

区域空气质量动态调控技术平台 及典型应用案例



目 录

| | |
|----------------------------------|----|
| 第一章 背景 | 3 |
| 1.1 我国大气污染形势与国家政策 | 4 |
| 1.2 科技支撑助推大气环境管理决策能力提升 | 5 |
| 第二章 区域空气质量动态调控技术平台 | 7 |
| 2.1 区域空气质量动态调控技术体系 | 8 |
| 2.2 多维溯源：高分辨率大气污染源排放清单技术 | 8 |
| 2.2.1 污染源排放清单编制方法 | 8 |
| 2.2.2 与环境数据体系对接的城市排放清单编制技术 | 14 |
| 2.2.3 排放清单校验与不确定性分析 | 15 |
| 2.2.4 区域与城市排放清单耦合同化技术 | 16 |
| 2.3 多维溯源：大气颗粒物及其组分来源追踪模拟技术 | 17 |
| 2.4 沙盘推演：减排情景分析及空气质量效果评估 | 18 |
| 2.4.1 大气污染源重点控制措施数据库 | 18 |
| 2.4.2 措施关联减排量动态测算方法 | 18 |
| 2.4.3 实现减排情景分析及空气质量效果评估 | 18 |
| 2.5 区域空气质量动态调控技术平台 | 20 |
| 第三章 应用案例——京津冀“大气十条”实施效果预评估 | 22 |
| 3.1 预评估背景与技术路线 | 23 |
| 3.2 京津冀“大气十条”措施概述 | 24 |
| 3.2.1 结构调整措施 | 24 |
| 3.2.2 末端控制措施 | 24 |
| 3.3 大气污染物减排效果预评估 | 26 |

| | |
|---|----|
| 3.3.1 京津冀地区主要污染物来源 | 26 |
| 3.3.2 京津冀地区污染物总量减排 | 26 |
| 3.3.3 分地区污染物下降幅度 | 26 |
| 3.3.4 各项措施的减排贡献 | 28 |
| 3.4 空气质量改善效果预评估 | 29 |
| 3.4.1 京津冀地区 2017 年 PM _{2.5} 浓度变化 | 29 |
| 3.4.2 京津冀地区 PM _{2.5} 组分浓度下降分析 | 31 |
| 3.5 控制措施加强及改善建议 | 31 |

第四章 应用案例——河北省“大气污染深入治理三年行动方案”的制定 33

| | |
|-------------------------|----|
| 4.1 案例背景 | 34 |
| 4.2 技术路线 | 35 |
| 4.3 河北省空气质量及排放现状评估 | 35 |
| 4.3.1 大气环境现状评估 | 35 |
| 4.3.2 大气污染物排放特征分析 | 36 |
| 4.4 河北省五十条方案效果评估及达标差距剖析 | 36 |
| 4.4.1 测算实现浓度下降目标需要的减排量 | 36 |
| 4.4.2 河北省五十条方案减排量存在差距 | 36 |
| 4.4.3 达标差距剖析 | 37 |
| 4.5 深入治理方案的制定 | 38 |
| 4.5.1 深入治理方案制定依据 | 38 |
| 4.5.2 深入治理方案主要措施分析 | 39 |
| 4.6 措施减排量核算 | 40 |
| 4.7 空气质量改善效果分析 | 41 |

第五章 第五章区域空气质量动态调控技术平台应用总结 42

| | |
|-----------------|----|
| 5.1 应用案例汇总 | 43 |
| 5.2 适用范围 | 43 |
| 5.3 相关部门参与情况 | 43 |
| 5.4 本地数据需求与来源部门 | 44 |
| 5.5 应用时间需求 | 44 |





第一章

背景



1.1 我国大气污染形势与国家政策

随着我国经济快速发展和城市化的快速推进，特别是以重化工为特征的产业发展模式、煤炭为主的能源结构以及快速的机动车增长，我国主要污染物排放量都已升居世界第一，造成了严重的大气污染，呈现出多污染源多污染物叠加、城市与区域污染复合、污染与气候变化交叉等显著特征，其治理难度远大于发达国家。当前，我国大气污染形势严峻，以细颗粒物 $PM_{2.5}$ 为标志的区域性大气复合污染问题日益突出，大气灰霾事件在我国许多地区频繁出现。自2011年以来，我国中东部地区冬、春两季连续出现长时间、大范围、重污染灰霾天气，严重影响民众生产生活和身体健康。根据环保部公布的2013年全国环境质量状况公告，2013年74个重点城市仅有3个城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到国家二级标准。在新的环境空气质量标准下，城市空气质量达标之路任重而道远。

2012年9月，国务院正式批复《重点区域大气污染防治“十二五”规划》，规划范围为京津冀、长三角、珠三角等13个重点区域，涉及19个省的117个地级及以上城市，明确提出“到2015年，空气中 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、 $PM_{2.5}$ 年均浓度分别下降10%、10%、7%、

5%”的目标；明确了防治 $PM_{2.5}$ 的工作思路和重点任务，增强了区域大气环境管理合力。这是中国第一部综合性大气污染防治规划，标志着中国大气污染防治工作逐步由污染物总量控制为目标导向向以改善环境质量为目标导向转变。

为进一步改善全国环境空气质量和保护公众健康，2013年9月，国务院发布实施《大气污染防治行动计划》（以下简称“大气十条”），明确了当前和今后一个时期大气污染防治总体思路，提出10条35项重点任务措施，对2017年全国及重点区域、重点城市的空气质量改善提出了具体的要求。到2017年，全国地级及以上城市 PM_{10} 浓度比2012年下降10%以上，优良天数逐年提高；京津冀、长三角、珠三角等区域 $PM_{2.5}$ 浓度分别下降25%、20%、15%左右，其中北京市 $PM_{2.5}$ 年均浓度控制在 $60\mu g/m^3$ 左右。为贯彻“大气十条”，确保实现空气质量改善目标，国务院委托环境保护部与全国31个省（区、市）签署了《大气污染防治目标责任书》，明确了各地空气质量改善目标和重点工作任务。

“大气十条”实施以来，全国城市空气质量总体改善。《大气污染防治行动计划》实施情况中期评估报告认为，“大气十条”确定的治污思路和方向正确，执行和保障措施得力，空气质量改善成效已经显现。全国城市 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度呈下降趋势，总体预期能够实现规定的空气质量改善目标。全国74个重点城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度由2013年的 $72\mu g/m^3$ 降至2015年的 $55\mu g/m^3$ ，下降23.6%；日均值超标天数的比例由2013年的33.2%降至2015年的20.8%。在74个城市中，2015年已有12个城市 $PM_{2.5}$ 年均浓度达到国家二级标准，较2013年提升了12.1个百分点。但环境空气质量面临形势依然严峻，冬季重污染问题突出，个别省份的 PM_{10} 年均浓度有所上升，北京市完成2017年终期目标需要付出努力，一些城市空气质量尚不能达到国家二级标准。今后一段时间和更长的时期内，需要

加大力度释放能源结构调整的污染削减潜力，并构建精准化治霾体系，提升重污染天气应对能力，保障空气质量长效改善。

1.2 科技支撑助推大气环境管理决策能力提升

“大气十条”明确了当前和今后一个时期国家和地方政府在空气质量改善方面的行动纲领，而如何细化落实“大气十条”，实现空气质量的切实改善，是当前城市空气质量决策者最为关心的问题。《大气污染防治行动计划》实施情况中期评估报告提出，要构建精准治霾技术体系，创新机制体制，加强科技引领，持续提升环境监管和执法能力。强化顶层设计，形成研判—决策—实施—评估—优化的决策支持体系；加强区域一体化的大气污染监测网络、动态污染源清单和空气质量预测预报能力建设；以科技创新引领我国大气污染防治进入到精准管理的新阶段。

目前区域大气污染防治工作面临三个核心科学问题：一是如何厘清区域污染来源成因，甄别重点排放源和主要影响区域，从而“对症下药”，提高政策制定的有效性和针对性；二是如何合理制定规划，实现各类行动措施对减排量贡献的定量核算，真正做到心中有数；三是如何做好各类行动措施对大气环境质量改善的定量分析，实现“沙盘推演”，从而准确评价环境质量改善效果。在支持城市空气质量决策的技术体系中，构建准确、完整、更新及时的大气污染物排放清单是识别污染来源的基础环节，也是制订污染控制策略的根本依据。目前在城市层面开展的各项工作中无一不需要完整的大气污染物排放清单作为核心基础数据支撑。开展大气污染来源解析工作是对污染成因进行精细化诊断的重要手段。通过源解析工作，可对PM_{2.5}组分、来源、及污染特征进行全面地分析和梳理，进而为污染成因分析提供重要的数据资料，

为空气质量达标管理和重污染应急预案的制定提供重要的科学依据。空气质量模型模拟技术，将排放清单和空气质量模拟相结合，实现定量测算大气污染防治措施实施的空气质量改善效果，从而为区域空气质量预报预警、重污染天气应急方案制订及效果评估、空气质量达标规划等工作提供技术支撑。

在各类科研项目支持下，我国研究人员在区域大气污染物排放清单领域已经开展了大量的工作，构建了既符合中国国情又与国际接轨的区域大气污染源排放清单共性技术体系，将排放因子的本土化率由20%提高到70%以上，发展了多层嵌套高分辨率的区域排放清单编制技术和方法学。其中，清华大学建立了包括10种污染物、700多种排放源的中国多尺度大气污染物排放清单（MEIC）并通过网络共享（<http://www.meicmodel.org>），为相关研究和管理工作提供了宝贵的数据资料。自上世纪90年代以来，环境管理部门逐步建立了由环境统计、污染源普查、排污申报、总量核查、重点源在线监测等组成的多来源立体环境数据体系，实现了对工业源SO₂、NO_x和烟粉尘排放量的核算和动态更新，以及对机动车和生活源排放量的统计。经济发达地区的部分城市基于自身空气质量需求，已经初步建立了相对完整的大气污染物排放清单，少数城市还实现了清单的动态更新。

一套完整的城市大气污染物排放清单应当覆盖化石燃料固定燃烧、工业过程、移动源、溶剂使用、开放扬尘、生物质燃烧、农业等排放源，包含SO₂、NO_x、CO、VOC、NH₃和一次颗粒物等PM_{2.5}和O₃的主要前体物，并具备动态更新机制。然而，我国一直没有启动城市层面的排放清单技术体系建设和清单编制工作，这方面的进度已远远落后于空气质量决策的迫切需求。目前的环境统计体系仅覆盖了主要工业和生活源的SO₂、NO_x和烟粉尘排放量，无法支持针对PM_{2.5}复合污染的控制决策制订；基于研究建立的区域排放清单在城市尺度应用时存在口径差异、时

空分辨率不足、不确定性大的问题；少数城市建立的综合城市排放清单在源分类体系、源排放计算方法、活动水平和排放因子获取方法等方面各有不同，质量参差不齐，可比性和可推广性不足。大部分城市至今没有污染源覆盖完整、基于统一数据来源和方法学编制的高分辨率城市排放清单，决策者对主要污染物的排放总量、时空分布、行业贡献、减排潜力等信息掌握不足。城市层面无排放清单可用、“底数不清”的状况成为制约我国城市大气污染防治的重要瓶颈。城市大气污染物排放来源繁多，排放过程复杂，建立污染物排放清单需要长期持续的努力，绝非一日之功。而目前严峻的大气污染防治形势倒逼城市空气质量管理必须在短期内实现排放清单“从无到有”的突破。这一过程中，既需要突破排放定量表征方法建立、清单准确性检验等科学技术问题，同时也需要解决与现有环境统计数据体系相接轨、与环境业务部门实际能力相吻合等操作层面问题。

另一方面，基于模型模拟的空气质量改善效果评估已应用于我国重大活动的空气质量保障工作中。但目前在城市层面，虽然面临着空气质量改善的压力，但在制定大气污染防治措施时往往缺乏有效预评估，对采取措施后可能取得的空气质量改善效果认识不清，对能否按期实现 $PM_{2.5}$ 及 PM_{10} 浓度的削减目标把握不足。基于模型模拟的空气质量改善效果评估，能够“对症下药”，实现科学治霾、精准发力，确保按期实现既定空气质量改善目标。

区域空气质量动态调控技术平台，旨在实现目标管理、自主规划和科学减排，集成源清单、模拟和源解析等多项技术，可实现方案的动态评估、调整、更新和管理，支持可视化管理、业务化支撑、可持续运行，从而为在城市层面开展的 $PM_{2.5}$ 来源解析、空气质量预报预警、重污染天气应急方案制订及效果评估、污染物总量减排核查核算、空气质量达标规划等工作提供科技支撑，助推区域大气环境管理决策水平的持续提升。

该培训材料首先对“区域空气质量动态调控技术平台”的核心技术进行介绍（第二章），然后展开介绍该技术平台的两个实际应用案例——京津冀“大气十条”实施效果预评估（第三章）、河北省“大气污染深入治理三年行动方案”的制定（第四章），旨在利用科技成果帮助支持区域大气环境管理决策的有效开展。



第二章

区域空气质量动态 调控技术平台

2

2.1 区域空气质量动态调控技术体系

以“短期应急”和“长期改善”为核心的区域空气质量动态调控技术，旨在提高区域空气质量目标预警分析、方案控制措施动态管理、方案实施效果定量评估三方面的能力。核心技术包括：“多维溯源：高分辨率大气污染源排放清单技术”、“多维溯源：大气颗粒物及其组分来源追踪模拟技术”、“沙盘推演：减排情景分析及空气质量效果评估”等技术。

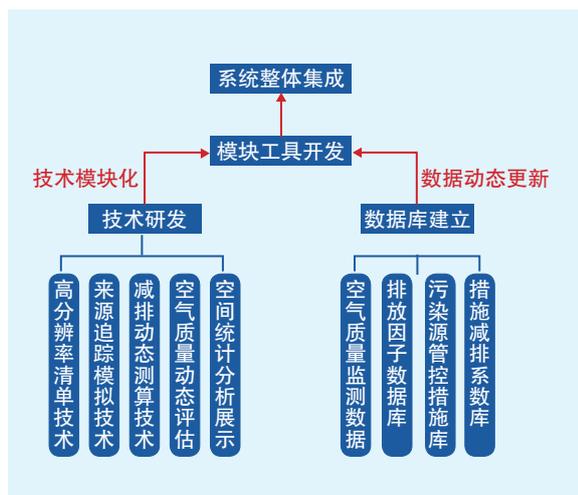


图 2-1 区域空气质量动态调控技术系统

2.2 多维溯源：高分辨率大气污染源排放清单技术

高分辨率大气污染源排放清单技术可以为城市空气质量预报预警、重污染应急和达标规划等工作提供精细化的排放数据支撑。高分辨率大气污染源排放清单技术路线如图 2-2 所示，根据环保部大气污染源排放清单编制指南相关技术方法，通过对污染源普查、环境统计数据等现有统计数据及污染源远程调查数据的采集与建库，核算生成城市各类点源、移动源和面源排放清单，并与区域排放清单进行耦合，经过时间、空间和物种分配，生成三维动态逐时排放数据，并实现与空气质量模型的数据对接，满足空气质量预报预警等管理需要。

2.2.1 污染源排放清单编制方法

(1) 编制依据

依据国家环保部颁布的《排放清单技术编制指南（试行稿）》（以下简称“源清单指南”）建立城市人为源清单编制方法，建立城市大气污染源分类分级体系，包括化石燃料固定燃烧源、工艺过程源、移动源、溶剂使用源、农业源、扬尘源、生物质燃烧源、储存运输源、废弃物处理源和餐饮油烟源等 10 类污染源。排放清单包括 SO₂、NO_x、CO、VOCs、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC、NH₃ 等 9 种污染物。

具体包括以下源清单指南：

- ◆ 大气细颗粒物一次源排放清单编制技术指南；
- ◆ 大气可吸入颗粒物一次源排放清单编制技术指南；
- ◆ 道路机动车排放清单编制技术指南；
- ◆ 生物质燃烧源排放清单编制技术指南；
- ◆ VOC 源排放清单编制技术指南；
- ◆ NH₃ 源排放清单编制技术指南；

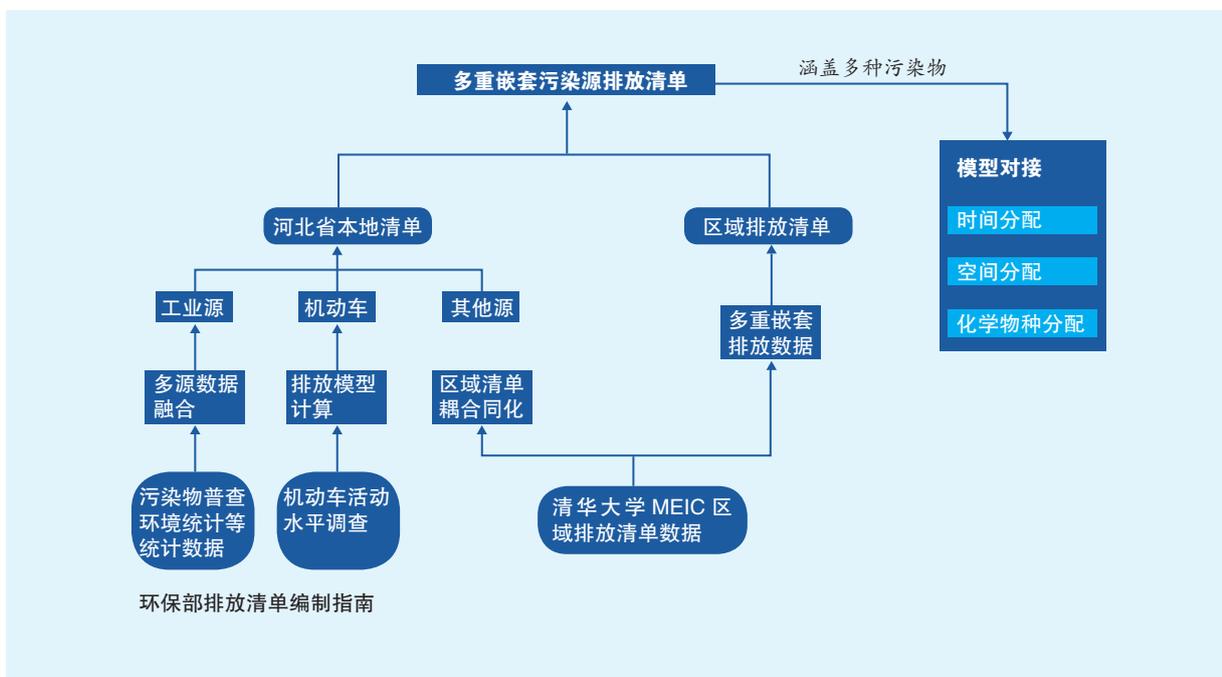


图 2-2 高分辨率大气污染源排放清单技术路线

- ◆ 扬尘排放源清单编制技术指南；
- ◆ 其他环保部发布、更新的排放清单技术编制指南。

(2) 大气污染源分类分级体系

① 化石燃料固定燃烧源

化石燃料固定燃烧源是指利用化石燃料燃烧时产生热量，为发电、工业生产和生活提供热能和动力的燃烧设备。

化石燃料固定燃烧源第一级分类包括电力、热力及燃气生产和供应业所辖行业、采矿业所辖行业、制造业所辖行业和民用源；第二级分类包括煤炭、各种气体和液体燃料等化石燃料；第三级分类包括锅炉和炉灶等燃烧设备；第四级分类包括除尘、脱硫和脱硝三类污染控制措施和无控制措施的情况。

② 工艺过程源

工艺过程源是指工业生产和加工过程中，以对工业原料进行物理和化学转化为目的的工业活动。

工艺过程源第一级分类包括黑色金属冶炼和压延加工业、有色金属冶炼和压延加工业、非金属矿物制品业、石油加工、炼焦和核燃料加工业、化学原料和化学制品制造业、化学纤维制造业、橡胶和塑料制品业、造纸和纸制品业、酒、饮料和精制茶制造业、食品制造业、农副食品加工业以及纺织业；第二级分类涵盖上述行业主要工业产品，如水泥、生铁、粗钢、化学纤维等；第三级分类涵盖主要生产工艺和技术设备，如新型干法生产线、转炉、电炉等；第四级分类包括除尘、脱硫和脱硝三类污染控制措施和无控制措施的情况，其中脱硫措施仅针对烧结（球团）工艺，脱硝措施仅针对水泥熟料生产线。

③ 移动源

移动源是指由发动机牵引、能够移动的各种客运、货运交通设施和机械设备。

移动源第一级分类包括载客汽车、载货汽车和摩托车等道路移动源和工程机械、农用机械等非道

路移动源；第二级分类包括道路移动源的主要车型和非道路移动源的主要机械类型；第三级分类包括国1前、国1、国2、国3、国4和国5等排放水平机动车的运行、启动、蒸发和刹车过程；第四级均按无控情况处理。

④溶剂使用源

溶剂使用源是指生产、使用有机溶剂的工业生产和生活部门。其中，有机溶剂包括脂肪烃、芳香烃、氯化烃、萜烯烃、卤代烃、醇、醛酸酯、乙二醇及其衍生物、酮、醚缩醛、含氮有机物及含硫有机物等。

溶剂使用源第一级分类包括印刷印染、表面涂层、农药使用等溶剂使用行业；第二级分类包括杀虫剂、除草剂、杀菌剂使用及建筑涂料、汽车喷涂和表面涂装等溶剂使用过程；第三级分类包括水性涂料、溶剂涂料、传统油墨、新型油墨等涂料溶剂类型；第四级均按无控情况处理。

⑤农业源

农业源是指在农业生产中排放大气污染物的各种农业活动。

农业源第一级分类包括氮肥施用、畜禽养殖、土壤本底、固氮植物、秸秆堆肥和人体粪便等；第二级分类包括化肥、畜禽、固氮植物和秸秆等；第三级分类包括散养、集约化养殖和放牧等三种畜禽养殖模式，其它农业源在第二级排放源层面直接建立第四级源分类；第四级均按无控情况处理。

⑥扬尘源

扬尘源是指在自然力或人力作用下各种不经过排气筒、无组织、无规则排放地表松散颗粒物质的颗粒物排放源。

扬尘源第一级分类包括土壤扬尘、道路扬尘、施工扬尘和堆场扬尘；第二级分类涵盖农田、荒地、道路、施工工地和料堆等扬尘排放表面；第三级分类涵盖各种土壤、道路和施工过程；第四级分类包括洒水、清扫、

喷洒抑尘剂等城市扬尘源治理措施。

⑦生物质燃烧源

生物质燃烧源是指锅炉、炉具等使用未经过改性的生物质材料燃烧过程，以及森林火灾、草原火灾、秸秆露天焚烧等。

生物质燃烧源第一级分类包括生物质燃料和生物质开放燃烧两个部门；第二级分类包括秸秆、薪柴、生物质成型燃料、草原、森林等；第三级分类包括生物质锅炉、户用生物质炉具和开放燃烧等燃烧方式；生物质锅炉第四级排放源分类包括除尘、脱硫和脱硝三类污染控制措施和无控制措施的情况，其它生物质燃烧源均按无控情况处理。

⑧储存运输

储存运输源是指挥发性油气产品被收集、储存、运输和销售的过程。

第一级分类包括油气储运；第二级分类包括原油、汽油、柴油、天然气等油气产品的储存、运输以及加油站销售过程；第三级排放源层面不再细分；第四级分类包括加油站的一次、二次及三次油气回收和无油气回收的情况。

⑨废弃物处理源

废弃物处理源是指由工业和生活部门产生、进入集中处理处置设施内的废水、固体废弃物以及烟气脱硝过程副产物。

废弃物处理源的第一级分类包括污水处理、固体废弃物处理和烟气脱硝三个部门；第二级分类包括废水、固体废弃物和脱硝烟气；第三级分类包括固体废弃物处理的填埋、焚烧和堆肥技术以及烟气脱硝中选择性非催化还原法和选择性催化还原法；第四级均按无控情况处理。

⑩餐饮油烟源

第一级分类包括餐饮油烟；第二级分类为炊事油烟；第三级分类不再细分；第四级分类包括油烟净化器和无控制措施的情况。

(3) 排放清单计算

①化石燃料固定燃烧源

A、工业部门

化石燃料固定燃烧源工业部门主要包括电力、热力及燃气生产和供应业，以及采矿业和制造业，一般按点源处理。对于化石燃料固定燃烧源中的第四级排放源，某种污染物的排放量由下式计算：

$$E=A \times EF(1-\eta)$$

其中，A 为第四级排放源对应的燃料消耗量。A 为该排放源的活动水平。EF 为污染物的产生系数， η 为污染控制技术对污染物的去除效率，当排放源处于无控状态时， η 为 0。

B、民用部门

化石燃料固定燃烧源民用部门一般按面源处理。

对于民用部门第四级排放源，排放量由下式计算：

$$E=A \times EF \times (1-\eta)$$

其中，A 为第四级排放源燃料消耗量；EF 为污染物产生系数； η 为污染控制设施对污染物的去除效率。

②工艺过程源

A、钢铁

钢铁行业排放源包括焦化、烧结（球团）、炼铁、炼钢及其它生产工序排污设备，一般按点源处理。大气污染物排放量计算公式如下：

$$E=A \times EF(1-\eta)$$

其中，A 为第四级排放源活动水平。对于焦化工序，A 为焦炭产量；对于烧结（球团）工序，A 为烧结矿（球团矿）产量；对于炼铁工序，A 为生铁产量；对于炼钢工序，A 为粗钢产量。EF 为大气污染物产生系数； η 为污染控制措施对污染物的去除效率。

烧结（球团）工序的 SO_2 排放量根据铁矿石和固体燃料（煤炭、焦炭）用量、含硫率和综合脱硫效率计算：

$$E_{\text{烧结}}=(M \times S+M' \times S') \times 1.7 \times ((1-\eta))$$

其中，M 为铁矿石使用量；S 为铁矿石平均硫分；

M' 为固体燃料使用量；S' 固体燃料平均硫分； η 为脱硫设施综合脱硫效率。烧结机（球团设备）脱硫设施的综合脱硫效率为烧结机烟气收集率、已收集烟气脱硫效率及脱硫设施投运率之积。

B、其他工艺过程源

其他工艺过程源包括有色冶金、水泥、平板玻璃制造业、其他非金属矿物制品业、有色金属冶炼和压延加工业、石油和天然气开采业、石油加工、炼焦和核燃料加工业、化学原料和化学制品制造业、化学纤维制造业、造纸和纸制品业、橡胶和塑料制品业、食品制造业、农副食品加工业、酒、饮料和精炼茶制造业以及纺织业等。一般按点源处理。

对于其他工艺过程源中的第四级排放源，某种污染物的排放量由下式计算：

$$E=A \times EF(1-\eta)$$

A 为第四级排放源对应的工业产品产量。对于点源，A 为该排放源的活动水平。EF 为污染物的产生系数； η 为污染控制技术对污染物的去除效率，当排放源处于无控状态时， η 为 0。

③移动源

A、道路移动源

道路移动源按照面源处理，对于道路移动源中的第四级排放源，清单中最小行政区单元内某种污染物的排放量由下式计算：

$$E=P \times VMT \times EF$$

P 为对应车型的保有量，EF 为污染物的排放因子，VMT 为该车型的年均行驶里程。

B、非道路移动源

非道路移动源按照面源处理，基于第四级排放源计算排放量，公式如下：

$$E=A \times EF$$

其中，A 为第四级排放源活动水平。对于飞机，A 为起飞着陆循环次数；对于其它非道路移动源，A 为燃油消耗量。EF 为污染物排放系数。

④溶剂使用源

A、印刷印染

印刷印染源优先按照点源处理，也可按面源处理，获取最小行政区单元的油墨和染料消费量。印刷印染产生 VOCs 排放，排放量计算公式如下：

$$E=Q \times EF$$

式中，Q 为油墨或染料消费量；EF 为单位质量油墨或染料的 VOCs 排放系数。按照当前行业控制水平，可认为印刷印染无 VOCs 末端控制措施。

B、表面涂层

表面涂层按照涂层施用对象分为建筑涂料、汽车喷涂和其它表面涂层。建筑涂料分为建筑内墙涂料和建筑外墙涂料；汽车喷涂根据喷涂车型分为汽车、自行车、摩托车、轿车和其它汽车五类；其它表面涂层包括饮料罐涂层、漆包线涂层、金属家具涂层、家电涂层、装修木器、木制家具、机床涂层、设备制造涂层等。表面涂层中汽车喷涂、家电涂层等工业产品生产线优先按点源处理，其他可按面源处理。

表面涂层产生 VOCs 排放，排放量计算公式如下：

$$E=Q \times EF$$

式中，Q 为建筑涂料表观消费量、汽车制造修补用漆或饮料罐生产线、家电、机床设备等产品消费量或产量；EF 为生产或消费单位产品对应的 VOCs 排放系数。按照当前排放控制水平，可认为无 VOCs 末端控制措施。

C、农药使用

农药使用源包括施用杀虫剂、除草剂和杀菌剂等排放源，按面源处理。

农药使用产生 VOCs 排放，排放量计算公式如下：

$$E=Q \times EF$$

式中，Q 为农药施用量；EF 为单位质量农药使用的 VOCs 排放系数。按照当前的控制水平，可认为农药使用过程无 VOCs 末端控制措施。

D、其它溶剂使用

其它溶剂使用源包括除印刷印染、表面涂层和农药使用之外的溶剂使用源，包括沥青铺路、木材生产、医药生产、印刷设备清洗、胶粘剂使用、打字机、其它办公用品、干洗、去污脱脂、生活和商业溶剂使用等排放源。按面源处理。

其它溶剂使用产生 VOCs 排放，排放量计算公式如下：

$$E=Q \times EF$$

式中，Q 为沥青消费量、木材生产量、化学药品产量、印刷设备清洗所用汽油消费量、胶粘剂使用量、打字机量、文教体育用品企业、三氯乙烯 / 四氯乙烯消费量；EF 为消费单位产品对应的 VOCs 排放量，表示为 g/kg 沥青、g/m³ 木材、g/kg 药品、g/kg 汽油、g/kg 胶粘剂、t/厂/年、g/kg 干洗剂。按照当前的控制水平，可认为溶剂使用源无 VOCs 末端控制措施。

⑤农业源

农业源均按面源处理。

A、氮肥施用

氮肥施用过程会产生氨排放，排放量计算公式为：

$$E = \sum_i (A_i \times EF_i)$$

其中，i 为化肥种类（包括尿素、碳铵、硝铵、硫酸、其它氮肥）；A 为活动水平，即各种氮肥施用量；EF 为氨排放系数。

B、畜禽养殖

畜禽养殖中动物排泄物产生大量氨排放。动物排泄产生的粪便包括室内和户外两部分，室内粪便在圈舍中停留一段时间后，会汇集进行存储腐熟处理和施肥。畜禽粪便管理阶段包括户外、圈舍内、粪便存储处理和后续施肥。后三种方式属于室内粪便管理，具有尿液和粪便两种形态，动物户外排泄的尿液和粪便通常混合在一起。畜禽排泄物释放大气氨包含户外、圈舍 - 液态、圈舍 - 固态、存储 - 液态、存储 - 固态、施肥 - 液态、施肥 - 固态共七部分。根据粪便管理阶

段和形态，畜禽养殖氨排放总量计算公式如下：

$$E_i = \sum_i (A_i \times EF_i \times \gamma)$$

其中，i 为畜禽粪便类型，分为户外、圈舍-液态、圈舍-固态、存储-液态、存储-固态、施肥-液态、施肥-固态；A 为活动水平，指畜禽排泄物在不同管理阶段、粪便不同形态中含有的总铵态氮量；EF 为氨排放系数； γ 为氮-大气氨转换系数。

⑥扬尘源

A、土壤扬尘

土壤扬尘按面源处理，排放量计算公式如下：

$$W_{si} = E_{si} \times A_s$$

◆ W_{si} 为土壤扬尘中 PM_{10} （空气动力学粒径在 $0 \sim 10 \mu m$ 间的颗粒物，下同）总排放量，t/a。

◆ E_{si} 为土壤扬尘源的 PM_{10} 排放系数， $t/(m^2 \cdot a)$ 。

◆ A_s 为土壤扬尘源的面积， m^2 。

土壤扬尘源的 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放量可根据土壤扬尘中相关粒径分布情况估算获得。

B、道路扬尘

道路扬尘包括铺装道路和未铺装道路的扬尘排放量，计算公式如下：

$$W_{Ri} = E_{Ri} \times L_R \times N_R \times \left(1 - \frac{n_r}{365}\right) \times 10^{-6}$$

◆ W_{Ri} 为道路扬尘源中颗粒物 PM_{10} 的总排放量，t/a。

◆ E_{Ri} 为道路扬尘源中 PM_{10} 平均排放系数，g/($km \cdot 辆$)。

◆ L_R 为道路长度，km。

◆ N_R 为一定时期内车辆在该段道路上的平均车流量，辆/a。

◆ n_r 为不起尘天数。

C、施工扬尘

施工扬尘源中颗粒物排放量的总体计算公式如下：

$$W_{ci} = E_{ci} \times A_c \times T$$

该公式适用于总体估算整个建筑施工区域的排放总量，式中：

◆ W_{ci} 为施工扬尘源中 PM_{10} 总排放量，t/a。

◆ E_{ci} ，整个施工工地 PM_{10} 的平均排放系数， $t/(m^2 \cdot 月)$ 。

◆ A_c 为施工区域面积， m^2 。

◆ T 为工地的施工活跃月份数，一般按施工天数/30 计算。

D、堆场扬尘

堆场的扬尘源排放量是装卸、运输引起的扬尘与堆积存放期间风蚀扬尘的加和，计算公式如下：

$$W_Y = \sum_{i=1}^m E_n \times G_{Yi} \times 10^{-3} + E_w \times A_Y \times 10^{-3}$$

◆ W_Y 为堆场扬尘源中颗粒物总排放量，t/a。

◆ E_n 为堆场装卸运输过程的扬尘颗粒物排放系数，kg/t。

◆ m 为每年料堆物料装卸总次数。

◆ G_{Yi} 为第 i 次装卸过程的物料装卸量，t。

◆ E_w 为料堆受到风蚀作用的颗粒物排放系数， kg/m^2 。

◆ A_Y 为料堆表面积， m^2 。

⑦生物质燃烧源

A、生物质锅炉

生物质锅炉可按点源计算，也可按面源进行计算，采用下面公式计算：

$$E = A \times EF$$

式中，A 为第四级排放源活动水平，即生物质锅炉燃料消耗量；EF 为排放系数。

对于生物质锅炉，由于其规模相对较大，可安装除尘器等污染控制设施，在这种情况下，排放系数 EF 应由下面公式计算得到：

$$EF = EF_0 \times EF(1 - \eta)$$

式中， EF_0 为污染物产生系数； η 为污染控制设施的去除效率。

B、生物质炉灶

生物质炉灶按面源处理，排放量采用下面公式计算：

$$E = A \times EF$$

式中，A 为排放源活动水平，即生物质炉灶燃料

消耗量；EF 为排放系数。

C、开放燃烧

生物质开放燃烧按面源处理，排放量计算公式如下：

$$E=A \times EF$$

式中，A 为排放源活动水平，即生物质开放燃烧消耗的生物量；EF 为排放系数。

⑧油气储运源

油气储运源涵盖了原油运输至炼油厂、储油库的收油 / 发油作业、油罐车油品运输、加油站卸油作业、机动车加油、天然气运输排放源。其中加油站、储油库活动水平按照点源收集，其它排放源按照面源处理。

油气储运源排放采用排放系数法进行计算，计算公式如下：

$$E_{i,j} = \sum_m EF_{i,j,m} \times Q_{i,j}$$

式中，i 为油气储运源的排放子源，j 为各省、市、自治区，m 代表第三级排放源的技术和工艺。EF 为排放源可挥发性有机物实际排放系数，Q 为油气运输量或储存量。

⑨废弃物处理源

A、污水处理

按照点源计算，污水处理产生的大气污染物排放量采用下式计算：

$$E=A \times EF$$

式中，A 为排放源活动水平，即污水处理量；EF 为排放系数。

B、固体废弃物处理

固体废弃物处理产生的大气污染物排放量采用下式计算：

$$E=A \times EF$$

式中，A 为第四级排放源活动水平，即由填埋、堆肥或焚烧等方式处理的固体废弃物的量；EF 为排放系数。

C、废气处理

废气处理源排放量采用下面公式计算：

$$E=A \times EF$$

式中，A 为排放源活动水平，即脱硝烟气对应的燃煤量；EF 为烟气脱硝的 NH₃ 排放系数。

⑩餐饮油烟

餐饮油烟源可按点源处理，也可按面源处理。

对于餐饮油烟源，大气污染物的排放量 E 的计算采用下面的公式：

$$E=A \times EF(1-\eta)$$

式中，A 为排放源活动水平；EF 为排放系数；η 为油烟净化器去除效率。

2.2.2 与环境数据体系对接的城市排放清单编制技术

依托环境统计、污染源普查、排污申报、总量核查、

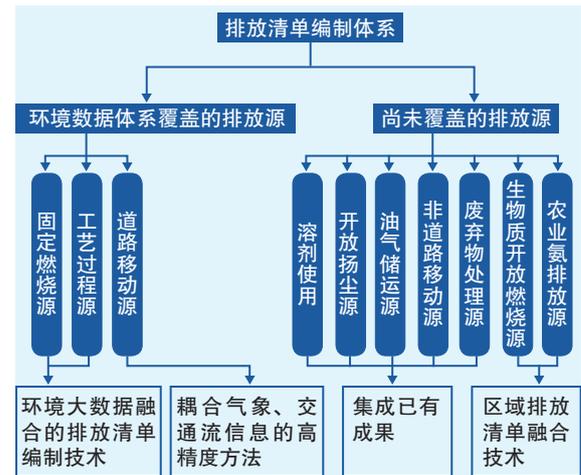


图 2-3 与环境数据体系对接的排放清单编制技术方法

重点源在线监测等现有环境数据体系建立排放计算方法及时空分布确定方法。通过分析多源数据的污染源分类与覆盖范围，对不同数据源适用范围和质量等级进行评估，确立多源数据在不同情况下的优选级别以及数据同化方法；基于大数据挖掘建立多源数据的信息提取技术规范 and 融合方法；多源数据重叠部分进行交叉检验和统计比对，评估数据质量，剔除异常数据；

采用区域能源消耗、工业产品产量等区域能源经济统计资料校验和约束多源数据融合产品，建立缺失部分的补遗技术规则。

对于道路机动车排放源，建立车辆注册信息、环保标识、总行驶里程等与保有量、技术分布和年行驶里程的映射关系，建立依托环保部机动车排污监控中心全口径活动水平数据库提取用于清单建立参数的方法。基于机动车排污监控中心基准排放因子数据库和利用机动车排放因子模型 IVE 和 MOVES 建立温度、湿度、海拔、行驶里程、交通状况对排放因子的修正系数关系。

对于环境统计数据体系中缺失的其它重要排放源，如溶剂使用、开放扬尘、油气储运、非道路移动源、废弃物处理源、以及部分工业过程源，在集成清洁空气研究计划相关项目成果的基础上，建立排放模型、活动水平获取方法以及排放因子的获取、质控、同化方法。调研相关计算参数获取途径和精度范围，建立通用可靠的计算方法、参数化方案、活动水平获取规范以及排放时空分配方法。

◆ 现有污染源统计数据整合

系统以现有环境统计体系为基础，整合污染源普查、年度环境统计等污染源统计数据，可提取各类污染源基本情况、活动水平及控制技术等相关信息。通过与污染源普查、环境统计等数据的对接，质控人员将数据统计结果处理成标准化数据格式，并导入系统内作为基础数据，进而获得各个污染源的经纬度信息、行业类别、锅炉和窑炉型号、控制技术、产品及其产量等各项参数，建立污染源活动水平基础数据库。

◆ 污染源数据远程采集

针对现有环境统计体系无法提供的污染源数据，通过排放清单系统远程录入、上传与接收污染源相关信息，补充污染源基本情况、活动水平和控制技术相关信息。为防止录入阶段可能发生的数据丢失状况，在录入过程中和全部录入完毕后，都可进行数据保存，

将原始数据安全地保存到数据库中。系统可根据预先设定的业务数据校验及计算规则，对手动录入的数据进行校验和计算。

2.2.3 排放清单校验与不确定性分析

(1) 宏观统计数据校核

通过宏观统计数据校核城市排放清单编制结果的合理性进行初步评估，依靠主要能源产品消耗量和工业产品产量结合平均排放系数校核排放量总量。

依据宏观统计数据约束活动水平。收集城市工业燃煤消耗量统计数据，逐行业校核清单编制中收集的活动水平数据，对差异大的行业仔细排查。点源排放量计算结果与环境统计各企业污染物排放量核对，逐一核实差别较大的排放源，排查造成差异的原因。道路机动车排放清单使用当地燃油销售量的统计数据，用于 VKT 校验。

(2) 多维动态校验

基于地面观测数据、三维大气化学模式等手段对清单进行多维动态校验。采用源解析采集分析的主要污染物成分数据（ $PM_{2.5}$ 可溶性离子成分、BC 等），结合城市及周边地区的常规站点监测数据，结合三维大气化学模式对城市主要污染物（如 SO_2 、 NO_x 、CO、PM 等）的排放清单进行验证，评估和改进排放清单质量。

(3) 不确定性分析

采用蒙特卡洛方法评估排放总量的置信区间，对排放清单结果进行不确定性分析。不确定性分析主要用于重要污染源信息的甄别，评估排放清单的可靠性。

① 确定输入数据的概率分布函数

在样本库抽取随机样本，通过模拟获得包含分布形式、平均值及标准方差三类信息的概率分布函数，以相对标准方差来表达该数据的不确定度。

②不确定性传递

采用蒙特卡洛数值分析方法在各数据的个体概率密度函数上选择随机值，计算相应的输出值，重复定义次数，每次计算结果构成了输出值的概率密度函数，当输出值的平均值不再变化时，结束重复计算，得到排放清单的不确定度。

2.2.4 区域与城市排放清单耦合同化技术

城市和区域排放清单的耦合技术通过在两类排

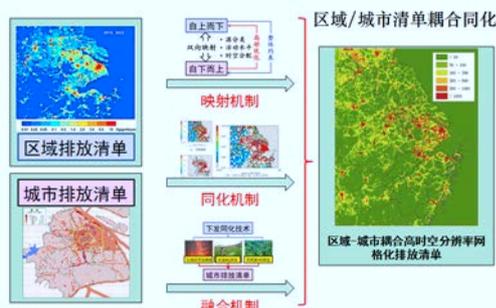


图 2-4 区域排放清单与城市排放清单的耦合与同化

放清单之间建立污染源类别和空间尺度的映射关系实现。根据两类排放清单基础信息来源和数据精度不同的特点，在排放源分类标准、活动水平信息获取来源、时空分配原则与方法等方面进行详细比较并建立准确映射关系。以区域能源消耗、工业产品产量、排放部门技术分布等关键数据作为约束条件，发展两类清单双向耦合机制，通过局部优化的理论与方法发展排放数据检验和校正技术，保证耦合过程中数据的完整性和一致性，根据污染控制决策和空气质量模拟对排放清单精度的要求，实现各空间尺度排放清单产品的灵活选取和调用。

(1) 区域人为源排放清单

区域污染源排放数据采用清华大学基于 MEIC 模型提供的区域人为源大气污染物排放清单，包括 SO_2 、 NO_x 、 CO 、 VOCs 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 BC 、 OC 、 NH_3

等 9 种污染物。MEIC 模型可以根据空气质量数值模拟的需求，为多重嵌套区域提供对应空间分辨率的区域排放清单数据。

(2) 天然源 VOC 排放清单

集成本地化后的天然源排放模型 MEGAN，采用本土的高精度植被数据，由气象模型 WRF 驱动生成实时的天然源排放数据，水平分辨率模式与区域人为源排放清单多重嵌套区域设置一致。

(3) 区域与城市排放清单耦合同化

将基于上述编制方法获得的区域排放清单与区域人为源和天然源排放清单数据进行耦合同化，进而获得高时空分辨率的网格化排放清单。对城市排放清单污染源覆盖范围进行检查核对，确定缺少的污染源种类和污染物，从区域排放清单中提取相应数据，在时空尺度上与已有清单结果进行耦合。对于城市以外区域，利用区域网格化排放清单实现时空尺度上的匹配。

(4) 排放清单与空气质量模式数据对接

对排放清单数据进行处理，生成符合空气质量模式输入格式要求的排放清单，从而实现空气质量数值模拟。主要是对排放清单进行时间分解、空间分解、化学物质分解、接口转换。

◆时间分解

时间分解参数设置用来将年排放量转化为每个月每天每小时的排放量，满足时间分辨率的要求。

◆空间分解

空间分解的作用是利用空间分配变化系数，将年排放量分配到垂直高度中，满足空间分辨率的要求。

◆化学物种分解

化学物种分解依据源成分谱数据将 PM 和 VOCs 等污染物转化为模型计算所需的化学物种，满足大气化学过程模拟对化学分辨率的要求。

◆空气质量模型数据对接

将核算生成的排放数据与区域排放清单进行耦合同化，并进行时间、空间和化学物种分配，输出三维逐时网格化排放数据，经过时空分解以及化学分解之后的排放清单，通过污染源排放模式，转换成能够作为空气质量模式可读取的三维逐时网格化数据。支持主流空气质量模型 CMAQ, CAMx, WRF-Chem 和 NAQPMS 的数据对接。

2.3 多维溯源：大气颗粒物及其组分来源追踪模拟技术

近年来，我国的大气污染防治工作目标开始由排放总量控制向环境浓度控制转变。尽管控制目标为 PM_{2.5} 环境浓度值，但在制定排放控制措施时，仍需从与其相关的具体部门排放源控制入手，不仅关注各类排放源对 PM_{2.5} 的贡献，还需要对 PM_{2.5} 区域来源有定

量认识。源追踪模型是国际上流行的源解析方法之一，通过输入分源排放清单，并在三维大气化学传输模型中追踪各源污染物，最终实现对 PM_{2.5} 源贡献的标记。源追踪模型的方法克服了受体模型无法解析同步排放源和二次颗粒物的困难，解析的范围和精度直接与排放清单的精细程度相关。源追踪模型可定量研究区域贡献和行业贡献，克服排放清单和受体模型法无法定量区分本地贡献和外来传输贡献的缺陷。常用的源追踪模型包括 CAMx-PSAT, Source-Oriented CMAQ, CMAQ-ISAM 等。以 CAMx-PSAT 的运行为例（见图 2-5），在使用中需根据管理需求对区域进行划分，并在排放清单中对重点排放源进行标记，从而得到区域传输矩阵和部门贡献矩阵。源追踪模型还具备动态源解析的优势，基于区域多层嵌套模拟域，逐日在线运行 CAMx/PSAT 模型，可实现对各城市颗粒物及其组分来源的动态解析，并分析各城市间 PM_{2.5} 传输通量，如图 2-6 所示。大气颗粒

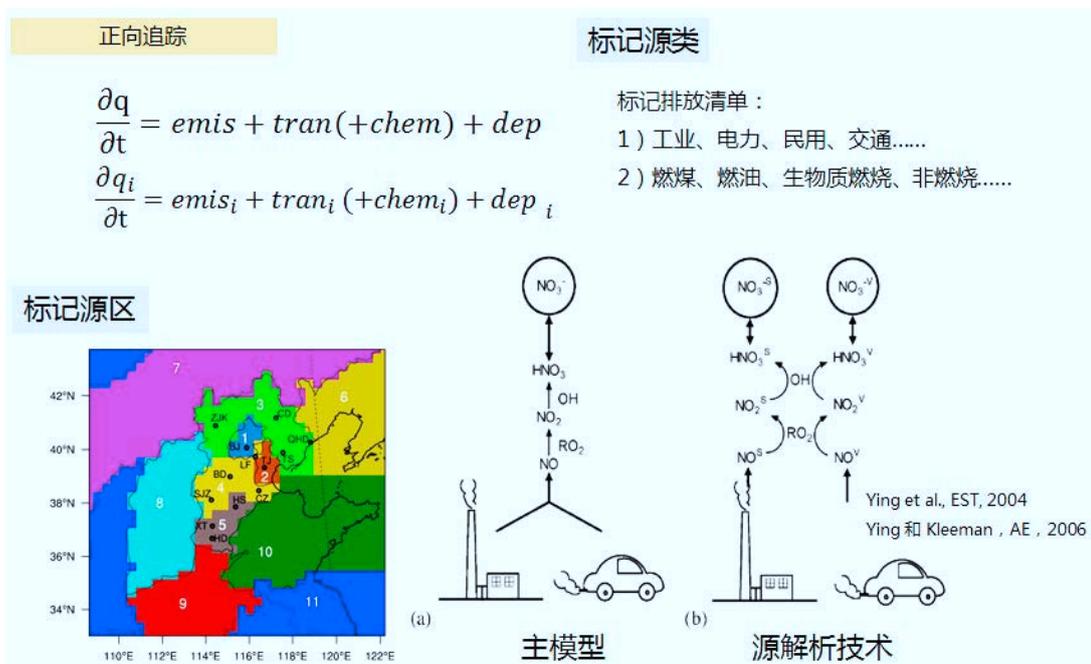


图 2-5 大气颗粒物及其组分来源追踪模拟技术

物及其组分来源追踪模拟技术能为区域污染精细化调控提供重要决策依据。

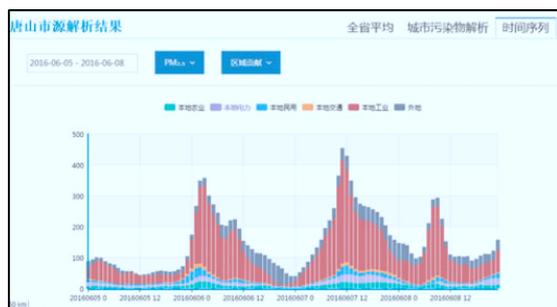


图 2-6 逐日动态来源追踪模拟结果示意图

2.4 沙盘推演：减排情景分析及空气质量效果评估

沙盘推演，通过减排情景分析及模型空气质量模拟，预估采取控制措施后所能实现的减排效果和空气质量改善效果，从而为重污染天气应急方案制订及效果评估、空气质量达标规划等工作提供支撑。

2.4.1 大气污染源重点控制措施数据库

根据各地污染特征和实际情况，结合上述方法建立的区域排放清单，筛选重点可控排放源以及相应的控制措施，建立适合本地的大气污染源重点控制措施数据库。按照工业源、移动源、民用源、扬尘源和农业源建立污染物控制措施数据库。表 2-1 给出了大气污染源重点控制措施数据库的一个示例。

2.4.2 措施关联减排量动态测算方法

在构建大气污染源重点控制措施数据库的基础上，建立各排放源非线性响应参数化方案，实现逐部门逐条污控措施减排测算。首先，应识别各措施作用的具体排放源，以及影响排放计算的相关参数（活动水平、工艺技术、排放因子、末端控制技术、去除效率等）。例如，关停、限产措施影响活动水平，使用

低硫煤影响排放因子，脱硫脱硝除尘措施影响末端控制、去除效率。同时测算不同措施作用时可实现减排率。最后，根据措施可实现减排率、控制强度，以及根据影响排放计算参数的不同，组合各类措施，建立措施关联减排量动态测算方法。最终能够通过调整措施控制强度、执行区域以及关键措施参数实现减排量的快速计算。

2.4.3 实现减排情景分析及空气质量效果评估

空气质量模型作为一种综合性的研究工具，整合了排放清单、空气质量模拟和观测数据三方面信息，排放清单描述污染源的排放特征，为空气质量模型提供输入数据；空气质量模型判断源排放对大气浓度的贡献，识别区域污染特征；监测结果验证模拟的准确程度。正因为如此，空气质量模型在评估空气质量保障措施效果上具有重要应用，以 Models-3/CMAQ 为代表的第三代空气质量模型，广泛应用在区域空气质量管理工作、控制措施设计及效果评估等，在大气污染的区域特征研究和决策支持过程中起着非常重要的作用。

空气质量模型系统 Models-3/CMAQ 是由美国环保局开发的第三代空气质量模型系统，它由排放源模式、中尺度气象模型和多尺度空气质量模型（CMAQ）三部分组成，其中 CMAQ 是系统的核心。CMAQ 模型主要由边界条件模块（BCON）、初始条件模块（ICON）、光分解率模块（JPROC）、气象-化学预处理模块（MCIP）和化学输送模块（CCTM）构成，见图 2-7。化学输送模块（CCTM）是 CMAQ 的核心，污染物在大气中的扩散和输送过程、气象化学过程、气溶胶化学过程、液相化学过程、云化学过程以及动力学过程均由 CCTM 提供输入数据和相关参数，其它模块的主要功能主要是为 CCTM 提供输入数据和相关参数。CCTM 模块可输出多种气态污染物和气溶胶组分的逐时浓度以及逐时的能见度和干湿沉降。CMAQ 模型所

表 2-1 大气污染源重点控制措施数据库

重点控制措施

| |
|--|
| 所涉燃煤设施燃用低硫优质煤 |
| 所涉燃煤设施加强污染治理设施运行管理 |
| 所涉燃煤设施采取停产、检修或降低生产负荷 |
| 未淘汰的 10 蒸吨及以下锅炉、茶浴炉等燃煤设施暂停使用 |
| 燃煤电厂或机组，降低生产负荷 |
| 未完成超低排放改造的燃煤电厂或机组，降低生产负荷 |
| 实心粘土砖瓦窑一律停止排放污染物 |
| 钢铁、焦化、水泥、玻璃等高架点源，降低生产负荷，加强污染治理设施运行管理 |
| 其他涉气企业降低生产负荷 |
| 工业企业涉及挥发性有机物排放的工序停止生产 |
| 加强对机动车尾气排放检测和进京车辆查验、疏导及劝返 |
| 结合北京限行措施，对城区机动车实施限行 |
| 停驶运输土方、渣土等扬尘车辆和危险化学品运输车辆 |
| 停驶低速载货汽车、三轮汽车、拖拉机（城市运行保障类车辆除外） |
| 开展油品质量和油气回收执法监察 |
| 建筑施工工地采取洒水、覆盖等抑尘措施 |
| 其他施工场地的油漆、粉刷、打磨、切割、焊接等污染工序一律停止作业 |
| 土石方挖掘、拆除工程、渣土清运及市政道路工程等一律停止施工作业，其他施工场地污染工序作业时间减半 |
| 增加建城区道路清扫保洁和冲洗作业频次 |
| 加强对城市外道路扬尘治理和监管 |
| 未配备密闭运输装置的运输散体物料车辆或密闭装置破损的车辆禁止上路行驶 |
| 煤炭、灰渣、砂石、灰土、矿粉等散体物料的堆场停止使用，并落实洒水、覆盖等扬尘污染控制措施 |
| 露天矿山全部暂停开采生产 |
| 实时监控并严厉打击焚烧秸秆等露天焚烧行为 |
| 加强畜禽养殖粪污无害化处理 |
| 严格禁止露天烧烤 |

需气象数据由 WRF 中尺度气象学模型模拟，WRF 模式输出结果经气象 - 化学预处理模块（MCIP）处理后作为 CMAQ 模式的输入气象场。

基于 Models-3/CMAQ 模型，可建立多尺度、多污染物的区域综合空气质量模拟系统，并进一步建立

区域空气污染控制决策支持系统，为城市空气质量管理提供服务，为制订污染控制政策提供科学支持，评估各种规划和标准实施效果。情景分析法是评估空气质量保障措施的环境影响和效果的一种常用方法（图 2-8）。情景分析法中情景设置是关键，将相关政策

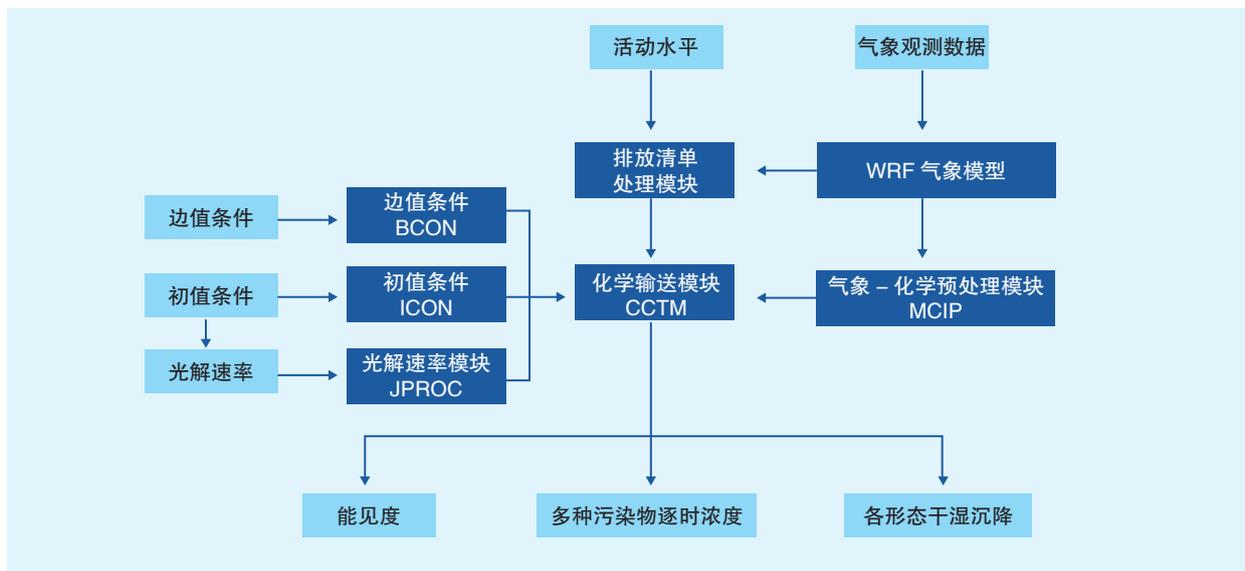


图 2-7 WRF-CMAQ 空气质量模拟系统

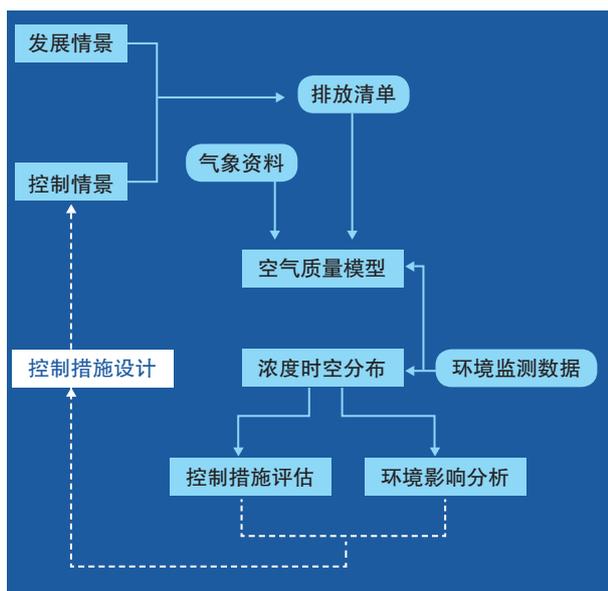


图 2-8 基于情景分析的评价方法

组合转化为不同的排放情景，通过 CMAQ 模型将情景输入与浓度场输出关联起来，就可以评价不同情景的环境影响。应用 CMAQ 评估空气质量保障措施的效果，需着重分析控制情景下不同污染物的减排潜力，在原

有排放清单基础上减掉污染物减排量即可得到控制情景下的排放清单。以更新过的排放清单输入空气质量模型，将污染物排放信息转化为大气中的浓度信息，模拟得到控制措施影响下的污染物浓度场，即可评估空气质量保障措施的实施效果，评估结果可以进一步指导控制措施的设计。基于上述建立的大气污染源重点控制措施数据库和措施关联减排量动态测算方法，可实现减排情景分析。基于大样本模型测算，可对控制措施实施效果进行快速动态模拟。在此基础上，进行调控措施的优选，实现减排情景分析及空气质量效果评估。对正常、不利、有利等多种历史气象条件情景进行沙盘推演，判断现有控制方案达标可行性，供筛选最佳方案参考。

2.5 区域空气质量动态调控技术平台

区域空气质量动态调控技术平台采用云计算、大数据和可视化分析方法，通过整合区域大气污染源排放与环境监测数据，集成复合污染源识别技术、优

控污染源筛选技术、控制方案设计优化技术以及减排效果定量评估技术，实现大气污染防治措施调度管理、污染物来源动态解析、空气质量达标预警分析、控制方案制定与量化评估等一系列决策支持功能。

区域空气质量动态调控技术平台，主要由五部分构成，包括：高分辨率排放清单系统、污染来源识别解析系统、多污染物协同控制方案分析系统、计算与模拟支持系统、管理信息支持系统。该平台具备空气质量目标预警分析、方案控制措施动态管理、方案实施效果定量评估等多方面功能。在空气质量目标预警分析方面，支持考核管理、定期预警和来源解析，能够动态评估空气质量达标差距，基于气象敏感性预警目标可达性、解析区域及本地各部门贡献。在方案控制措施动态管理方面，支持控制措施、排放清单、控制效果动态响应，实现多种措施任意组合生成方案，以及排放清单与措施库定期维护、动态更新。在方案实施效果定量评估方面，支持多污染物排放特征分析与减排量核算，通过控制方案效果预评估与后评估实现“沙盘推演”，并支持方案的优选，比较控制效果，筛选最佳方案。从而为空气质量预报预警、重污染应急和达标规划等工作提供科技支撑。

目前，该平台已在多项重要空气质量保障任务中得到实际应用和实战检验，如京津冀“大气十条”实施效果预评估、河北省“大气污染深入治理三年行动方案”的制定、河北省“九三阅兵”空气质量保障工作、G20杭州空气质量保障工作等。第三、四章将分别对两个实际应用案例——京津冀“大气十条”实施效果预评估（第三章）、河北省“大气污染深入治理三年行动方案”的制定（第四章）进行展开介绍。



第三章

应用案例

京津冀“大气十条”实施效果预评估

3

3.1 预评估背景与技术路线

2013年9月，国务院发布了《大气污染防治行动计划》（简称“大气十条”），根据各地社会经济发展和空气质量现状，以签订目标责任书的形式确定了2017年31个省空气质量改善目标，将全国省份划分为重点区域和非重点区域，并制定了分档的改善目标。“大气十条”要求到2017年，全国地级及以上城市

PM₁₀浓度比2012年下降10%以上，京津冀、长三角、珠三角等区域PM_{2.5}浓度分别下降25%、20%、15%左右，其中北京市PM_{2.5}年均浓度控制在60 μg/m³左右。

“大气十条”明确了当前和今后一个时期国家和地方政府在空气质量改善方面的行动纲领，而如何细化落实“大气十条”，实现空气质量的切实改善，是当前城市空气质量管理者最为关心的问题。在这个背景下，亟需建立科学的“大气十条”措施实施效果预评估方法，以指导区域空气质量政策的有效开展。

“大气十条”实施效果预评估，旨在通过排放清单和空气质量模型等手段对现有控制措施的减排效果和空气质量改善效果进行测算，以预估现有政策实施后的控制效果，并找出现有政策存在的不足和需要进一步努力的方向。

在第二章构建的区域空气质量动态调控技术平台的基础上，重点基于“高分辨率大气污染源排放清单技术”和“减排情景分析及空气质量效果评估技术”，我们将该技术平台应用于京津冀“大气十条”实施效果的预评估。“大气十条”实施效果预评估的具体技术路线如图3-1所示：首先对现有“大气十条”措施

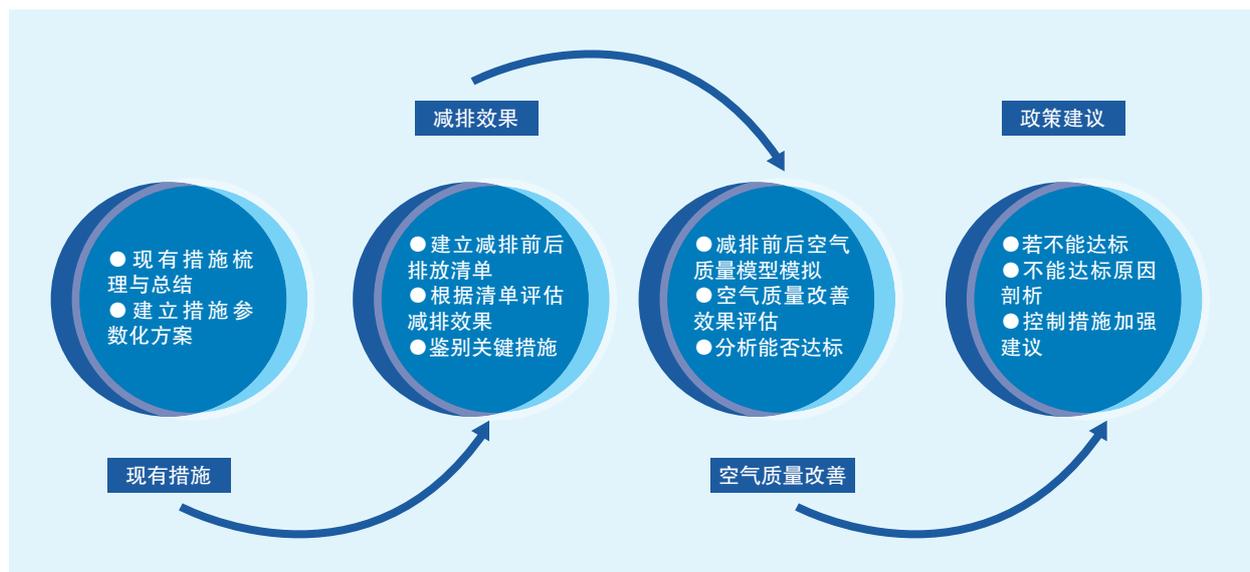


图 3-1 “大气十条” 实施效果预评估技术路线

进行系统的梳理以及分类；其次建立各措施的具体参数化方案，结合基准排放清单，建立减排排放清单，定量评估这些控制措施的潜在减排效果，对主要减排措施进行排序；然后基于空气质量模型模拟减排前后的空气质量，评估空气质量改善效果；在此基础上提出控制措施加强和改进建议。

3.2 京津冀“大气十条”措施概述

国务院颁布《大气污染防治行动计划》之后，各级政府也相继公布了各自的实施细则。在京津冀地区，主要有《京津冀及周边地区落实大气污染防治行动计划实施细则》、《北京市 2013-2017 年清洁空气行动计划》、《天津市清新空气行动方案》、《河北省大气污染防治行动计划实施方案》。“大气十条”提出了一系列强有力的控制对策，我们将这些措施划分为两大类：结构调整措施和末端控制措施。结构调整措施从源头削减排放，如控制煤炭消费总量、加快清洁能源替代利用、淘汰落后产能、限制机动车保有量等；末端控制措施是指末端控制技术的应用与更新，如实施脱硫、脱硝，进行除尘升级改造等。

3.2.1 结构调整措施

产业结构调整与能源结构调整是结构调整的两个立足点，是从源头削减排放的措施。“大气十条”涉及到的结构调整措施主要有：

1、调整优化产业结构，严控“两高”行业新增产能，加快淘汰落后产能。一方面，京津冀及周边地区未来不会有任何钢铁、水泥、电解铝、平板玻璃、船舶等产能严重过剩行业新增产能项目；炼焦、有色、电石、铁合金等新增产能项目也在京津冀及周边地区有了明确限制。另一方面，现有落后产能进入淘汰阶段。这将实现高耗能产业的产能逐渐下降。例如，2017 年京津冀地

区计划淘汰落后水泥产能 7000 万吨，河北省钢铁产能计划削减 6000 万吨。

2、控制煤炭消费总量。以煤为主的能源消费结构是我国大气污染严重的主要原因，“大气十条”明确提出要控制煤炭消费总量。京津冀地区在各自的“行动方案”中共压减煤炭消费总量 6300 万吨，其中北京市、天津市和河北省分别净削减 1300、1000 和 4000 万吨，相应削减比例分别为 61%、20% 和 19%。

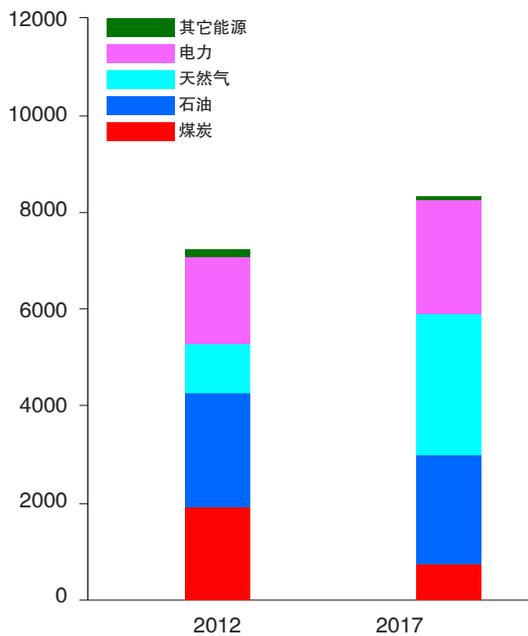
3、清洁能源替代。京津冀地区新增天然气 500 亿立方米，其中北京市、天津市和河北省分别为 130、120 和 250 亿立方米。

4、机动车总量限制。北京实施了机动车总量控制后，柴油与汽油消费在 2017 年有望下降。

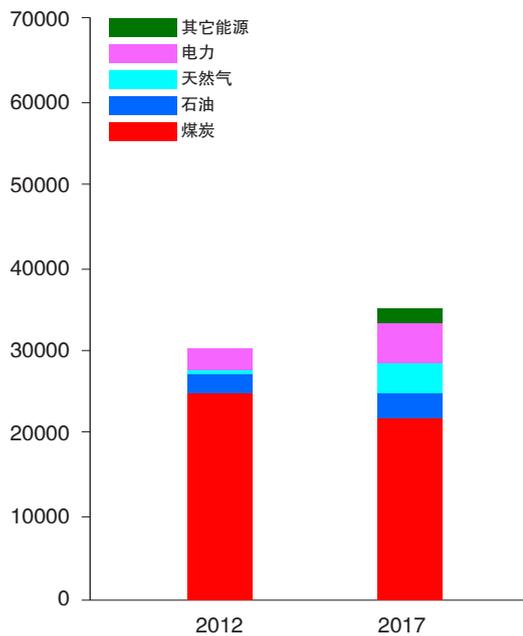
为量化其影响，我们在能源消费总量预测的基础上，结合能源结构调整措施，建立了 2017 年能源平衡表，得到分部门分燃料类型的能源消费量。图 3-2 给出了 2017 年京津冀地区主要能源品种消费量预测。2017 年，京津冀地区煤炭消费占能源消费总量比重降低到 65% 以下，并通过逐步提高接受外输电比例、增加天然气供应、加大非化石能源利用强度等措施替代燃煤。

3.2.2 末端控制措施

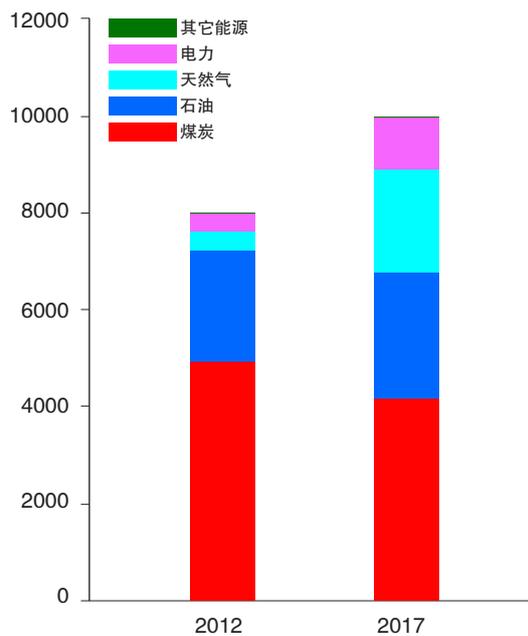
“大气十条”提出了一系列末端控制措施，加快重点行业脱硫、脱硝、除尘改造工程建设。所有燃煤电厂、钢铁企业的烧结机和球团生产设备、石油炼制企业的催化裂化装置、有色金属冶炼企业都要安装脱硫设施，每小时 20 蒸吨及以上的燃煤锅炉要实施脱硫。除循环流化床锅炉以外的燃煤机组均应安装脱硝设施，新型干法水泥窑要实施低氮燃烧技术改造并安装脱硝设施。燃煤锅炉和工业窑炉现有除尘设施要实施升级改造。机动车排放控制持续加严。例如，2015 年京津冀地区将全面实施国五标准；北京市则计划在 2016 年实施更严格的国六标准。京津冀地区的具体措施如下：



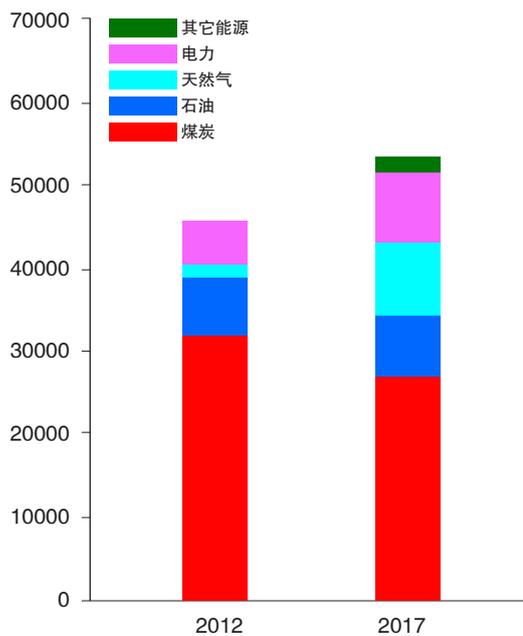
(a) 北京



(c) 河北



(b) 天津



(d) 京津冀

图 3-2 京津冀地区主要能源品种消费量预测

1、2017 年所有燃煤电厂都要安装脱硫设施，预计燃煤电厂综合脱硫效率将从 2012 年的 80% 提高到 90%

以上；到 2017 年燃煤机组均应全面应用烟气脱硝。

2、工业锅炉脱硫在 2017 年达到 70% 以上，淘汰机

械式除尘，升级改造现有除尘设施。

3、水泥行业脱硝比例从 2012 年的 16% 增加至 2017 年的 100%。

4、钢铁烧结机脱硫比例从 2012 年的 35% 到 100%。

5、机动车排放控制持续加严，2015 年京津冀地区全面实施机动车排放“国 5”标准，北京市 2016 年实施“国 6”标准。

6、到 2017 年京津冀地区的 200 万辆黄标车、“国 2”及“国 2”以前的汽油车和柴油车全部淘汰。

7、通过综合整治削减重点行业 20% 的 VOC 排放量。

8、加油站安装一级油气回收系统和二级油气回收系统。

3.3 大气污染物减排效果预评估

我们建立了“大气十条”措施的参数化方案，量化控制措施对排放的影响。基准年（2012 年）排放清单来自于清华大学开发的中国多尺度排放清单模型（MEIC，<http://www.meicmodel.org>）。目标年（2017 年）的排放清单是在基础年排放清单上，依据大气“国十条”的措施进行量化，并结合能源消费等活动水平和控制技术分布的预测得到。

3.3.1 京津冀地区主要污染物来源

工业过程和民用部门是京津冀地区一次 PM_{2.5} 的主要来源，分别贡献了 54% 和 29%，其中工业过程排放主要来自于钢铁、水泥、炼焦等行业，民用部门排放主要来自于民用燃煤和生物质燃烧；此外，电力、供热、工业锅炉和交通部门分别贡献了 4%、3%、6% 和 4%。

二次 PM_{2.5} 污染的前体物主要是 SO₂、NO_x、VOC、NH₃。工业锅炉、工业过程（主要是钢铁烧结和工业窑炉）、电力、民用和供热部门分别贡献了区域 SO₂ 排放的 39%、19%、17%、15% 和 8%；交通、工业锅炉、电力、供热和工业过程（主要是水泥行业）是 NO_x 排放的

主要来源，分别贡献了 28%、27%、24%、10% 和 7%；

VOC 排放的 40%、26%、17% 和 9% 分别来自于溶剂使用、工业过程、民用和交通部门；NH₃ 主要来自于农业部门的化肥施用和畜禽养殖。

3.3.2 京津冀地区污染物总量减排

京津冀地区 2017 年主要污染物 SO₂、NO_x、PM_{2.5}、BC、OC、VOC 的排放量分别为 139.5、221.2、90.2、14.7、23.6、199.9 万吨，相比 2012 年分别下降 32%、21%、24%、17%、14%、6%。在三个省份中，河北省由于排放量远高于其它两个直辖市，对京津冀地区污染物减排的贡献最大，贡献了京津冀地区 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5}、VOC 减排量的 71%、71%、74%、45%；北京市的减排幅度最大，因为推行相对较严的控制措施。

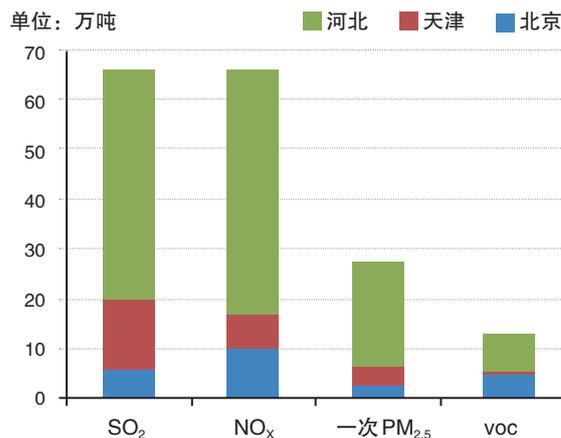
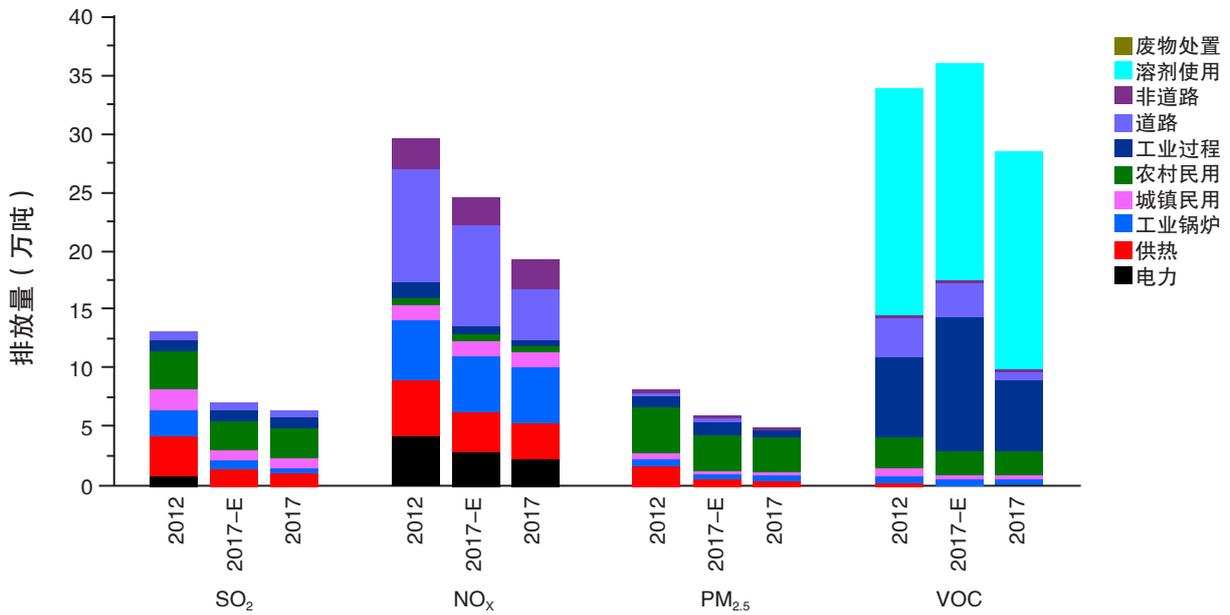


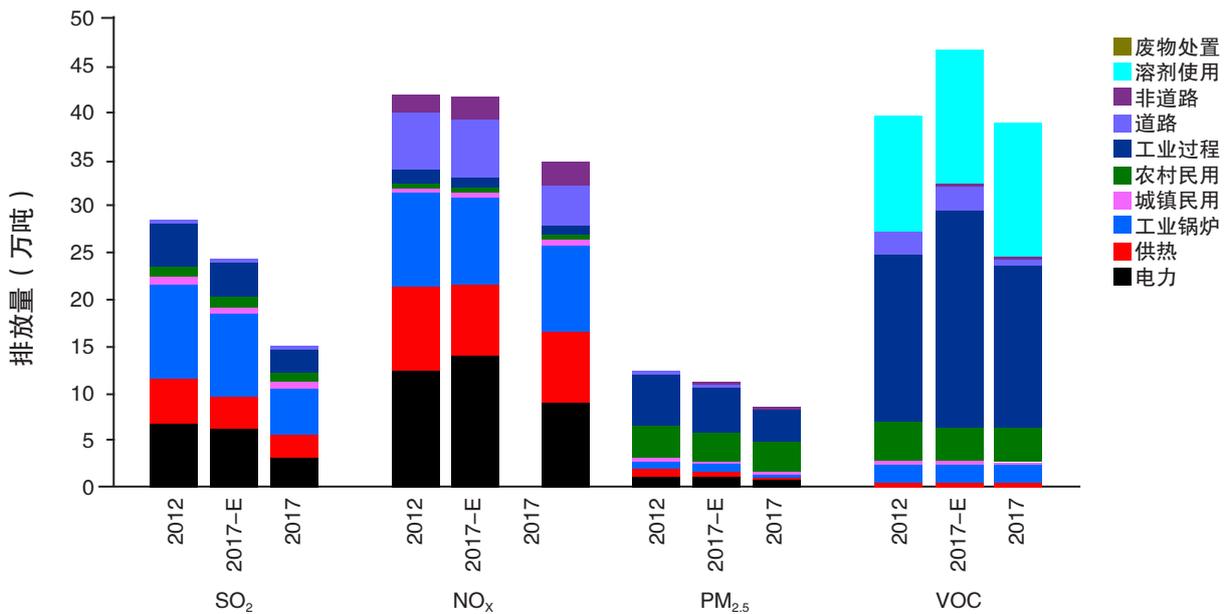
图 3-3 京津冀区域污染总量减排贡献图

3.3.3 分地区污染物下降幅度

图 3-4 分别给出了北京、天津、河北地区主要污染物分行业排放变化情况。为了分别体现结构减排与末端治理措施带来的污染物减排效果，我们分别设定了只进行结构减排的情景（2017 - E）以及进一步进行末端治



(a) 北京



(b) 天津

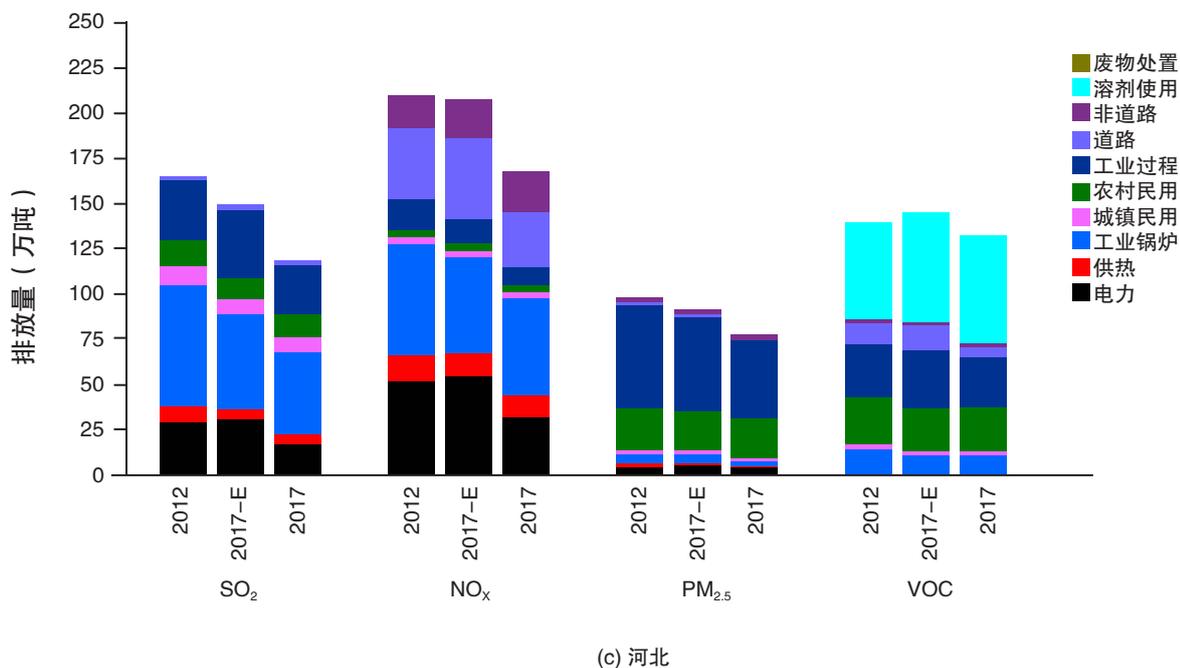
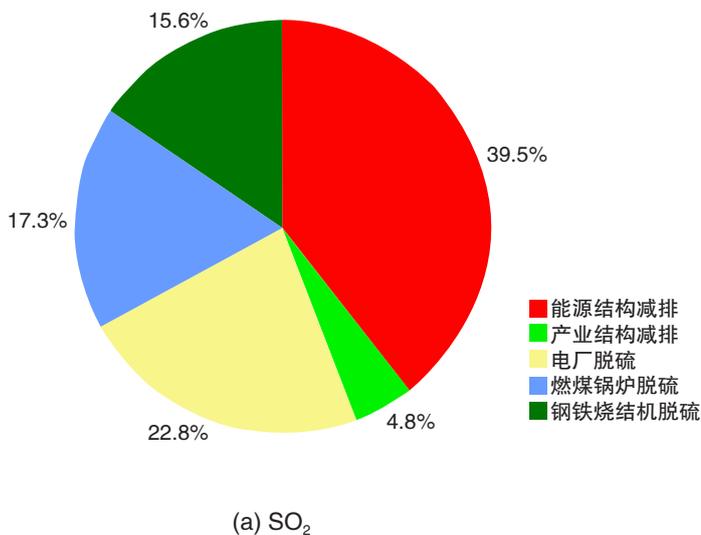


图 3-4 北京、天津、河北地区主要污染物排放变化

理情景（2017）。根据清单测算结果，已出台的各项措施对北京、天津的 SO_2 的削减幅度接近一半，而河北的 SO_2 削减幅度稍弱；三个地区的 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 也有一定的削减幅度，而 VOC 的减排幅度较低，其中河北、天津的 VOC 污染削减幅度更是低于 5%。其中，结构减排对 SO_2 的减排效果较为明显，对 NO_x 的减排效果则天津、河北不如北京。这主要是因为产业结构调整、能源替代方面天津与河北的挑战更大。如能进一步削减高耗能产业产能、提高清洁能源比重，将会有更明显的减排效果。结构减排对 VOC 的控制效果尚不明显。

3.3.4 各项措施的减排贡献

从各项措施对京津冀污染物减排的贡献来看，在京津冀地区，能源结构减排对 SO_2 减排贡献最大



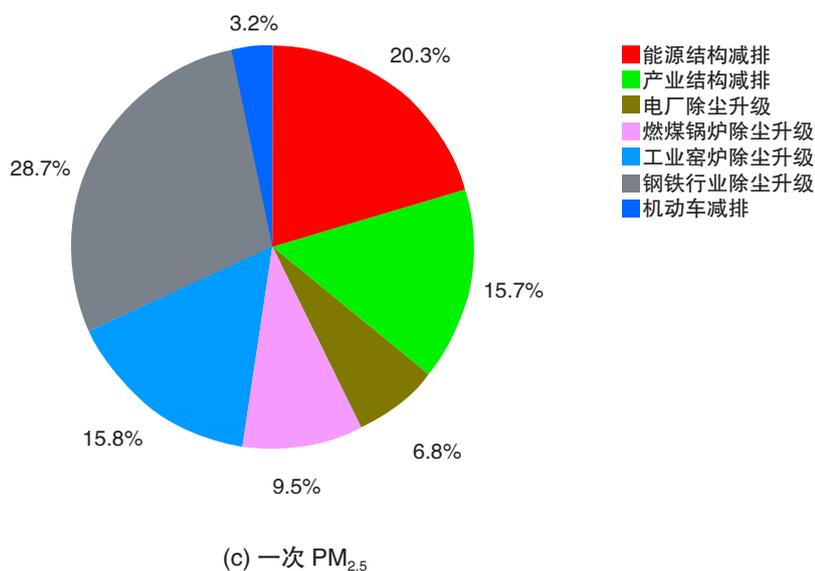
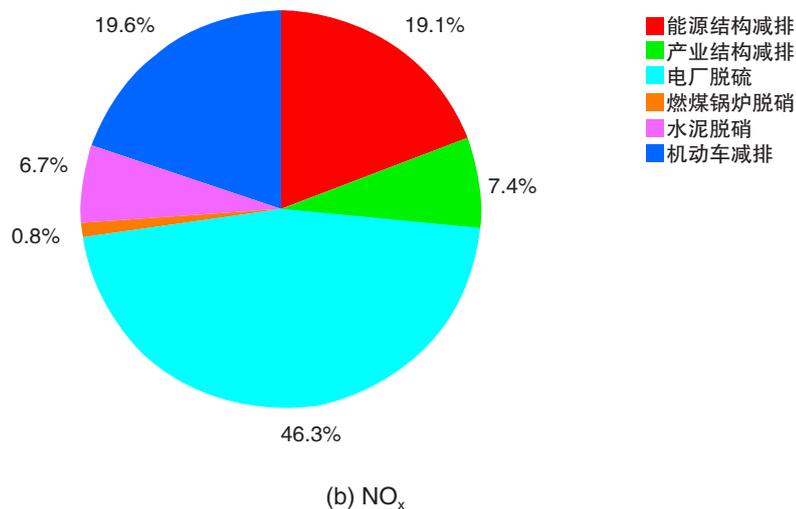


图 3-5 各项措施对污染物减排的贡献

(39.5%)，电厂脱硫次之(22.8%)；电厂脱硝对 NO_x 减排贡献最大(46.3%)，其次是机动车减排(19.6%)、能源替代(19.1%)。对一次 PM_{2.5} 减排贡献最大的是钢铁行业除尘升级(28.7%)，其次是能源结构减排(20.3%)。

3.4 空气质量改善效果预评估

3.4.1 京津冀地区 2017 年 PM_{2.5} 浓度变化

为定量评估“大气十条”措施对京津冀地区空气质量的改善效果，我们基于 2012 年排放清单和“大气十

条”实施下 2017 年的排放情景，利用多尺度空气质量模型 CMAQ 分别模拟两种排放下京津冀地区细颗粒物的污染状况。考虑到 PM_{2.5} 污染的区域特征，京津冀周边省份的排放变化也将对京津冀地区的空气质量带来影响。京津冀周边省份的排放变化根据各省市“大气十条”中的 PM₁₀ 或 PM_{2.5} 年均浓度下降目标进行设计，其中山东、山西和内蒙古的 PM_{2.5} 年均浓度下降目标分别为 20%、20% 和 10%。目标年采用和基准年采用相同的气象条件

(2013 年气象场)。模型模拟京津冀地区 PM_{2.5} 浓度变化见图 3-6。

为获得各行政区的模拟浓度值，我们进一步采用监测站点所在网格平均的方法对模拟结果进行空间统计。模拟后的统计结果显示，北京市、天津市和河北省 PM_{2.5} 年均浓度将由 2013 年的 88.3 μg/m³、112.7 μg/m³、112.9 μg/m³ 降至 2017 年的 65.8 μg/m³、91.6 μg/m³、96.3 μg/m³，相应降幅分别为 25.6%、

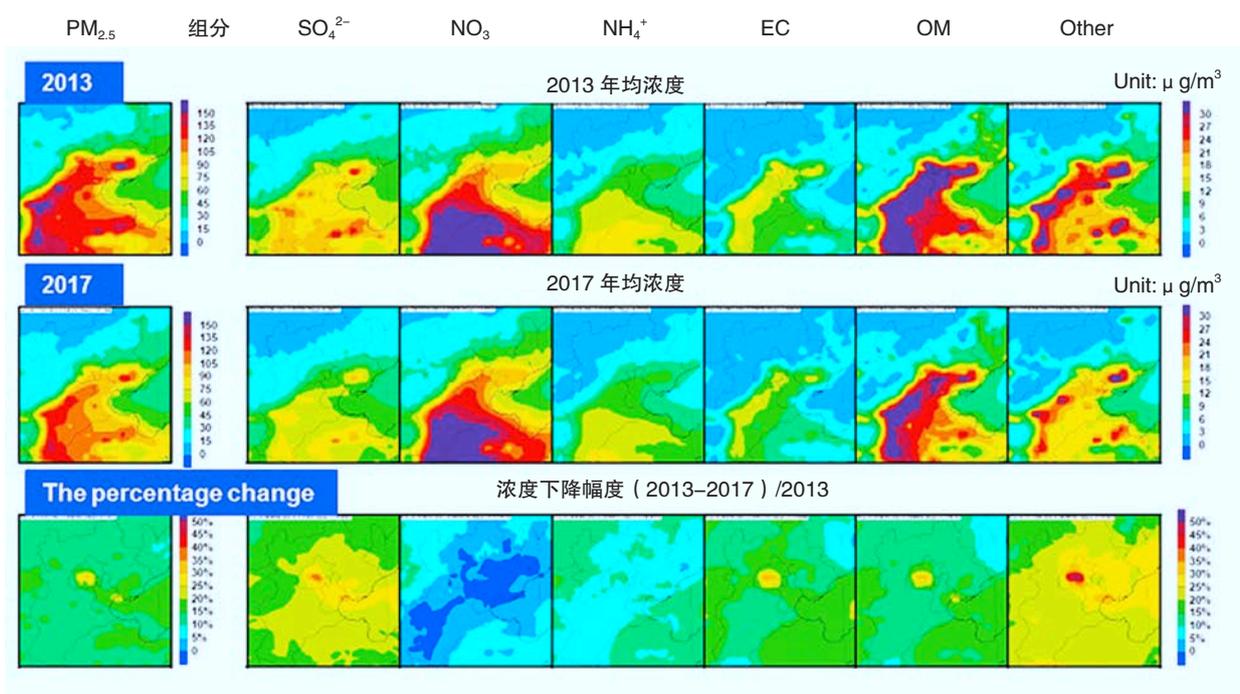


图 3-6 模型模拟京津冀地区 PM_{2.5} 各组分年均浓度变化

18.7%、14.7% (图 3-7)。

模拟结果显示，如果全面实施“大气十条”，京津冀地区 PM_{2.5} 浓度降幅显著，特别是北京市市辖区，这与北京市城六区推行无煤化政策有关。但北京市仍存在达不到 60 μg/m³ 浓度目标的风险，天津市和河北省的部分地区仍存在达不到 2017 年浓度降低 25% 的风险。

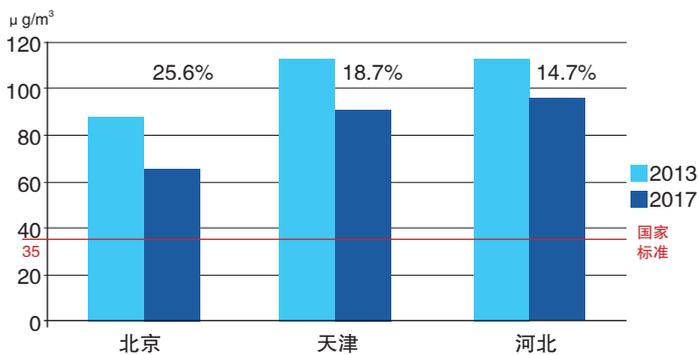


图 3-7 京津冀地区实施“大气十条”带来的 PM_{2.5} 浓度改善

3.4.2 京津冀地区 PM_{2.5} 组分浓度下降分析

从图 3-8 可以看到，京津冀三个省份 PM_{2.5} 浓度的下降中，硫酸盐和其他组分的贡献较大，硝酸盐的贡献相对较小，北京市黑碳、有机组分浓度的下降也较为明显。

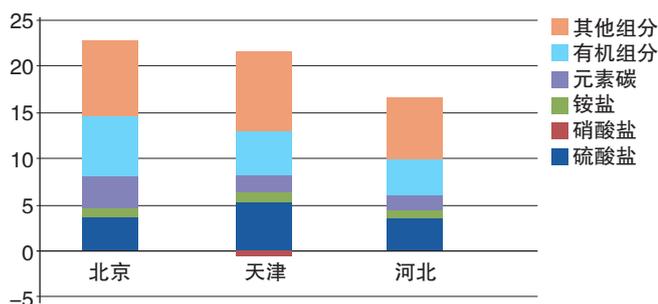


图 3-8 实施“大气十条”对京津冀地区 PM_{2.5} 各组分浓度下降的贡献 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

上述结果显示，SO₂ 和一次 PM_{2.5} 减排措施对京津冀地区 PM_{2.5} 浓度削减的作用较大，北京市主要是大幅削减燃煤；天津市和河北省主要是削减燃煤、末端脱硫以及钢铁水泥行业的颗粒物减排。

我们进一步分析对比了主要污染物减排比例与空气质量改善的比例，发现：

1、硫酸盐在三个省份的降幅均较为显著，分别下降 33.3%、29.5%、23.1%，但明显小于 SO₂ 排放的降幅 51.4%、47.3%、28.1%。

2、硝酸盐浓度的变化较小，北京市和河北省的硝酸盐浓度基本不变，天津市则增加了 2.9%，与 NO_x 的减排幅度不相符，与非线性化学反应有关。

3、北京市有机组分的下降幅度为 27.5%，高于天津市的 17.4% 和河北省的 14.0%。

从主要前体物的减排来看，现有政策对 SO₂ 的控制效果较明显，但对 NO_x 和一次 PM_{2.5} 的减排效果不及 SO₂，对 VOC 和 NH₃ 的控制较为薄弱。北京市大部分前体物的削减力度在 25% 以上，因此浓度的降幅较为明显；河北省的削减力度要小于北京和天津，NO_x 和一次 PM_{2.5} 的减排比例分别为 20.2% 和 21.4%，小于浓度下降目标 25%。

由于大气化学反应过程是非线性的，PM_{2.5} 组分（特别是硝酸盐）的浓度削减幅度与前体物的减排幅度并不完全一致。如北京、天津和河北 NO_x 的减排幅度分别达到 34.9%、17.3% 和 20.2%，硝酸盐浓度却基本不变甚至略有上升。我们通过分析以往的研究，发现京津冀地区处于富氨地区。在富氨的条件下，二次 PM_{2.5} 生成对大气氧化性更敏感。由于京津冀地区处于 VOC 控制区，NO_x 减排导致大气氧化性的增强，造成氧化剂浓度的增加，从而促进各种前体物生成二次 PM_{2.5}。此外，周边区域的减排幅度小于京津冀地区，以及天然源的 VOC 排放维持不变也是空气质量浓度降幅小于人为源污染物减排幅度的原因。

3.5 控制措施加强及改善建议

现有政策对 SO₂ 的控制效果较明显，但对 NO_x 和一次 PM_{2.5} 的减排有限，对 VOC 和 NH₃ 的控制较为薄弱。SO₂ 和 PM_{2.5} 减排措施对京津冀地区 PM_{2.5} 浓度削减效果较明显，天津市和河北省应特别注意控制一次 PM_{2.5} 的排放量，以保证达到“大气十条”制定的环境目标。同时应当加大对 NO_x、VOC、NH₃ 的控制力度，实现 PM_{2.5} 多组分协同减排。民用部门和工业过程（钢铁、水泥、炼焦等）对一次 PM_{2.5} 排放的贡献较大，工业过程和溶剂使用是 VOC 的主要来源，化肥施用和畜禽养殖是 NH₃ 排放的重要来源，“大气十条”针对民用部门以及 VOC 和 NH₃ 的措施较难量化，这些措施还有待细化明确。

为了支持京津冀地区达到“大气十条”设定的目标，针对以上目标，我们选取推荐了十项强化措施，并进行了空气质量改善效果模拟分析：

1、京津冀地区实现工业煤炭 100% 洗选，同时禁止使用硫含量高于 0.6% 的煤炭；

2、京津冀地区对在用柴油车加装颗粒物过滤器（DPF）；

3、河北省应该削减钢铁产量，从而保证煤炭削减总量从 4000 万吨提高至 6000 万吨；

4、河北、天津钢铁企业全面升级改造安装高效除尘，

比如电除尘、袋式除尘器等；

5、河北、天津应对水泥窑进行全面升级改造成袋式除尘器，其中河北对水泥行业全部开展脱硝治理；

6、河北对现有炼焦行业除尘进行升级改造；

7、河北、天津燃煤供热锅炉安装脱硝设施，其中天津的脱硝安装比率提高到 50%；

8、河北、天津应对欧三柴油车进行限行，将重型载货柴油车中欧三车型油耗比例降至 20%；

9、天津、河北对炼焦、涂料、制药等行业的 VOC

排放实行重点控制，将 VOC 的排放减少 30%–40%；

10、天津、河北将畜牧养殖业集约化比例提高到 30%，并推广施用缓释肥料。

在施行以上措施之后，根据模拟结果，北京、天津、河北可达到“大气十条”中设定的空气质量改善目标，具体改善效果见图 3-9。

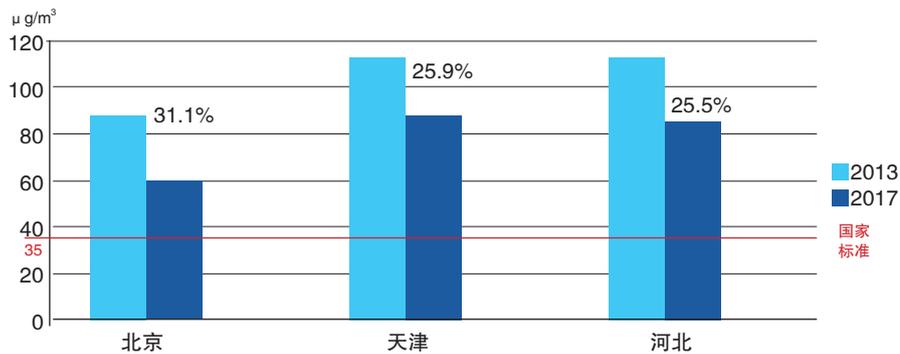
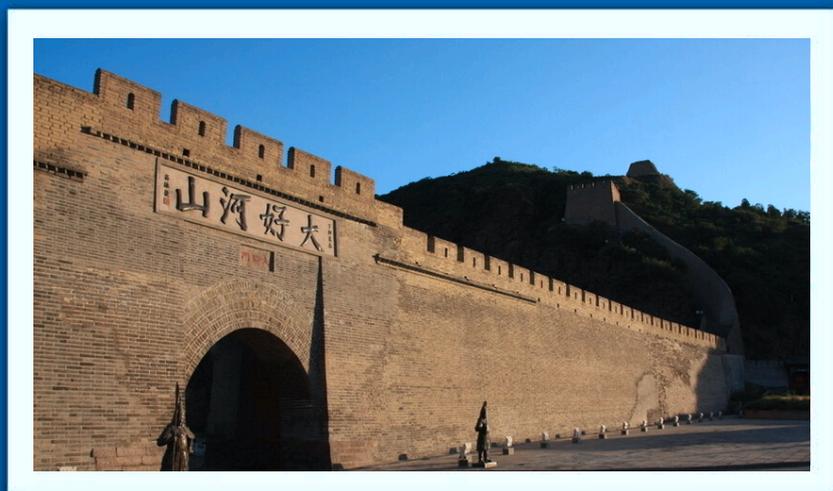


图 3-9 模拟实施强化大气污染防治措施带来的空气质量改善 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



第四章 应用案例

河北省“大气污染深入治理三年行动方案”的制定

4

4.1 案例背景

为大力推进科学治霾、精准治污，确保“大气十条”目标全面完成，河北省环保厅委托清华大学、环保部环

境规划院、河北省环境科学研究院联合开展研究，对河北省近两年来大气污染防治工作及空气质量改善进行了科学评估，对现有措施以及是否能够完成目标任务进行分析，并提出具有针对性的深化措施，制订河北省今后三年大气污染深入治理的行动方案。

国务院发布的“大气十条”提出到2017年，河北省PM_{2.5}浓度相比2013年下降25%的具体目标。自“大气十条”发布以来，河北省委、省政府高度重视大气污染防治工作，全省紧急动员、全面部署，下最大决心、以最大力度推进大气污染防治。制订了《河北省大气污染防治行动计划实施方案》，即“河北省大气五十条”，根据河北省各市所处的区位、环境容量、污染程度、产业结构等方面因素，分区域、分城市下达了细颗粒物下降比例：石家庄、唐山、保定、廊坊、定州、辛集下降33%，邢台、邯郸下降30%，秦皇岛、沧州、衡水下降25%以上，承德、张家口下降20%以上。同时针对燃煤

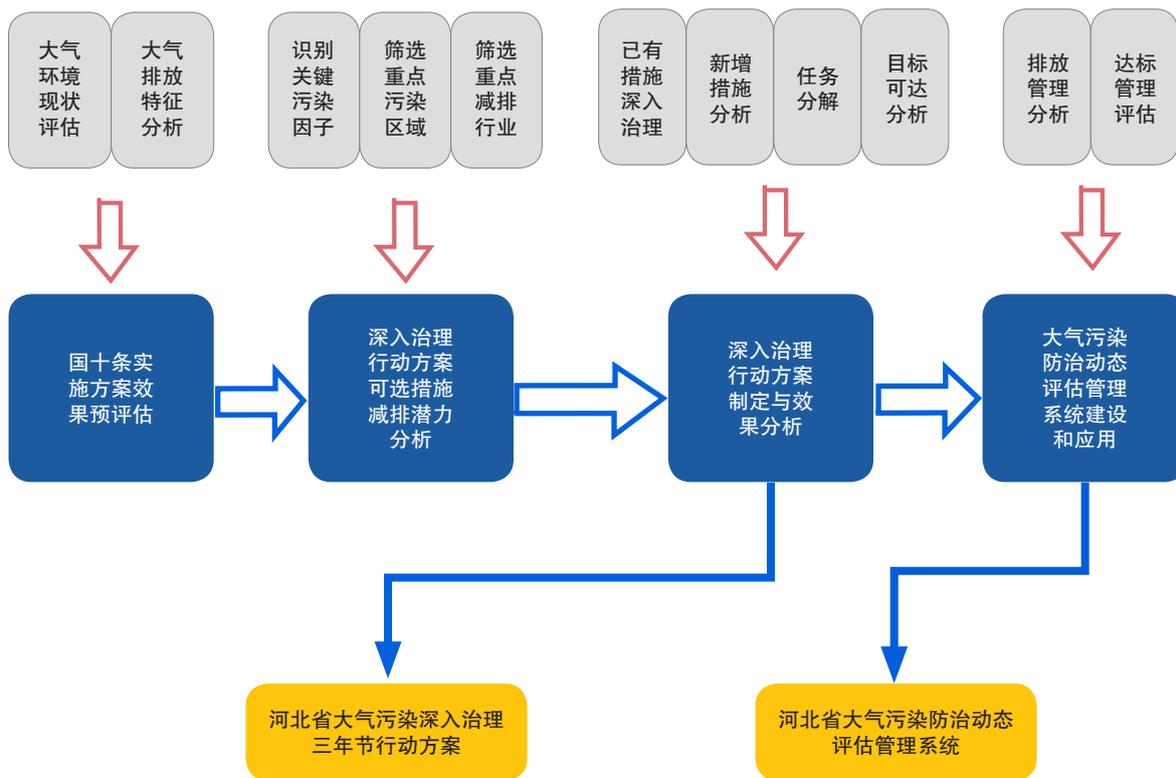


图 4-1 深入治理方案制定的技术路线

削减、黄标车和老旧车辆淘汰、扬尘治理、重点行业污染治理等专项工作，逐一制定工作方案和配套措施。提出了在环境治理上只有“华山一条路”，宁可牺牲一段时间的GDP和财政收入，也要坚决打赢环境治理攻坚战，争取五年甩掉重污染帽子，把调结构、治污染作为全省经济工作的主旋律。

经过近两年的不懈努力，河北省环境空气质量呈现向好态势，局部初见效果。2014年，PM_{2.5}比2013年下降12.0%，其它污染物也均有不同程度的下降。但由于河北省受产业结构制约，以煤为主的能源结构在短期内很难改变，且二氧化硫、氮氧化物等污染物减排潜力收窄，挥发性有机物和氨等对PM_{2.5}具有显著贡献的前体物尚未得到有效控制，要实现2017年PM_{2.5}浓度下降25%的河北省空气质量持续改善目标面临巨大的挑战和压力。如仅依靠“大气十条”提出的污染控制措施，河北省存在难以保证全面完成PM_{2.5}浓度下降25%任务目标的风险。

4.2 技术路线

深入治理方案制定的技术路线如图4-1所示。我们对“河北省大气五十条”的实施效果进行预评估，分析目标差距、筛选强化治理措施，从而制定“大气污染深入治理三年行动方案”，确保完成“大气十条”的考核目标。并通过区域空气质量动态调控技术平台的建设，实现方案动态评估、调整、更新和管理，服务日常大气污染治理动态评估和重大活动空气质量保障实时评估，从而全面提升河北省大气环境管理决策能力。

4.3 河北省空气质量及排放现状评估

4.3.1 大气环境现状评估

河北省的大气污染总体呈复合型污染特征，具有影响范围大、持续时间长、灰霾出现频次高、污染物性质

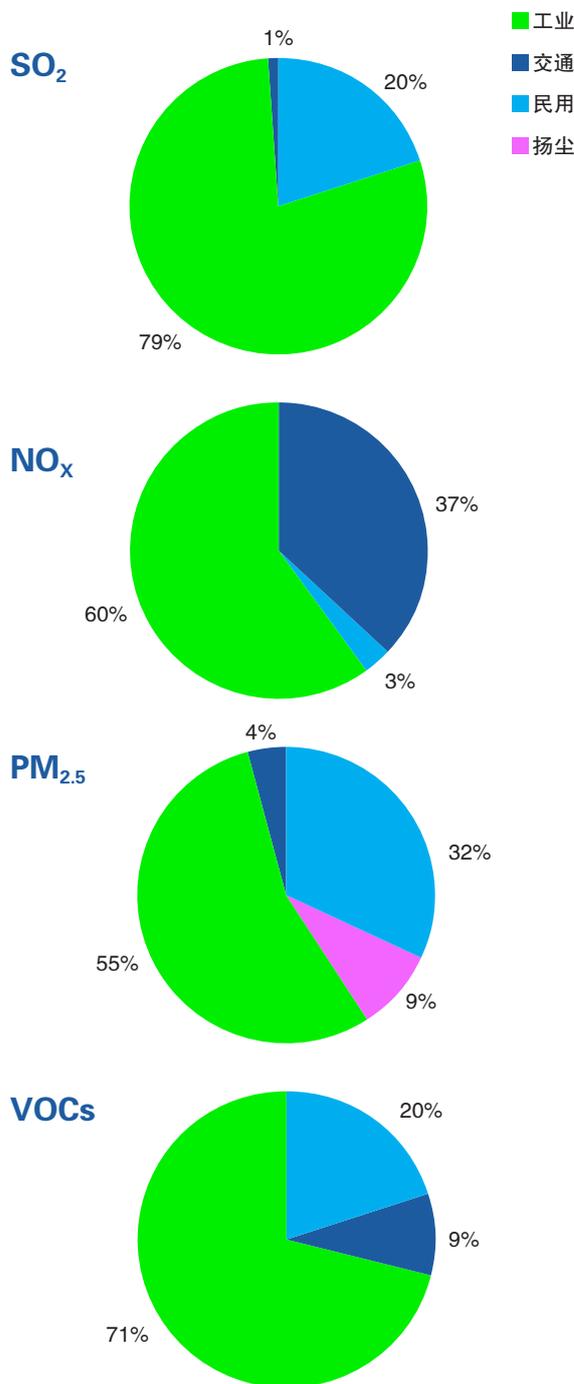


图4-2 河北省2013年主要大气污染物排放部门分担率

不稳定、变化大和浓度高等特点。在环保部公布的2014年每月全国空气质量最差的10个城市中，河北省占据5-7

个，大气污染防治形势十分严峻。2014年，河北省所有城市PM_{2.5}和PM₁₀年平均浓度均超标，南部的邢台、石家庄、邯郸等城市年均PM_{2.5}浓度在120μg/m³以上，是《环境空气质量标准》二级标准限值35μg/m³的三倍以上。全省各城市空气质量达标优良天数比例平均为41.6%，远低于全国平均水平的60.5%；而重度污染及以上的天数比例为18.1%，高于全国水平的8.6%。

4.3.2 大气污染物排放特征分析

根据2013年河北省大气污染物排放清单（清单涵盖电力、工业、民用、交通、农业和扬尘等全部人为排放源）的计算结果，2013年全省排放SO₂160.2万吨、NO_x157.9万吨、PM_{2.5}为95.5万吨、VOCs143.4万吨，工业源对大气污染的贡献占据主导地位，分别贡献了排放总量的79%、60%、55%和71%。

从工业大气污染物行业排放分布情况来看，SO₂、NO_x和PM_{2.5}的主要排放行业是电力、钢铁、建材、供热、工业锅炉等，合计贡献SO₂、NO_x和PM_{2.5}排放的89%、92%和78%。工业VOCs主要由表面涂装、石化化工、制药和溶剂使用等排放源贡献。

机动车对河北省大气污染物的排放也具有显著贡献。河北省2013年机动车排放NO_x39.1万吨、VOCs10.7万吨、PM_{2.5}1.5万吨，分别贡献NO_x、VOC、PM_{2.5}排放的25%、7%和2%。其中，重型载货汽车（主要是柴油车）是NO_x和PM_{2.5}的主要排放源，排放分担率达到70%。轻型载客汽车（主要是汽油车）和摩托车是VOCs的主要排放源。

4.4 河北省五十条方案效果评估及达标差距剖析

4.4.1 测算实现浓度下降目标需要的减排量

根据模型测算，河北省为达到2017年PM_{2.5}浓度下降目标，各污染物所需减排比例如表4-1所示。河北省实现PM_{2.5}浓度下降目标，需减排40%的SO₂、25%的NO_x、40%的PM_{2.5}和20%的VOCs。其中，首都周边及大气污染较重的石家庄、唐山、保定、廊坊、定州和辛集市减排比例更高，需减排45%的SO₂、27%的NO_x、45%的PM_{2.5}和23%的VOCs。

表 4-1 实现 PM_{2.5} 浓度下降目标需要的减排比例

| 城市 | PM _{2.5} 浓度下降目标 | 所需排放下降比例 | | | |
|--------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|
| | | SO ₂ | NO _x | PM _{2.5} | VOC _s |
| 石家庄、唐山、廊坊、保定、定州、辛集 | 33% | 45% | 27% | 45% | 23% |
| 邢台、邯郸 | 30% | 41% | 25% | 41% | 20% |
| 秦皇岛、沧州、衡水 | 25% | 35% | 23% | 35% | 15% |
| 承德、张家口 | 20% | 30% | 20% | 30% | 10% |
| 河北省 | 25% | 40% | 25% | 40% | 20% |

4.4.2 河北省五十条方案减排量存在差距

河北省委、省政府把环境治理列为全省四大攻坚战之一，对大气污染防治工作进行了全面安排部署，形成

了省政府牵头、各部门密切协作，全社会共同参与，全面加强大气治理的新格局。围绕“调结构、治污染”主题，2013年底至今，省政府以及环保、发改、工信、住建、农业、国土、质监、公安等相关部门陆续发布《河北省钢铁水

表 4-2 河北省五十条目标责任书主要治理措施及减排量

| 行业 / 部门 | 大气 50 条措施 | 减排量 |
|---------|------------------------------------|--------------------------|
| 火电行业 | 351 万千瓦燃煤机组除尘改造 | 8.0 万吨 SO ₂ |
| | 1400 万千瓦燃煤机组脱硫改造 | 23.2 万吨 NO _x |
| | 2107 万千瓦燃煤机组新建脱硝 | 0.2 万吨 PM _{2.5} |
| 钢铁行业 | 120 台烧结（球团）设备脱硫改造 | 12.1 万吨 SO ₂ |
| | 64 家钢铁企业除尘改造 | 8.7 万吨 PM _{2.5} |
| 水泥行业 | 67 条约 6200 万吨生产线脱硝改造和建设 | 3.3 万吨 NO _x |
| | 40 条约 2300 万吨水泥企业除尘改造 | 2.0 万吨 PM _{2.5} |
| 燃煤锅炉 | 131 台 3813t/h 锅炉脱硫改造 | 14.8 万吨 SO ₂ |
| | 164 条约 5600t/h 燃煤锅炉除尘改造 | 2.9 万吨 PM _{2.5} |
| 机动车 | 到 2015 年底前, 全省供应符合国家第五阶段标准的车用汽、柴油。 | 8.6 万吨 NO _x |
| | 到 2017 年, 全部淘汰黄标车。 | 1.3 万吨 VOC |

泥电力玻璃行业大气污染防治攻坚行动方案》、《河北省洁净型煤生产配送体系建设实施方案》、《河北省重点工业企业清洁生产水平提升实施方案》、《河北省治理淘汰黄标车工作方案》、《河北省建筑工程施工扬尘治理行动计划》、《河北省煤电节能减排升级与改造行动计划（2014-2020年）》等工作方案，坚决淘汰落后产能、压减过剩产能、大力开展四大行业污染治理、散煤清洁化利用、清洁生产和节能技术改造、黄标车和老旧车辆淘汰、扬尘整治等专项工作，并逐一制定工作方案和配套措施，全省大气污染防治工作有条不紊全面开展。

以四大重点行业为例，2014年，全省火电行业完成74台机组（装机容量24370MW）脱硫设施改造，67台机组（装机容量22120MW）脱硝设施改造，61台机组（装机容量19636MW）的高效除尘改造，分别实现SO₂、NO_x、PM_{2.5}减排7.00万吨、16.67万吨、0.95万吨。钢铁行业完成255台烧结机（球团设备）脱硫改造，关停89台烧结机（球团设备），实现SO₂减排16.20万吨。水泥行业完成43条、12.26万吨/日新型干法水泥熟料生产线脱硝工程，实现NO_x减排2.46万吨。

通过对《河北省大气污染防治行动计划实施方案》（2013年9月）、《河北省大气污染防治目标责任书》（2013年9月）、《河北省钢铁水泥电力玻璃行业大气污染治

理攻坚行动方案》（2013年11月）和《京津冀及周边地区重点行业大气污染限期治理方案》（2014年7月）实施措施的收集、核对和整合，我们测算了采取河北省五十条方案预计能达到的减排量。表4-2给出了河北省五十条目标责任书中主要治理措施及测算的减排量。

表4-3给出了河北五十条方案可达减排幅度及与实现2017年浓度下降目标所需减排幅度的对比。实施河北五十条后，河北省主要污染物SO₂、NO_x、PM_{2.5}和VOCs预计明显降低，减排幅度分别达到32%、22%、28%、5%，但距离实现2017年浓度下降目标所需减排幅度仍存在明显差距。

4.4.3 达标差距剖析

经过近两年的工作，河北省环境空气质量出现向好态势，各项污染物浓度均呈下降趋势。但是要实现2017年PM_{2.5}浓度下降25%的目标，仍然面临较大的压力，已采取的防治措施还不足以确保完成目标任务。

（1）空气质量改善压力巨大

“十三五”时期是京津冀区域空气质量改善的关键期。作为京津冀区域中污染最为严重、经济水平相对较低的省份，随着治污减排工作的不断深入，二氧

表 4-3 河北五十条可达减排幅度及与 2017 年要求目标对比

| | SO ₂ | NO _x | PM _{2.5} | VOC _s |
|---------------|-----------------|-----------------|-------------------|------------------|
| 2017 年要求的减排幅度 | 40% | 25% | 40% | 20% |
| 河北五十条可达幅度 | 32% | 22% | 28% | 5% |
| 差距 | 8% | 3% | 12% | 15% |

化硫、氮氧化物等常规污染因子治污潜力逐步收窄，挥发性有机物、氨等污染因子尚未纳入有效管理，长期累积和新型环境问题应对的难度加大，目前已有的举措难以保障环境空气质量改善目标全面完成。再加上以煤为主的能源结构和高耗能高污染的产业结构调整难度较大且需要时间，河北省空气质量持续改善面临巨大的挑战和压力。

(2) 结构调整步入艰难期

《大气污染防治行动计划》明确提出，到 2017 年，河北省减少 4000 万吨煤炭消费量，压缩 6000 万吨以上钢铁产能，淘汰 10 万千瓦以下非热电联产燃煤机组；到 2015 年，淘汰 6100 万吨以上落后水泥产能和 3600 万重量箱平板玻璃产能。2013 年以来，全省通过淘汰燃煤锅炉、取缔外来煤炭洗选，关停落后产能等措施，煤炭消费量减少 1900 万吨，年均天然气供应能力提高 20% 以上，压减 1600 多万吨钢铁、1700 多万吨水泥、3200 多万重量箱平板玻璃产能，能源结构和产业结构调整取得阶段性成果。

但是河北省历史形成的产业结构偏重，钢铁、电力、建材、石化工业增加值占规模以上工业的 56.7%；能源消费结构不合理，煤炭消耗量占全省能源消费总量的 88.6%。调整优化产业结构，既要做好减法，大力压减过剩产能，又要做好加法，加快推进传统产业改造升级，培育壮大新兴产业，需要付出艰苦不懈的努力。而且随着今后我国发展阶段总体转入后工业化新阶段，经济增长要在短时间内摆脱依赖资源过度开发和利用、资源能源高消耗、污染排放高强度、产出和效益低下的状

态难度很大。

(3) 挥发性有机物污染防治工作进展缓慢

挥发性有机物是导致大气中臭氧、细颗粒物浓度升高的主要污染物之一，改善空气质量，降低 PM_{2.5} 浓度，必须开展挥发性有机物污染防治。《大气污染防治行动计划》中针对挥发性有机物综合治理提出明确的治理重点和要求。但是近两年来，河北省大气污染防治工作重点围绕压煤、限产、控尘、控油等常规污染源和常规污染因子，涉及的工业行业主要包括火电、钢铁、水泥和其他工业锅炉等，对减少二氧化硫、氮氧化物、颗粒物等污染物排放量具有显著效果，而对石化、制药、有机化工、表面涂装、包装印刷等挥发性有机物排放重点行业的综合治理工作开展相对滞后。

4.5 深入治理方案的制定

4.5.1 深入治理方案制定依据

(1) 钢铁、火电、水泥、玻璃四大行业：

《京津冀及周边地区重点行业大气污染限期治理方案》（环发〔2014〕112 号）

相关行业排放标准（GB4915、GB 13223、GB 13271、GB 28662、GB 28663、GB 28664 等，2014 年开始陆续实施）

(2) 燃煤锅炉、能源结构调整：

《大气污染防治行动计划》（国发〔2013〕37 号）



图 4-3 深入治理方案主要措施分析

《2014-2015 年节能减排低碳发展行动方案》（国办发〔2014〕23 号）

《能源发展战略行动计划（2014-2020 年）》（国办发〔2014〕31 号）

《京津冀地区散煤清洁化治理工作方案》（发改能源〔2014〕1527 号）

《商品煤质量管理暂行办法》（国家发展改革委、环境保护部等 6 部委第 16 号令）

《燃煤锅炉节能环保综合提升工程实施方案》（发改环资〔2014〕2451 号）

（3）其他工业源：

《石化行业挥发性有机物综合整治方案》（环发〔2014〕177 号）

即将出台的 VOCs 防治相关政策（表面涂装、包装印刷、排放权收费）

以及其他焦化、石化行业等相关行业排放标准

4.5.2 深入治理方案主要措施分析

（1）四大行业提标改造

2015 年四大行业新排放标准实施后，所有现役企业需实现达标排放，其中石家庄、保定、唐山、廊坊、定州和辛集市实施特别排放限值。2015 年底前，针对四大行业未列入《攻坚方案》的企业及工序实施脱硫脱硝除尘提标改造和建设，加强无组织排放治理，实现四大行业全面达标排放。

（2）全面推进焦化行业技术改造

河北省五十条中只涉及了钢铁企业中的焦化工序，未将独立焦化企业列入治理目标。针对焦化行业全面推进技术改造，实现达标排放。针对备煤、装煤、推焦、熄焦、筛焦等工序产生的高浓度含尘废气，须全部采取有效的烟气捕集和除尘措施，烟气捕集率不低于 90%，经干式地面

表 4-4 四大行业已有措施及强化措施

| 行业 / 部门 | 强化措施 | 已有措施 |
|---------|--|---|
| 火电行业 | 69 台燃煤机组 (1934 万千瓦) 高效除尘改造 41 台燃煤机组 (854 万千瓦) 脱硫改造 44 台燃煤机组 (1100 万千瓦) 新建脱硝, 5 台燃煤机组 (70 万千瓦) 脱硝改造 | 351 万千瓦燃煤机组除尘改造 1400 万千瓦燃煤机组脱硫改造 2107 万千瓦燃煤机组新建脱硝 |
| 钢铁行业 | 428 台烧结 (球团) 设备脱硫改造 117 家钢铁企业的全部原料场、焦炉、烧结 (球团)、高炉和转炉除尘设施改造 | 120 台烧结 (球团) 设备脱硫改造 64 家钢铁企业除尘改造 |
| 水泥行业 | 85 条约 8000 万吨熟料生产线脱硝改造和建设 81 条约 8000 万吨水泥熟料生产线除尘技术改造淘汰 4 条、约 3400 吨 / 日立窑生产线 | 67 条约 6200 万吨生产线脱硝改造和建设 40 条约 2300 万吨水泥企业除尘改造 |
| 燃煤锅炉 | 10t/h 以下 (约 5700t/h) 燃煤小锅炉全部淘汰 35t/h 以上 (约 37200t/h) 燃煤锅炉脱硫除尘改造 | 131 台 3813t/h 锅炉脱硫改造 164 条约 5600t/h 燃煤锅炉除尘改造 |

除尘站处理后达标排放。针对煤气净化工序各类贮槽尤其是苯贮槽产生的苯、酚类以及非甲烷总烃等 VOCs 烟气逸散, 须采取有效的烟气捕集和净化措施, 经洗涤塔净化后达标排放。2015 年底前, 完成 12 家钢铁企业共计 39 座焦炉综合整治。到 2016 年, 完成 66 家独立焦化企业综合整治。

(3) 推进重点行业 VOCs 防治

针对石化、医药、表面涂装、包装印刷等主要 VOCs 排放源开展治理工作。到 2016 年, 完成 28 家石油炼制与石化企业、72 家医药化工企业、32 家企业表面涂装 VOCs、104 家有机化工、40 家合成材料、7 家轮胎制造、14 家涂料油墨生产以及 14 家塑料制品企业 VOCs 整治, 实现排放达标。

(4) 加强应急管理减排

据测算, 在重污染天气启动应急预案, 将该污染时段 PM_{2.5} 浓度削减 10–20%, 最高可降低 4–8% 的 PM_{2.5} 年均浓度。强化采暖季重点工业企业污染控制, 合理调整重

点工业企业采暖季生产负荷。据测算, 保障冬季采暖需求的基础上, 适当下调采暖季工业生产负荷 10–20%, 可在年排放总量不变情况下, 将 PM_{2.5} 年均浓度削减 2–3%。

4.6 措施减排量核算

通过深入开展工业减排、促进结构调整以及全面加强环境监管, 实施燃煤锅炉淘汰改造、散煤清洁化利用、焦化行业清洁生产、钢铁行业脱硫除尘、火电行业脱硫脱硝除尘、水泥行业脱硫除尘、平板玻璃行业脱硫脱硝、石油炼制与石化行业 VOCs 治理、表面涂装 VOCs 治理、包装印刷 VOCs 治理、其他行业工艺过程 VOCs 治理以及机动车污染治理等一系列专项工作, 可分别实现 SO₂、NO_x、PM_{2.5} 以及 VOCs 减排量共计 66.0 万吨、40.4 万吨、36.5 万吨以及 29.8 万吨。采用深入治理方案, 可以实现 2017 年全省 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 VOCs 排放总量在 2013 年基础上分别下降 40%、25%、40% 和 20% 的目标。



第五章

区域空气质量动态调控技术平台应用总结



5.1 应用案例汇总

空气质量动态调控技术平台目前在河北省已实现了本地化运行和维护，服务日常大气污染治理动态评估和

重大活动空气质量保障实时评估，已应用于“九三阅兵”空气质量保障阶段性评估和后评估、年度治理工程评估、火电超低排放改造效果评估、四大专项行动评估、钢铁产能上限研究等区域大气污染防治工作。

5.2 适用范围

区域空气质量动态调控技术平台，集成源清单、空气质量模拟和源解析等多项技术，可服务于城市层面开展的PM_{2.5}来源解析、空气质量达标规划方案制定、重污染天气应急方案制订及效果评估、重大事件应对与快速评估、污染物总量减排核查核算等工作。

5.3 相关部门参与情况

牵头部门为各级政府环保部门（环保厅或环保

表 5-1 空气质量动态调控技术平台应用案例汇总

| 序号 | 应用案例 | 工作内容 |
|----|--------------|--|
| 1 | 9.3 阅兵保障评估 | 河北省空气质量保障方案实施效果近实时动态评估，测算控制方案对活动期间河北及北京空气质量改善的贡献 |
| 2 | 年度治理工程评估 | 对河北省治理工程实施进度和减排效果进行逐月动态评估，分析空气质量改善效果及逐条治理措施的贡献 |
| 3 | 火电超低排放改造效果评估 | 评估河北省火电行业超低排放改造的污染物减排及空气质量改善效果 |
| 4 | 四大专项行动评估 | 评估河北省四大专项行动实施后的减排效果和空气质量改善情况 |
| 5 | 钢铁产能上限研究 | 研究基于环境空气质量目标约束的钢铁行业产能限值（钢铁产业发展天花板），从环境约束的角度提出河北省“十三五”钢铁行业产能压减建议。 |

局)，需要配合的部门涵盖环保、发改、工信、住建、城管、质检、交通等部门。大气处发挥的支持作用是协调各部门之间的调研及基础信息的提供。

5.4 本地数据需求与来源部门

本地数据需求涉及到与社会经济发展、能源生产与消费、产业结构调整、大气污染防治相关等各类数据，来源部门包括环保、发改、工信、住建、城管、质检、交通等相关政府部门。具体数据需求与来源部门如下：

(1) 重点行业污染治理进展及下一步工作计划、挥发性有机物污染防治工作进展（环保厅、工信厅）；

(2) 产业结构调整、产业发展规划、燃煤小锅炉淘汰等工作进展及下一步工作计划（发改委、工信厅、环保厅）；

(3) 能源结构调整、煤炭消费总量控制工作落实、清洁能源发展和利用、洁净煤使用及管理等相关工作开展状况（发改委、工信、住建厅、环保厅）；

(4) 工业和民用集中供热、管网建设等现状及未来发展规划（住建厅）；

(5) 有关机动车尾气、餐饮油烟、扬尘、秸秆焚烧等管理办法、采取的行动等（环保厅、住建厅、交通厅）。

5.5 应用时间需求

系统平台的落地应用需实现本地化，时间需求为数月至一年，因各地的应用需求和数据基础而异。主要工作包括本地数据的收集调研、与系统平台的对接、模型系统的搭建、方案制定等。



清华大学



亚洲清洁空气中心

近年来亚洲清洁空气中心会同国内外相关专家学者基于城市的主要需求开发针对性的培训材料，致力于通过把知识转化为政策和行动，帮助城市环境管理者提升空气质量管理水平，从而改善空气质量。“区域空气质量动态调控技术平台及典型应用案例”是系列专题之一，由中国工程院院士、清华大学环境学院教授贺克斌团队编写。其他已开发的专题培训材料还包括“燃煤锅炉污染控制”、“涂料与油墨生产企业 VOCs 排放核算及治理技术”、“有机化工及制药行业挥发性有机物（VOCs）排放控制”等，更多材料请登录亚洲清洁空气中心搭建的在线清洁空气知识分享平台“空气知库”获取：<http://www.allaboutair.cn>。

