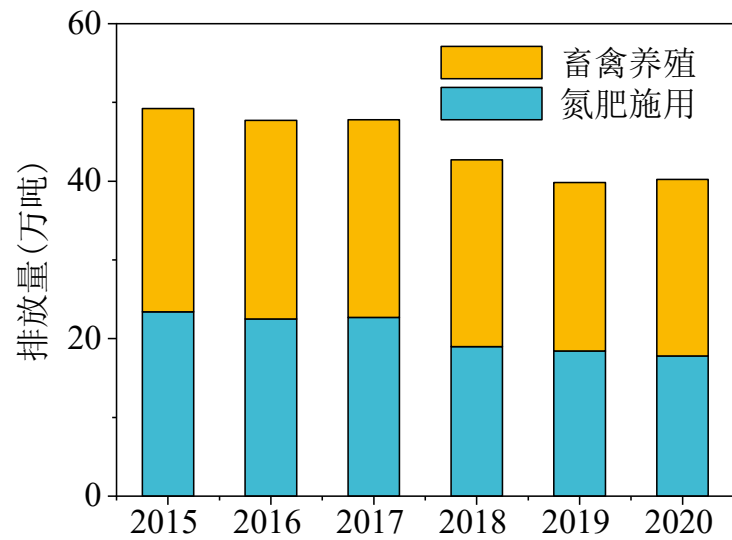


图 2-11 河北省 2015-2020 年农业源 NH_3 排放状况

溶剂使用源仅考虑 VOCs 排放，研究期内对总量的贡献为 43.19%。如图 2-12 所示，从细分源类来看，车辆喷涂、其他工业、印刷印染、生活溶剂的排放量有所上升，分别从 2015 年的 4.82、19.27、3.72、1.41 万吨增至 2020 年的 5.30、22.85、3.78、1.50 万吨，增幅分别为 9.87%、18.54%、1.53%、6.18%。建筑喷涂、木材喷涂、药品制造、农药使用的排放量有所下降，分别从 2015 年的 9.20、5.85、21.17、3.98 万吨降至 2020 年的 7.56、5.40、14.66、2.85 万吨，降幅分别为 17.85%、7.65%、30.77%、28.44%。其他工业的 VOCs 排放增幅最大，药品制造行业的排放降幅最大。

从排放结构的角度来看，2015 年时各精细源类对溶剂使用源

VOCs 排放的贡献从高到低依次为药品制造、其他工业、建筑喷涂、木材喷涂、车辆喷涂、农药使用、印刷印染、生活溶剂，对应的贡献率依次为 30.50%、27.76%、13.25%、8.43%、6.94%、5.74%、5.36%、2.03%。至 2020 年，各精细源类排放贡献从高到低依次为其他工业、药品制造、建筑喷涂、木材喷涂、车辆喷涂、印刷印染、农药使用、生活溶剂，对应的贡献率分别是 35.76%、22.94%、11.83%、8.46%、8.29%、5.91%、4.46%、2.35%。可以发现，其他工业、药品制造、建筑喷涂是溶剂使用源 VOCs 排放的主要贡献源，贡献率一直在 10% 以上。“十三五”时期，其他工业与药品制造行业的 VOCs 分别经历了明显的上升与下降，相应的，药品制造业 VOCs 首要排放源的位置逐渐让渡给了其他工业，

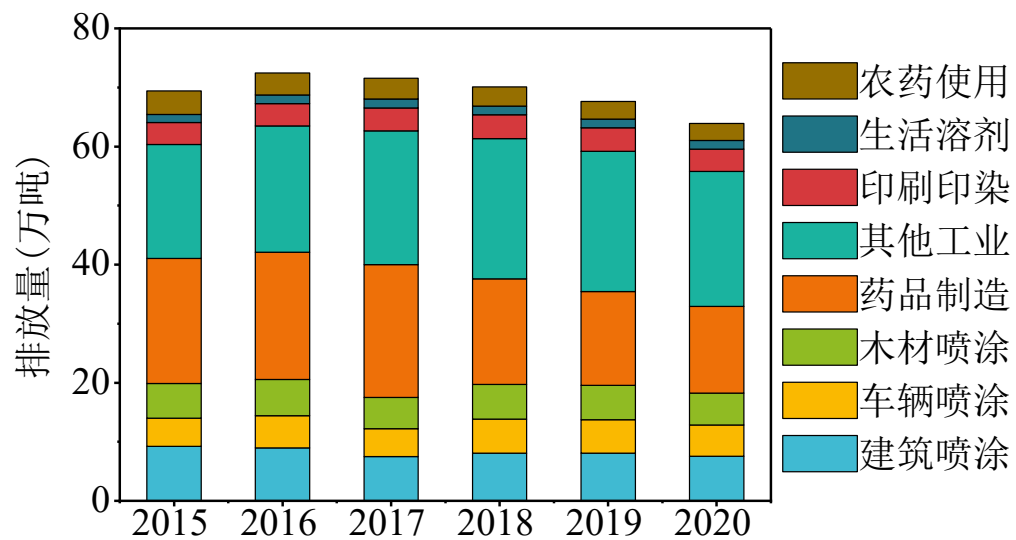


图 2-12 河北省 2015-2020 年溶剂使用源 VOCs 排放状况

如若不考虑精细排放源所属的排放大类，直接考察其对区域各排放物种总量的贡献，可以发现，2015-2020 年间，SO₂ 排放的前五位贡献源类为钢铁、燃煤工业锅炉、农村民用燃煤、燃煤电厂、城市民用

燃煤,贡献率依次为 37.19%、19.10%、16.70%、7.65%和 4.27%。 NO_x 排放的前五位贡献源类为柴油机动车、燃煤工业锅炉、钢铁、燃煤电厂、其他电厂,贡献率依次为 24.78%、24.76%、8.88%、7.98%和 6.44%。 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的前五位贡献源类为钢铁、农村民用燃煤、农村生物质、水泥、燃煤工业锅炉,贡献率依次为 32.92%、19.13%、14.74%、5.93%和 5.74%。 VOCs 排放的前五位贡献源类为汽油机动车、其他工业、药品制造、农村生物质、钢铁,贡献率依次为 15.55%、13.91%、11.82%、7.98%和 7.94%。 NH_3 排放的前五位贡献源类为畜禽养殖、氮肥施用、石油化工、农村生物质、废弃物处理,贡献率依次为 50.17%、43.21%、2.81%、2.56%、0.60%。 CO_2 排放的前五位贡献源类为燃煤工业锅炉、燃煤电厂、其他工业锅炉、水泥、柴油机动车,贡献率依次为 40.11%、20.67%、13.77%、5.30%、4.48%。综合以上分析结果,可知钢铁、燃煤工业锅炉、燃煤电厂、农村生物质、农村民用燃煤、柴油机动车、水泥这 7 个精细源类为河北省“十三五”期间的重点排放源。

第5节 时空分布

第 1 节到第 4 节讨论了河北省“十三五”期间主要大气污染和温室气体排放的演变趋势与分担状况,研究尺度为省域。本节将在此基础上,从市域层面上考察排放的时空分布状况。

图 2-13 展示了 2015 与 2020 年河北省地级市层面主要污染物与温室气体排放的结构与变化。由于不同城市有着不同的社会经济规模、

能源结构、产业结构、人口结构、交通结构、用地结构以及后处理技术普及水平，因此排放的总量与构成也均具有一定的差异。

对于 SO_2 而言，2015 年时，排放前五位的城市依次为唐山市、石家庄市、保定市、邯郸市、沧州市，排放量分别为 25.65、17.54、13.21、12.84、11.62 万吨，对区域总排放的分担率依次为 22.65%、15.49%、11.67%、11.34%、10.26%，合计占比为 71.40%。2020 年时，排放前五位的城市依次为唐山市、石家庄市、邯郸市、保定市、沧州市，排放量分别为 12.95、8.61、5.99、5.91、5.51 万吨，对区域总排放的分担率依次为 24.10%、16.02%、11.16%、11.00%、10.26%，合计占比为 72.53%。2020 年与 2015 年相比， SO_2 排放进一步聚集，唐山市与石家庄市的排放分担率仍在上升。从排放变化率来看，2015 至 2020 年间，所有城市的 SO_2 排放量均有所下降，其中唐山市降幅最小，为 49.52%，邢台市降幅最大，为 56.76%。从排放结构来看，研究期内，唐山市对河北省电力源与工业源的 SO_2 排放贡献最高，分别为 26.69% 和 26.20%，保定市对交通源与民用源的 SO_2 排放贡献最高，分别为 14.56% 和 16.00%。

对于 NO_x 而言，2015 年时，排放前五位的城市依次为唐山市、石家庄市、保定市、邯郸市、沧州市，排放量分别为 39.79、29.36、21.94、20.06、19.08 万吨，对区域总排放的分担率依次为 21.50%、15.86%、11.85%、10.84%、10.31%，合计占比为 70.36%。2020 年时，排放前五位的城市与 2015 年时相同，排放量分别为 33.37、24.87、

18.70、17.12、16.14 万吨，对区域总排放的分担率依次为 21.27%、15.85%、11.92%、10.91%、10.29%，合计占比为 70.23%。2020 年与 2015 年相比，NO_x 排放区域分担差异不大。从排放变化率来看，2015 至 2020 年间，所有城市的 NO_x 排放量均有所下降，其中张家口市降幅最小，为 14.14%，唐山市降幅最大，为 16.13%。从排放结构来看，研究期内，唐山市对河北省电力源与工业源的 NO_x 排放贡献最高，分别为 26.69%和 25.59%，石家庄市对交通源 NO_x 排放贡献最高，为 15.17%，保定市对民用源 NO_x 排放贡献最高，为 15.13%。

对于 PM_{2.5} 而言，2015 年时，排放前五位的城市依次为唐山市、石家庄市、保定市、邯郸市、沧州市，排放量分别为 13.34、9.94、8.93、8.03、7.04 万吨，对区域总排放的分担率依次为 19.44%、14.49%、13.01%、11.71%、10.26%，合计占比为 68.92%。2020 年时，排放前五位的城市与 2015 年时相同，排放量分别为 8.80、6.24、5.13、4.77、4.28 万吨，对区域总排放的分担率依次为 21.13%、14.98%、12.32%、11.45%、10.27%，合计占比为 70.16%。2020 年与 2015 年相比，PM_{2.5} 排放进一步聚集，唐山市与石家庄市的排放分担率仍在上升。从排放变化率来看，2015 至 2020 年间，所有城市的 PM_{2.5} 排放量均有所下降，其中唐山市降幅最小，为 34.01%，邢台市降幅最大，为 44.25%。从排放结构来看，研究期内，唐山市对河北省电力源与工业源的 PM_{2.5} 排放贡献最高，分别为 26.69%和 26.51%，保定市对交通源与民用源的 PM_{2.5} 排放贡献最高，分别为 14.89%和 16.71%。

对于 VOCs 而言，2015 年时，排放前五位的城市依次为唐山市、石家庄市、保定市、邯郸市、沧州市，排放量分别为 35.51、26.82、21.48、19.33、17.95 万吨，对区域总排放的分担率依次为 20.39%、15.40%、12.33%、11.10%、10.31%，合计占比为 69.53%。2020 年时，排放前五位的城市与 2015 年时相同，排放量分别为 29.42、21.76、16.58、15.38、14.26 万吨，对区域总排放的分担率依次为 21.21%、15.69%、11.96%、11.09%、10.28%，合计占比为 70.23%。2020 年与 2015 年相比，VOCs 排放进一步聚集，唐山市与石家庄市的排放分担率仍在上升。从排放变化率来看，2015 至 2020 年间，所有城市的 VOCs 排放量均有所下降，其中唐山市降幅最小，为 17.15%，邢台市降幅最大，为 23.90%。从排放结构来看，研究期内，唐山市对河北省电力源、工业源和溶剂使用源的 VOCs 排放贡献最高，分别为 26.69%、25.57%和 24.17%，石家庄市对交通源 VOCs 排放贡献最高，为 16.12%，保定市对民用源 VOCs 排放贡献最高，为 16.70%。

对于 NH₃ 而言，2015 年时，排放前五位的城市依次为保定市、石家庄市、邯郸市、唐山市、沧州市，排放量分别为 6.59、6.31、6.26、6.22、5.42 万吨，对区域总排放的分担率依次为 12.48%、11.95%、11.85%、11.79%、10.26%，合计占比为 58.35%。2020 年时，排放前五位的城市与 2015 年时相同，排放量分别为 5.39、5.23、5.14、5.13、4.39 万吨，对区域总排放的分担率依次为 12.48%、12.10%、11.90%、11.88%、10.16%，合计占比为 58.52%。2020 年与 2015 年相比，NH₃

排放区域分担差异不大。从排放变化率来看，2015 至 2020 年间，所有城市的 NH_3 排放量均有所下降，其中秦皇岛市降幅最小，为 16.08%，邢台市降幅最大，为 19.63%。从排放结构来看，研究期内，唐山市对河北省工业源的 NH_3 排放贡献最高，为 23.65%，石家庄市对交通源的 NH_3 排放贡献最高，为 16.28%，保定市对民用源和农业源的 NH_3 排放贡献最高，分别为 16.91%和 12.39%。

对于 CO_2 而言，2015 年时，排放前五位的城市依次为唐山市、石家庄市、保定市、邯郸市、沧州市，排放量分别为 18682.96、12280.96、8506.42、8373.89、7907.39 万吨，对区域总排放的分担率依次为 24.30%、15.97%、11.06%、10.89%、10.28%，合计占比为 72.50%。2020 年时，排放前五位的城市与 2015 年时相同，排放量分别为 19911.43、13021.77、8759.76、8734.85、8286.23 万吨，对区域总排放的分担率依次为 24.70%、16.15%、10.87%、10.83%、10.28%，合计占比为 72.83%。2020 年与 2015 年相比， CO_2 排放区域分担差异不大。从排放变化率来看，2015 至 2020 年间，所有城市的 CO_2 排放量均有所上升，其中邢台市增幅最小，为 1.55%，唐山市增幅最大，为 6.58%。从排放结构来看，研究期内，唐山市对河北省电力源与工业源的 CO_2 排放贡献最高，分别为 26.69%和 26.28%，石家庄市对交通源 CO_2 排放贡献最高，为 15.72%，保定市对民用源 CO_2 排放贡献最高，为 15.26%。

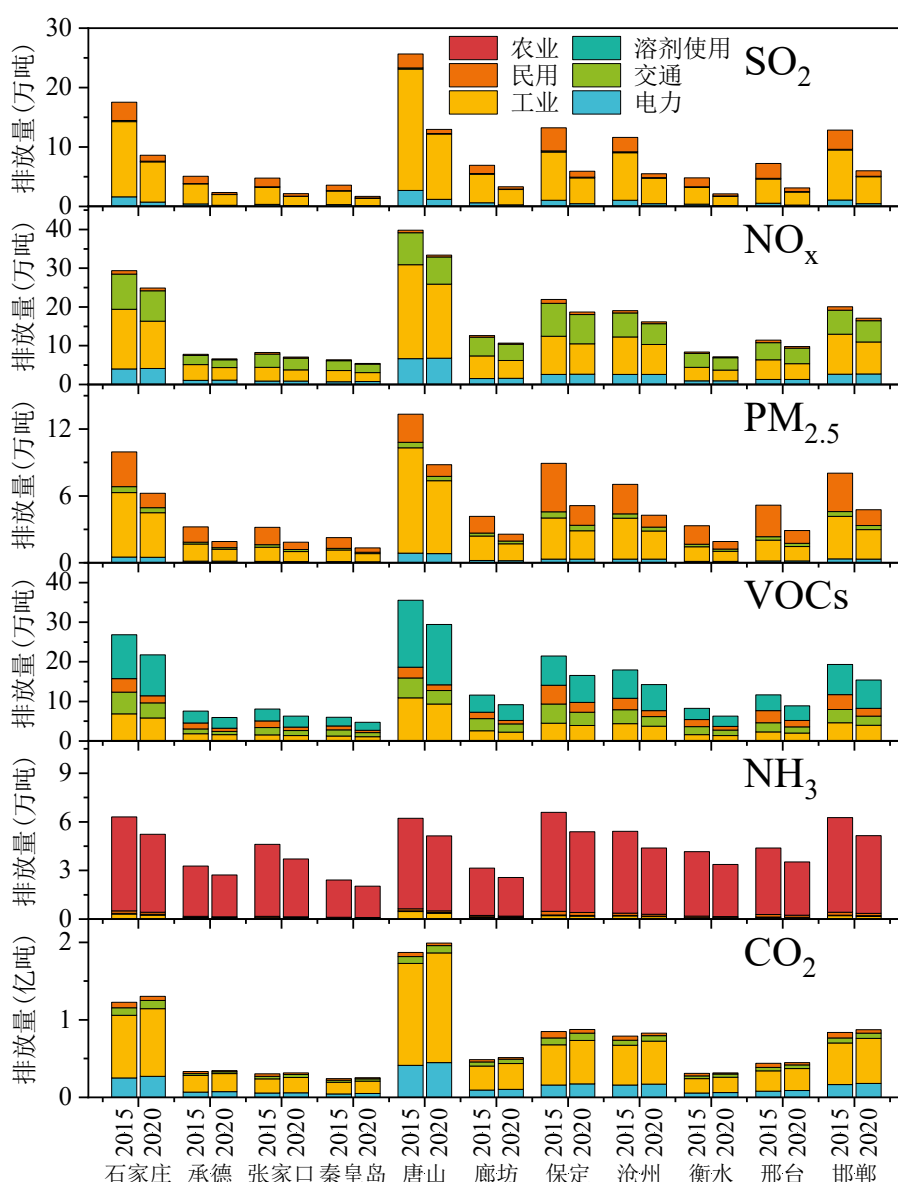


图 2-13 河北省 2015 与 2020 年不同城市主要污染物与温室气体排放状况

图 2-14 展示了 2020 年河北省主要污染物排放的空间分布状况。污染物排在空间上主要聚集于城区等人口密集区域，同时在全省范围内呈现北低南高的特点。若将京津冀区域作为整体来分析，则空间分异规律更加显著。唐山、天津中部存在 SO_2 排放高值区域，而北京市的 SO_2 排放在北京及周边地区处于较低水平。这主要与能源结构有关，2020 年北京市全市煤炭消费总量已压减至 173 万吨，煤炭消费

占比 1.9%，优质能源比重提升至 98%以上。北京市通过积极推动清洁采暖，大力发展可再生能源，成功完成能源清洁转型，当前其能源结构已发展到国际较优水平，大幅领先于国内其他区域与城市。相较之下，河北省的能源结构仍相对落后，未来需继续压减燃煤消耗量，提升清洁能源消费占比。

京津唐为 NO_x 排放高值区域。北京产业布局较为集约，产业主要集中在国家级产业开发区，工业布局向平原新城转移。目前已形成以高新技术产业和战略新兴产业为主导的产业格局。然而北京市 NO_x 排放仍处于较高水平，原因在于其机动车保有量庞大。在河北省，石家庄市对交通源的排放贡献较高，原因同样是其庞大的机动车保有规模。当前石家庄市的汽车保有量已突破 300 万辆，位列河北省第一。

唐山、天津中部存在 $\text{PM}_{2.5}$ 排放高值区，北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 排放则处于较低水平。在唐山、天津中部存在 VOCs 排放高值区域，北京市中南部的 VOCs 排放处于较高水平。相较于北京，天津市产业结构调整滞后，第二产业增加值比重较高且以重工业为主导，生产性服务业发展相对滞后。河北省工业重型化特征同样突出，钢铁、水泥排放占比相对较高。

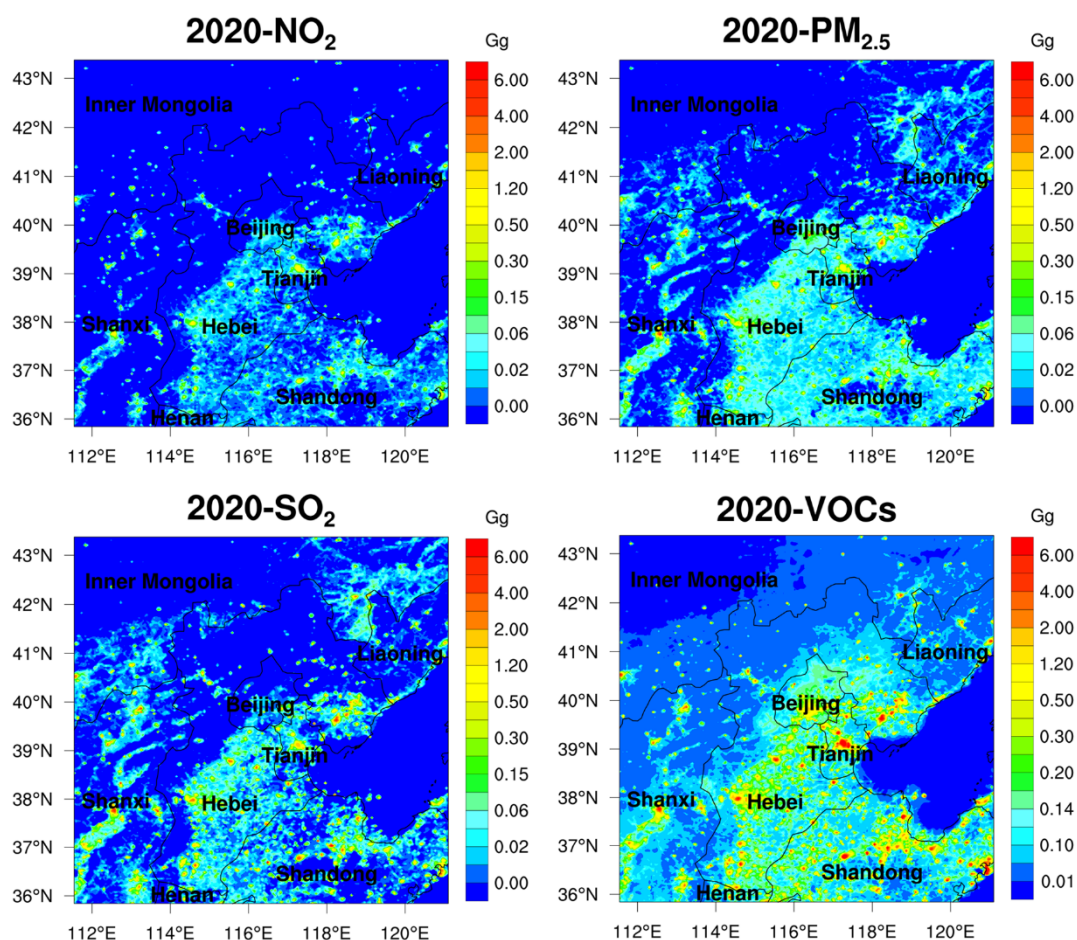


图 2-14 河北省 2020 年主要污染物排放空间分布

表 2-3 展示了 2020 年河北省各城市主要大气污染物与温室气体排放强度，据此可以对排放的空间高值区进行量化。SO₂ 和 CO₂ 排放强度位居前五的城市为唐山、石家庄、廊坊、沧州、保定。NO_x、PM_{2.5} 和 VOCs 排放强度位居前五的城市为唐山、廊坊、石家庄、沧州、保定。NH₃ 排放强度位居前五的城市为廊坊、衡水、唐山、石家庄、沧州。综上所述，排放强度高值主要集中在唐山、石家庄、廊坊、沧州、保定等地。

表 2-3 河北省各城市 2020 年主要大气污染物与温室气体排放强度（单位：吨/平方公里）

城市	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	CO ₂
----	-----------------	-----------------	-------------------	------	-----------------	-----------------

石家庄	5.43	15.69	3.94	13.73	3.30	8216.66
承德	0.60	1.67	0.48	1.51	0.69	874.52
张家口	0.59	1.93	0.50	1.71	1.01	854.47
秦皇岛	2.15	6.96	1.72	6.04	2.59	3236.01
唐山	9.61	24.77	6.53	21.84	3.81	14779.86
廊坊	5.16	16.57	3.97	14.25	4.00	7980.94
保定	2.68	8.46	2.32	7.50	2.44	3963.69
沧州	4.11	12.03	3.19	10.63	3.27	6175.00
衡水	2.40	8.09	2.15	7.13	3.82	3588.93
邢台	2.52	7.86	2.32	7.13	2.83	3593.43

通过以上分析可知，从排放量分担来看，唐山市、石家庄市、保定市、沧州市、邯郸市为重点区域，从城市排放强度来看，唐山市、石家庄市、沧州市、廊坊市、保定市为重点区域。综合来看，唐山市、石家庄市、保定市、沧州市这四个城市的总体排放量与排放强度均相对较高，应成为河北省减污降碳工作的关键区域。

第3章 大气污染治理措施效果与成本量化

第1节 措施整理

本项目基于河北省在《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》时期发布的主要大气污染治理政策，以及从生态环境部门获取的相关实施细则、详细配套政策、逐年自查报告、以及附表等数据资料，梳理了全省主要的减排措施及执行情况，同时基于MEIC 排放模型，解析了 2016-2020 年间河北省各项措施对主要污染物与温室气体的减排贡献。

本项目将河北省“十四五”期间所实施的各项措施，划分为能源结构调整、产业结构调整、运输结构调整、用地结构调整、末端治理工程 5 大类措施，各措施包含的具体内容列于表 3-1 中。从中提取出 11 项细化措施：燃煤锅炉整治、民用能源清洁化、落后产能淘汰、散乱污企业清理整治、移动源排放管控、农业综合治理、扬尘综合治理、工业提标改造、电厂超低排放改造、挥发性有机物源头替代、重点行业挥发性有机物治理。燃煤锅炉整治主要针对燃煤锅炉清洁能源替代与燃气锅炉低氮改造。民用燃料清洁化主要指民用散煤治理。散乱污企业清理整治主要体现为工业源减排。移动源排放管控主要针对柴油货车、汽油车、非道路移动机械等优化升级。扬尘源综合整治主要针对土壤、施工以及道路扬尘。挥发性有机物治理包含了对石化企业和汽修、餐饮、家具制造、汽车制造等重点行业的精细化治理。

表 3-1 河北省“十三五”期间主要减排措施及执行情况

措施类别	具体内容
能源结构调整	✓ 2016 年-2020 年 10 月，煤炭消费量从 30864 万吨降至 28201 万吨，下降 8.6%。
	✓ 截至 2020 年，全省完成双代改造 1125 万户，重点区域（传输通道城市）平原地区农村取暖散煤基本“清零”。
	✓ 2016 年-2020 年 10 月，累积淘汰/升级燃煤小锅炉 58706 台，147011 蒸吨，基本完成 35 蒸吨/小时及以下燃煤锅炉淘汰。
产业结构调整	✓ 2016-2020 年间，持续调整优化产业布局，完成 84 家城市重点污染工业企业和 39 家危险化学品生产企业退城搬迁改造。
	✓ 2016-2020 年间，累积淘汰整治“散乱污”企业 13.2 万家。持续保持“散乱污”企业动态清零。
	✓ 2016-2020 年间，累积压减炼钢产能 8211.4 万吨，平板玻璃 4999 万重量箱，煤炭 5007 万吨，火电机组 229.05 万千瓦。
交通结构调整	✓ 2016-2020 年间，机动车排放标准由国 IV 上升至国 VI，成品油质量从国 V 上升至国 VI。
	✓ 截至 2020 年，累积推广新能源汽车 31.38 万辆标准车；淘汰老旧机动车 74555 辆、摩托车及挂车类老旧车 179572 辆。
	✓ 2016-2020 年间，铁路货运量由 2.61 亿吨上升至 4.82 亿吨，增长率为 84.7%。
	✓ 截至 2020 年 10 月，全省有 41 个 5 万吨级以上泊位具备岸电供应能力。
用地结构调整	✓ 2016-2020 年间，河北省累积造林总面积为 4161 万亩，全省 4330 处责任主体灭失矿山迹地已完成治理 3229 处，综合治理率 75%。
	✓ 截至 2020 年 10 月，城市道路机械化清扫率达到 85%以上，共完成工业企业料堆场整治 1134 家。
	✓ 2020 年，秸秆综合利用率继续稳定在 95%以上。
末端治理工程	✓ 截至 2020 年 10 月底，完成钢铁、焦化、水泥、平板玻璃、陶瓷六大行业 399 家企业 1084 个超低排放改造项目。
	✓ 截至 2020 年 9 月底，完成 925 家低 VOCs 原辅材料替代，5166 家无组织排

放治理，1207 家高效治理设施建设，对 2885 家实施“一厂一策”精细化管控，27 个涉 VOCs 工业园区（企业集群）治理。

✓ 截止 2020 年 10 月底，累计淘汰不达标工业炉窑 533 台，取缔燃煤热风炉 2 台，淘汰炉膛直径 3 米以下燃料类煤气发生炉 21 台，清洁能源替代工业炉窑 306 台，深度治理 2562 台。

本项目逐条分析、量化了每则细化措施对能源消费数据、能源效率、工业产品产量、技术分布和末端控制水平的影响，以 2020 年为基准年，计算了 2016-2020 年间各项细化措施对 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂ 的减排量与减排贡献，并以此作为后续减排成本核算的基础数据。

第2节 措施效果

3.2.1 排放变化

本节将各细化措施对主要污染物与温室气体的减排效果进行分解，如图 3-1 所示。

对 SO₂ 减排效果较明显的措施是民用能源清洁化、燃煤锅炉整治、工业提标改造、落后产能淘汰，四项措施在 2016-2020 年间带来的减排量分别为 19.21、16.63、12.76、8.09 万吨，贡献率依次为 32.53%、28.15%、21.61%、13.70%，合计为 95.99%。

对 NO_x 减排效果较为显著的措施是工业提标改造、移动源排放管控、燃煤锅炉整治、落后产能淘汰，减排量依次为 14.09、11.33、9.20、6.81 万吨，贡献率分别是 30.22%、24.29%、19.72%、14.61%，合计为 88.84%。

对 $\text{PM}_{2.5}$ 减排效果最为显著的措施是民用能源清洁化，减排量与减排贡献分别为 16.29 万吨和 37.41%。工业提标改造、扬尘综合治理、落后产能淘汰、燃煤锅炉整治对 $\text{PM}_{2.5}$ 减排亦有较高贡献，减排量分别为 16.29、8.36、7.85、4.75 万吨，贡献率依次为 19.19%、18.04%、10.90%、9.93%。

对 VOCs 减排效果较为显著的三项措施分别为民用能源清洁化、重点行业挥发性有机物治理、挥发性有机物源头替代，减排量分别为 15.79、8.02、7.80 万吨，减排贡献依次为 38.00%、19.30%、18.77%，合计为 76.07%。

NH_3 的减排主要来自于农业综合治理，减排量为 4.20 万吨，减排贡献为 94.92%。民用能源清洁化和移动源排放管控对 NH_3 减排也有一定贡献，减排量分别为 0.22 和 0.01 万吨，减排效果分别为 4.91% 和 0.16%。

对 CO_2 减排效果较为显著的措施是散乱污企业清理整治、落后产能淘汰、燃煤锅炉整治，减排量分别为 0.36、0.20、0.16 亿吨，减排贡献依次为 43.45%、23.96%、19.29%，三项措施合计减排贡献为 86.70%。

总体而言，能源结构调整措施，包括民用能源清洁化与燃煤锅炉整治，对于 SO_2 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的减排效果较好，合计减排贡献分别为 60.69% 和 47.34%。产业结构调整措施，包括落后产能淘汰和散乱污企业清理整治，有效缓解了 CO_2 的排放增势，减排贡献合计为 67.40%。工

业提标改造显著降低了 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 排放，减排贡献率的均值为 23.67%。移动源排放管控有效降低了 NO_x 排放，对 VOCs 和 CO₂ 减排也有一定贡献。在用地结构调整中，扬尘综合治理有效降低了一次 PM_{2.5} 排放，农业综合治理对 NH₃ 减排效果显著。对于 VOCs 的专项治理，包括重点行业挥发性有机物治理和挥发性有机物源头替代，有效减少了 VOCs 排放，减排贡献合计达到了 38.07%。

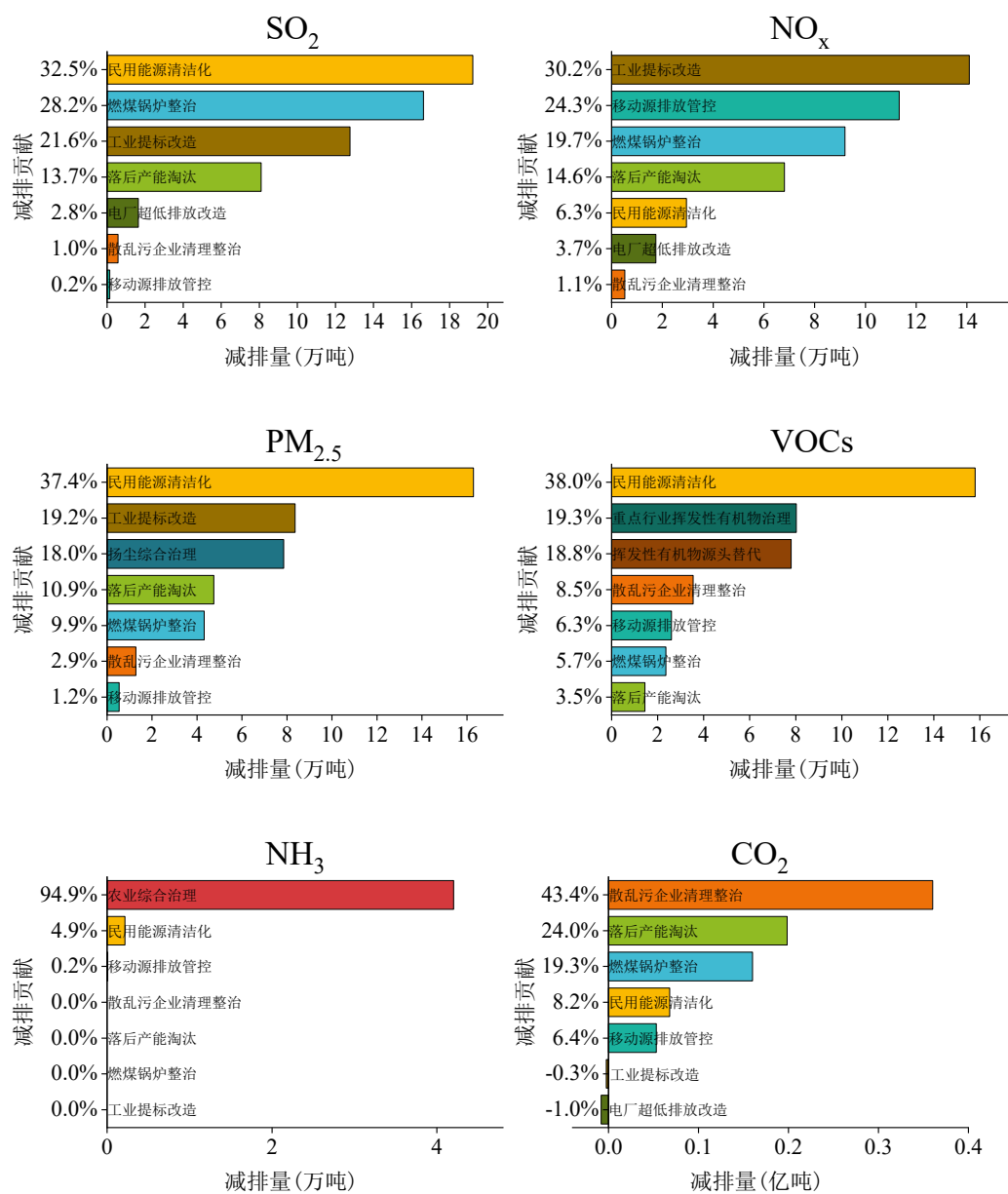


图 3-1 河北省“十三五”期间主要减排措施减排量与减排贡献

3.2.2 浓度变化

本项目基于 WRF-CMAQ 空气质量模拟框架，分析了研究期内河北省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化状况。图 3-2 展示了河北省 2015 年和 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度模拟的空间分布状况，总体呈现出“南高北低”的特征。

$\text{PM}_{2.5}$ 浓度低值区分布在北部燕山山区与坝上高原和西部太行山区，这些区域人类活动少，污染物排放强度小，主要位于张家口、承德和秦皇岛北部地区。浓度中值区分布在平原东北部，滨海地区较好的大气扩散条件在一定程度上缓解了唐山较高排放强度对空气质量的影响。浓度高值区分布在平原南部，主要包括石家庄、保定、邢台、邯郸等地，这些地区人口众多、路网密集、产业集中，能耗与排放强度较高，同时处在太行山麓半封闭地形中，大气扩散条件较差。

从年际变化来看，2015-2020 年间，河北省各市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度普遍下降，空气质量整体持续改善，达到国家二级标准的区域范围显著扩大。尽管空间分布虽一直“南高北低”，但南北差距逐步缩小，各城市间的浓度逐步均匀化。

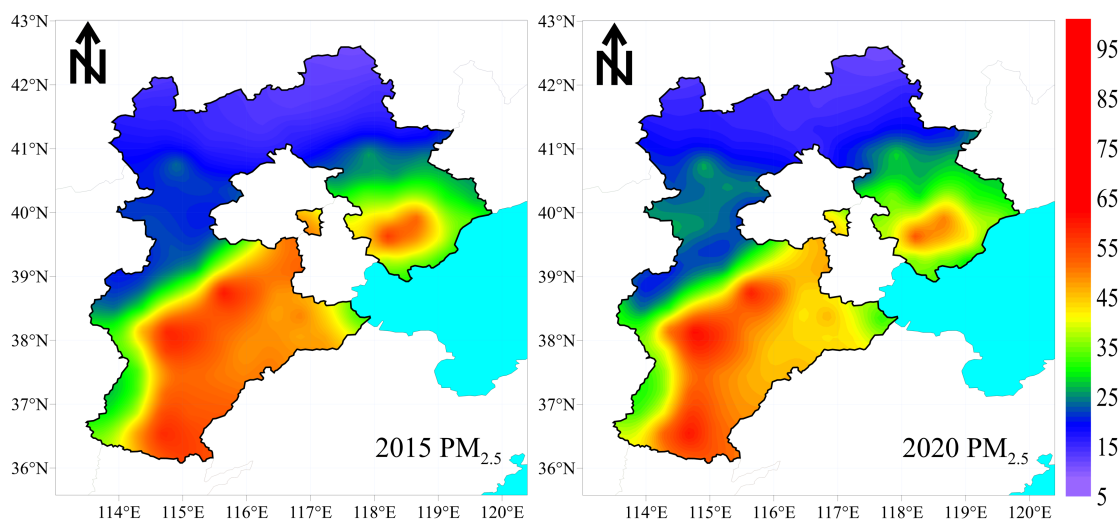


图 3-2 河北省 2015 年与 2020 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度空间分布

图 3-3(a)利用国控站空气质量监测数据对模拟的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度进行了验证。监测数据表明，2015-2020 年间，河北省的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度由 $74\mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降至 $45\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，降幅为 39.2%。根据模拟结果， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的降幅为 40.8%，说明本项目搭建的空气质量模拟框架能够较好反映研究区域的空气质量改善状况，模拟结果基本可靠。基于这一模拟框架，本项目通过设计敏感性实验分析了河北省“十三五”期间主要大气污染治理措施对对空气质量改善的贡献。

图 3-3(b)展示了不同减排措施对浓度 $\text{PM}_{2.5}$ 下降的贡献。“十三五”期间，对河北省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降贡献最大的措施为民用能源清洁化，削减了 $7.73\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降总量的 26.67%。工业提标改造、扬尘综合治理、燃煤锅炉整治、“散乱污”企业清理整治、落后产能淘汰、电厂超低排放改造对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献也较为显著，分别削减了 $5.45\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $4.28\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $3.56\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2.34\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2.28\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1.48\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占浓度下降总量的 18.78%、14.75%、12.26%、8.08%、7.86%、5.11%。以上措施合计贡献了近 95%的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降幅。农业综合治理、挥发性有机物治理、移动源排放管控对河北省 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的贡献相对较小，仅分别削减了 $0.77\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.59\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $0.53\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，对浓度下降的贡献分别为 2.64%、2.03%、1.82%。总体而言，对民用源散煤的压减、对工业源后处理设施的升级、以及对扬尘源的针对性整治，是河北省“十三五”期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降的关键举措。

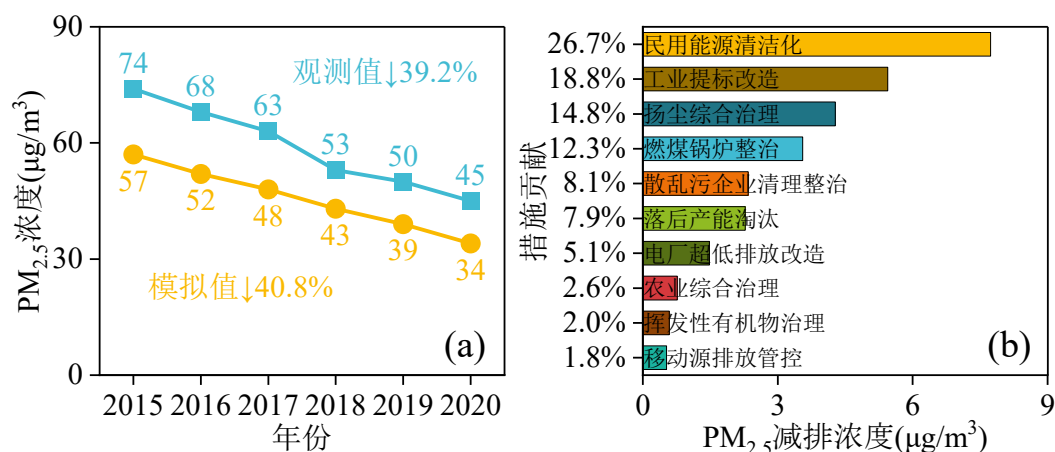


图 3-3 河北省 2015-2020 年 PM_{2.5} 年均浓度：(a)模拟值与观测值对比；(b)不同减排措施对浓度下降的贡献

第3节 措施成本

本节考察了各细化措施对主要污染物与温室气体的单位减排成本，如图 3-4 所示。需要指出的是，本项目所指的措施成本，仅考虑了政府大气污染治理的财政直接支出，未考虑行政成本以及企业、居民支出。

对于 SO₂ 而言，电厂超低排放改造、落后产能淘汰、燃煤锅炉整治的单位减排成本较低，分别为 12.96、49.99、50.27 元/千克。NO_x 减排成本较低的措施同样为电厂超低排放改造、落后产能淘汰、燃煤锅炉整治，减排成本分别为 12.26、59.35、90.90 元/千克。扬尘综合治理与落后产能淘汰对 PM_{2.5} 的单位减排成本较低，分别为 29.41 和 85.18 元/千克。对于 VOCs 而言，挥发性有机物源头替代和重点行业挥发性有机物治理的单位减排成本较低，分别为 5.01 和 75.71 元/千克。NH₃ 排放中，农业综合治理的单位减排成本为 11.21 元/千克，显著低于其他措施。对于 CO₂ 而言，燃煤锅炉整治的单位减排成本最低，

为 53.17 元/吨，落后产能淘汰、散乱污企业清理整治、移动源排放管
控、民用能源清洁化的单位减排成本依次升高，分别为 279.27、338.46、
928.85、1218.06 元/吨。

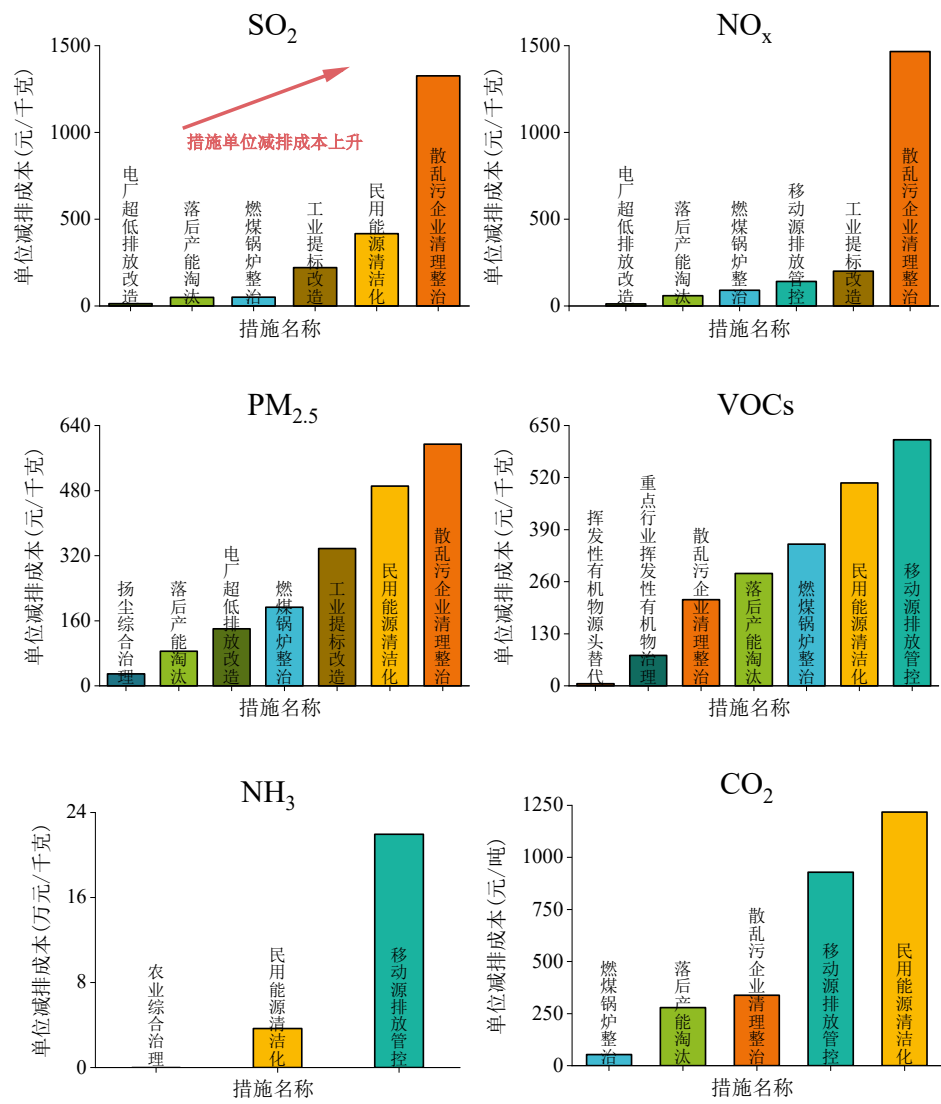


图 3-4 河北省“十三五”期间主要减排措施单位成本

第4节 协同评价

进一步分析不同治理措施的大气污染物与温室气体的减排协同性，如图 3-5 所示。本处定义污染物与 CO₂ 的减排协同度为单位污染物减排可实现的 CO₂ 减排。在图 3-5 中，每项措施标记在横轴和纵轴

的位置分别代表了该措施在“十三五”期间大气污染物与 CO₂ 的减排量，措施标记的大小代表了单位污染物减排可协同实现的 CO₂ 减排，即该项措施的 CO₂-污染物的减排协同度。减排协同度的计算公式如下：

$$CER_{m,p} = \frac{ER_{m,CO_2}}{ER_{m,p}} \quad \text{公式 3-1}$$

其中，CER 为 CO₂-污染物减排协同度，m 为措施名称，p 为污染物，ER 为研究期内由措施 m 带来的 CO₂ 或污染物 p 的减排量。

对 CO₂ 与 SO₂ 的减排协同度而言，散乱污企业清理整治和移动源排放管控是 CO₂-SO₂ 减排协同度最高的两项措施，每万吨的 SO₂ 减排可协同实现 6.27 和 3.64 千万吨的 CO₂ 减排。落后产能淘汰、燃煤锅炉整治、民用能源清洁化的 CO₂-SO₂ 减排协同度较弱，每万吨的 SO₂ 减排可分别协同实现 2.45、0.96、0.35 百万吨的 CO₂ 减排。

对 CO₂ 与 NO_x 的减排协同度而言，散乱污企业清理整治是 CO₂-NO_x 减排协同度最高的措施，每万吨的 NO_x 减排可协同实现 6.94 千万吨的 CO₂ 减排。落后产能淘汰、民用能源清洁化、燃煤锅炉整治、移动源排放管控的 CO₂-NO_x 减排协同度次之，每万吨的 NO_x 减排可分别协同实现 2.91、2.31、1.74、0.47 百万吨的 CO₂ 减排。

对 CO₂ 与 PM_{2.5} 的减排协同度而言，散乱污企业清理整治仍然是 CO₂-PM_{2.5} 减排协同度最高的措施，每万吨的 PM_{2.5} 减排可协同实现 2.81 千万吨的 CO₂ 减排。移动源排放管控、落后产能淘汰、燃煤锅炉整治、民用能源清洁化的 CO₂-PM_{2.5} 减排协同度次之，每万吨的 PM_{2.5}

减排可分别协同实现 9.83、4.18、3.70、0.42 百万吨的 CO₂ 减排。

对 CO₂ 与 VOCs 的减排协同度而言，落后产能淘汰和散乱污企业清理整治是 CO₂-VOCs 减排协同度最高的两项措施，每万吨的 VOCs 减排可协同实现 1.38 和 1.02 千万吨的 CO₂ 减排。燃煤锅炉整治、移动源排放管控、民用能源清洁化的 CO₂-VOCs 减排协同度次之，每万吨的 VOCs 减排可分别协同实现 6.77、2.04、0.43 百万吨的 CO₂ 减排。

总体而言，散乱污企业清理整治、落后产能淘汰、移动源排放管控三项措施的 CO₂-污染物减排协同度较高。此外，工业提标改造和电厂超低排放改造两项措施在削减了污染物排放的同时，推高了 CO₂ 排放量，因此减排协同度为负。对于减排协同性较差的举措，在实施前应充分考虑其对大气环境的正向与负向影响，全面评估其减排效果。

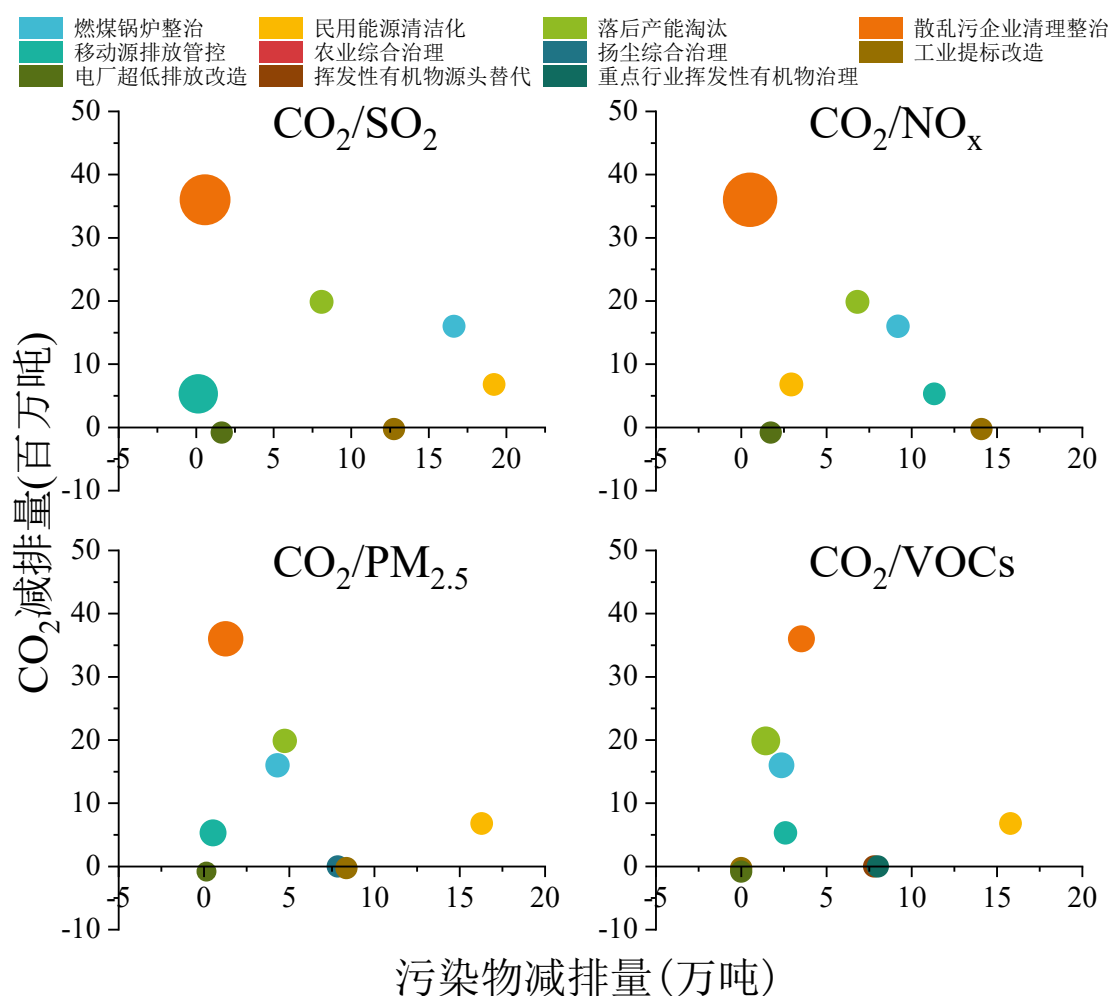


图 3-5 河北省“十三五”期间主要减排措施协同性

第5节 减煤评估

从第 2 节的评估结果来看，能源结构调整的相关措施，包括民用能源清洁化与燃煤锅炉整治，对于 SO₂、PM_{2.5}、VOCs 等污染物均有较好的减排效果。能源结构调整的关键，在于推进煤炭集约高效利用，减少煤炭消费量，逐步削弱煤炭在资源结构和能源消费结构中的主导地位。因此，减煤相关举措在当前大气污染防治工作中占据着重要地位。本节将从活动水平、排放变化、减排贡献等多个视角，分析河北省“十三五”期间减煤举措所带来的环境治理成果。

2015 至 2020 年间，河北省涉煤的主要细分排放源有 6 类，包括燃煤电厂、燃煤工业锅炉、燃煤工业供热、燃煤民用供热、城市民用燃煤、农村民用燃煤，用煤类型包括原煤、型煤与洗煤。本项目首先考察 6 类涉煤排放源活动水平的变化状况，如图 3-6(a)所示。2015 年，涉煤排放源的用煤总量为 1.86 亿吨，其中，燃煤电厂、燃煤工业锅炉、燃煤工业供热、燃煤民用供热、城市民用燃煤、农村民用燃煤的煤耗量分别为 8672.29、5080.08、1099.37、664.93、486.59、2583.67 万吨，占比依次是 46.66%、27.33%、5.91%、3.58%、2.62%、13.90%，可知燃煤电厂、燃煤工业锅炉、农村民用燃煤的煤耗占比较高。2020 年，涉煤排放源的用煤总量下降至 1.61 亿吨，降幅为 13.23%，其中燃煤电厂、燃煤工业锅炉、燃煤工业供热、燃煤民用供热、城市民用燃煤、农村民用燃煤的煤耗量分别为 9436.60、3618.63、1368.43、815.99、426.14、461.77 万吨，占比依次是 58.51%、22.44%、8.49%、5.06%、2.64%、2.86%。燃煤电厂、燃煤工业供热、燃煤民用供热的煤耗量有所增长，分别上升了 764.31、269.06、151.06 万吨，增幅依次为 8.81%、24.47%、22.72%，对煤耗增长的贡献分别为 64.53%、22.72%、12.75%。燃煤电厂和燃煤工业供热是区域煤耗增长的主要驱动源类。燃煤工业锅炉、城市民用燃煤、农村民用燃煤的煤耗量有所下降，分别降低了 1461.45、60.45、2121.89 万吨，降幅依次为 28.77%、12.42%、82.13%，对煤耗下降的贡献分别为 40.11%、1.66%、58.23%。农村民用燃煤和燃煤工业锅炉是区域煤耗下降的主要驱动源类，对应的政策举措为民

用能源清洁化与燃煤锅炉整治。具体而言，“十三五”期间，河北省的煤耗削减主要来自于农村散煤的“煤改气”与“煤改电”以及工业小型燃煤锅炉的淘汰。由于电气化与集中供暖的推行，电力煤耗与供热煤耗相应上升。

不同排放部门的燃煤具有不同的排放水平。尽管河北省 2015-2020 年间的燃煤总量降幅不大，但涉煤排放源的排放变动相对较高。如图 3-6(b)所示，6 类涉煤排放源的 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、VOCs、 CO_2 的排放总量，分别从 2015 年的 69.92、49.86、25.93、23.22、31194.59 万吨降至 2020 年的 21.65、36.28、9.08、9.95、27190.16 万吨，减排量分别为 48.27、13.58、16.84、13.26、4004.43 万吨，降幅依次为 69.04%、27.24%、64.96%、57.13%、12.84%。需要指出的是，这些减排量不能全部归因于减煤措施。以燃煤电厂为例，尽管其燃煤消耗量有所上升，但部分物种的排放量仍然有所下降，该源类 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量分别从 2015 年的 10.12、16.18、3.23 万吨降至 2020 年的 4.42、12.30、3.11 万吨，降幅分别为 56.37%、23.97%、3.74%。而 VOCs 与 CO_2 的排放量则分别从 0.22 和 15248.98 万吨增长至 0.24 和 16469.34 万吨，增幅分别为 8.80%和 8.00%，二者与其煤耗的增幅 8.81%非常接近，说明煤耗增长是排放上升的主要影响因素。燃煤电厂部分物种排放的下降，得益于燃煤电厂超低排放改造，电力行业普遍开展了脱硫、脱硝、除尘治理，提升了后处理设施的普及率与削减效率，进而降低了 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量。因此在评估减煤措施的污染治理

效果时，有必要将减煤措施带来的减排与后处理措施带来的减排进行区分。

本项目首选筛选出燃煤消耗量下降的部门，即燃煤工业锅炉、城市民用燃煤、农村民用燃煤，假设这些源类的排放因子保持 2015 年水平，将其分别与 2015 和 2020 年的活动水平相乘，以所得排放量的差值，来衡量减煤政策的污染治理效果。如图 3-6(c)所示，2015 至 2020 年间，河北省减煤相关政策带来的 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、CO₂ 减排量分别为 29.35、9.19、15.23、14.49、6732.22 万吨，降幅分别为 55.19%、44.52%、71.20%、64.14%、52.87%。其中，城市民用燃煤、农村民用燃煤、燃煤工业锅炉对 SO₂ 的减排贡献分别为 1.87%、55.39%、42.74%，对 NO_x 的减排贡献分别为 2.78%、21.00%、76.22%，对 PM_{2.5} 的减排贡献分别为 0.60%、86.01%、13.39%，对 VOCs 的减排贡献分别为 0.77%、73.22%、26.01%，对 CO₂ 的减排贡献分别为 1.34%、43.72%、54.94%。可见农村民用燃煤的削减，主导了 SO₂、PM_{2.5} 和 VOCs 的减排，燃煤工业锅炉的淘汰，主导了 NO_x 和 CO₂ 的减排。

本项目还测算了减煤政策对区域整体减排所作的贡献。此处首先对 2015-2020 年间，排放增长和下降的细分排放源进行识别，区分出哪些源类助推了排放增长，哪些源类助益了排放削减。在细分源类层级上对 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、CO₂ 的排放增量与减量分别加和，增量依次为 1.38、10.40、0.78、8.42、11280.63 万吨，减量依次为 -60.90、

-38.59、-27.74、-43.91、-7562.76 万吨，二者合并即为区域总变化量-59.52、-28.19、-26.95、-35.49、3717.86 万吨。将区域总体的减排量与减煤政策带来的减排量相结合，即可分析减煤政策对区域整体减排的贡献。如图 3-6(d)所示，减煤政策对区域 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、CO₂ 的减排贡献分别为 48.20%、23.82%、54.92%、33.00%、89.02%。由此可知，减煤政策对于区域 CO₂ 的减排具有主导性贡献，对于 PM_{2.5} 和 SO₂ 的减排贡献也较为显著。

总体而言，“十三五”期间，河北省的煤耗削减主要来自于民用散煤替代与小型燃煤锅炉淘汰，虽然用煤量总体的下降幅度不大，但对区域总体减排的贡献较为显著。这是因为，即便同样以燃煤为能源，不同源类的排放因子也具有较大差异。民用散煤受炉具、煤质影响，燃烧条件差且缺乏污染物治理措施，其一次 PM_{2.5} 排放因子约为燃煤电厂的 100 倍。小型燃煤锅炉具有位置分散、燃烧不完全等问题，也是大气污染物重要来源。因此，与燃煤电厂、工业供热、民用供热这类集中燃煤相比，民用散煤、小型燃煤锅炉治理具有更高的环境效益。由本节分析可知，以减煤为着力点的能源结构调整是河北省“十三五”期间减少空气污染与碳排放极为重要的举措。未来能源结构与能源布局的优化仍能释放一定的减排空间，“十四五”期间河北省应严控煤炭消费总量，继续推进清洁取暖建设，不断提高消费侧电力比重，降低化石能源消费占比。

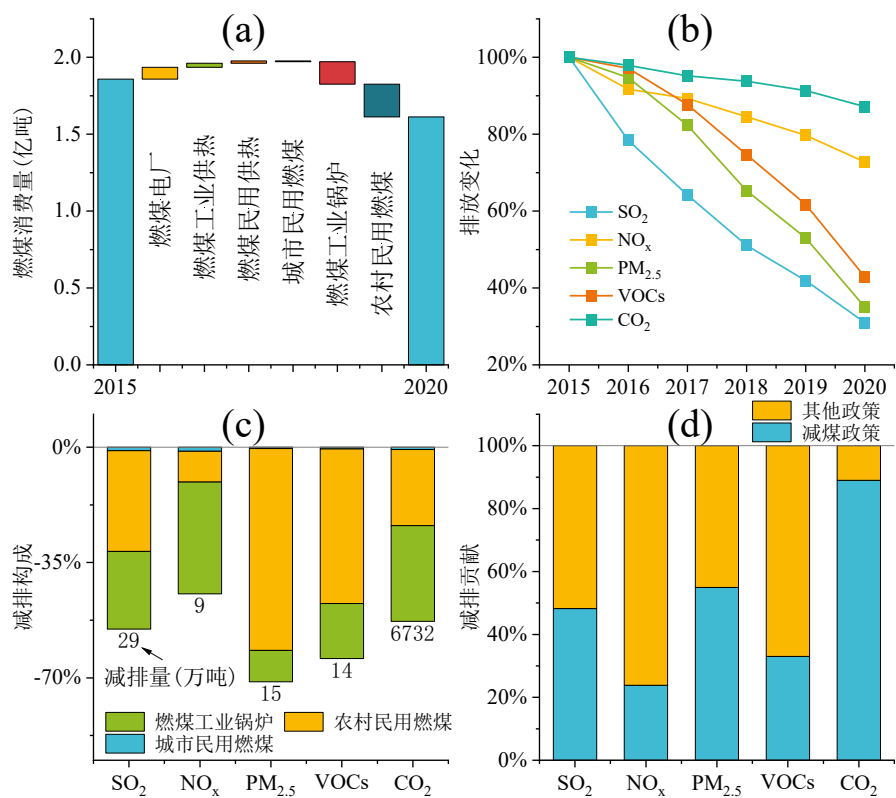


图 3-6 河北省“十三五”期间减煤措施效果评估：(a)2015 与 2020 年主要燃煤源用煤量与变化状况；(b)2015-2020 年间主要燃煤源排放变化；研究期内减煤政策带来的(c)减排量与减排构成(d)以及对区域总体减排的贡献。

第4章 “十四五”减污降碳政策分析

第1节 “十四五”政策梳理

4.1.1 措施梳理

当前，河北省生态文明建设面临着实现生态环境根本好转和“双碳”目标两大战略任务。基于大气污染物和温室气体排放同根同源同过程的特性，减污降碳协同增效成为了河北省新发展阶段的必然选择。本项目收集整理了河北省“十四五”期间减污降碳相关政策法规 40 余项（详见表 4-1），涵盖了省人民政府、生态环境厅、发改委、工信厅、住建厅、交通厅等诸多机构，以期从整体上理顺政策主线，识别关键举措。

表 4-1 河北“十四五”减污降碳政策

政策名称	发布机构
《关于完整准确全面贯彻新发展理念认真做好碳达峰碳中和工作的实施意见》	省委、省政府
《河北省生态环境保护“十四五”规划》	省政府
《关于深入打好污染防治攻坚战实施意见》	省委、省政府
《河北省“十四五”节能减排综合实施方案》	省政府
《河北省“十四五”工业绿色发展规划》	省工信厅
《河北省生态环境监测“十四五”规划》	省生态厅
《河北省促进绿色消费实施方案》	省发改等六部门
《河北省加快推进钢铁产业高质量发展的若干措施》	省工信厅等三部门

《河北省农业农村生态环境保护“十四五”规划》	省生态环境厅
《河北省“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》	省政府
《河北省“十四五”新型储能发展规划》	省发改委
《河北省氢能产业发展“十四五”规划》	省发改委
《河北省被动式超低能耗建筑产业发展专项规划(2020—2025年)》	省工信厅、住建部、科技厅
《关于促进全省地热能开发利用的实施意见》	省政府
《支持重点行业 and 重点设施超低排放改造（深度治理）的若干措施》	省政府
《河北省钢铁产业链集群化发展三年行动计划》	省发改委
《河北省钢铁行业数字化转型专项行动计划（2020-2022年）》	省发改委
《河北省氢能产业链集群化发展三年行动计划(2020—2022年)》	省发改委
《关于支持被动式超低能耗建筑产业发展的若干政策》	省政府
《河北省能源大数据中心建设工作方案》	省发改委
《河北省绿色建筑创建行动实施方案》	住建部等
《河北省绿色社区创建三年行动方案》	省住建厅
《京津冀及周边地区、汾渭平原 2020-2021 年秋冬季大气污染综合治理攻坚行动方案》	生态环境部、发改委等
《河北省数字经济发展规划（2020-2025 年）》	省政府
《河北省秸秆综合利用实施方案（2021-2023 年）》	省政府
《河北省人民政府关于建立健全绿色低碳循环发展经济体系的实施意见》	省政府
《河北省“十四五”大宗固体废弃物综合利用实施方案》	省发改委、科技厅等十部门
《河北省人民政府办公厅关于科学绿化的实施意见》	省政府

《关于加快推动新型储能发展的指导意见》	省发改委
《河北省“十四五”大宗固体废弃物综合利用实施方案》	省发改委
《河北省“十四五”循环经济发展规划》	省发改委
《河北省能源大数据中心建设工作方案》	省发改委
《河北省住房和城乡建设“十四五”规划》	省住建厅
《河北省城镇住房发展“十四五”规划》	省住建厅
《河北省人民政府关于加快实施“三线一单”生态环境分区管控的意见》	省政府
《2021-2022 年秋冬季大气污染综合治理攻坚方案》	生态环境部、发改委等
《关于建立降碳产品价值实现机制的实施方案（试行）》	生态环境部、发改委、 工信部等
《河北省建设京津冀生态环境支撑区“十四五”规划》	省政府
《河北省战略性新兴产业发展“十四五”规划》	省发改委
《河北省重点领域严格能效约束推进节能降碳实施方案》	省发改委等四部门
《屋顶分布式光伏建设指导规范（试行）》	省能源局
《河北省畜禽养殖污染防治“十四五”规划》	省发改委等

本项目通过对表 4-1 中政策的梳理，抽析出了减污降碳的共识政策框架，可归为源头管控、重点领域、环境治理、创新示范、技术攻关共五大方面。

表 4-2 展示了源头管控相关的减污降碳措施，总体而言是为对产业与能源的双重优化。

1、优化重点行业企业布局：坚决遏制“两高”项目盲目发展，合理控制钢铁、水泥、平板玻璃、焦化、煤电、煤化工、煤制油气等行业产能。

2、推动能源绿色低碳转型：升级改造煤电机组，淘汰煤电落后产能，控制农村散煤复燃，打造张家口、承德、唐山、沧州及太行山沿线等百万千瓦级光伏发电基地，推进张家口、承德千万千瓦级风电基地建设，推进丰宁满族自治县、易县、秦皇岛市抚宁区、尚义县等抽水蓄能电站建设，推进国家氢能示范试点建设，提高制氢储氢运氢用氢能力。

表 4-2 “十四五”减污降碳措施—源头管控

分类	措施
优化产业布局	积极推进不符合城市功能定位的钢铁、焦化、水泥、平板玻璃、陶瓷、制药、有色金属、化工等重污染企业退出城市建成区。
	在保障电力安全供应前提下，稳实施燃煤火电机组及自备电厂退城搬迁。
坚决遏制“两高”项目盲目发展	严格执行钢铁、水泥、平板玻璃、焦化等行业产能置换规定，优化产品结构，严禁新增产能。
	合理控制煤电、煤化工、煤制油气等行业产能。
	严格落实国家石化布局规划和政策规定，有序实施列入国家规划重大石化项目。
强化能源消费强度和总量双控/加强政策支撑	严把拟建项目准入关，全面排查清理在建项目，深入挖潜存量项目，严禁建设不符合要求的高耗能高排放项目。
	加强能耗总量和强度双控，严格控制二氧化碳排放强度和污染物排放总量，建立以碳排放、污染物排放、能耗总量为依据的产量约束机制。
	建立用能预算管理制度。
	对能耗双控形势严峻地区实行项目缓批限批、能耗等量或减量替代。
大幅提升能源	强化能耗及二氧化碳排放控制目标分析预警，严格评价考核。
	深入推进工业、建筑、交通运输、公共机构等重点领域节能，优化数据中心等新基建空间布局和用能结构，提高电能利用效率和非化石能源消

利用效率	费比重。 强化重点用能单位节能管理，推进重点用能单位能耗在线监测系统全覆盖。 探索开展能耗产出效率评价，推动能耗要素向单位能耗产出效率高的优质产业、企业、项目流动。
大力削减煤炭消费/实施终端用能清洁化替代	严格控制燃煤发电装机规模，严禁新建自备燃煤机组，推动自备燃煤机组实施清洁能源替代，鼓励自备电厂转为公用电厂。
	进一步淘汰煤电落后产能，持续关停落后小火电机组以及服役期满且不符合延寿条件的 30 万千瓦及以下机组，“上大压小”，推进煤电“三联改动”。
	谋划建设新的输电通道，大幅提升可再生能源调入比例。
	推动工业、采暖等领域电能和天然气替代，置换锅炉和工业窑炉燃煤。
	加强农村散煤复燃管控，持续抓好农村地区清洁取暖，大力推进分布式光伏取暖，实施农村清洁取暖农户动态管理，规范“新增”和“退出”农户标准、程序，建立健全维修服务体系。
	基本完成种养殖业及农副产品加工业燃煤设施清洁能源替代。
	划定高污染燃料禁燃区。
积极发展非化石能源/调整优化能源供给	严格落实煤炭等量或减量替代政策，严控新增产能的新改扩建耗煤项目。
	提升工业终端用能电气化水平，加快推广应用电窑炉、电锅炉、电力设备，扩大电气化终端用能设备使用比例。
	建设产业集群集中供汽供热或清洁低碳能源中心，推动锅炉和工业炉窑使用清洁低碳能源或利用工厂余热、电厂热力。
	加强煤炭清洁高效利用，提升煤矿洗选技术水平，煤矿原煤入选率保持 90%以上。
积极发展非化石能源/调整优化能源供给	控制化石能源消费总量，推动非化石能源成为能源消费增量的主体。
	推动张家口、承德清洁能源创新引领发展，加快建设张家口可再生能源示范区，大力推进张家口、承德市绿氢制备工程建设。

结构	打造张家口氢能全产业发展先导区，以雄安新区为核心打造氢能产业研发创新高地，支持廊坊、保定、定州、石家庄、邯郸等地大力发展涵盖制氢、储氢、运氢、加氢、氢应用全产业链的氢能装备制造产业,支持承德、秦皇岛、唐山、沧州等地加快港口重型卡车等重型车辆氢能替代。 大力发展风能、太阳能等可再生能源发电，打造张家口、承德、唐山、沧州及太行山沿线等百万千瓦级光伏发电基地，大力发展分布式光伏发电，推进张家口、承德千万千瓦级风电基地建设。 以雄安新区为核心打造新型储能研发创新高地，打造张承地区“风电光伏基地+储能”大规模综合应用示范区，打造太行山脉“光伏+储能”规模化应用和装备制造示范带，打造沿海“新能源+储能”和“工业大用户+储能”多元化应用示范带。 建设抽水蓄能重点工程，推进丰宁满族自治县、易县、秦皇岛市抚宁区、尚义县等抽水蓄能电站建设，加快徐水、滦平、灵寿、邢台、怀来、赤城、蔚县抽水蓄能电站项目前期工作。加快化学储能、压缩空气储能等规模化应用。 推进国家氢能示范试点建设，提高制氢储氢运氢用氢能力。 因地制宜发展生物质能、海洋能、地热能。因地制宜推进生物质热电联产，加快建设垃圾焚烧发电项目。 坚持“增气减煤”同步，加强天然气基础设施建设，扩大管道气覆盖范围。 完善可再生能源消纳保障机制，推进可再生能源在大数据、制氢等产业和清洁供暖、公共交通领域应用，实施源网荷储一体化和多能互补发展。 构建适应非化石能源高比例大规模接入的新型电力系统。 推动能源数字化，打造“数字能源”。
深化能源领域体制改革	深入推进电力市场化改革，完善中长期市场、现货市场和辅助服务市场衔接机制。 推进电网体制改革，明确以消纳可再生能源为主的增量配电网、微电网和分布式电源的市场主体地位。 加快形成以储能和调峰能力为基础支撑的新增电力装机发展机制。 完善能源品种价格市场化运行机制。

表 4-3 展示了工业领域的减污降碳措施，着力点包括重点行业、产业园区、产业供应链、绿色产业四个方面。

1、推进重点行业绿色转型：加快钢铁企业升级改造；推进钢铁行业短流程改造，试点示范富氢燃气炼铁；优化石化化工行业原料结构，推动能量梯级利用、物料循环利用，加强炼厂副产气体高效利用；推广水泥生产原料替代技术，鼓励利用转炉渣等非碳酸盐工业固体废物作为原辅料生产水泥，加强低碳建材产品研发应用。

2、实施产业园区和产业 clusters 升级改造：推进建材、化工、铸造、印染、电镀、加工制造等传统制造业集群提升，提高产绿色化发展水平；深化国家级和省级循环经济示范园区的循环化改造，创建生态工业示范园区。

3、提升产业链供应链绿色化水平：推进工业产品绿色设计和绿色制造研发应用，在重点行业推广先进、适用的绿色生产技术和装备；加快工业互联网、5G 等新一代信息技术在绿色制造领域的应用，推进智能车间、智能工厂建设。

4、大力发展绿色低碳产业：推动电子信息、互联网、大数据、人工智能和数字经济等与各产业深度融合；培育一批技术先进、管理科学的环保装备制造龙头企业。

表 4-3 “十四五”减污降碳措施—工业领域

分类	措施
推进重	开展重点行业去产能“回头看”，巩固去产能成果。

点行业 绿色转 型	实施重点行业领域减污降碳行动，加快推进钢铁、煤电、石化化工（焦化）、建材（水泥、平板玻璃、陶瓷）、有色金属等行业绿色低碳改造和清洁生产。 在电力、钢铁、建材等重点行业实施减污降碳行动，实施全产业链和产品全生命周期降碳减污，打造多维度、全覆盖的绿色低碳产业体系。 推动重点行业完成限制类产能装备的升级改造。 优化石化化工行业原料结构，推动能量梯级利用、物料循环利用，加强炼厂干气、液化气等副产气体高效利用。 推广水泥生产原料替代技术，鼓励利用转炉渣等非碳酸盐工业固体废物作为原辅料生产水泥，引导建材行业向轻型化、集约化、制品化转型，加强低碳建材产品研发应用。 加快对全省钢铁企业 1000 立方米以下高炉、100 吨以下转炉升级改造（铸造用生铁和特钢企业除外），推进炼铁、炼钢主体装备大型化。 推进钢铁行业短流程改造，持续降低长流程炼钢比重，试点示范富氢燃气炼铁。 持续保持“散乱污”企业动态清零。 统筹节能低碳、节水、资源综合利用等基础数据，探索建立工业领域绿色低碳数据平台。 逐步推广应用碳捕集利用与封存技术，推动实现近零排放，开展碳捕集利用与封存重大项目示范。
实施产 业园区 和产业 集群升 级改造	开展产业园区规划环境影响跟踪评价，推动优化园区在城市总体空间格局中的布局，促进园区绿色发展。 深化国家级和省级循环经济示范园区的循环化改造，创建生态工业示范园区。 推进建材、化工、铸造、印染、电镀、加工制造等传统制造业集群提升，提高产业集约化、绿色化发展水平。 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，提高能源管理智慧化水平。 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，利用“互联网+”、云计算、大数据等手段促进节能提效。
提升产业链供应链绿色化水平	建立以资源节约、环境友好为导向的采购、生产、营销、物流及循环利用体系。 加快工业互联网、5G、大数据、云计算、数字孪生、区块链等新一代信息技术在绿色制造领域的应用，推进智能车间、智能工厂建设。 推进工业产品绿色设计和绿色制造研发应用，在重点行业推广先进、适用的绿色生产技术和装备。 鼓励企业采用绿色设计、绿色材料、绿色采购、绿色工艺、绿色包装、绿色运输。 培育打造一批绿色设计示范、绿色工厂、绿色园区和绿色供应链管理企业。
大力发展绿色低碳产业	加快发展信息智能、生物医药健康、新能源、新材料、绿色环保等战略性新兴产业，推动电子信息、互联网、大数据、人工智能和数字经济等与各产业深度融合。 吸引聚集国际国内高端科技创新资源，打造一批低碳零碳负碳产业化基地。 推动生产性服务业向专业化和价值链高端延伸。 培育一批技术先进、管理科学的环保装备制造龙头企业。做新做优环境服务业，推行环境污染第三方治理、环保管家、环境综合治理托管服务等模式。做精做专资源综合利用业，加强秸秆、尾矿、煤矸石、冶炼渣、工业副产石膏等综合利用，规范废旧物资回收利用。推动生态环保产业与5G、物联网、云计算、大数据、区块链、人工智能等新一代信息技术深度融合。

表 4-4 展示了交通领域的减污降碳措施，“十四五”期间的政策主要关注运输结构调整、绿色流通体系、低碳交通工具推广及其配套设施建设等方面：

- 1、加快运输结构调整：**推进大型工矿企业、物流园区、港口码头铁路专用线建设，推动大宗货物及中长距离货物运输“公转铁”。
- 2、构建绿色流通体系：**深入实施多式联运示范工程，鼓励构建“外集内配、绿色联运”的公铁联运城市配送新体系。

3、推广低碳交通工具：加快新能源或清洁能源车辆推广使用，推动保定、唐山等纯电动重型货车换电模式试点和氢燃料电池汽车示范应用；加快淘汰老旧运输工具。

4、建设低碳基础设施：提升车用充电桩（站）覆盖面和使用率，推进加氢站建设；实施港口岸电、空港陆电改造。

表 4-4 “十四五”减污降碳措施—交通运输

分类	措施
加快运输结构调整	大力推进进港、进厂、进园“最后一公里”建设，加快大型工矿企业、物流园区、港口码头铁路专用线建设，完善铁路货运网络，推动大宗货物及中长距离货物运输“公转铁”。
	建设煤炭、钢铁、电力、焦化等大型工矿企业和重要物流园区铁路专用线。
	全省新建及迁建大宗货物运输量 150 万吨以上的企业，原则上同步规划建设铁路专用线、专用码头或管廊等。
	创新货物运输组织形式，发展甩挂运输、共同配送、统仓统配。
构建高效集约的绿色流通体系	优化客运组织，引导客运企业规模化、集约化经营。
	深入实施多式联运示范工程，布局建设“无水港”，开展集装箱运输、商品车滚装运输、全程冷链运输等多式联运试点示范创建。
	鼓励构建“外集内配、绿色联运”的公铁联运城市配送新体系。
	发展绿色仓储，鼓励和支持在物流园区、大型仓储设施应用绿色建筑材料、节能技术与装备以及能源合同管理等节能管理模式。
	推进城市绿色货运配送示范工程建设。
推广低碳交通工具	加强快递包装绿色治理，推进寄递企业包装物回收循环利用共享。
	完善邮政和快递服务网络，提高城市物流配送效率。
推广低碳交通工具	持续推进清洁柴油车（机）行动，加快新能源或清洁能源车辆推广使用。

	推动保定、唐山等纯电动重型货车换电模式试点和氢燃料电池汽车示范应用。
	加快淘汰老旧运输工具，常态化开展重型柴油货车尾气排放达标整治。
	提升车用充电桩（站）覆盖面和使用率，推进加氢站建设。
	建设绿色港口，实施船舶大气污染排放控制区制度，推动船舶发动机升级或尾气处理。
建设低碳基础设施	实施港口岸电、空港陆电改造。到 2025 年，秦皇岛、唐山、黄骅港 80% 的 5 万吨级以上泊位（除油气码头外）具备岸电供应能力，推动入港船舶安装岸电受电设施。
	支持机场开展电动化设备建设和应用，新增作业车辆和机械基本实现电动化。
打造绿色出行体系	加强省内城市间轨道交通联系，提速打造“轨道上的京津冀”。 推广城市绿色出行模式，不断优化城市公交网络，推进城乡交通一体化，加快自行车专用道、行人步道等慢行设施建设。

表 4-5 展示了城乡建设方面的减污降碳措施，政策的重心在绿色建筑与用能优化上：

1、城镇新建建筑全面执行绿色建筑标准，大力推进 2000 年底前建成的城镇老旧小区升级改造；实施全过程绿色低碳建造；支持建设绿色环保的宜居型农房；大力发展近零能耗建筑。

2、优化建筑用能结构与建造方式，开展整县屋顶分布式光伏开发试点；加快推进热电联产集中供暖；提高建筑采暖、生活热水、炊事等电气化普及率；大力发展钢结构建筑，推行装配式建筑、钢结构建筑及装配化装修。

表 4-5 “十四五”减污降碳措施—城乡建设

分类	措施
----	----

	在城乡规划建设管理各环节全面落实绿色低碳要求。
推进城乡建设和管理模式低碳转型	推动城市组团式发展，优化城市空间布局。 合理规划城镇建筑面积发展目标，严格管控高耗能公共建筑建设。 加强建筑拆除管理，杜绝大拆大建。
	城镇新建建筑全面执行绿色建筑标准，对城镇既有建筑和基础设施实施节能改造，大力推进 2000 年底前建成的城镇老旧小区升级改造。 大力发展近零能耗建筑，形成产业链体系。
大力发展节能低碳建筑	逐步实行建筑能耗限额管理。 实施全过程绿色低碳建造，全面推广绿色低碳建材。 推广农村住房建筑导则，支持建设绿色环保的宜居型农房。 加快农房节能改造和绿色农房建设。 逐步开展公共建筑能耗限额管理，强化用能监测和低碳运营管理。
	城镇民用建筑全面推行超低能耗建筑标准。 推进可再生能源建筑应用，开展整县屋顶分布式光伏开发试点。 加快推进热电联产集中供暖，因地制宜推进清洁低碳供暖。
优化建筑用能结构与建造方式	提高建筑采暖、生活热水、炊事等电气化普及率。 加强用能基础设施与互联网、5G 等信息基础设施的融合与升级改造，服务智能工厂、智能小区、智能楼宇、智能家居创建。 大力发展钢结构建筑，推行装配式建筑、钢结构建筑及装配化装修。

表 4-6 展示了农业领域的减污降碳措施，政策的重点是发展绿色农业，减少农药化肥用量：

- 1、推行农业绿色生产方式，发展绿色低碳循环农业。
- 2、实施化肥农药减量增效行动，加强种植业面污染源污染防治。

表 4-6 “十四五”减污降碳措施—农业生产

分类	措施
推进农业生产 清洁化	鼓励种养循环一体化，推进农业绿色循环低碳生产，实施粮饲统筹、“种养加”结合、农林牧渔融合循环发展。
	推广设施生态农业、观光生态农业、“猪—沼—果”、生态畜牧、生态渔业等模式。
	规范饲料添加剂和兽药使用。
	推广农光互补、“光伏+”设施农业等模式，发展绿色低碳循环农业，提高土壤有机碳储量。
推动化肥科学 合理施用	合理制定各区域作物单位面积施肥限量标准。
	推广高效新型肥料、适用施肥设备和机械深施、水肥一体化、叶面喷施等方式。
	推进绿色种养循环农业试点县建设。
实施农药减量 增效行动	推动农作物病虫害绿色防控示范区建设。
	开展病虫害统防统治，严格控制高毒高残留高风险农药使用，推广应用生物农药、高效低毒低残留农药和先进施药机械。

表 4-7 展示了生态建设相关的减污降碳措施，着力点是巩固碳汇能力与提升碳汇增量：

- 1、巩固生态系统碳汇能力，严格保护各类重要生态系统。
- 2、提升生态系统碳汇增量，持续植树造林，草原生态修复。

表 4-7 “十四五”减污降碳措施—生态建设

分类	措施
巩固生态系统 碳汇能力	落实主体功能区和生态功能分区定位，严守生态保护红线，严控生态空间占用，严格保护各类重要生态系统。
	科学划定城镇开发边界，严控新增建设用地规模，全面完成责任主体灭失矿山迹地综合治理。
提升生态系统	推进京津风沙源治理、“三北”防护林等重点国土绿化工程，加强森林

碳汇增量	抚育。
	在张家口、承德和白洋淀上游涞源县、易县、涞水县、曲阳县、唐县等市、县开展人工造林。
	草原生态修复，以坝上、太行山、燕山等地区为重点，推进沙化、退化、盐碱化草原治理。

表 4-8 展示了生态环境治理方面的减污降碳措施，主要围绕协同治理、行业治理、面源治理、固废治理四个方面展开：

1、**推进大气污染防治协同控制**，持续改善城市环境空气质量，协同控制颗粒物和臭氧污染，强化区域大气污染综合治理，石家庄、唐山、邢台、邯郸市重点开展 PM_{2.5} 和 O₃ 协同治理；沧州、衡水、廊坊、保定市和雄安新区重点开展 VOCs 及 NO_x 协同治理；张家口、承德、秦皇岛市重点加强 O₃ 污染控制。

2、**推动重点行业深度治理和超低排放**，巩固钢铁、焦化、煤电、水泥、平板玻璃、陶瓷等行业超低排放成效，实施工艺全流程深度治理，全面加强无组织排放管控，以工业炉窑污染综合治理为重点，深化工业 NO_x 减排；开展工业园区和产业集群 VOCs 综合治理。

3、**深入开展面源污染治理**，强化重点时段秸秆禁烧专项整治，探索建立大气氨规范化排放清单。

4、**提高固废综合利用水平**，加快构建废旧物资循环利用体系。

表 4-8 “十四五”减污降碳措施—环境治理

分类	措施
推进城市环境空气质量持续改善	张家口、承德市实现全面稳定达标。 未达标的地级城市编制完善大气环境质量限期达标规划并向社会公

	开，明确环境空气质量达标期限及污染防治重点任务。 达标期限在 5 年以上的城市，确定“十四五”空气质量改善阶段目标。 强化城市大气污染物来源解析能力建设，编制污染源清单。
协同控制细颗粒物和臭氧污染	制定加强 PM_{2.5} 和臭氧协同控制行动方案，推动地级城市 PM_{2.5} 浓度持续下降，臭氧浓度稳定下降。 加强重点区域、重点时段、重点领域、重点行业治理，实行差异化、精细化协同管控。 对活性强的臭氧前体物排放企业实行重点控制。
强化区域大气污染综合治理	加强区域大气污染联防联控，探索建立交界区域大气环境管理共建共管机制，强化重大项目环境影响评价区域会商。 石家庄、唐山、邢台、邯郸市重点开展 PM_{2.5} 和臭氧协同治理；沧州、衡水、廊坊、保定市和雄安新区重点开展挥发性有机物（VOCs）及氮氧化物协同治理；张家口、承德、秦皇岛市重点加强臭氧污染控制。
优化污染天气应对体系	加强省、市两级环境空气质量预报能力建设。 构建省、市、县污染天气应对三级预案体系，探索建立空气质量分指数应急响应机制，开展轻、中度污染天气应对措施研究。 实施重点行业企业绩效分级管理，深化生态环境监管正面清单制度，精准管控区域重点污染源，切实做好重点时段环境空气质量保障。
推动重点行业深度治理和超低排放	巩固钢铁、焦化、煤电、水泥、平板玻璃、陶瓷等行业超低排放成效，实施工艺全流程深度治理，全面加强无组织排放管控。 推进砖瓦、石灰、铸造、铁合金、耐火材料等重点行业污染深度治理。 以工业炉窑污染综合治理为重点，深化工业氮氧化物减排。 开展生活垃圾焚烧烟气深度治理，探索研发二噁英治理和控制技术，到 2025 年，所有焚烧炉烟气达到生活垃圾焚烧大气污染物排放控制标准。
深化重点行业挥发性有机物（VOCs）治理	以石化、化工、涂装、医药、包装印刷、油品储运销等行业领域为重点，加大低挥发性有机物原辅材料和产品源头替代力度，全面提升废气收集率、治理设施同步运行率和去除率。

	取消非必要的挥发性有机物（VOCs）废气排放系统旁路，必须保留的加强监管与治理。 推行加油站夏季高温时段错时装卸油，提倡城市主城区和县城建筑墙体涂刷、建筑装饰以及道路划线、栏杆喷涂、沥青铺装等户外工程错时作业。 加强汽修行业挥发性有机物（VOCs）综合治理，加大餐饮油烟污染治理力度。 开展工业园区和产业集群挥发性有机物（VOCs）综合治理，重点工业园区建立统一的泄漏检测与修复（LDAR）管理系统，推广建设涉挥发性有机物（VOCs）“绿岛”项目，规划建设一批集中涂装中心、活性炭集中处理中心、溶剂回收中心等。 建立健全监测预警监控体系，探索挥发性有机物（VOCs）有组织、无组织超标排放自动留样监测，强化自动监测数据执法应用。
强化汽柴油货车治理监管	健全燃油和车用尿素管理制度，持续开展打击生产、储存、运输、销售、使用不合格油品和车用尿素行为，全面供应符合第六阶段强制性国家标准VIB 车用汽油（含乙醇汽油），到 2025 年，年销售汽油量大于 3000 吨的加油站全部安装油气回收自动监控设备并与生态环境部门联网。 全面建立重型柴油车污染防治责任制度，强化重点用车单位进出场车辆电子台账动态管理。 增设黑烟抓拍设备，建设重型柴油货车远程排放监控系统，完善覆盖全省主要交通干线的遥感监测网络。 到 2025 年，建成完备的机动车排放“污染检验和维护”制度，生产（进口）的主要车（机）型系族年度抽检率达到 80%以上。
加强非道路移动机械污染管控	全面实施非道路移动机械第四阶段排放标准。 加快老旧工程机械淘汰，基本淘汰国一及以下排放标准或使用 15 年以上的工程机械，具备条件的更换国三及以上排放标准的发动机。 地级城市和定州、辛集市调整完善并公布禁止使用高排放非道路移动机械的区域。 实施船舶发动机第二阶段标准和油船油气回收标准。 港口、机场、铁路货场、物流园区开展非道路移动机械低排放控制区建设，推动非道路移动机械实现零排放或近零排放。

	落实非道路移动机械使用登记管理制度，消除工程机械冒黑烟现象。
	建立健全绿色施工标准和扬尘管控体系，对扬尘重点污染源实行清单化动态管理，将绿色施工纳入企业资质评价、生态环境信用评价。
	加强城市道路低尘机械化湿式清扫作业，加大城市出入口、城乡结合部等重要路段冲洗保洁力度，实施渣土车密闭运输，完善降尘监测和考评体系。
强化扬尘精细化管控	城市裸露地面、粉料类物料堆放及大型煤炭和矿石码头物料堆场基本完成抑尘设施建设和物料输送系统封闭改造，鼓励有条件的大型煤炭和矿石码头等干散货码头堆场实施全封闭改造。
	强化重点时段秸秆禁烧专项整治，完善秸秆焚烧视频监控系统点位建设，基本实现全省涉农区域全覆盖。
	严格落实矿产资源开采、运输和加工过程防尘、除尘措施，实施矿山生产污染物排放在线监测。
探索推动大气氨排放控制	开展重点区域大气氨监测试点。
	探索建立大气氨规范化排放清单。
	加强烟气脱硝和氨法脱硫氨逃逸控制。
	推进种植业、养殖业大气氨减排，加强源头防控，优化肥料、饲料结构。
加快构建废旧物资循环利用体系	构建建筑垃圾管理和资源化利用体系，建立健全政策引导、市场推动、社会参与的长效推进机制。
	健全强制报废制度和废旧家电、消费电子等耐用消费品回收处理体系。
	以电器电子产品、汽车产品、动力蓄电池、铅酸蓄电池、饮料纸基复合包装物为重点，加快落实生产者责任延伸制度。
强化工业固体废物污染防治	持续开展非法和不规范堆存渣场排查整治，建立排污单位工业固体废物管理台账。
	推行生产企业“逆向回收”等模式，推动大宗工业固体废物贮存处置总量趋零增长。
	加快邯郸、唐山国家大宗固体废弃物综合利用基地和承德尾矿资源综合利用示范基地建设。

加强塑料制品 产、销、用管理	划定重点区域，禁止、限制不可降解塑料袋、一次性塑料餐具、宾馆酒店一次性塑料用品、快递塑料包装的生产、销售和使用。
	积极稳妥推广替代产品，增加可循环、易回收、可降解绿色产品供给。
	严禁生产销售厚度不符合规定的超薄塑料购物袋、聚乙烯农用地膜和纳入淘汰类产品目录的一次性发泡塑料餐具、塑料棉签、含塑料微珠日化产品等。
	定期开展河湖水域、岸线、滩地等区域塑料垃圾清理，持续开展塑料污染治理部门联合专项行动。
规范塑料废弃物 回收利用	规范废旧农膜、废旧渔网渔具等农、渔业塑料废弃物回收，依法关停违法违规的家庭作坊式塑料废弃物回收利用企业。
	引导塑料废弃物回收利用企业进园入区，加快培育废塑料综合利用骨干企业，最大限度减少塑料垃圾直接填埋量。
	以非正规集散地、塑料废弃物加工利用园区为重点，加强塑料废弃物回收、利用、处置监管。
提高农业生产废 弃物资源化利用 水平	逐步完善农膜及农药包装废弃物回收利用体系，推动生产者、销售者和使用者落实回收责任。
	推广应用标准地膜，开展农膜回收试点示范，鼓励各地探索开展区域农膜回收补贴制度试点。
	落实秸秆还田离田支持政策。

创新示范的相关政策详见表 4-9。“十四五”期间河北省相关工作的重点如下：

- 1、深化雄安新区“无废城市”试点，在各市开展“无废城市”创建。
- 2、环京津核心功能区（保定、廊坊市和雄安新区）、冀西北生态涵养区（张家口、承德市），以产业转型和“无废”旅游文化为突破点，推动绿色发展。
- 3、沿海率先发展区（唐山、沧州、秦皇岛市）抓实钢铁、石化、

制造行业减污降碳，以“无废园区”和美丽海湾建设为立足点，推动低碳发展。

4、冀中南功能拓展区（石家庄、邯郸、邢台、衡水市）围绕城乡固体废物资源回收利用，以示范基地建设和绿色种养农业循环为着力点，推动循环发展。

表 4-9 “十四五”减污降碳措施—创新示范

分类	措施
城市创新	在张家口市实施二氧化碳达峰综合性示范工程，推动近零或零碳排放区试点示范。
	推动城市开展二氧化碳达峰和空气质量达标试点示范，探索创建“双达”典范城市。
	开展雄安新区近零碳区试点。
	深化雄安新区“无废城市”试点，在各市开展“无废城市”创建。
	推动建设雄安新区国家生态文明试验区，探索城市能源发展新模式。
园区创新	持续完善城市配送物流基础设施，推进邯郸、唐山、秦皇岛等市开展国家级“绿色货运配送示范城市”创建工作。
	推进园区循环化改造，创建一批绿色工厂、园区。
示范工程	支持创建碳达峰试点园区。
	推动实施一批规模化储能、智能电网、分布式可再生能源、氢能及碳捕集利用与封存等净零排放和碳中和示范工程。

表 4-10 展示了减污降碳技术攻关的相关举措，主要包括基础研究、技术研发和成果转化三个方面：

1、加强基础研究和前沿技术布局，依托高水平大学开展减污降碳研究。

2、聚焦钢铁、煤电、水泥等高碳排放行业，加快布局节能减碳技术；重点开展 PM_{2.5}、NO_x、VOCs、NH₃ 等大气污染物和温室气体协同控制科技攻关。

3、推进绿色技术成果应用，在国家级高新技术产业开发区、经济技术开发区等开展绿色技术创新转移转化示范；加大交通领域节能低碳技术研发与应用，推广智能交通，探索运用大数据优化运输组织模式。

表 4-10 “十四五”减污降碳措施—技术攻关

分类	措施
加强基础研究和前沿技术布局	依托一流大学和一流学科建设高校，完善学科布局，鼓励面向碳达峰、碳中和开展物理、化学、材料、能源动力、电力电气等多学科多领域交叉融合研究。
	加强气候变化成因、森林海洋生态系统碳汇、低碳零碳负碳技术等基础理论研究。
	实施省碳达峰碳中和创新专项，采取“揭榜挂帅”等方式，推动绿色低碳关键核心技术攻关和典型场景应用示范。
加快先进适用技术研发	鼓励建立绿色技术重点实验室、技术创新中心和科技资源共享服务平台，推进重大科研基础设施建设，加大科研人才引进培养力度。
	聚焦钢铁、煤电、水泥等高碳排放行业，加快布局节能减碳技术、工艺、材料、零部件、设备研究项目，攻克一批关键共性技术。
	加强臭氧形成机理、预测预报研究，重点开展细颗粒物、氮氧化物、挥发性有机物（VOCs）、氨等大气污染物和温室气体协同控制科技攻关。
	深入推进先进智能电网、光电转换效率提升、储能、碳捕集利用与封存等技术装备研发推广。
	支持人工智能、虚拟现实、量子通信、区块链等绿色未来产业技术创新。
	加大交通领域节能低碳技术研发与应用，推广智能交通,探索运用大数据优化运输组织模式。

推进绿色技术成果应用	支持企业、高校、科研机构等建立绿色技术创新项目孵化器、创新创业基地。
	在国家级高新技术产业开发区、经济技术开发区等开展绿色技术创新转移转化示范。
	探索共建京津冀区域科技成果转化项目库，完善配套政策及利益共享机制。
	开展各类节能降碳、污染防治、清洁生产、新能源循环利用及生态修复等绿色技术遴选，加强推广应用和技术指导。
	加快高效节能电机、余热余压利用、大型光伏和风力发电机组、氢能制储运加、可再生能源与建筑一体化等适用技术规模化应用。
	加大交通领域节能低碳技术研发与应用，推广智能交通,探索运用大数据优化运输组织模式。

4.1.2 指标梳理

发展指标作为中长期规划的重要组成部分，不仅是各项任务举措的量化体现，也是衡量工作成效的重要标志，同时还是实施规划的“指挥棒”和“风向标”，在推动生态环境高质量发展过程中发挥着重要的引领作用。通过梳理河北省“十四五”时期减污降碳的相关指标（包括能源、工业、交通、农业、建筑、碳汇、大气等方面），可以厘清政策主线、把握工作重点，具体见表 4-11。

表 4-11 河北省“十四五”时期减污降碳相关指标

领域	指标	2020 年	2025 年
能源	全省单位地区生产总值能耗降低%	-	14.5
	单位地区生产总值二氧化碳排放量降低%	-	国家
	非化石能源消费比重%	-	13
	煤电总规模稳定万千瓦	-	5100

	可再生能源装机占全部电力装机比重%	-	60
	新型储能规模	-	400 万千瓦
	全省电炉钢比例%	-	5~10
	溶剂型工业涂料使用比例%	-	20
	溶剂型油墨使用比例%	-	10
	溶剂型胶粘剂使用量下降%	-	20
	规模以上工业企业单位工业增加值能耗%	-	16.5
	重点耗能行业能效达到标杆水平的比例%	-	30
	规模以上单位工业增加值能耗下降（%）		18（*）
	钢铁行业万元工业增加值能耗下降（%）	-	19
	水泥行业万元工业增加值能耗下降（%）	-	18
	石化行业万元工业增加值能耗下降（%）	-	11
工业	化工行业万元工业增加值能耗下降（%）	-	12
	规模以上单位工业增加值二氧化碳排放下降（%）	-	19（*）
	钢铁行业万元工业增加值二氧化碳排放下降（%）	-	19
	水泥行业万元工业增加值二氧化碳排放下降（%）	-	19
	石化行业万元工业增加值二氧化碳排放下降（%）	-	20
	化工行业万元工业增加值二氧化碳排放下降（%）	-	17
	新增一般工业固体废物利用处置率（%）	-	95 以上
	承德尾矿综合利用率%	-	40 以上
	规模以上制造业企业关键业务环节全面数字化比例%	-	50 以上
	钢铁、水泥（熟料）等行业重点企业能源管理平台创建率%	-	100
交通	煤炭、矿石等大宗货物集疏港绿色运输方式占比%	-	80

	火电、钢铁、建材等行业大宗货物清洁运输比例%	-	80
	船舶单位运输周转量碳排放强度下降%	-	3.5
	铁路货运量比重提升%	-	3
	中心城区绿色出行比例%	-	74
	新能源汽车占新车销量比重%	-	20
	公共领域新增或更新公交、出租等车辆中新能源汽车比例%	-	80
	清洁能源及新能源公交车比例%	-	90
	清洁能源及新能源出租车比例%	-	80
	营运车辆单位运输周转量碳排放强度下降%	-	4
农业	畜禽粪污综合利用率%	77	85
	主要粮食作物化肥利用率%	-	43
	主要农作物农药利用率%	-	43
	主要农作物化肥使用量	285.7 万吨	零增长
	农膜回收率%	90.17	90 以上
	主要农作物秸秆综合利用率%	97.36	基本实现全面综合利用
建筑	城镇绿色建筑占新建建筑比例%	-	100
	达到绿色社区标准的城市社区比例%	-	60
	新建装配式建筑占当年新建建筑比例%	-	30
碳汇	森林覆盖率%	35	36.5
	森林蓄积量亿立方米	-	1.95
大气	地级城市 PM _{2.5} 浓度 ug/m ³	44.8	37/35
	地级城市空气质量优良天数比率%	69.9	75/80
	化学需氧量重点工程减排量万吨	-	16.64

氨氮重点工程减排量万吨	-	0.57
氮氧化物重点工程减排量万吨	-	14.05
挥发性有机物重点工程减排量万吨	-	5.64
全省重度及以上污染天气比率%	-	0.9

能源方面，河北省指标涉及非化石能源消费占比、可再生能源电力装机占比、新型储能规模等，反映了当地引导能源清洁、低碳、高效利用的政策方向。

工业方面，对钢铁、水泥、石化、化工等重点行业的能耗和碳排放强度进行了约束。工业是能源消耗、大气污染物与 CO₂ 排放的主要部门，河北作为重工业大省，产业绿色转型是当地实现空气质量与“双碳”目标的重点。

交通部门与石油消费密不可分，对大气污染物与碳排放的影响同样较为显著。通过提升绿色出行比例、新能源车比例，引导形成绿色、低碳的出行方式和生活模式，对缓解交通拥堵和节能减排有重要作用。由于河北省公路货运量大，且多采用国三、国四排放标准的柴油货车，大气污染物与温室气体排放量均相对较高，需要以生产企业为抓手，设置货物清洁运输比例指标。

河北省农业面源污染仍比较严重，畜禽粪污、秸秆等资源化利用水平还有待提高，因此设置了农药、化肥、秸秆粪污利用率和农膜回收利用指标，以促进农业农村生态环境持续改善。

建筑排放是城乡建设领域减污降碳工作的重点，应该通过提高建筑节能标准，实施既有建筑节能改造，优化建筑用能结构，推动建筑

节能减排，“十四五”时期，绿色建筑仍是河北省工作的重点。

如期实现“双碳”目标，一个重要方面在于提升生态碳汇能力，有效发挥森林、草原的固碳作用，提升生态系统碳汇增量。“十四五”时期，河北省围绕生态系统碳汇能力的提升设置了相关指标。

河北省还设置了“十四五”期间城市 PM_{2.5} 浓度与空气质量优良天数比率的指标。尽管 2021 年河北省大气污染治理取得了里程碑式突破，PM_{2.5} 和 CO 浓度的同比降幅为 2013 年以来最高，但空气质量持续改善的基础尚不稳固，大气污染防治工作应持之以恒、久久为功的持续向纵深推进。

第2节 京津冀政策对比

对河北省问题的研究，不应脱离京津冀协同发展这一区域背景。本节通过对比河北、北京、天津三地的减污降碳相关措施与指标，梳理出了不同地区的政策关键点与着力点，以挖掘河北省各类措施的实施潜力，为当地政策的制定提供参考。

4.2.1 措施对比

表 4-12 从能源结构、产业结构、交通运输、城乡建设 4 个方面，列出了河北、北京、天津的减污降碳相关政策措施。

表 4-12 京津冀不同区域减污降碳政策

类别	河北	北京	天津
能源	合理减少煤电机组发电，	推进“减煤、稳气、少	稳定煤电装机规模、扩大

结构	提高严格实施煤炭消费减量替代。 加快建设风电基地和光伏发电应用基地，支持可再生能源电力制氢产业。	油、强电、增绿”，非应急情况下基本不使用煤炭，大幅提升绿电进京规模，实施可再生能源替代行动。	天然气、可再生能源等清洁能源装机。
产业结构	做优做强钢铁、装备制造、石化和食品 4 大传统优势产业，加快实施节能技术改造。 加强工业固废综合利用。培育壮大新一代信息技术、生物医药、新能源和新材料 4 大战略性新兴产业。	推进一般生产制造环节疏解退出和优化高精尖产业体系工作。 打造绿色智慧能源产业集群。 生产过程清洁优化行动。	以智能制造为主攻方向，大力发展战略性新兴产业，加速制造业高端化、智能化、绿色化发展，全面提升产业链供应链竞争力，着力构建现代工业产业体系。
交通运输	建设煤炭、钢铁、电力、焦化等大型工矿企业和重要物流园区铁路专用线。 推动保定、唐山等纯电动重型货车换电模式试点和氢燃料电池汽车示范应用。	提高绿色出行比例，推进绿色出行网络建设，提升绿色货运比例，大力推进车辆“油换电”。	加快建设一流港口。 推进绿色公路建设。 提高绿色出行比例。 打造公交都市标杆城市。
城乡建设	推广农村住房建筑导则，支持建设绿色环保的宜居型农房。 推进绿色建筑、近零能耗建筑发展，推广应用绿色建材。	大力发展绿色建筑、装配式建筑，积极推广超低能耗建筑。 鼓励有条件地区规模化开展超低能耗建筑、可再生能源与建筑一体化推广应用。	持续推动既有建筑、老旧供热管网节能改造，加快公共建筑能效提升改造。 大力发展节能低碳建筑。

通过对京津冀三地减污降碳政策的对比分析，可以得出以下 4 点启示：

（1）在能源方面，削减煤炭、发展清洁能源、发展新能源发电仍是河北省“十四五”工作的重点，张家口、承德坝上等地区具有较为丰富的风能，张家口、承德、唐山、沧州等地区的光照资源相对丰富，

河北省有着清洁能源发电的先天优势；相较于北京市非应急情况下基本不使用煤炭、大幅提升绿电进京规模的举措，在安全保供的前提下，河北省的控煤力度和绿电占比还可以提升；天津市则是稳定煤电装机规模、扩大天然气、可再生能源等清洁能源装机。

（2）产业结构方面，考虑到产业结构偏重的现状，河北省“十四五”时期以产业结构转型为重点，积极推动钢铁、石化等传统行业的升级改造，提高能源资源利用效率，加大工业固废循环利用，加强绿色技术创新，提升绿色制造水平；北京市则更注重发展高精尖产业，健全推动制造业绿色低碳发展的管理服务体系，优化汽车、电子、生物医药等重点行业绿色供应链管理；天津市加速制造业高端化、绿色化、智能化发展，着力构建现代工业产业体系。

（3）交通运输方面，京津冀三地都重视绿色出行和交通工具的低碳转型；河北省将优化货运结构作为大气污染治理的重要工作，积极推动货物公路运输转铁路运输，提高铁路货运能力和比例；北京市将加快交通数字化转型和智能化升级，构建综合、绿色、安全、智能的立体化现代化城市交通系统；天津市将加大港口污染治理力度，试点创建“低碳码头”。

（4）城乡建设方面，河北省积极发展近零能耗建筑工程，发展装配式建筑，重点推动钢结构装配式住宅建设；北京市则制定了更高的指标，对城镇新建居住建筑执行“第五步”节能 80%的设计标准，并对新建建筑执行不同的星级标准；天津市加强绿色建筑技术标准规范

研究并开展集成示范。

4.2.2 指标对比

(1) 污染物指标

由图 4-1 可知，对于 PM_{2.5} 浓度指标和空气质量优良天比率，河北省低于国家和北京市标准，高于天津市标准；对于重污染天气指标，河北省最为严格，要求控制在 0.9%以内，国家和北京市要求为 1%，天津为 1.1%。为实现生态环境质量持续改善的目标，促进京津冀协同发展，河北省还需要深入打好污染防治攻坚战，在目标制定上尽可能参照北京市的标准。

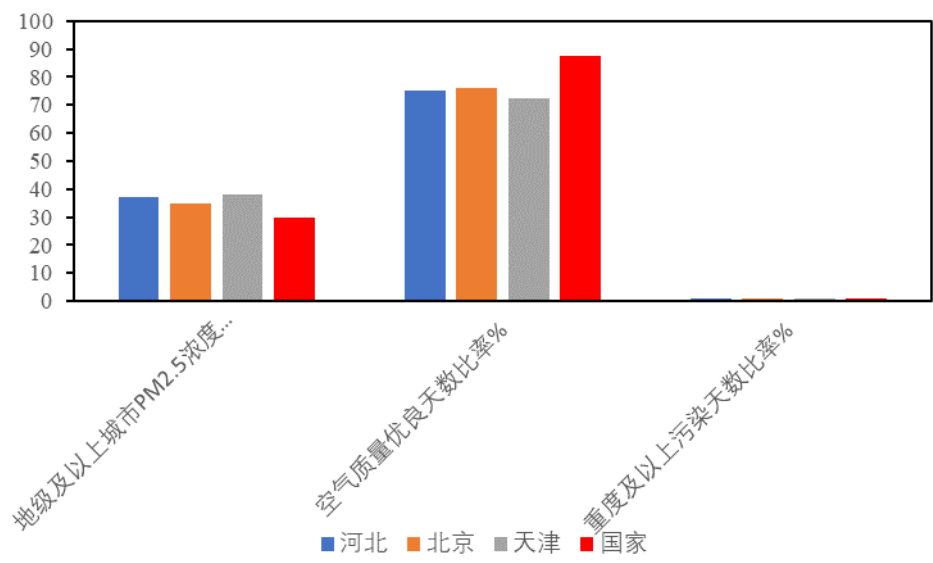


图 4-1 2025 年空气质量目标对比

(2) 碳指标

从图 4-2 可知，河北省单位 GDP 二氧化碳排放降低指标（单位 GDP 二氧化碳排放量与基期相比的降低比例）与国家、北京市和天津

市标准一致。设置碳排放强度降低的指标，有利于引导能源清洁低碳高效利用和产业绿色转型。对于森林覆盖率，河北省高于国家、天津市标准，低于北京市标准，森林覆盖率可以体现森林资源丰富程度、国土绿化状况和碳汇能力，河北省后续可提高该指标，进一步提升生态系统的碳汇能力。

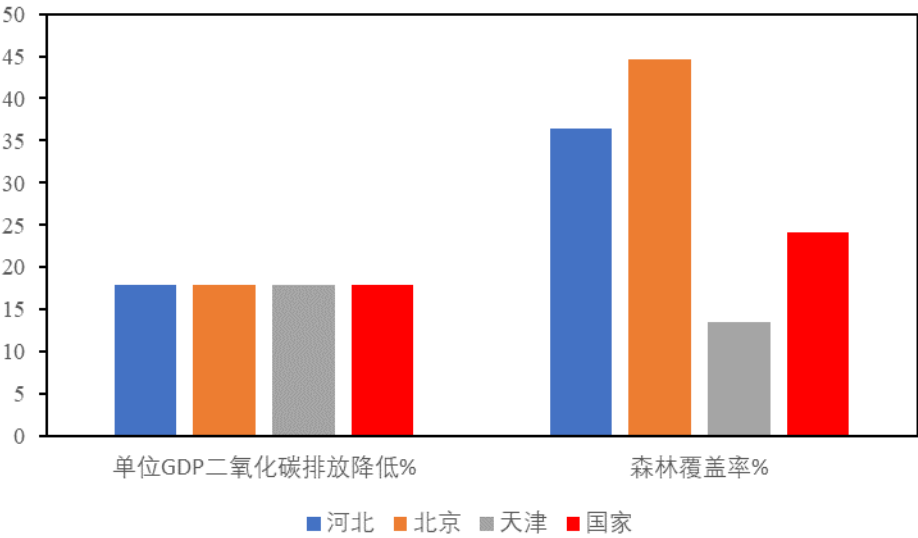


图 4-2 2025 年碳相关指标对比

（3）能源指标

从图 4-3 可知，对于单位 GDP 能耗降低指标，河北省是高于国家和北京市标准的，单位 GDP 能源消耗降低（单位 GDP 所消耗能源量与基期相比的降低比例）指标有利于引导提高能源效率，以能耗约束倒逼产业结构转型和发展动能转换。

非化石能源消费占比指标，河北省是低于国家和北京市标准，河北省有着优越的清洁能源禀赋，应提高非化石能源在总能源消费中的比重；河北省可再生能源装机占比指标最高，“十四五”期间，河北省

将积极开发利用风能、太阳能等非化石能源，推动张家口可再生能源示范区和承德百万千瓦大型风电光电基地建设，清洁低碳、安全高效的能源体系正在加速构建。

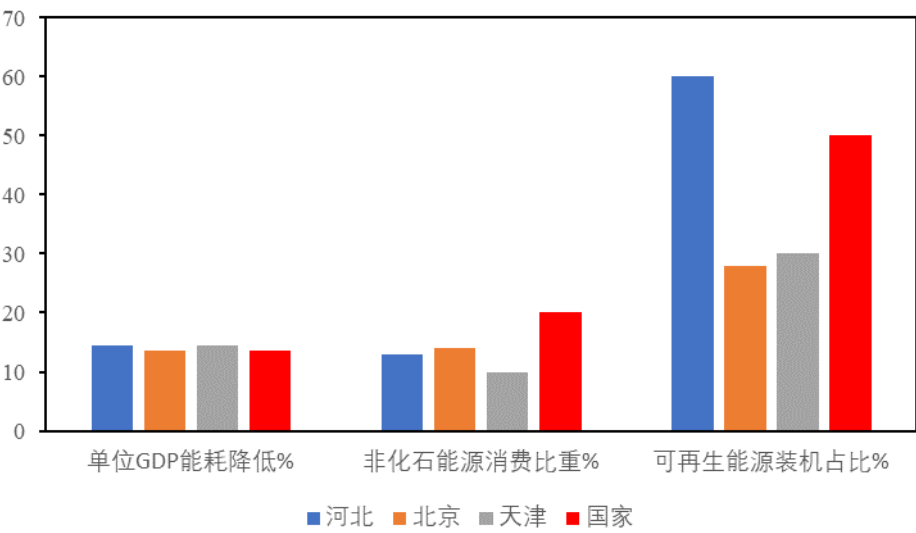


图 4-3 2025 年能源相关指标对比

(4) 工业指标

由图 4-4 可知，河北省工业碳排放强度指标高于国家和天津市标准。此外，河北省设置了钢铁、水泥、石化、化工等重点行业的万元工业增加值碳排放强度，河北省在“十四五”期间将进一步深化工业领域低碳行动。

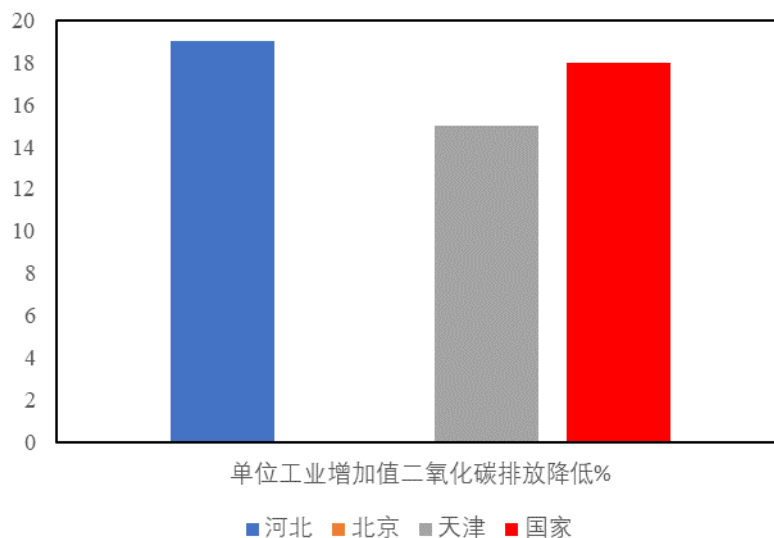


图 4-4 2025 年工业相关指标对比

(5) 交通指标

由图 4-5 可知，河北省中心城区绿色出行比例指标低于北京市和天津市，绿色出行有助于生产与生活的“低碳化”。河北省城市新能源公交车辆指标高于国家标准，低于北京市标准，发展新能源汽车对我国减轻石油依赖、减少碳排放、推动汽车产业转型升级具有重要意义，而公共交通行业由于固定路线、公共服务的特点，成为了新能源汽车推广政策的着力点。

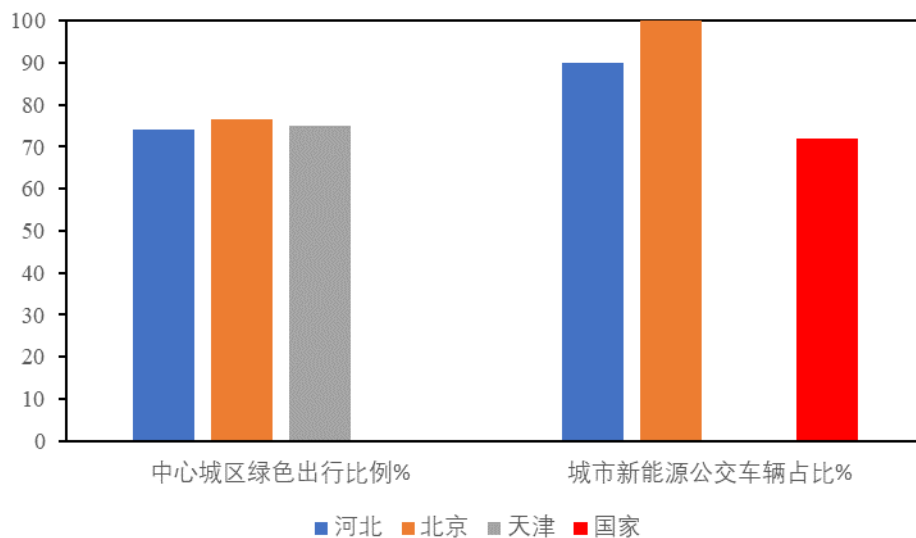


图 4-5 2025 年交通相关指标对比

(6) 城乡建设指标

由图 4-6 可知，河北省装配式建筑指标与国家标准一致，低于北京市标准；河北省星级绿色建筑指标高于国家标准，低于北京市标准。随着城镇化的推进和人民生活水平的提高，建筑能耗可能会持续增长，具有较大减排潜力，大力发展绿色建筑应该成为河北省经济绿色低碳转型的重要一环，因此相关指标还可继续完善提升。

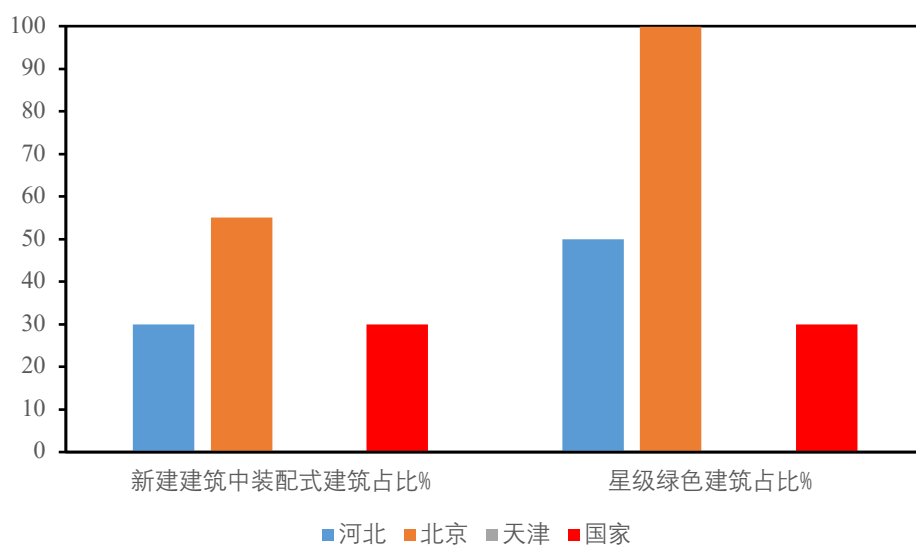


图 4-6 2025 年绿色建筑相关指标对比

（7）农业指标

由图 4-7 可知，京津冀三地区的秸秆综合利用率指标均高于国家标准，河北省标准最为严格，北京市和天津市比较接近；河北省废旧农膜回收率指标高于国家和天津市标准，低于北京市标准；河北省农药利用率指标高于国家和天津市标准，略低于北京市标准；河北省畜禽粪污综合利用率指标高于国家标准，低于北京市和天津市。

河北省应继续贯彻党中央国务院、省委省政府打好农业农村污染防治攻坚战决策部署，紧密围绕解决全省农业环境污染重点问题，强化种养殖业污染治理，加快补齐农业生态环境保护突出短板，有效改善农业生态环境，提高污染治理目标。

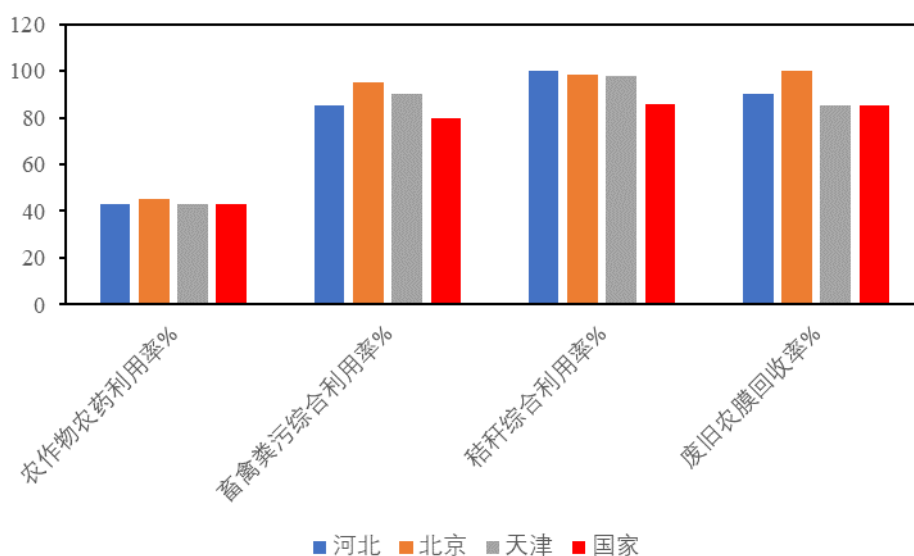


图 4-7 2025 年农业污染治理目标对比

（8）科技指标

二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）是指将 CO₂ 从工业过程、能

源利用或大气中分离出来，直接加以利用或注入地层以实现 CO 永久减排的过程。从长期来看，CCUS 对于碳中和是不可或缺的技术。

2022 年 8 月 18 日，科技部、国家发改委等联合印发《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》，提及力争到 2025 年实现单位二氧化碳捕集能耗比 2020 年下降 20%，这是国家级政策中首次提出的 CCUS 发展量化目标。

河北省 CCUS 项目仍处于起步阶段，规模相对较小，运行年份短，在封存、运输和利用等方面还有很大的提升空间。在未来相当长一段时期内，河北省以煤为主的能源结构难以出现根本性转变，大力发展 CCUS 技术，对确保河北省如期实现“双碳”目标具有重要意义，建议河北省在未来规划中考虑设置 CCUS 发展指标。

第5章 大气污染物与温室气体排放预测与协同减排路径

第1节 预测方法

本项目基于经济-能源-排放耦合动态响应分析方法，模拟政策与技术干预条件下的经济、能源、排放之间的反馈，据此预测未来不同情景下大气污染物与 CO₂ 的排放状况。预测模型的概念框架如图 5-1 所示，主要分为两大模块。在经济与能源预测模块，本项目考虑了人口、GDP、城镇化率、新增建筑面积、工业产品产量、机动车保有量等主要社会经济指标，运用能源系统模型，分析未来能源相关指标，包括消费总量、能源结构、工业煤耗、电力构成等。在行业技术与污染控制技术演替模块，包含基于技术的演替模型和基于技术的预测模型，分别适用于不同的排放源类，同时考虑了未来可能实施的排放控制政策，以此作为减排路径设计的基础。

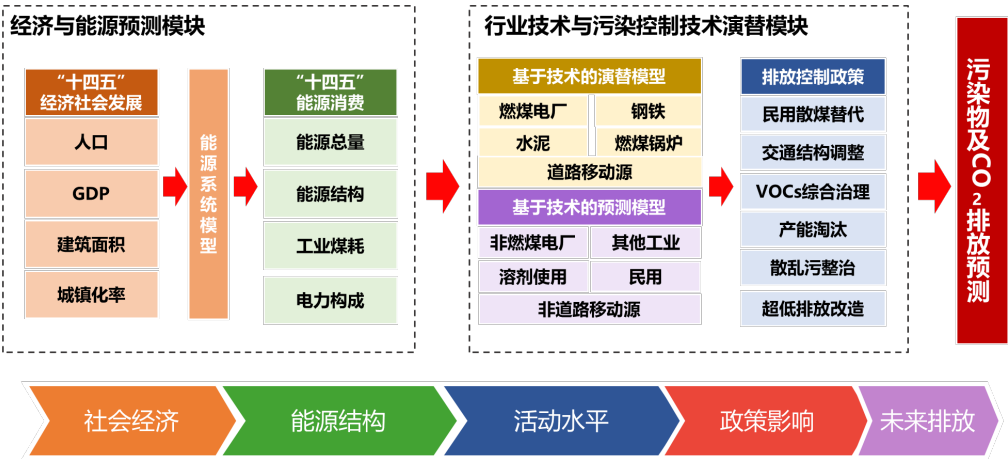


图 5-1 未来能源与排放的动态预测模型

第2节 情景设定

基于第 3 章对和第 4 章对河北省“十三五”与“十四五”期间大气污染防治措施相关政策的梳理，本项目将政策按照能源结构、产业结构与交通结构调整细化归结为如下 19 条具体措施。

- **能源结构调整**（7 条）：发电能效提升、发电结构优化、供热能效提升、供热方式结构转型、民用建筑节能、民用散煤替代、民用传统生物质替代
- **产业结构调整**（8 条）：钢铁行业能效提升、钢铁行业结构转型、化工行业能效提升、化工行业结构转型、建材行业能效提升、建材行业结构转型、其他工业能效提升、其他工业结构转型
- **交通结构调整**（4 条）：交通能效提升、汽油车电气化转型、柴油车电气化转型、非道路机械电气化转型

考虑第 3 章中各项大气污染防治措施的减排成本与协同效应的量化结果，结合各类措施的减排潜力，本项目以 2020 年为基准年，针对 2030 年碳达峰、2025 年提前达峰以及减污降碳协同治理目标，采用不同的选取原则组合上述 19 条细化措施，构建了不同的减排路径，如表 5-1 所示。

表 5-1 碳达峰与空气质量达标协同治理路径设计

路径名称	治理目标	协同措施选取原则
参考路径	无治理目标，提供基线参考	社会经济自然发展

碳达峰 路径	2030 年实现碳达峰	优先选择减碳潜力大，减碳成本低的措施
提前达峰 路径	2025 年左右碳达峰	在碳达峰路径基础上，加大各项措施实施力度
减污降碳 协同路径	与提前达峰路径一致的碳减排，同时实现污染改善效益最大化	优先选择污染改善协同性高的措施

首先，基于社会经济可持续自然增长的假设建立了 2020-2030 年间的自然发展路径（参考路径）。该路径下，不考虑气候目标约束，除现行已发布的气候治理行动外，在 2020-2030 年间不实施额外的气候治理措施；不考虑空气质量目标约束，除现行已发布的大气污染治理行动（如燃煤电厂超低排放改造、重点区域钢铁和水泥行业超低排放改造、VOCs 专项治理等），在 2020-2030 年间不实施额外的污染末端治理措施。社会经济保持较快增速，2030 年相较 2020 年 GDP 增长 74.3%；城镇化率较 2020 年增加 11.2%；人口缓慢增长至 2025 年达到峰值，2030 年人口数量与 2020 年基本持平，但社会老龄化程度加剧，2030 年 55 岁及以上的老龄人口占比相较 2020 年提升 11.4%。在工业行业发展方面，综合考虑人口、GDP、城镇化率、新增建筑面积和基础设施建设的影响，水泥、生铁、钢材等主要工业产品产量在 2020 年达到峰值，2030 年产量相较 2020 年分别下降 7.2%、24.3%、23.3%；化工行业产品产量在 2025 年左右达到峰值。在交通运输行业发展方面，机动车保有量呈中低速增长模式，至 2030 年机动车千人保有量达到 400 辆/千人，是 2020 年的 2.1 倍。

在参考路径基础上，分别以 2030 年和 2025 年实现碳达峰为目

标，以减排成本和潜力为措施实施力度优选依据，构建碳达峰和提前达峰路径，按照减排成本逐步增高，实施力度逐步减弱的原则组合措施。图 5-2 展示了河北省碳达峰、提前达峰路径下的措施排序状况。

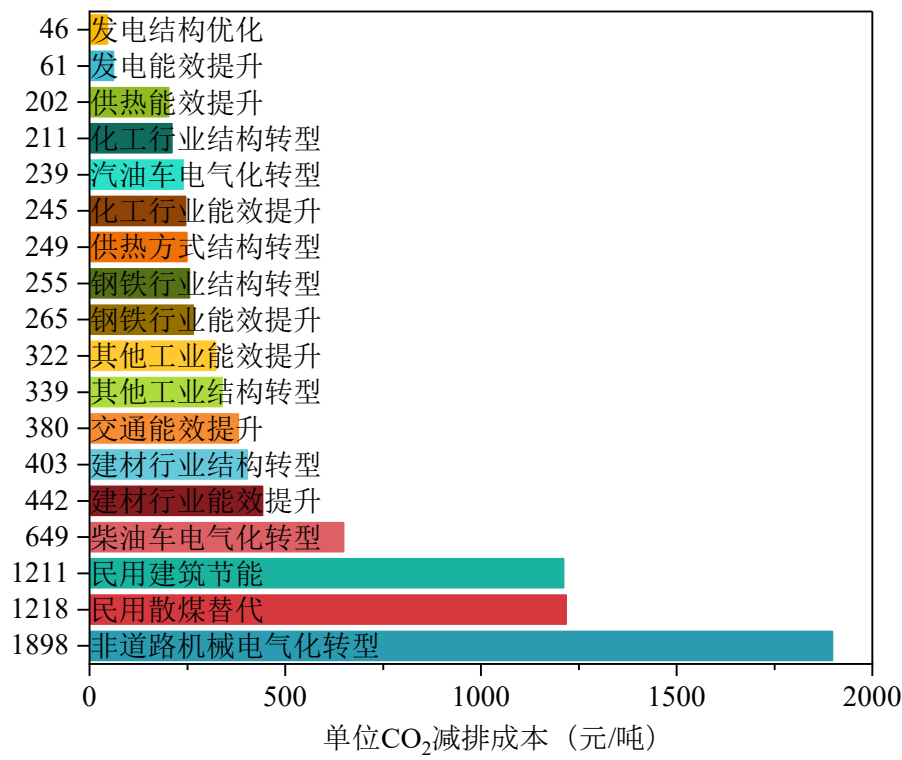


图 5-2 河北省碳达峰、提前达峰路径措施实施排序

另一方面，同样在参考路径基础上，以 2025 年实现碳达峰且污染改善协同效益（通过措施实施带来的 PM_{2.5} 浓度降幅来衡量）最大化为目标，优先选择污染改善协同性高的措施，构建减污降碳协同路径，按照单位减碳环境协同效益逐步减小，实施力度逐步减弱的原则组合措施。图 5-3 展示了河北省减污降碳协同路径下的措施排序状况。

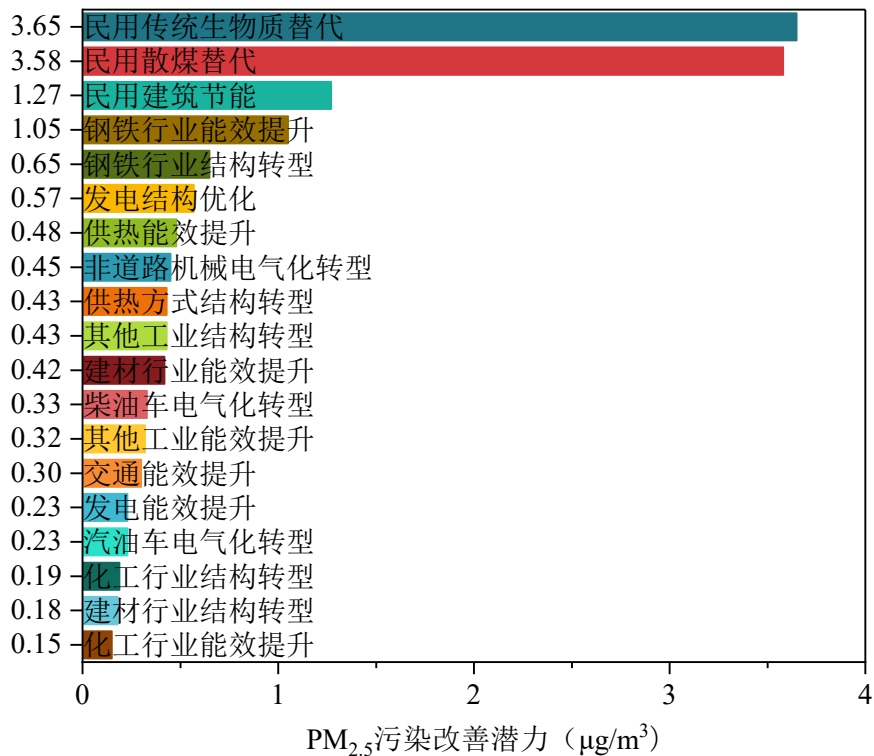


图 5-3 河北省减污降碳协同路径措施实施排序

第3节 指标设定

本研究设置的四个路径中，参考路径和减污降碳协同路径最具代表性。参考路径假定不施加额外的治污与减碳措施，预测未来大气污染物和温室气体可能的演变情形，反映了社会经济自然发展对区域生态环境的压力。减污降碳协同路径则突出污染防治和气候治理的整体性，以结构调整、源头减排为关键，注重提高环境治理综合效能，力求实现环境效益、气候效益、经济效益多赢。对这两种典型路径下近期（2025 年）和中期（2030 年）指标的分析，可以为河北省“十四五”时期大气污染防治与温室气体协同控制策略的制订提供有益参考。

温室气体和大气污染物的同根同源同过程，很大程度上来自于能源的使用。因此，对于能源消费量的预测是排放分析的关键。本研究

主要考虑了煤炭、天然气、石油、非化石能源四个类别，核心指标为消费量，设定值详见表 5-2。

表 5-2 参考路径与减污降碳协同路径下主要能源指标设定

分类	指标	单位	实际单位	参考路径		减污降碳协同路径	
				2025 年	2030 年	2025 年	2030 年
能源总量	消费量	亿 tce	亿 tce	3.64	4.37	4.17	4.00
煤炭	消费量	亿吨	亿 tce	2.89	2.61	2.78	2.27
	占比	%	%	79.4	59.8	66.7	56.7
天然气	消费量	亿 m ³	亿 tce	0.31	0.33	0.30	0.30
	占比	%	%	8.5	7.6	7.2	7.5
非化石能源	消费量	亿 tce	亿 tce	0.71	1.06	0.76	1.13
	占比	%	%	13	24.2	18.1	28.3
油品合计	消费量	亿吨	亿 tce	0.355	0.360	0.335	0.302
其中：汽油	消费量	亿吨	亿 tce	0.139	0.139	0.122	0.092
柴油	消费量	亿吨	亿 tce	0.00083	0.00083	0.00081	0.00078
残余燃油	消费量	亿吨	亿 tce	0.00007	0.00006	0.00007	0.00006
液化石油气	消费量	亿吨	亿 tce	0.00076	0.00078	0.00075	0.00075
原油	消费量	亿吨	亿 tce	0.160	0.164	0.158	0.158
重油	消费量	亿吨	亿 tce	0.05158	0.05236	0.04983	0.04762
炼油气	消费量	亿吨	亿 tce	0.00278	0.00285	0.00275	0.00274

电力源排放预测中，本研究考虑了煤电、天然气发电、水电、风电、太阳能发电和生物质发电，核心指标为装机容量，设定值详见表 5-3。

表 5-3 参考路径与减污降碳协同路径下主要电力指标设定

分类	单位	参考路径		减污降碳协同路径	
		2025 年	2030 年	2025 年	2030 年
煤电	万千瓦	5100	4510	5100	4100
天然气发电	万千瓦	294	494.8571	294	394.8571
水电	万千瓦	542	893.1429	542	893.1429
风电	万千瓦	4300	6800	4600	6800
太阳能发电	万千瓦	6000	8714.286	6000	10000
生物质发电	万千瓦	522	676	522	676
总装机容量	万千瓦	16758	22088.29	17058	22864
非化石发电量占比	%	64.58	77.34158	68.37847	80.3409

工业源排放预测中，本研究考虑了主要工业产品产量的变化。粗钢和水泥在 2025 年的产量预计分别为 2.05 和 0.96 亿吨，在 2030 年的产量预计分别为 1.95 和 0.80 亿吨。交通源排放预测中，本研究主要考虑了未来电动汽车的普及率，预计 2025 年新能源汽车占新车销量比重将达到 20%。民用源排放预测中，本研究主要考虑了建筑领域电气化，预计建筑电气化率在 2025 年为 31.4%，在 2030 年有望达到 35.7%。

第4节 参考路径

基于 DEPC 模型预测河北省“十四五”期间（2021-2025 年）在参考路径、碳达峰路径、提前达峰路径、减污降碳协同路径下，主要大气污染物与温室气体排放的总量趋势、部门分担与结构变化。

图 5-4 展示了参考路径下河北省 2020-2025 年主要大气污染物与温室气体分部门排放变化状况。总体而言，排放总量普遍保持上升，这是因为参考路径下，能耗、后处理技术、清洁能源比例等参数维持不变，但排放活动水平仍在上升。排放结构与 2015-2020 年间有一定相似性，工业源、交通源、电力源仍是主要的大气污染物与温室气体排放源。但具体到不同的排放物种，其总体趋势与部门分担存在着一定差异，以下将分别进行讨论。

预测期内，河北省 SO₂ 排放量从 2020 年的 53.74 万吨增长至 2025 年的 60.00 万吨，增幅为 11.65%，年均增幅为 2.23% 且年增幅逐渐下降。从分部门的排放变化来看，2020-2025 年间，电力、工业、交通、民用源的 SO₂ 排放量分别从 4.42、41.93、0.81、6.59 万吨增至 5.19、46.53、0.84、7.44 万吨，增幅分别为 17.44%、10.98%、3.71%、12.99%。电力源的排放增幅最大，交通源增幅最小。从分部门的排放构成来看，预测期内电力、工业、交通、民用源对 SO₂ 总排放的贡献率分别为 8.42%、77.88%、1.44%、12.26%，可见工业源与民用源在未来仍为 SO₂ 排放的主要贡献源。

NO_x 排放 在 2020-2025 年间，从 156.91 万吨增长至 174.01 万吨，增幅为 10.90%，年均增幅为 2.09% 且年增幅逐渐下降。从部门层面的排放变化来看，电力、工业、交通、民用源的 NO_x 排放量分别从 25.48、74.96、51.86、4.61 万吨增至 29.92、84.28、54.91、4.91 万吨，增幅分别为 17.43%、12.43%、5.88%、6.32%。电力源排放增幅最大，工

业源次之。从分部门的排放构成来看，预测期内电力、工业、交通、民用源对 NO_x 总排放的贡献率分别为 16.76%、48.20%、32.17%、2.87%。工业源与交通源在未来仍为 NO_x 排放的主要贡献源。

2020-2025 年， $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量从 41.64 万吨增长至 44.39 万吨，增幅为 6.61%，年均增幅为 1.29%且年增幅总体呈下降趋势。各部门的排放量增减不一。电力、工业、交通源的排放量分别从 3.11、24.67、3.23 万吨增长至 3.65、27.60、3.28，增幅依次为 17.44%、11.91%、1.47%。民用源的排放量则从 10.63 万吨降至 9.85 万吨，降幅为 7.30%。民用源 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的下降，与民用散煤清零政策的继续推行密切相关。从分部门的排放构成来看，预测期内电力、工业、交通、民用源对 $\text{PM}_{2.5}$ 总排放的贡献率分别为 7.84%、60.97%、7.52%、23.68%。工业源与民用源仍是 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的主要贡献源，但民用源的贡献率将逐渐下降。

VOCs 排放量在 2020 到 2025 年间从 138.69 万吨增长至 139.43 万吨，增幅很小，仅为 0.53%。年均增幅为 0.11%，且从 2024 年开始年变化率由正转负。VOCs 增长势头的遏制得益于产能压减与产业升级。部门层面的排放量升降不一。电力、工业、交通源的排放量从 0.24、36.25、23.46 万吨增长至 0.28、39.97、23.95 万吨，增幅分别为 17.44%、10.27%、2.09%。民用源与溶剂使用源的排放量分别从 14.86 和 63.89 万吨降至 13.26 和 61.97 万吨，降幅分别为 10.76%和 3.00%。工业源排放增幅最大，民用源排放降幅最大。从部门的排放构成来看，预测期内电力、工业、交通、民用、溶剂使用源对 VOCs 总排放的贡献率

分别为 0.18%、27.44%、17.02%、10.10%、45.26%。溶剂使用源和工业源是 VOCs 排放的主要贡献源，其中工业源的贡献率在上升，溶剂使用源的贡献率在下降。

NH₃ 排放量在 2020 至 2025 年间从 43.20 万吨增长至 43.53 万吨，总量增幅仅为 0.76%，年均增幅 0.15%。从部门的排放变化来看，2020-2025 年间，工业、交通、农业源的 NH₃ 排放量分别从 1.55、0.32、40.24 万吨增长至 1.58、0.34、40.74 万吨，增幅分别为 1.91%、4.23%、1.24%。同时，民用源的 NH₃ 排放从 1.10 万吨降至 0.88 万吨，降幅为 19.48%。从分部门的排放构成来看，农业源在未来依然是 NH₃ 排放的首要贡献源，贡献率为 93.36%。工业源和民用源的贡献率位列第二、三位，贡献率分别是 3.60%和 2.28%。交通源对 NH₃ 排放的贡献率最小，仅为 0.76%。

预测期内，河北省的 CO₂排放量从 80617.16 万吨增长至 87062.31 万吨，增幅为 7.99%，年均增幅为 1.55%，年增幅呈总体呈下降趋势。从分部门排放的变化来看，电力、工业、交通、民用源的 CO₂ 排放量分别从 16750.34、53892.17、6711.22、3263.42 万吨增长至 19670.57、56176.44、7093.34、4121.95 万吨，增幅分别为 17.43%、4.24%、5.69%、26.31%。从部门的排放构成来看，预测期内电力、工业、交通、民用源对 CO₂ 排放的分担率分别为 21.77%、65.62%、8.22%、4.40%。工业源和电力源是 CO₂ 排放的主要贡献源，其中工业源的贡献率在上升，电力源的贡献率在下降。

综合以上分析结果,可知在参考路径下,SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂在2020至2025年间的排放增幅分别为11.65%、10.90%、6.61%、0.53%、0.76%、7.99%。这说明如不实施更有力的减排举措,未来SO₂、NO_x、CO₂、PM_{2.5}排放仍将保持较高增速。各物种的排放构成与“十三五”时期有较高相似性,工业源和民用源是SO₂和PM_{2.5}排放的主要贡献源,NO_x排放主要来自于工业源和交通源,溶剂使用源和工业源是VOCs排放的主要来源,农业源是NH₃排放的首要贡献源,工业源和电力源是CO₂排放的主要贡献源。

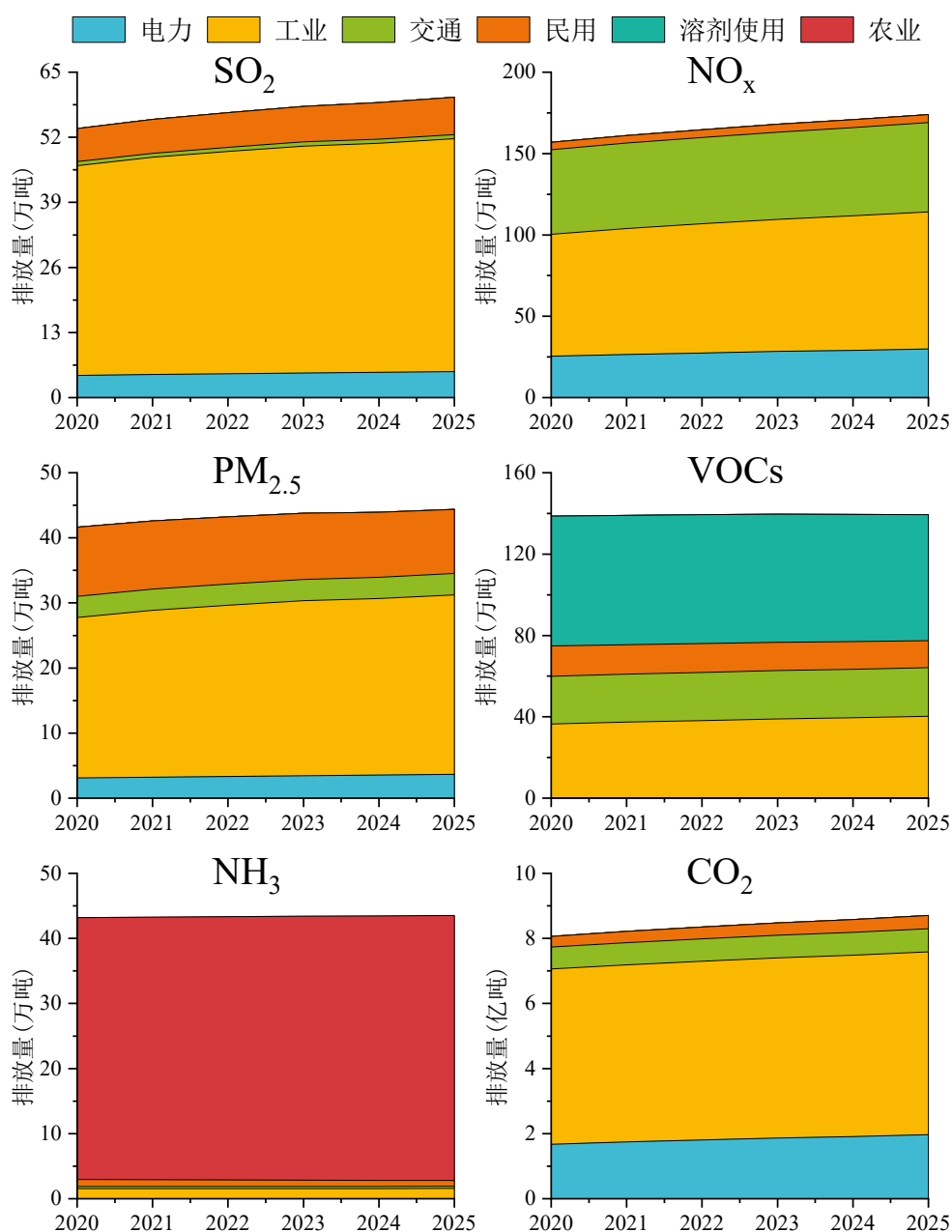


图 5-4 参考路径下河北省 2020-2025 年主要大气污染物与温室气体排放变化

第5节 协同路径

在参考路径的基础上，以 2020 年为基准年，针对 2030 年碳达峰、2025 年提前达峰以及减污降碳协同治理目标，分别优选电力结构清洁化、移动源电气化、重点行业节能、民用散煤替代等治理措施，构建碳达峰路径、提前达峰路径与减污降碳协同路径。各路径下的减

排效果可采用以下两类指标量化。

一是排放在预测期末相对于期初的变化率。该指标重在考察不同路径下排放量的绝对变化状况，公式如下：

$$ECR_s = \frac{E_{s,end,p} - E_{s,st,p}}{E_{st,p}} \quad \text{公式 5-1}$$

其中，s 为本项目所设计的路径名称，包括参考路径、碳达峰路径、提前达峰路径、减污降碳协同路径；ECR 为排放量变化率； $E_{s,end,p}$ 和 $E_{s,st,p}$ 分别表示在 s 路径下预测期末 end 年和期初 st 年污染物 p 的排放量，本项目中 end 为 2025 年，st 为 2020 年。

二是碳达峰与空气质量达标协同治理路径相对于参考路径的减排率。该指标重在考察不同路径下排放量的相对变化状况，公式如下：

$$ARRB_{s,p} = \frac{\sum_y \frac{E_{BAU,y,p} - E_{s,y,p}}{E_{BAU,y,p}}}{PL} \quad \text{公式 5-2}$$

其中，ARRB 为预测期内协同治理路径相对于参考路径的多年度平均减排率； $E_{BAU,y,p}$ 表示参考路径 BAU 下在预测年 y 时污染物 p 的排放量，y 取值范围是 2021 至 2025 年；PL 为预测期长度，本项目中为 5 年。

图 5-5 展示了不同路径下河北省主要污染物与温室气体的排放状况。

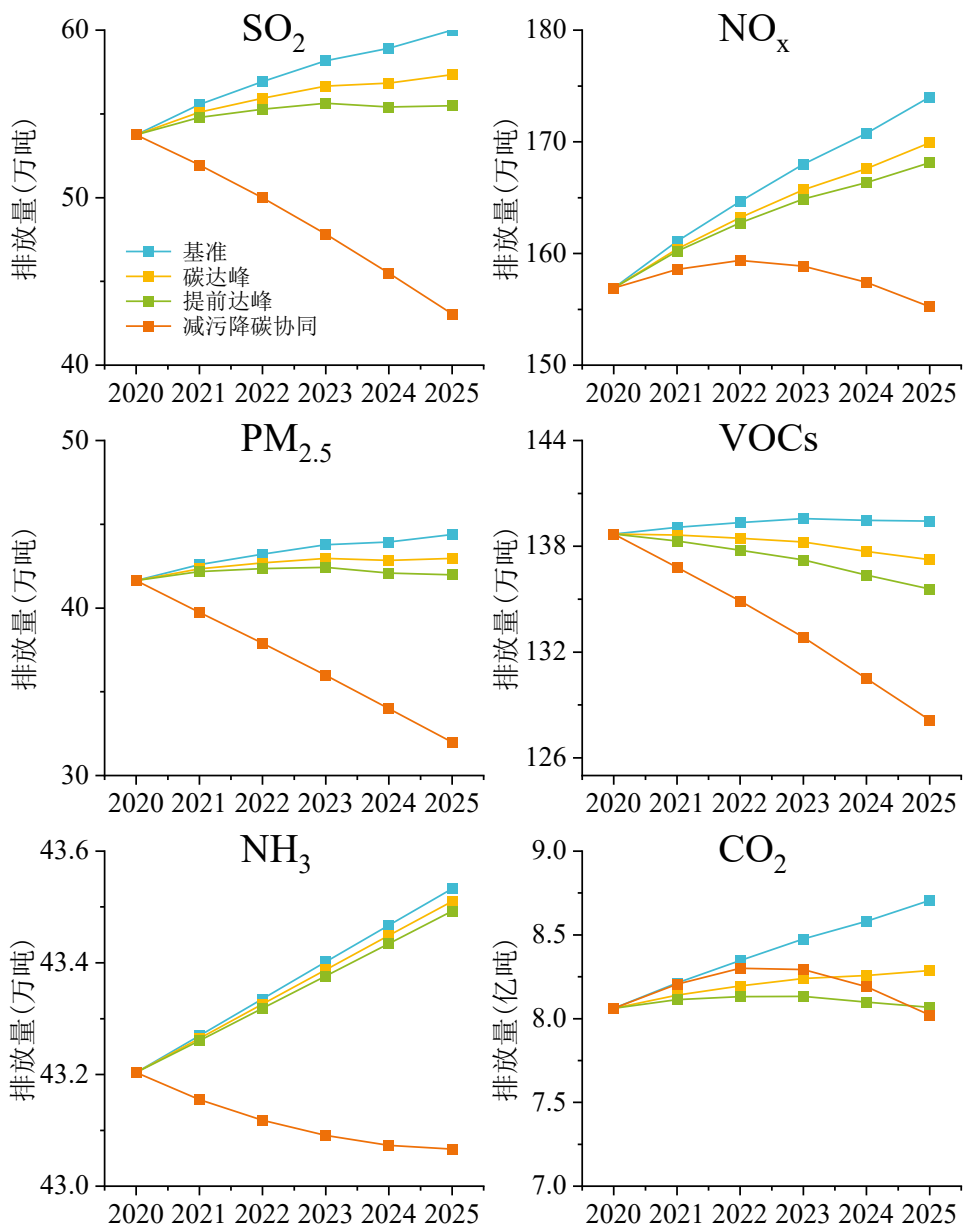


图 5-5 不同路径下河北省 2020-2025 年主要大气污染物与温室气体排放变化

为更清晰的量化各路径的绝对减排效果，表 5-4 中展示了预测期内不同路径下主要污染物与温室气体排放的绝对变化率。显然，减污降碳协同路径下减排效果最为明显，SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂ 排放分别从 2020 年的 53.74、156.91、41.64、138.69、43.20、80617.16 万吨降至 2025 年的 43.06、155.24、32.00、128.15、43.07、80214.09 万吨，对应的变化率分别为-19.88%、-1.06%、-23.15%、-7.60%、

-0.32%、-0.50%。其中 SO₂、PM_{2.5}、VOCs 排放的减排幅度较大。

表 5-4 不同路径下预测期初（2020 年）与期末（2025 年）主要大气污染物与温室气体排放变化

路径	指标	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	CO ₂
	期初排放	53.74	156.91	41.64	138.69	43.20	80617.16
参考路径	期末排放	60.00	174.01	44.39	139.43	43.53	87062.31
	绝对变化	11.65%	10.90%	6.61%	0.53%	0.76%	7.99%
碳达峰路径	期末排放	57.34	169.91	42.97	137.24	43.51	82868.50
	绝对变化	6.70%	8.29%	3.19%	-1.05%	0.71%	2.79%
提前达峰路径	期末排放	55.49	168.14	41.99	135.58	43.49	80681.75
	绝对变化	3.25%	7.16%	0.84%	-2.25%	0.67%	0.08%
减污降碳协同路径	期末排放	43.06	155.24	32.00	128.15	43.07	80214.09
	绝对变化	-19.88%	-1.06%	-23.15%	-7.60%	-0.32%	-0.50%

参考路径、碳达峰路径、提前达峰路径、减污降碳协同路径下 CO₂ 排放变化的绝对量分别为 6445.15、2251.34、64.59、-403.07 万吨。CO₂ 排放仅在减污降碳协同路径下实现了有效减排，这意味着未来政策制订的着力点应从末端治理转向源头治理，通过应对气候变化降低碳排放，从根本上解决环境污染问题，推动高质量发展。

为衡量不同路径的相对减排效果，表 5-5 展示了不同减排路径下主要大气污染物与温室气体排放相对于参考路径的减排率。减污降碳协同路径对污染物的相对减排率最高，预测期内对 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃ 的相对减排率分别为 17.50%、5.76%、17.48%、4.83% 和 0.69%。减污降碳协同路径中的措施，显著降低了 SO₂ 和 PM_{2.5} 的

排放量。提前达峰路径对温室气体的相对减排率最高，预测期内对CO₂的相对减排率为3.05%。

表 5-5 不同减排路径下主要大气污染物与温室气体排放相对于参考路径减排率

路径名称	SO ₂	NO _x	PM _{2.5}	VOCs	NH ₃	CO ₂
碳达峰路径	2.63%	1.38%	1.88%	0.95%	0.03%	2.81%
提前达峰路径	4.42%	1.91%	3.14%	1.67%	0.06%	4.16%
减污降碳协同路径	17.50%	5.76%	17.48%	4.83%	0.69%	3.05%

参考路径下，不额外实施减污降碳措施，则在社会经济自然增长的驱动下，2021-2025 年间 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂ 的排放总量合计为 289.58、838.52、217.92、696.91、217.01、423230.05 万吨。

碳达峰路径下，实施减排潜力高、成本低的减碳措施。2021-2025 年间 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂ 的排放总量合计为 281.88、826.82、213.80、690.29、216.94、411209.09 万吨，与参考路径相比分别减少了 7.70、11.70、4.12、6.62、0.07、12020.96 万吨。SO₂ 排放削减的驱动力来自于工业源、电力源、民用源，分别削减了 5.48、1.16、1.03 万吨，贡献率为 71.12%、15.00%、13.39%（驱动力计算方式参考公式 2-1 到公式 2-3）。NO_x 排放削减的驱动力来自于工业源、交通源、民用源，分别削减了 11.34、2.06、0.36 万吨，贡献率为 82.40%、14.95%、2.65%。PM_{2.5} 排放削减主要来自于工业源、电力源、民用源，分别削减了 2.49、0.81、0.68 万吨，贡献率为 60.48%、19.73%、16.49%。VOCs 排放削减主要来自于交通源、工业源、民用源，分别削减了 3.77、

2.04、0.75 万吨，贡献率为 56.90%、30.77%、11.39%。NH₃ 排放削减来自于交通源与民用源，分别削减了 0.05 和 0.02 万吨，贡献率分别 69.43%和 30.57%。CO₂ 排放削减的驱动力来自于工业源、电力源、交通源，分别削减了 6803.98、4378.95 和 568.15 万吨，贡献率分别 56.60%、36.43%和 4.73%。总体而言，工业源和电力源是该路径下未来主要大气污染物与温室气体减排的主要驱动力。通过实施化工、钢铁、供热等工业行业的电气化转型与用能技术升级，可以有效削减工业源排放。同时，通过电力系统的可再生能源转型和发电能效提升，电力源排放也将得到有效控制。

提前达峰路径下，将进一步强化低成本减碳措施的实施力度。2021-2025 年间 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂ 的排放总量合计为 276.60、822.30、211.04、685.26、216.88、405442.58 万吨，与参考路径相比分别减少了 12.98、16.21、6.88、11.65、0.12、17787.47 万吨。SO₂ 排放削减的驱动力来自于工业源、民用源、电力源，分别削减了 9.90、1.95、1.06 万吨，对应的减排贡献率分别为 76.32%、15.00%、8.17%。NO_x 排放削减主要来自于工业源、交通源、民用源，分别削减了 19.90、3.89、0.70 万吨，减排贡献率分别为 81.25%、15.90%、2.85%。需要指出的是，相对于参考路径，提前达峰路径下电力源的 NO_x 排放增长了 8.28 万吨。PM_{2.5} 排放削减主要来自于工业源、民用源、电力源，分别削减了 4.60、1.30、0.75 万吨，贡献率依次为 66.83%、18.84%、10.83%。VOCs 排放削减来自于交通源、工业源、民用源，

分别下降了 6.33、3.82、1.45 万吨，减排贡献依次为 54.29%、32.80%、12.43%。NH₃ 排放削减来自于交通源与民用源，分别削减了 0.08 和 0.04 万吨，贡献率分别 65.77%和 34.23%。CO₂ 排放削减的驱动力来自于工业源、电力源、交通源，分别削减了 12259.53、4016.26 和 994.30 万吨，贡献率分别 68.92%、22.58%和 5.59%。总体而言，工业源、交通源、民用源是该路径下大气污染物减排的主要驱动力。相较于碳达峰路径，通过钢铁、化工、供热、建材等重点工业行业能效进一步提升 5%-40%；以及工业终端电力消费占比进一步提升 5%-12%，工业部门的减排效应将进一步凸显。此外，交通和民用部门的排放也将得到有效抑制。电力行业通过提升可再生发电比例（进一步提升 15%左右）和发电效率（进一步提升 35%-40%），在温室气体减排中仍具有较强的驱动力。

减污降碳协同路径下，优先实施环境改善协同性高的措施。2021-2025 年间 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、NH₃、CO₂ 的排放总量合计为 238.32、789.47、179.61、663.20、215.50、410098.12 万吨，与参考路径相比分别减少了 51.26、49.05、38.31、33.71、1.50、13131.93 万吨。SO₂ 排放削减的驱动力来自于工业源、民用源、交通源，分别削减了 45.84、12.45、0.10 万吨，对应的减排贡献率分别为 78.51%、21.32%、0.17%。NO_x 排放削减主要来自于工业源、交通源、民用源，分别削减了 69.49、13.16、7.70 万吨，减排贡献率分别为 76.91%、14.57%、8.52%。PM_{2.5} 排放削减主要来自于工业源、民用源、交通源，分别削

减了 25.85、16.99、0.49 万吨，贡献率依次为 59.67%、39.21%、1.12%。

VOCs 排放削减来自于民用源和工业源，分别下降了 23.06 和 17.19 万吨，减排贡献依次为 57.29%和 42.71%。NH₃ 排放削减全部来自于民用源，削减量为 1.58 万吨。CO₂ 排放削减的驱动力来自于工业源、民用源、交通源，分别削减了 33692.89、5809.76 和 411.38 万吨，贡献率分别 84.41%、14.56%和 1.03%。总体而言，工业源和民用源是该路径下大气污染物与温室气体减排的主要驱动力。对于民用源，全面淘汰民用散煤，并且最大限度提升民用部门的终端用能效率，这使得该路径下民用部门排放大幅下降。对工业部门，钢铁、建材等行业仍具有较高环境改善潜力；相较提前达峰路径，上述工业行业的能效进一步提升 7%–13%，且终端电气化转型进一步强化，因此该情景下工业源排放同样得到了有效削减。需要指出的是，该路径下，预测期内电力源 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs、CO₂ 的排放量相较于参考路径分别上升了 7.13、41.30、5.02、0.38、26782.11 万吨。这是因为电力部门近年来全面实施燃煤电厂超低排放改造，燃煤电厂污染排放已得到有效控制，后续的环境改善潜力相对较低。而在减污降碳协同路径下，一方面电力部门的低碳转型与发电效率提升相对弱于提前达峰路径，另一方面民用部门、主要工业行业、柴油车、非道路机械的电气化转型力度高于提前达峰路径，发电需求更高，两项因素叠加，推升了电力部门的排放量。但总体而言，减污降碳协同路径下，通过优选民用散煤替代、交通电气化、“两高”行业能源转型与能效提升等措施，可

以有效降低河北省“十四五”期间主要大气污染物与温室气体的排放量。

第6章 问题与建议

近年来，河北省各级各部门认真贯彻落实习近平生态文明思想，强化治本攻坚，坚持精准施策，以生态环境高水平保护促进经济高质量发展。“十三五”期间，河北省空气质量改善取得标志性、历史性突破。2020年，全省PM_{2.5}平均浓度44.8微克/立方米，同比下降10.8%，较2017年下降27.7%；优良天数比率69.9%，较2017年提升9个百分点，环境空气质量创2013年以来最好水平，超额完成了“十三五”和蓝天保卫战三年行动计划目标任务。2021年，河北省大气环境持续改善、六项污染物浓度均显著下降、达标天数明显增加，大气污染物协同控制、大气污染治理取得显著成效，人民群众蓝天获得感、幸福感、安全感显著增强。

然而，河北省空气污染形势依然严峻：首先，河北省多个城市PM_{2.5}年均浓度尚未达标，且未来进一步下降的难度逐步加大；其次，臭氧污染尚未得到有效控制，空气质量管理进入PM_{2.5}和臭氧协同防控的深水区；再次，能源结构偏煤、产业结构偏重、运输结构偏公路的格局并未发生根本性好转，导致NO_x、SO₂、PM₁₀、PM_{2.5}等污染物和温室气体的排放量居高不下；最后，污染来源和特征发生变化，机动车、扬尘和挥发性有机物污染逐步成为当前空气污染治理的重点难点问题。总体而言，当前区域污染物排放总量仍超过环境容量，河北省大气治理成效还不稳固，“复合型”、“区域型”污染问题尚未得到根本解决，大气环境治理仍然艰巨复杂、任重道远。

未来，在经济发展和快速城市化背景下，河北省面临着来自空气污染和气候变化问题的双重挑战。大气污染防治既是攻坚战，也是持久战，“十四五”污染防治攻坚战必须以“减污降碳协同增效”为总抓手，既减污、又降碳，加快推动从末端治理向源头治理转变，通过应对气候变化降低碳排放，在持续深入打好污染防治攻坚战的同时，推动社会经济高质量发展。

为助力河北省大气环境质量的持续改善与社会经济的绿色低碳发展，本研究基于多源数据和中国多尺度排放清单模型（MEIC），分析了河北省 2015-2020 年间主要大气污染物（SO₂、NO_x、PM_{2.5}、VOCs 和 NH₃）和温室气体（CO₂）排放的趋势、结构、驱动和分布特征，从减排效果、空气质量、实施成本和污碳协同角度对河北省“十三五”时期大气污染治理措施开展综合评估，同时对“十四五”时期的减污降碳政策进行了系统梳理，构建了涵盖源头管控、重点领域、环境治理、创新示范和技术攻关的政策框架，提炼了能源、工业、交通、农业和建筑多领域的政策规划指标，对比了京、津、冀三地的政策差异，并采用中国未来排放动态评估模型（DPEC）预测了参考路径、碳达峰路径、提前达峰路径、减污降碳协同路径下，河北省 2020-2025 年主要大气污染物与温室气体的排放变化，给出了河北省“十四五”时期的减污降碳协同路径。

基于上述分析方法，总结前文研究成果，本章梳理出了河北省温室气体和空气污染物排放协同控制的关键问题，并围绕这些问题提出

了富有针对性的政策建议。

第1节 问题总结

一、能源结构相对落后，煤炭消费占比较高，清洁能源利用效率较低

在河北省能源消费中，煤炭消费占比较高，2019 年时煤炭消费占比为 68.3%，显著高于全国平均水平 57.7%。随着“十三五”期间清洁取暖的有效推进，民用取暖方式由散煤改为天然气后，民用散煤量被大幅压减，煤炭的大气污染物与碳排放总体呈下降趋势，但燃煤相关源类依然主导着区域大气污染物与 CO₂ 排放变化，如 2015-2020 年间，煤炭燃烧对应的污染物降幅虽然较为明显，但从排放结构来看，煤炭排放占比仍然较高，是 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 和 CO₂ 的主要贡献源。

河北省涉煤的主要细分排放源有 6 类，包括燃煤电厂、燃煤工业锅炉、燃煤工业供热、燃煤民用供热、城市民用燃煤、农村民用燃煤，用煤类型包括原煤、型煤与洗煤。其中，燃煤电厂是电力排放的主要贡献源，对电力 SO₂、PM_{2.5} 和 CO₂ 的排放贡献均高达 99%以上；燃煤工业锅炉、农村民用燃煤分别是工业排放和民用排放的主要贡献源之一。“十三五”期间河北省涉煤排放源用煤总量下降了 13.23%，其中燃煤工业锅炉、城市民用燃煤、农村民用燃煤的煤耗量有所下降，主要来自于农村散煤的“煤改气”与“煤改电”以及工业小型燃煤锅炉的淘汰；然而燃煤电厂、燃煤工业供热、燃煤民用供热的煤耗量有

所增长，是由于电气化与集中供暖的推行，导致电力煤耗与供热煤耗相应上升。2020 年，河北省涉煤排放源的用煤总量为 1.61 亿吨，其中燃煤电厂、燃煤工业锅炉占比较高，分别为 58.51%、22.44%。由此可见，未来能源结构与能源布局的优化仍能释放一定的减排空间，“十四五”期间河北省应严控煤炭消费总量，继续推进清洁取暖建设，不断提高消费侧电力比重，降低化石能源消费占比。

从能源分布上来看，河北省张家口、承德坝上等地区具有较为丰富的风能，张家口、承德、唐山、沧州等地区的光照资源相对丰富，河北省有着清洁能源发电的先天优势；相较于北京市非应急情况下基本不使用煤炭、大幅提升绿电进京规模的举措，在安全保供的前提下，河北省的控煤力度和绿电占比还可以提升。

二、产业结构偏重，亟待升级优化

河北省处于工业化中期的发展阶段，对资源和能源的依存度较高，火电、钢铁、燃煤工业锅炉的排放贡献显著。“十三五”期间，河北省工业源对工业排放对几乎所有排放物种均具有较高贡献，其中工业源对 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、CO₂ 的贡献达到 50%以上。

河北省的工业源主要可以细分为燃煤工业锅炉、其他工业锅炉、燃煤工业供热、其他工业供热、燃煤民用供热、其他民用供热、钢铁、有色金属、水泥、玻璃、其他非金属、石油化工、油气储运、纺织纤维、食品饮料、废弃物处理等，可以看出产业结构以钢铁、燃煤、火电等重工业为主，其中工业源排放主要来自燃煤工业锅炉、钢铁、燃

煤工业供热、石油化工等行业。“十三五”期间，通过实施落后产能淘汰、散乱污企业整治等产业结构调整措施，工业源的主要大气污染物排放量有所下降，但 CO₂ 排放量上升，其中燃煤工业锅炉、其他工业锅炉和水泥作为工业源 CO₂ 排放的主要贡献源，其 CO₂ 排放量均有所上升，其他工业锅炉和水泥的排放量增幅更为显著，说明当前产业结构对实现污染物与 CO₂ 协同减排存在一定不合理之处，产业结构仍需进一步优化升级。

三、用地结构不尽合理，工业围城现象突出

工业是能源消耗、大气污染物与 CO₂ 排放的主要部门，河北作为重工业大省，产业绿色转型是当地实现空气质量与“双碳”目标的重点。从空间分布上进行分析，河北省主要污染物排放高值区域主要聚集于城区等人口密集区域，同时在全省范围内呈现北低南高的特点，将京津冀区域作为整体来分析，则空间分异规律更加显著。相较于北京，河北省产业结构调整滞后，第二产业增加值比重较高且以重工业为主导，重工业钢铁、水泥排放占比相对较高，生产性服务业发展相对滞后，其中唐山、邯郸钢铁企业聚集，石家庄煤电围城，邢台重工业园区围城，整体上省内钢铁、电力、工业园区布局与城市共融发展问题突出。

从各地级市主要大气污染物与温室气体排放空间分布对比来看，唐山市、石家庄市、保定市、沧州市这四个城市的总体排放量与排放强度均相对较高，特别是唐山市，整体工业源排放强度较高，对河北

省工业源的 SO_2 、 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 NH_3 、 CO_2 排放贡献率在各地级市中均为最高，应成为河北省减污降碳工作的关键区域。

四、机动车保有量增速过快，排放占比日益上升

交通源是河北省 NO_x 排放的主要排放源之一。2015-2020 年间，河北省民用汽车拥有量上升了 62.53%，其排放贡献仍在上升，应引起足够重视。以石家庄为例，其机动车保有规模庞大，位列河北省第一，2015-2020 年期间，石家庄对交通源的排放贡献也相对较高，其中对交通源 VOCs、 NO_x 、 CO_2 和 NH_3 的贡献分别达到 16.12%、15.17%、15.72% 和 16.28%，在省内各地级市的排放贡献中均为最高贡献。

柴油机动车、汽油机动车和非道路移动机械是河北省交通排放的排放源：其中柴油机动车是交通 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO_2 排放源，2020 年贡献率分别为 74.99%、6.86% 和 52.60%；而汽油机动车是主要的交通 VOCs 排放源，2020 年贡献率为 89.51%；非道路移动机械对交通源排放的贡献率虽然相对较低。“十三五”期间，河北省交通源 NO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 VOCs 排放量均有所下降，其中柴油机动车对各污染物排放量的降幅更为显著；但对 CO_2 排放量均存在一定升高，其中汽油机动车的 CO_2 排放增幅高于柴油机动车，这与河北省机动车保有量增速较高有关，在缺乏政策约束的情况下，排放贡献上升显著。

五、大气污染防治形势依然严峻，复合型、区域性污染问题逐渐显现，环境保护指标存需进一步收严

“十三五”期间，河北省采取对民用源散煤的压减、对工业源后处

理设施的升级、以及对扬尘源的针对性整治等措施，使得全省空气质量整体得以改善，顺利实现了十三五”规划目标，但当前大气环境形势总体依然十分严峻：一方面颗粒物污染问题尚未得到全面解决，2020 年河北全省 11 个设区市中仅张家口、承德和秦皇岛年均 $PM_{2.5}$ 达标，这主要是由于这些区域人类活动少，污染物排放强度小，然而对于南部的石家庄、保定、邢台、邯郸等地，这些地区人口众多、路网密集、产业集中，能耗与排放强度较高，同时处在太行山麓半封闭地形中，大气扩散条件较差，其 $PM_{2.5}$ 浓度仍处于较高水平；与此同时，臭氧污染尚未得到有效控制，2015 到 2021 年，河北省 O_3 -8h 浓度从 $147\mu g/m^3$ 上升至 $161\mu g/m^3$ ，复合型污染逐渐显现，空气质量管进入 $PM_{2.5}$ 和臭氧协同防控的深水区。此外，污染来源和特征发生变化，机动车、扬尘和挥发性有机物污染逐步成为当前空气污染治理的重点难点问题。加之河北省地形呈现西北高、东南低的特点，高度落差超过 500 米，污染物在山前堆积，整体地形不利于污染扩散，大气环境治理仍然艰巨复杂、任重道远。

河北作为京津冀生态环境支撑区，其产业和能源目标规划是京津冀区域减污降碳协同的重点，关键减排路径是产业结构、能源结构的优化升级。对河北省问题的研究，不应脱离京津冀协同发展这一区域背景。对比河北、北京、天津三地的减污降碳相关措施与指标发现，河北省的环境保护主要指标与北京市和天津市相比，仍存在一定的提升空间。从污染物指标上来看，河北省对于 $PM_{2.5}$ 浓度指标和空气质

量优良天比率的要求，低于北京市标准，为实现生态环境质量持续改善的目标，促进京津冀协同发展，河北省还需要深入打好污染防治攻坚战，在目标制定上尽可能参照北京市的标准。而在碳指标上，河北省单位 GDP 二氧化碳排放降低指标（单位 GDP 二氧化碳排放量与基期相比的降低比例）虽然与北京市和天津市标准一致，但对于森林覆盖率的指标要求，河北省低于北京市标准，森林覆盖率可以体现森林资源丰富程度、国土绿化状况和碳汇能力，河北省后续可提高该指标，进一步提升生态系统的碳汇能力。在能源指标上，河北省非化石能源消费占比指标，低于国家和北京市标准，河北省有着优越的清洁能源禀赋，应提高非化石能源在总能源消费中的比重，积极开发利用风能、太阳能等非化石能源，推动张家口可再生能源示范区和承德百万千瓦大型风电光电基地建设，清洁低碳、安全高效的能源体系正在加速构建。在交通指标方面，河北省中心城区绿色出行比例指标低于北京市和天津市，绿色出行有助于生产与生活的“低碳化”。河北省城市新能源公交车辆指标高于国家标准，低于北京市标准，发展新能源汽车对我国减轻石油依赖、减少碳排放、推动汽车产业转型升级具有重要意义，而公共交通行业由于固定路线、公共服务的特点，成为了新能源汽车推广政策的着力点。建筑指标方面，河北省装配式建筑指标、星级绿色建筑指标与国家标准持平或高于国家标准，但与北京市标准均存在一定差距；随着城镇化的推进和人民生活水平的提高，建筑能耗可能会持续增长，具有较大减排潜力，大力发展绿色建筑应该成为

河北省经济绿色低碳转型的重要一环，因此相关指标还可继续完善提升。农业指标方面，河北省的秸秆综合利用率指标最为严格，北京市和天津市比较接近；但废旧农膜回收率、农药利用率指标低于北京市标准，畜禽粪污综合利用率指标低于北京市和天津市。河北省应就农业环境污染重点问题，强化种养殖业污染治理，加快补齐农业生态环境保护突出短板，有效改善农业生态环境，提高污染治理目标。对于科技指标，河北省二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）仍处于起步阶段，规模相对较小，运行年份短，在封存、运输和利用等方面还有很大的提升空间。在未来相当长一段时期内，河北省以煤为主的能源结构难以出现根本性转变，大力发展 CCUS 技术，对确保河北省如期实现“双碳”目标具有重要意义。总体而言，河北省当前减污降碳相关措施与指标与周边城市存在一定差距，仍需进一步收严。

第2节 政策建议

（一）加快调整能源结构，建立以削减化石能源为核心的减污降碳协同增效战略路径，继续推进民用能源清洁化。

积极发展非化石能源。控制化石能源消费总量，推动非化石能源成为能源消费增量的主体，到 2025 年，非化石能源消费比重达到 13% 以上，2030 年，非化石能源消费比重达到 19% 以上；大力发展风能、光伏、太阳能等可再生能源发电，到 2025 年，可再生能源装机占全部电力装机比重达到 60%左右，风电、光伏发电装机容量分别达到

4300 万千瓦、5400 万千瓦；打造张家口、承德、唐山、沧州及太行山沿线等百万千瓦级光伏发电基地，大力发展分布式光伏发电，推进张家口、承德千万千瓦级风电基地建设。

加快燃煤锅炉改造。稳妥有序推进燃料类煤气发生炉、燃煤热风炉、加热炉、热处理炉、干燥炉（窑）以及建材行业煤炭减量，实施清洁电力和天然气替代。进一步淘汰煤电落后产能，持续关停落后小火电机组以及服役期满且不符合延寿条件的 30 万千瓦及以下机组，“上大压小”，推进煤电“三联改动”，到 2025 年，煤电总规模稳定在 5100 万千瓦左右。

推广大型燃煤电厂热电联产改造。充分挖掘供热潜力，采取区域供冷供热系统，设置分布式能源中心，推动淘汰供热管网覆盖范围内的燃煤锅炉和散煤。

促进民用能源清洁化。优化农业农村用能结构，加快风能、太阳能、生物质能、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，逐步提升清洁能源消费比重。加强农村散煤复燃管控，持续抓好农村地区清洁取暖，大力推进分布式光伏取暖，实施农村清洁取暖农户动态管理，规范“新增”和“退出”农户标准、程序，建立健全维修服务体系。

通过技术合作等方式联合开发河北地区风光资源，加强区域电网一体化建设，保障绿电入京。拓展河北与北京合作深度与广度，共同开发风光资源，实现技术产业化。北京发挥政府投资基金和高精尖产

业资金的引导作用，利用自身科技创新优势和资金优势以项目合作方式，河北将风光资源丰富地区的资源优势转换为经济优势，促进北京高比例可再生能源与电力系统融合，提升可再生能源电力的安全可靠应用水平，对冲未来绿电价格上升带来的成本上升风险，降低北京实现碳中和的成本，帮助河北在更大范围内解决可再生能源消纳问题。

（二）深化产业结构调整，遏制“两高”项目盲目发展，压减过剩和落后产能，注重源头治理。

坚决遏制高耗能高排放项目盲目发展。依法依规淘汰落后产能和化解过剩产能。严禁违规“两高”项目建设、运行，坚决拿下不符合要求的“两高”项目。严格执行钢铁、水泥、平板玻璃、焦化等行业产能置换规定，优化产品结构，严禁新增产能。

强化“散乱污”企业综合治理。列入关停取缔类的，基本做到“两断三清”（切断工业用水、用电，清除原料、产品、生产设备）；列入整合搬迁类的，要按照产业发展规模化、现代化的原则，搬迁至工业园区并实施升级改造；列入升级改造类的，树立行业标杆，实施清洁生产技术改造，全面提升污染治理水平。建立“散乱污”企业动态管理机制，坚决杜绝“散乱污”企业项目建设和已取缔的“散乱污”企业异地转移、死灰复燃。

加快重点行业节能降耗工程改造。加快实施钢铁、煤电、焦化、水泥、建材、石化化工、平板玻璃、陶瓷、有色金属等重点行业的节能改造升级和污染物深度治理。推进余热余压利用技术与工艺节能相

结合，在钢铁、石化、电力等行业推广高效烟气除尘和余热回收一体化技术。支持采用合同能源管理、环境污染第三方治理模式，推动工业窑炉、油机、压缩机等重点用能设备进行系统节能改造。巩固重点行业和燃煤锅炉超低排放改造成效，加强工业炉窑综合治理。推进绿色数据中心、5G 通信基站等新型基础设施绿色升级，加快提升新建项目可再生能源消费比重，新建大型和超大型数据中心电能利用效率（PUE）不超过 1.3。深入开展能效、水效“领跑者”行动，推动重点单位持续赶超引领。到 2025 年，规模以上工业企业单位工业增加值能耗比 2020 年下降 16.5%以上，重点耗能行业能效达到标杆水平的比例超过 30%。

加快钢铁行业减污降碳转型升级。钢铁行业是河北省大气污染与碳排放的关键源类。实施节能降碳行动，引导未达到基准水平的钢铁企业(高炉工序单位产品能耗为 435 千克标准煤/吨，转炉工序单位产品能耗为-10 千克标准煤/吨)，对照标杆水平实施改造升级(高炉工序单位产品能耗为 361 千克标准煤/吨，转炉工序单位产品能耗为-30 千克标准煤/吨)，力争到 2025 年全省钢铁产业能效达到标杆水平的产能比例超过 30%，技术层面，钢铁行业加快推动 1000 立方米以下高炉、100 吨以下转炉升级改造，推广高效精馏系统、高温高压干熄焦、富氧强化熔炼等节能技术，有序发展电弧炉短流程炼钢，力争 2025 年全省电炉钢比达到 5%-10%。围绕氢还原冶炼、全氧冶金、绿色化智能化流程控制等举措加快低碳生产技术研发，同时加强冷热电三联供

综合利用与固废处理等协同减排关键技术的研发与应用。在制度机制层面，应严控过剩产能，设定碳绩效并开展碳排放环境影响评价，同时提升钢铁行业清洁运输比例。经济政策层面，综合采取价税财金等手段推动钢铁行业转型升级。出台针对短流程炼钢企业的电价优惠和对废钢资源综合利用的价格优惠政策；出台基于钢铁行业节能奖励资金和碳减排专项支持资金；缩短绿色信贷审批周期，匹配企业融资需求；主动服务企业申请绿色金融享受优惠利率。

推进原辅材料和产品源头替代工程。实施全过程污染物治理。以工业涂装、包装印刷等行业为重点，推动使用低挥发性有机物含量的涂料、油墨、胶粘剂、清洗剂，到 2025 年，溶剂型工业涂料使用比例达到 20%，溶剂型油墨使用比例达到 10%，溶剂型胶粘剂使用量下降 20%。推进石化化工等行业挥发性有机物污染治理，全面提升废气收集率、治理设施同步运行率和去除率。到 2025 年，挥发性有机物重点工程减排量完成国家下达的 5.64 万吨目标。

加强区域氢能产业协同发展力度，区域总体布局，统筹发展规划。发挥北京氢能技术优势、河北的丰富应用场景优势和自然资源优势，助力区域实现能源供应的清洁低碳和安全高效双重目标。北京发挥氢能技术领先优势，加快提升产业技术创新与装备制造水平，河北充分发挥雄厚的产业基础，强化终端氢能应用场景。京津冀建立氢能产业统筹合作平台发挥各自优势，错位发展，统筹开发绿氢资源，规划氢能的运输、储备及消费等。

京冀共同搭建绿色低碳科技创新平台，深化拓展“北京研发、河北转化”模式，提升科技成果转化孵化能力。探索健全京冀技术交易市场以及知识产权交易平台，进一步促进北京科技创新优势与河北之间产业资源优势的有效互补和深度融合。加快构建企业为主体、产学研深度融合、创新平台和服务体系完备、资源配置高效、成果转化顺畅的绿色技术创新体系。健全和完善重大科技任务京冀两地联合攻关机制，针对重大绿色技术问题和低碳关键技术，京冀联合开展技术攻关，共同申报碳达峰、碳中和领域国家科技重大专项、国家自然科学基金，联合打造行业碳达峰、碳中和典型应用场景。

（三）调整用地结构，推进养殖场污染治理，加强扬尘源管控，推进城镇绿色节能改造工程。

强化农业面源污染防治。推进农药化肥减量增效、秸秆综合利用。加强规模养殖场污染治理和畜禽粪污资源化利用。到 2025 年，化肥、农药施用量保持零增长，畜禽粪污综合利用率达 85%以上，基本实现废旧农膜全回收。推进种植业、养殖业大气氨减排，加强源头防控，优化肥料、饲料结构。到 2025 年，推进大型规模化养殖场氨排放总量持续下降。

强化扬尘治理。强化施工、道路、堆场、裸露地面等扬尘管控，加强城市保洁和清扫。建立健全绿色施工标准和扬尘管控体系，对扬尘重点污染源实行清单化动态管理，将绿色施工纳入企业资质评价、生态环境信用评价。加强城市道路低尘机械化湿式清扫作业，加大城

市出入口、城乡结合部等重要路段冲洗保洁力度，实施渣土车密闭运输，完善降尘监测和考评体系。城市裸露地面、粉料类物料堆放及大型煤炭和矿石码头物料堆场基本完成抑尘设施建设和物料输送系统封闭改造，鼓励有条件的大型煤炭和矿石码头等干散货码头堆场实施全封闭改造。强化重点时段秸秆禁烧专项整治，完善秸秆焚烧视频监控系统点位建设，基本实现全省涉农区域全覆盖。严格落实矿产资源开采、运输和加工过程防尘、除尘措施，实施矿山生产污染物排放在线监测。

推进城镇绿色节能改造工程。深化雄安新区“无废城市”试点，在各设区的市开展“无废城市”建设。提高建筑节能标准，实施近零能耗建筑推广工程，鼓励发展零碳建筑。因地制宜应用太阳能、浅层地热能、生物质能等可再生能源解决建筑采暖用能需求。城镇新建建筑全面执行绿色建筑标准。到 2025 年，新建装配式建筑占当年新建建筑比例达 30%以上，城镇民用建筑全面推行超低能耗建筑标准，城镇基本实现清洁取暖。

优化重点行业企业布局。引导重点行业向环境容量充足、扩散条件较好区域布局。推动焦炭产能向五大集团、煤化工基地和钢焦一体企业集聚。实施重点企业退城搬迁，对不符合城市功能定位的污染企业，依法搬迁退出城市建成区。在保障电力安全稳定供应前提下，稳妥实施燃煤火电机组及自备电厂退城搬迁。

（四）推进运输结构调整，强化移动源综合管控，更新车队构成，

淘汰高排老旧车辆，推广新能源车辆，优化运输方式，建立低碳交通体系。

加强移动源管控。提高城市公交、出租、物流、环卫清扫新能源车辆的比例。实施汽车国六排放标准和非道路移动柴油机械国四排放标准，基本淘汰国三及以下排放标准汽车。深入实施清洁柴油机行动，鼓励重型柴油货车更新替代。

推广低碳交通工具。加快新能源和清洁能源汽车在城市公交、出租汽车、物流、环卫清扫、港口等领域推广应用，推广氢燃料电池重卡等交通运输设施。加快推进多式联运发展，持续深化国家多式联运示范工程建设。到 2025 年，清洁能源及新能源公交车、出租车比例分别达到 90%以上、80%以上。

优化现有运输方式。加快大宗货物和中长途货物运输“公转铁”、“公转水”，大力发展铁水、公铁、公水等多式联运。大力发展智能交通，积极运用大数据优化运输组织模式。加快绿色仓储建设，鼓励建设绿色物流园区，全面推广绿色快递包装，引导电商企业、邮政快递企业选购使用获得绿色认证的快递包装产品。持续完善城市配送物流基础设施，推进邯郸、唐山、秦皇岛等市开展国家级“绿色货运配送示范城市”创建工作。到 2025 年，铁路货运量比重提升 3 个百分点，火电、钢铁、建材等行业大宗货物清洁运输比例力争达到 80%。

加强非道路移动机械污染管控。全面实施非道路移动机械第四阶段排放标准。加快老旧工程机械淘汰，基本淘汰国一及以下排放标准

或使用 15 年以上的工程机械，具备条件的更换国三及以上排放标准的发动机。地级城市和定州、辛集市调整完善并公布禁止使用高排放非道路移动机械的区域。实施船舶发动机第二阶段标准和油船油气回收标准。港口、机场、铁路货场、物流园区开展非道路移动机械低排放控制区建设，推动非道路移动机械实现零排放或近零排放。落实非道路移动机械使用登记管理制度，消除工程机械冒黑烟现象。

（五）重视大气污染防治工作，坚持 PM_{2.5} 和 O₃ 协同防控，推进 NO_x 和 VOCs 深度减排，健全排放总量控制制度，深化区域联防联控，构建新一代大气复合污染防治体系。

坚持 PM_{2.5} 和 O₃ 协同防控。有效解决 PM_{2.5} 和 O₃ 协同控制这一深层次问题，是未来空气质量持续改善的关键。针对“科学治污、精准治污和依法治污”的重大需求，河北省亟需构建 PM_{2.5} 和 O₃ 协同防控的现代治理体系，补强短板，加快推进能力建设。制定加强 PM_{2.5} 和臭氧协同控制行动方案，推动地级城市 PM_{2.5} 浓度持续下降，臭氧浓度稳定下降。加强重点区域、重点时段、重点领域、重点行业治理，实行差异化、精细化协同管控。对活性强的臭氧前体物排放企业实行重点控制。石家庄、唐山、邢台、邯郸市重点开展 PM_{2.5} 和臭氧协同治理；张家口、承德、秦皇岛市重点加强臭氧污染控制。到 2025 年，地级城市 PM_{2.5} 浓度确保降至 37 微克/立方米，力争降至 35 微克/立方米，空气质量优良天数比率确保达到 75%，力争达到 80%。

推进 NO_x 和 VOCs 深度减排。NO_x 对 PM_{2.5} 与 O₃ 协同控制的近、

远期目标均有深刻影响。目前河北省的 NO_x 排放主要来自于工业与交通部门,推进非电工业与移动源排放管控对河北省 NO_x 控制至关重要。 VOCs 是大气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 污染生成的前体物,也是空气质量改善的关键短板。科学、精准和依法减排 NO_x - VOCs 是 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同控制的重要推动力。应坚持源头控制、过程管理、末端治理,组织开展 VOCs 专项治理行动。沧州、衡水、廊坊、保定市和雄安新区重点开展 VOCs 及 NO_x 协同治理。开展工业园区和产业集群 VOCs 综合治理,重点工业园区建立统一的泄漏检测与修复 (LDAR) 管理系统,推广建设涉 VOCs “绿岛”项目,规划建设一批集中涂装中心、活性炭集中处理中心、溶剂回收中心等。建立健全监测预警监控体系,探索 VOCs 有组织、无组织超标排放自动留样监测,强化自动监测数据执法应用。

健全排放总量控制制度。优化总量减排指标分解方式,按照可监测、可核查、可考核的原则,将重点工程减排量下达地方,污染治理任务较重的地方承担相对较多的减排任务。改进总量减排核算方法,制定核算技术指南,加强与排污许可、环境影响评价审批等制度衔接,提升总量减排核算信息化水平。完善总量减排考核体系,健全激励约束机制,强化总量减排监督管理。

构建新一代大气复合污染防治体系。构建“精准感知-智能响应-靶向治理”的新一代大气复合污染防治科学技术体系,为实现空气质量持续改善提供系统化的科学技术解决方案。不断健全污染物排放相关法规标准体系,为大气污染治理提供有力法制保障,构建国内领先、

世界一流的环保标准体系。坚持跟踪服务，持续提升河北省大气污染防治的科技服务能力，形成精细化监管途径和方法，构建现代化、信息化、精细化大气环境治理体系。

深化区域联防联控。与周边区域共同开展秋冬季大气污染治理攻坚，推动秋冬季空气质量持续改善；聚焦夏季重点时段，共同实施夏季 VOCs 治理攻坚，遏制区域夏季 O₃ 污染。进一步完善京津冀地区的环境执法联动工作机制，针对 VOCs 和扬尘等污染源开展专项执法，依法查处环境违法问题，打击交界地区违法排污行为。

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.

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.