



清华大学
Tsinghua University

典型城市空气质量达标 及碳排放达峰路径研究报告

编制单位：清华大学

资助单位：能源基金会

2020年4月



目录

第一章	研究背景	1
第二章	研究方法	3
2.1	城市排放清单编制方法	3
2.2	城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架构建	6
第三章	郑州市实现“双达”路径分析	10
3.1	郑州市城市概况	10
3.2	经济与能源发展预测	10
3.3	重点减排任务与措施	11
3.4	减排潜力分析	12
3.5	空气质量达标和碳达峰分析	13
第四章	石家庄市实现“双达”路径分析	16
4.1	石家庄市城市概况	16
4.2	经济与能源发展预测	16
4.3	重点减排任务与措施	17
4.4	减排潜力分析	18
4.5	空气质量达标和碳达峰分析	20
第五章	湖州市实现“双达”路径分析	22
5.1	湖州市城市概况	22
5.2	经济与能源发展预测	22

5.3 重点减排任务与措施 23

5.4 减排潜力分析 24

5.5 空气质量达标和碳达峰分析 25

第六章 结论 28

6.1 “双达”路径协同分析方法总结 28

6.2 案例城市分析的结论与启示 29

参考文献 35

摘要

在经济发展和快速城市化背景下，我国面临着来自空气污染和气候变化问题的双重挑战。城市是政策落地实施的基本单元，也是减排的关键区域。相比于空气质量政策，低碳政策在城市一级的机制尚不完善，因此目前我国城市尺度协同减排主要由空气质量目标驱动。我国已有部分城市开展了空气质量达标规划研究或低碳试点工作，但开展空气质量达标和碳排放达峰协同“双达”研究的城市仍然很少。本研究建立了基于统一源分类体系与源排放表征技术方法的城市尺度温室气体和大气污染物排放的清单编制方法，并从清单出发构建了空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架。然后，以郑州、石家庄、湖州为典型案例，探讨了空气质量目标导向下城市“双达”的路径和策略，为国家和地方机构改革背景下“双达”在城市层面的实践提供研究参考和决策依据。

研究表明，为实现“双达”目标，除末端控制措施外，必须进行能源结构、产业结构和运输结构的深度调整。空气质量政策下，工业部门（包括电力、热力生产）是碳减排协同效益最大的部门，电力结构调整、落后产能淘汰和燃料清洁化替代等政策具有协同效益，是各城市应当优先考虑的措施。城市民用和交通部门的未来能源需求在较长一段时间内难以达峰，未来工业部门减排潜力将逐渐减小，城市应当进一步关注产业结构转型，以及民用、交通部门能源需求总量控制和燃料结构低碳化转型，否则仍然存在碳排放再度回弹的风险。外购电、机动车电动化等政策是否存在协同减排效益很大程度上取决于电力结构，凸显了在终端电气化进程下电力清洁生产的重要性。

本研究是探索城市“双达”路径的一次积极尝试，也总结了案例城市的减排经验、给出了相应的政策建议。受限于案例城市的数量，一些问题的规律尚不明确，有待于未来在更多的典型城市开展研究、进行深入讨论。

第一章 研究背景

在经济发展和快速城市化背景下，我国面临着来自空气污染和气候变化问题的双重挑战。近年来，以 $\text{PM}_{2.5}$ 为特征的大气复合污染给我国人民身体健康和社会经济发展造成了不利影响。2013 年 9 月，国务院发布实施《大气污染防治行动计划》，推动我国大气污染防治进入新阶段。2018 年，京津冀、长三角和珠三角三个重点区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度分别比 2013 年下降了 48%、39% 和 32%，成效显著。然而，2018 年全国 338 个地级及以上城市中仅 121 个城市环境空气质量达标，总体空气污染形势不容乐观。气候变化方面，作为负责任的大国，中国向《联合国气候变化框架公约》提交《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》文件，确定了到 2030 年的自主贡献目标，包括 2030 年左右二氧化碳排放达到峰值并争取尽早达峰、单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%。研究显示 2017-2019 年中国碳排放出现反弹，终止了中国碳排放 2013-2016 年平稳下降的趋势[1]。未来一段时间我国能源需求总量还会持续增长，能源转型面对着较大压力，实现我国 2030 年左右碳排放达峰的目标仍面临着挑战。

我国以化石燃料为主的一次能源结构决定了我国温室气体和大气污染物排放具有高度同源性。控制策略方面，常见的除末端控制外的大部分减排策略都能够同时减排大气污染物与二氧化碳，如煤炭总量管控、节能改造和非化石能源替代等，其本质是减少化石燃料尤其是煤炭的燃烧量。因此，现有的空气质量改善政策实际具有碳协同减排效益。经过新一轮的机构改革，目前应对大气污染和气候变化职能均隶属生态环境部管理，如何实现温室气体和大气污染物协同治理是管理部门面临的新课题。城市是政策落地实施的基本单元，是我国未来实现空气质量目标和碳达峰目标的关键区域。相比仍然主要停留在宏观层面的应对气候变化目标，城市空气质量管理的体系更为完善、目标更为明确。《大气污染防治法》明确要求空气质量未达标城市应当依法编制大气环境质量限期达标规划。目前还有 2/3 的城市空气质量未达标，2030 年前我国城市减排路径仍将以空气质量目标为主导。目前，广州、大连、

成都等部分城市已经开展空气质量达标规划研究，北京、武汉等城市提出了碳排放达峰目标，但开展空气质量达标和碳排放达峰协同“双达”研究的城市仍然很少。我国城市发展水平不一、经济结构差异较大，呈现出多元化的特点。如何根据城市特点制订协同减排路径，对未来实现协同减排具有关键意义。

本研究的主要目标包括：

- (1) 建立基于统一源分类体系与源排放表征技术方法的的城市尺度温室气体和大气污染物排放的清单编制方法；
- (2) 建立经济-能源-排放耦合动态响应分析方法以及城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架；
- (3) 以郑州、石家庄和湖州为典型案例城市，进行能源、经济发展预测，制定符合其城市发展的城市协同“双达”路径，综合评估产业、能源、交通、用地结构调整各措施带来的减排效益。
- (4) 基于典型城市的实践案例，探讨空气质量目标导向下城市“双达”的路径和策略，为国家和地方机构改革背景下“双达”在城市层面的实践提供研究参考和决策依据。

第二章 研究方法

2.1 城市排放清单编制方法

建立统一的城市尺度温室气体和大气污染物排放清单是探索城市协同减排路径的基础。以往城市尺度温室气体和大气污染物排放清单编制工作分开进行，存在数据核算边界不同、口径不一、部门分类不同等问题，不利于识别重点减排领域以及评估协同减排潜力。为此，本研究建立了基于统一源分类体系与源排放表征技术方法的城市尺度温室气体和大气污染物排放的清单编制方法。

建立城市尺度温室气体和大气污染物排放清单首先应当明确城市排放源的构成，然后通过调查收集活动水平、排放系数、技术分布和末端控制等相关数据信息，最终计算得到排放量。本研究中介绍的城市尺度温室气体和大气污染物排放清单涵盖了城市管辖的地理范围内的所有排放源，包含 SO_2 、 NO_x 、 VOC 、 CO 、 NH_3 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 BC 、 OC 等气态和颗粒态污染物，以及最重要的温室气体 CO_2 。从空气质量达标的角度来看，只需考虑城市边界内一次能源消费和工业过程产生的大气污染物排放，不考虑二次能源如电力、热力消耗以及产品上游产生的排放。大气污染物排放量采用下式计算：

$$E_i = \sum_j \sum_k \sum_m \sum_n A_{i,j,k} X_{i,j,k,m} EF_{RAW,i,j,k,m} C_{i,j,k,m,n} (1 - \eta_n)$$

其中， i 代表城市； j 代表排放部门/行业； k 代表燃料/产品； m 代表燃烧/工艺技术； n 代表末端控制技术； A 代表活动水平，如燃料消耗量或产品产量； X 代表某项燃烧/工艺活动水平占总活动水平比例； EF_{RAW} 代表未经末端控制技术处理的排放系数； C 代表某项末端控制技术渗透率； η 代表某项末端控制技术对污染物的去除效率。

二氧化碳排放量的计算公式较为类似，但由于碳捕集技术等末端控制措施还未普及，一般可不考虑，采用下式计算：

$$E_i = \sum_j \sum_k \sum_m \sum_n A_{i,j,k} X_{i,j,k,m} EF_{i,j,k,m}$$

参数意义同上。

从以上计算公式可以看出，建立城市尺度温室气体和大气污染物排放清单首先应当明确城市排放源的构成，然后通过调查收集活动水平、排放系数、技术分布和末端控制等相关数据信息，最终计算得到排放量。

准确识别排放源是清单编制的首要环节，也是确定排放量计算方法、收集活动水平和排放系数的根本依据。本研究中的源分类参照《城市大气污染物排放清单编制技术手册》[2]，将我国人为大气污染源分为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、废弃物处理源和其它排放源十大类。编制城市大气污染物和温室气体排放清单应首先针对清单编制区域内排放源进行摸底调查，根据当地行业和燃料/产品特点在源分类分级体系中选取合适的第一、二级排放源类型，确定活动水平数据调查和收集对象。在数据调查和收集阶段应当涵盖排放源第三、四级分类涉及的所有燃烧/工艺技术和污染物末端控制技术，在数据整理过程中根据当地排放源特点确定源清单覆盖的第三、四级分类。根据本地排放源体系和数据调查情况，基于第一级排放源分类确定合适的清单编制方法和流程，根据第二到四级排放源分类确定计算参数获取途径和来源。

针对污染物产生机理和排放特征的差异，按照部门/行业、燃料/产品、燃烧/工艺技术以及末端控制技术可将每类排放源分为四级，自第一级至第四级逐级建立完整的排放源分类分级体系。第三级排放源重点识别排放量大、受燃烧/工艺技术影响显著的重点排放源。对于排放量受燃烧/工艺技术影响不大的燃料和产品，第三级层面不再细分，在第二级下直接建立第四级分类。

以固定燃烧源为例，四级结构示意图如图 2-1 所示，其中第四级为除尘技术。

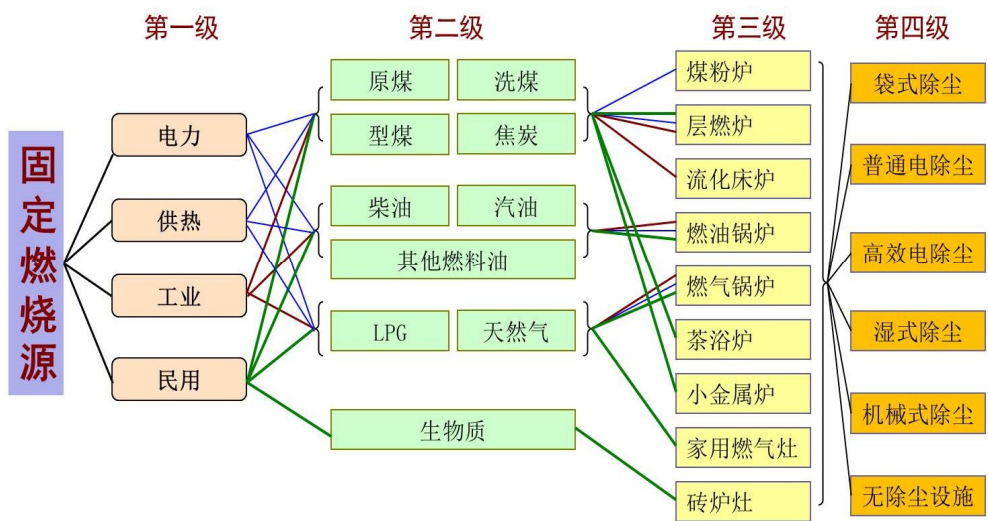


图 2-1 固定燃烧源四级结构示意图

针对火电、钢铁、水泥、玻璃等高耗能、高污染的重点工业行业，可基于设备和工序建立排放表征模型。对于其它工业行业，针对化石燃料固定燃烧源、工艺过程源和溶剂使用源排放特征差异，分别建立基于设备和技术的排放表征方法。图 2-2 以水泥行业为例展示了本研究建立的基于产品-生产工艺-控制技术的动态排放表征模型。我国现有的水泥生产工艺技术包含立窑、回转窑、新型干法窑，不同的生产工艺体现了不同的排放水平，水泥行业主要产生的污染物为颗粒物和氮氧化物，因此污染物控制技术包含除尘措施和脱硝措施两类，除尘措施包含旋风除尘、湿法除尘、静电除尘及布袋除尘等，脱硝措施包含低氮燃烧器、SNCR 及 SCR 等，不同的控制技术的去除效率不同。

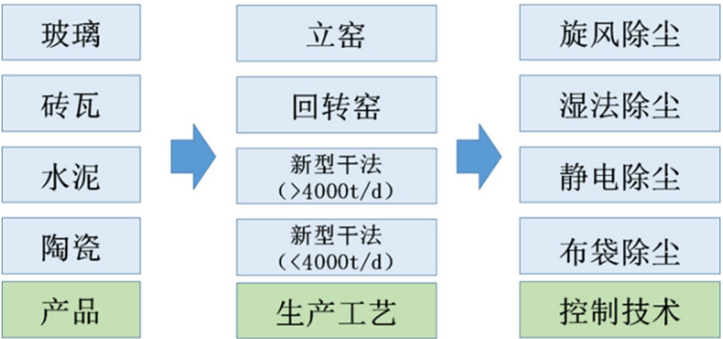


图 2-2 动态排放表征模型（以水泥行业为例）

确定城市本地排放源构成后即可开始收集活动水平、排放系数、技术分布和末端控制等相关数据信息。收集活动水平数据时，针对第四级排放源逐一制订活动水平调查方案，建立活动水平调查清单，确定调查流程，明确数据获取途径。数据调查收集过程可与现有数据统计体系结合，从环境统计、污染源普查和排污申报等数据库中获取相关信息。活动水平调查时尽可能收集与基准年份对应的数据。基准年份数据缺失的，可采用相邻年份数据，并根据社会经济发展状况进行调整。如果城市有完整的能源平衡表和工业产品产量则应作为对应年份城市排放源活动水平的总约束，对于存在差异的排放源应分析核对并进行适当调整。

污染物的排放系数获取方法一般包括实测法、物料衡算法和文献调研法。应优先采用实测法，如条件不允许可选用物料衡算法和文献调研法，各城市可根据自身实际工作基础选用合适的排放系数获取方法。实测法是指对污染源开展测试，获取实际工况条件下的排放系数，有条件的城市可针对当地重点排放源开展实际测试，国控重点源可根据在线监测浓度计算排放系数。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系数，大型和中型燃煤设备的二氧化硫和颗粒物排放系数可采取物料衡算法估算。文献调研法是指通过从科技文献、排放系数数据库等资料中收集整理相近燃料/产品、工艺技术、污染控制技术的排放测试结果，获取对应排放系数的方法。

CO₂ 的排放系数获取主要来自研究测试、企业生产检测以及国际或国家推荐数据。一般可采用国家推荐数据（如《中国温室气体清单研究》、《2005 年中国温室气体清单研究》、《省级温室气体编制指南》、《中国城市温室气体清单编制指南》等），如果城市的生产工艺、生产技术水平或者燃料类别和国家平均水平显著不同，则应自行开展排放系数研究，根据实测的燃料含碳量、低位发热值和氧化率计算排放系数。

2.2 城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架构建

本研究基于城市大气污染物和温室气体排放清单搭建了城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架，见图 2-3。该分析框架分为城市空气质量达标路径分析和城

市碳排放达峰路径分析两个部分。首先，以城市空气质量为目标导向，基于未来社会经济参数和空气质量目标下的相关政策获取未来的能源需求情景；然后，分别计算城市各部门二氧化碳和大气污染物的排放量，进一步进行空气质量达标和碳达峰路径分析。通过对比基准情景和政策情景，可分析不同能源政策、产业结构以及技术应用对温室气体和大气污染排放的影响。

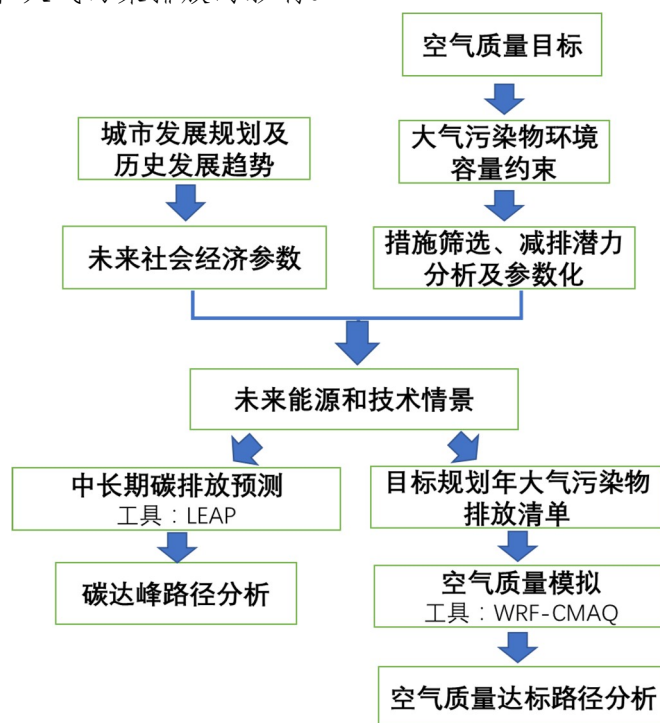


图 2-3 城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架

城市空气质量达标路径分析技术方法见图 2-4。首先通过收集和分析城市空气质量和污染源情况，进行问题及成因分析，并根据社会经济与能源发展预测及空气质量改善达标要求确定城市空气达标期限与阶段目标；其次进行空气质量达标关键问题识别，主要进行区域传输规律、关键污染因子、重点行业企业及空间敏感性识别。再次，从产业、能源、交通、用地结构制定可行的污染控制方案，并评估各项措施可能带来的污染物减排量。最后利用 WRF-CMAQ 空气质量模型，模拟可实现的空气质量改善效果。若可达到城市空气质量目标，则此方案为城市最优空气质量改善行动方案；若未达标，则继续调整管控情景，最终得到最优的达标情景。

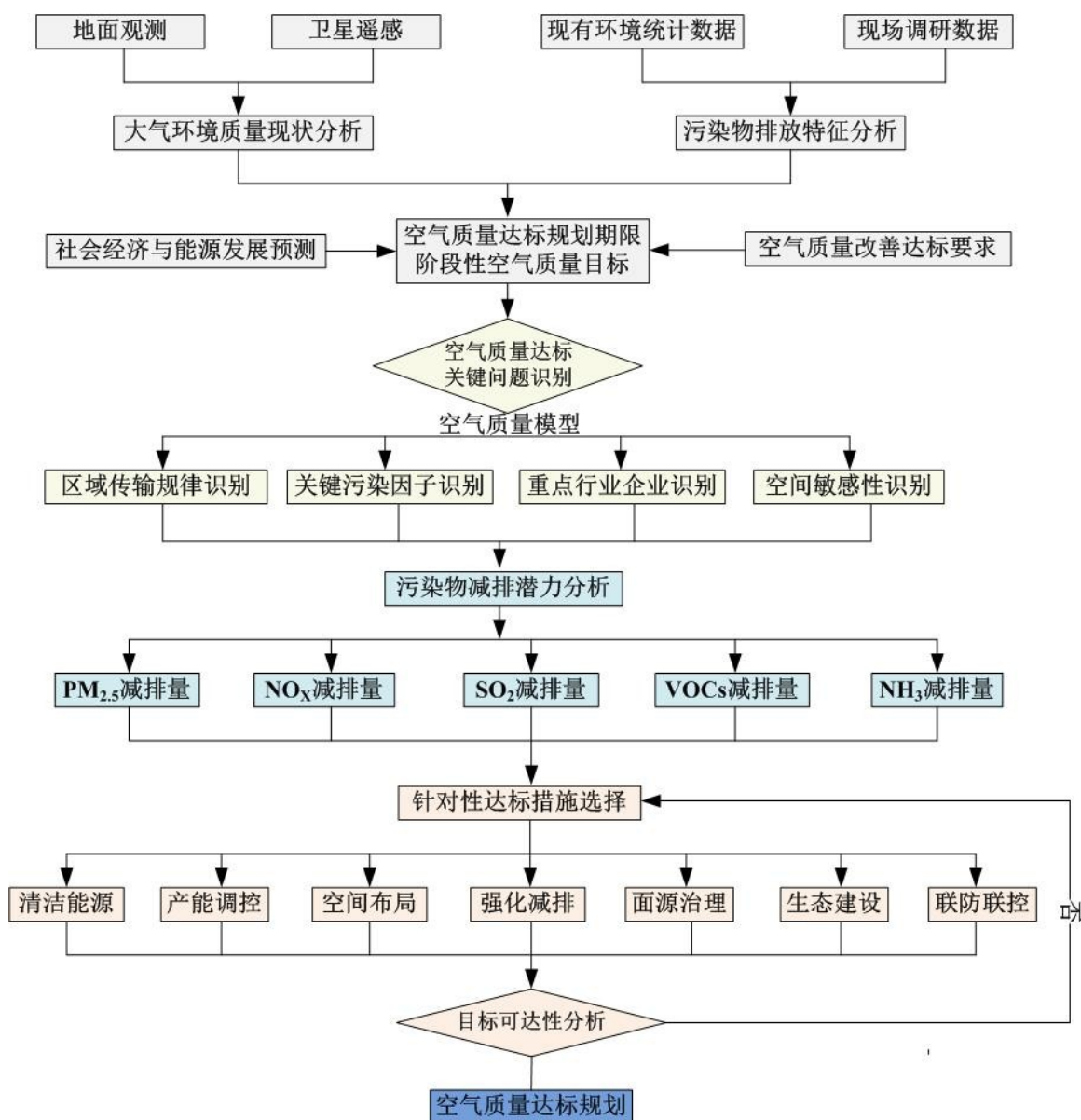


图 2-4 城市空气质量达标技术路线

城市碳达峰路径分析方法基于 LEAP (Long range Energy Alternatives Planning, 长期能源替代规划系统) 搭建, 技术路线见图 2-5。LEAP 是一个自下而上的能源模型, 有较为灵活的数据结构, 内置了多种技术和末端使用细节, 为参数设置提供了大量的选择, 被广泛用于城市中长期能源供需和碳排放预测。碳达峰路径分析的基准年和城市空气质量规划保持一致, 为 2017 年。三个案例城市的预测年份为 2017-2035 年。模型使用的主要数据来源包括三个城市的官方统计年鉴、环境统计数据以及调研数据。输入基准年数据后, 首先需要运行模型并进行参数校准, 直到模

型能较为准确地反映城市能源消耗和碳排放情况。在讨论城市碳达峰的时候，为鼓励城市节能节电、减少间接碳排放，可在 2.1 节中介绍的城市直接碳排放基础上进一步考虑外购电力产生的间接碳排放，使用购电量乘以区域排放因子进行计算。

LEAP 计算获得的碳排放是从终端角度出发的，例如民用部门使用的电力产生的碳排放会被归于电力生产部门。为更直观地反映各部门的贡献，本研究在对案例城市进行碳排放分析时进行了再分配，计算公式如下：

$$Emis_i = \sum_{j,k} (DirectEmis_{i,j} + IndirecEmis_{i,k})$$

$$IndirecEmis_{i,k} = \frac{Demand_{i,k}}{Demand_k} \times ProEmis_k$$

其中， i 代表部门， j 代表一次能源，如煤炭、天然气等； k 代表二次能源，主要是电力和热力。 $DirectEmis_{i,k}$ 代表终端直接排放。 $IndirecEmis_{i,k}$ 代表间接排放， $Demand$ 指能源需求， $ProEmis$ 指生产该燃料的加工转换模块产生的总排放。

本研究设置了基准情景（BAU）和空气质量达标情景（AQP）。两个情景的未来宏观社会经济参数（人口、GDP 等）设置和空气质量达标路径分析中一致，区别在于 BAU 不再考虑新的空气质量政策，而 AQP 则参数化了空气质量达标规划中能够产生碳减排协同效益的相关政策和措施，用于预测未来空气质量目标下的碳达峰情况。通过对比两个情景，可进一步分析空气质量政策下各个部门的碳减排贡献。

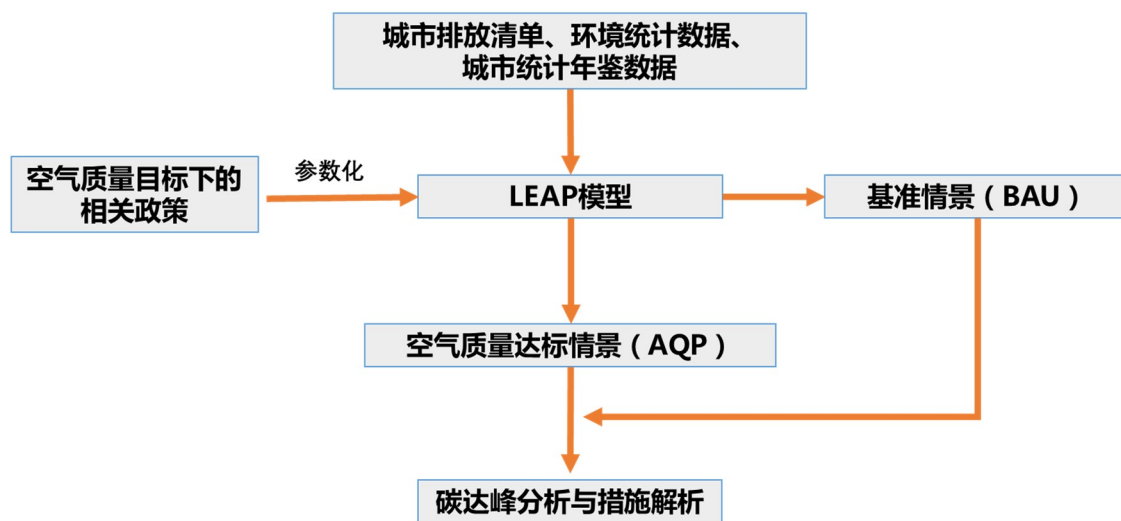


图 2-5 城市碳达峰分析技术路线图

第三章 郑州市实现“双达”路径分析

3.1 郑州市城市概况

郑州市为快速发展的工业城市代表，为河南省省会，居河南省中部偏北，市辖 6 区 5 市 1 县，全市总面积 7446 平方公里，2017 年全市年末总人口 988.1 万人，城镇化率 72.2%。2017 年郑州市一、二、三产比例为 1.5:43.9:54.7，煤炭消费量占能源消费总量 63.2%，机动车保有量已突破 400 万辆，在全国排名第七。郑州 2017 年共排放 2.5 万吨 SO₂、12.7 万吨 NO_x、17.4 万吨 VOCs、3.0 万吨 NH₃、19.1 万吨 PM₁₀、6.3 万吨 PM_{2.5} 和 7256 万吨 CO₂。

郑州市 2017 年 PM_{2.5} 年均浓度为 66μg/m³，超过国家二级标准限值 88.6%；PM₁₀ 年均浓度为 118μg/m³，超过国家二级标准限值 68.6%；NO₂ 年均浓度为 54μg/m³，超过国家二级标准限值 35.0%。O₃ 日最大 8 小时值第 90 百分位浓度为 199μg/m³，超过国家二级标准限值 24.3%。考虑郑州市的空气质量现状，可采取的行动措施及郑州市相关城市规划，制定郑州市空气质量达标目标：到 2028 年，PM_{2.5} 达到国家环境空气质量二级标准 35μg/m³。

3.2 经济与能源发展预测

依据《郑州建设国家中心城市行动纲要（2017-2035 年）》，郑州市已开启全面建设国家中心城市新征程，在 2020-2035 年期间，目标建设成为国家中心城市，基于国家全面开放二胎政策等人口政策，结合实际人口增长数据，预测到 2028 年，郑州市城镇人口为 1043.2 万，城镇化率达到 82.7%。按 2016-2020，2021-2025，2026-2028 年中国国内生产总值年均增速分别为 6.8%，5.5%和 4.5%，结合郑州市历年生产总值年增长率，预测到 2028 年郑州市生产总值为 2.2 万亿元。根据弹性系数法，郑州市“十二五”、“十三五”以及 2021-2028 年的弹性系数分别分 0.33、0.31 和 0.21，预测郑州市 2028 年能源消费量为 4053.6 万吨标准煤。

3.3 重点减排任务与措施

加快调整能源结构,建设清洁低碳能源体系。郑州市煤炭消费总量目标为到 2028 年煤炭消费占一次能源消费比重降到 40%以下。煤炭消费量主要通过有序控制电厂用煤、削减非电用煤及提高清洁能源利用水平实现。削减电厂用煤量主要措施为主城区煤电机组清零、全部关停 30 万千瓦等级及以下燃煤机组及提高供电煤耗。削减的煤电及新增用电主要依靠加大可再生能源比重及外购绿电替代。削减非电用煤量包括民用煤和工业企业用煤,民用采暖用煤主要通过大力发展热电联产集中供热工程、推进可再生能源供暖工程及加强农村清洁能源取暖实现,农村清洁取暖率达到 100%。工业企业用煤主要通过煤改清洁能源和提高工业企业能源效率实现,到 2028 年全市单位生产总值能源消耗较 2017 年下降 35%。同时,需扩大绿色建筑规模,发展超低能耗或近零能耗建筑建设。

调整优化产业结构,构建绿色低碳产业体系。源头上严格环境准入标准,严控“两高”行业产能、严格控制燃煤项目、加严涉 VOCs 项目建设等措施严禁高污染高耗能企业进入。同时,控制落后、低效、过剩产能,加大全市水泥、棕刚玉、石灰、石材、氯化石蜡、铸造、磨料磨具、电解铝、耐火材料、砖瓦等行业产能淘汰力度,进行行业整体提升,同时防止“散乱污”企业死灰复燃,并发展节能环保绿色低碳产业。同时,对保留的钢铁、水泥、有色金属、耐材、陶瓷等非电行业进行提标改造,同时进行工业炉窑专项整治、挥发性有机物专项整治。到 2028 年,全市重点行业企业可以实现有组织、无组织及物料运输体系全流程超低排放。

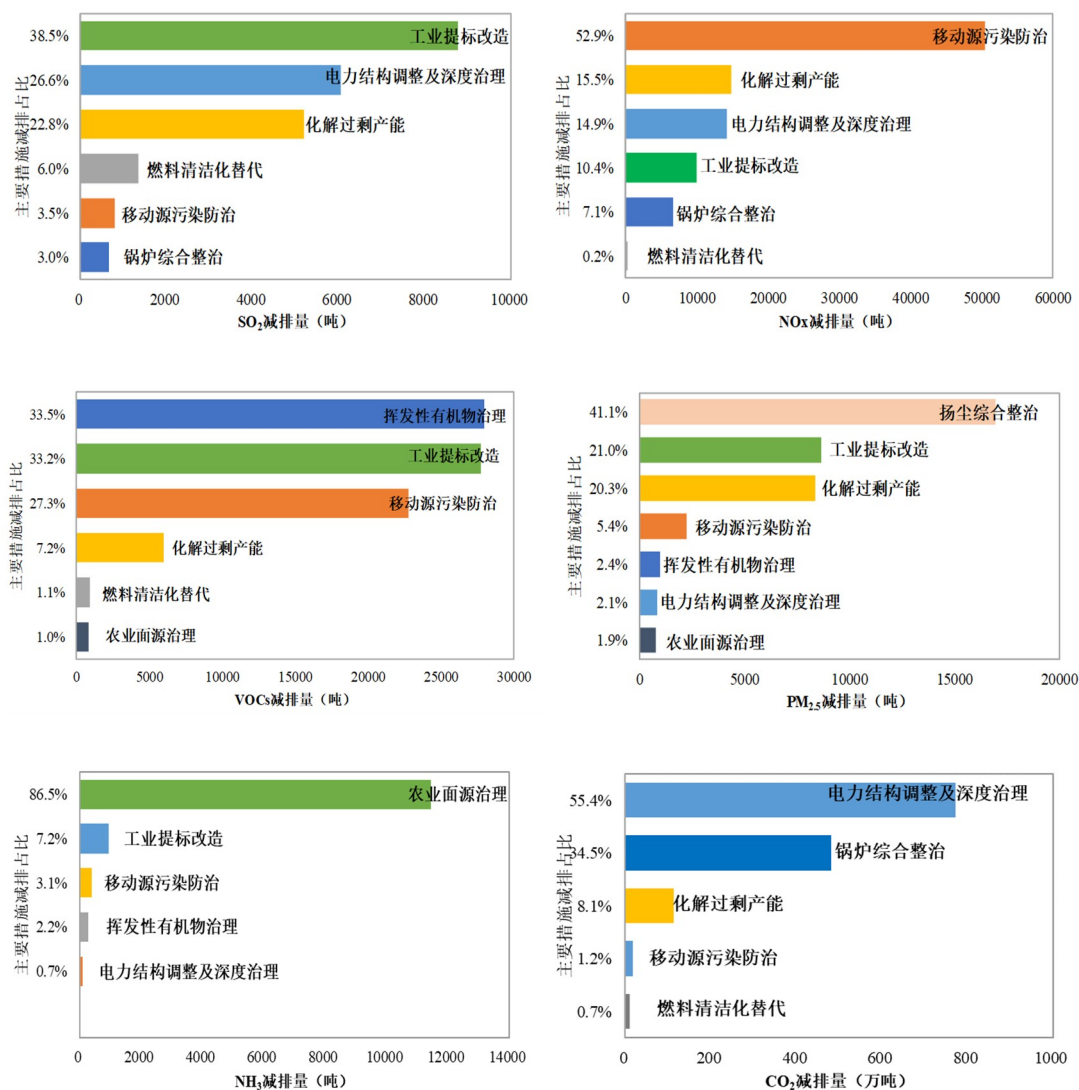
积极调整运输结构,完善绿色低碳交通体系。大幅提高铁路货运比例、大力发展多式联运和建设城市绿色物流体系等,到 2028 年铁路货运量占比达到 35%。同时,开展城市生产生活物资公铁接驳配送试点,构建“外集内配、绿色联运”的公铁联运城市配送新体系。完善绿色交通体系,到 2028 年公共交通机动化分担率达到 73%以上,并在集中办公或商贸区域研究规划“零排放行驶区域”,同时制定完成郑州市燃油机动车保有量控制计划及实施方案,逐年提高新能源小客车购置比例,到 2020 年,郑州市城市建成区公交车、出租车、市政环卫、轻型物流配送车等领域全部实

现电动化；到 2028 年，新能源小客车购置比例达到 80%以上。到 2025 年，淘汰全部国三及以下营运柴油车。

优化调整用地结构，推进面源污染治理。加强施工扬尘管理、强化道路扬尘管理及实施堆场扬尘治理等方面来进行，主要为全面落实“八个百分百”、可机械化清扫路面基本全部实现机械化清扫，机扫路面每平方米浮土达到 3 克以下，重点区域的煤场、料场、渣场实现在线监控和视频监控 100%覆盖。对于农业面源污染，建立和完善秸秆收储体系，促进秸秆资源化利用；加大畜禽粪污资源化利用，到 2028 年，畜禽粪污基本全部实现生态消纳或达标排放；大力推进种植业肥药减量增效，实现化肥、农药使用量负增长，到 2028 年，化肥利用率达到 50%以上。同时，调整用地结构还需实施绿色碳汇工程，通过规划建绿、拆违建绿、见缝插绿、留白增绿，大幅增加城市绿地面积。到 2028 年，城市建成区绿地（含立体绿化、屋顶绿化）率达到 40.0%。

3.4 减排潜力分析

以郑州市 2017 年大气污染源排放清单为基础，根据郑州市在能源、产业、交通及用地结构的调整规划，本研究预测了到 2028 年郑州市新增机动车和天然气的排放增量，并进行了减排措施评估。到 2028 年，郑州市 SO_2 、 NO_x 、 VOCs 、 NH_3 和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放总量将分别较 2017 年下降 74.5%、70.4%、56.4%、43.2%和 65.7%。通过对比各类措施发现，对 SO_2 减排贡献最高的措施是工业提标改造，约占减排总量的 38.5%，对 NO_x 减排贡献最高的措施是移动源污染防治，约占减排总量的 52.9%，对 VOCs ，减排贡献最高的措施是挥发性有机物治理，约占减排总量的 33.5%，对 NH_3 减排贡献最高的是农业面源治理，约占减排总量的 86.5%，对 $\text{PM}_{2.5}$ 减排贡献最高的措施是扬尘综合整治，约占减排总量的 41.1%，对 CO_2 减排贡献最高的措施是电力结构调整及深度治理，约占减排总量的 55.4%。

图 3-1 主要措施对污染物和 CO₂ 减排的贡献评估

3.5 空气质量达标和碳达峰分析

基于污染物削减比例，本研究建立了 2028 年郑州市排放清单，并利用空气质量模型开展模拟，通过综合考虑郑州市本地减排和周边区域减排的影响，对 2028 年郑州市主要大气污染物模拟年均浓度开展分析。通过模拟结果可知，污染控制措施实施后，到 2028 年，郑州市 PM_{2.5} 浓度相比 2017 年下降 49.5% (32.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)，达到 33.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。

基于 LEAP 模型模拟得到的郑州市碳排放量见图 3-2。BAU 情景下，由于各部

门的能源结构和能源强度未来没有大的改善，此后随着经济发展、能源需求量的提升，碳排放量将持续快速增长。AQP 情景，即郑州市空气质量在 2028 年达标的情景下，郑州市碳排放峰值可在 2025 年达到峰值（7970 万吨）后平缓下降。相较 BAU，AQP 情景下 2020 年、2025 年和 2030 年的碳排放分别减少了 332 万吨、978 万吨和 1701 万吨。

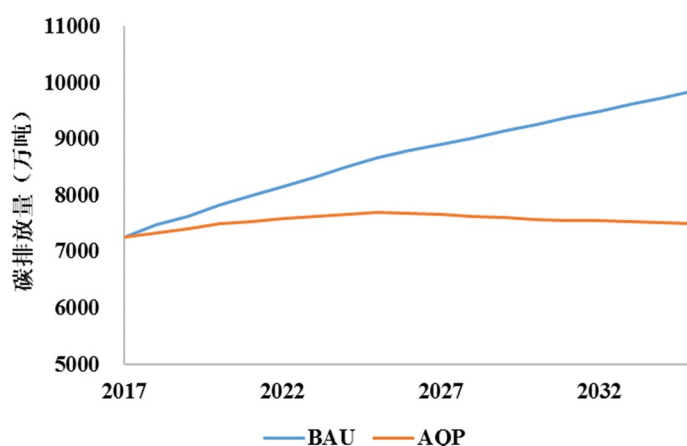


图 3-2 郑州市长期碳排放量预测情景

AQP 情景下分部门的碳排放情况见图 3-3。工业部门碳排放自 2017 年起大幅下降，工业部门碳减排的驱动力分为两个方面：一是终端工业用能需求的整体下降，主要由水泥、有色金属行业等高耗能行业的淘汰低效、过剩、落后产能和单位产品/增加值能耗下降主导；二是发电结构清洁化，到 2035 年郑州市煤电发电占比将下降至 50%，带来显著的碳减排效益。对于民用部门和公共建筑部门，主要通过推进电气化来减少建筑部门的污染物排放，同时考虑建筑节能改造和家电节能技术进步，然而，随着人民生活水平的提高、第三产业的快速发展，总体来看建筑部门能耗需求仍将增长，2035 年碳排放无法达峰。对于交通部门，郑州市未来将调整运输结构，在货运、公共车辆中大力推行新能源汽车，但随着机动车保有量的增长，郑州市交通部门的总体能源需求量和碳排放量仍将上升。

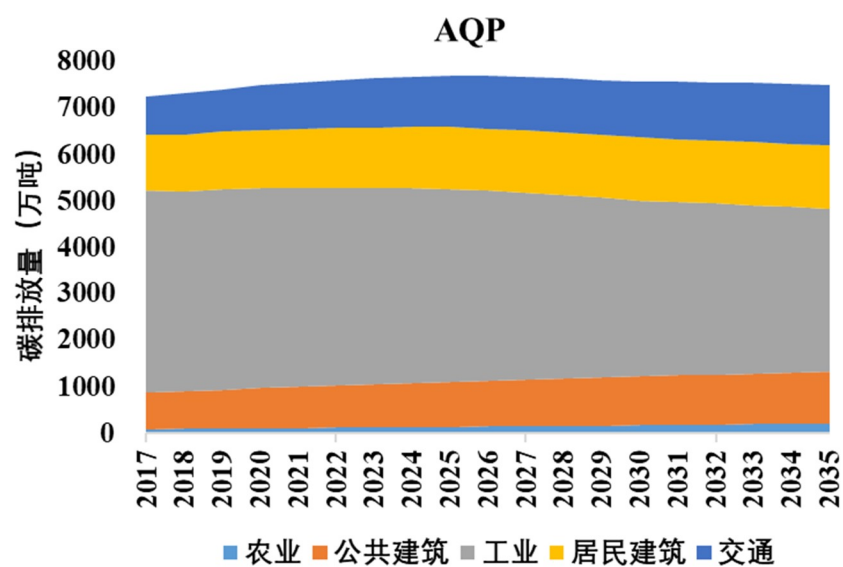


图 3-3 郑州市空气质量达标情景下的分部门碳排放

第四章 石家庄市实现“双达”路径分析

4.1 石家庄市城市概况

石家庄市为煤炭消费型城市代表，为河北省省会，地处河北省中南部，东与衡水接壤，南与邢台毗连，西与山西为邻，北与保定为界，市辖区总面积 15848 平方公里，2017 年全市年末常住人口 1088.0 万人，常住人口城镇化率为 61.6%。2017 年石家庄市一、二、三产比例为：7.4:45.1:47.5，煤炭消费量占能源消费总量 69%，汽车保有量达到 256 万辆，在全国城市中位列第 13。石家庄 2017 年共排放大气污染物 SO₂、NO_x、VOCs、NH₃、PM₁₀、PM_{2.5} 和 CO₂ 的排放量分别为 6.7 万吨、13.4 万吨、12.3 万吨、13.1 万吨、17.7 万吨、8.4 万吨和 9745 万吨。

石家庄市 2017 年 PM_{2.5} 年均浓度为 86μg/m³，超过国家二级标准限值 145.7%；PM₁₀ 年均浓度为 158μg/m³，超过国家二级标准限值 125.7%；NO₂ 年均浓度为 54μg/m³，超过国家二级标准限值 35.0%；O₃ 日最大 8 小时值第 90 百分位浓度为 201μg/m³，超过国家二级标准限值 24.3%。考虑石家庄市的空气质量现状，可采取的行动措施及石家庄市相关城市规划，制定石家庄市空气质量达标目标：到 2033 年，PM_{2.5} 达到国家环境空气质量二级标准 35μg/m³。

4.2 经济与能源发展预测

依据《石家庄市城市总体规划》(2018-2035)，基于 CPPS 模型，石家庄 2033 年为 1201 万人，城镇化率达到 77%。结合石家庄市统计年鉴中 2008-2017 年生产总值年增长率，采用弹性系数法，预测到 2033 年石家庄市生产总值为 1.2 万亿元。在河北省统计局官方网站获取到石家庄市 2005-2017 年的历年单位 GDP 能耗数据，根据单位 GDP 能耗法，预测 2033 年石家庄市万元 GDP 能耗为 0.42 吨标准煤，能源消费总量在 5095.3 万吨标准煤左右。

4.3 重点减排任务与措施

加快调整能源结构，建设清洁低碳能源体系。煤炭消费总量控制措施主要为有序控制电厂用煤、削减非电用煤、严格进行高污染燃料禁燃区管理，通过综合减煤措施，到 2033 年，煤炭消费占一次能源消费比重降到 45% 以下。构建清洁低碳取暖体系主要措施为扩大集中供热覆盖范围、加快清洁能源供热热源建设及加强农村清洁能源供暖，2020 年，全市平原农村地区分散燃煤基本“清零”，到 2033 年全市县级以上建成区全部实现集中供热和清洁能源供热。推进可再生能源利用主要措施是积极开展地热、风电、光伏和生物质能源利用项目建设，鼓励发展县域生物质热电联产、生物质成型燃料锅炉及规模化生物质天然气。到 2033 年，非化石能源占能源消费总量比重达到 18% 以上。提高能源利用效率主要措施为实施能源消耗总量和强度双控行动、加强重点能耗行业节能。

调整优化产业结构，构建绿色低碳产业体系。石家庄市工业门类较为齐全，但产业结构较粗放，行业过剩产能严重，传统产业与高新技术产业发展不相称。对比周边省会城市或直辖市，石家庄的单位国民生产总值排放强度最高，因此一方面，需要通过严控“两高”行业产能、搬迁升级项目严格管理、严格控制新增燃煤项目建设、加严涉 VOCs 项目建设等措施严格环境准入，另一方面需要重点推进钢铁、水泥、焦化、火电、铸造（精密铸造除外）、有色、炭素、钙镁、煤化工、陶瓷、砖瓦等行业压减低效过剩产能，优化产业结构。同时，对钢铁、焦化、水泥、玻璃、耐材、陶瓷等非电行业进行提标改造，对工业炉窑、挥发性有机物进行专项整治，并同时推进园区综合治理，到 2033 年，全市重点行业企业可以实现有组织、无组织及物料体系全流程超低排放。

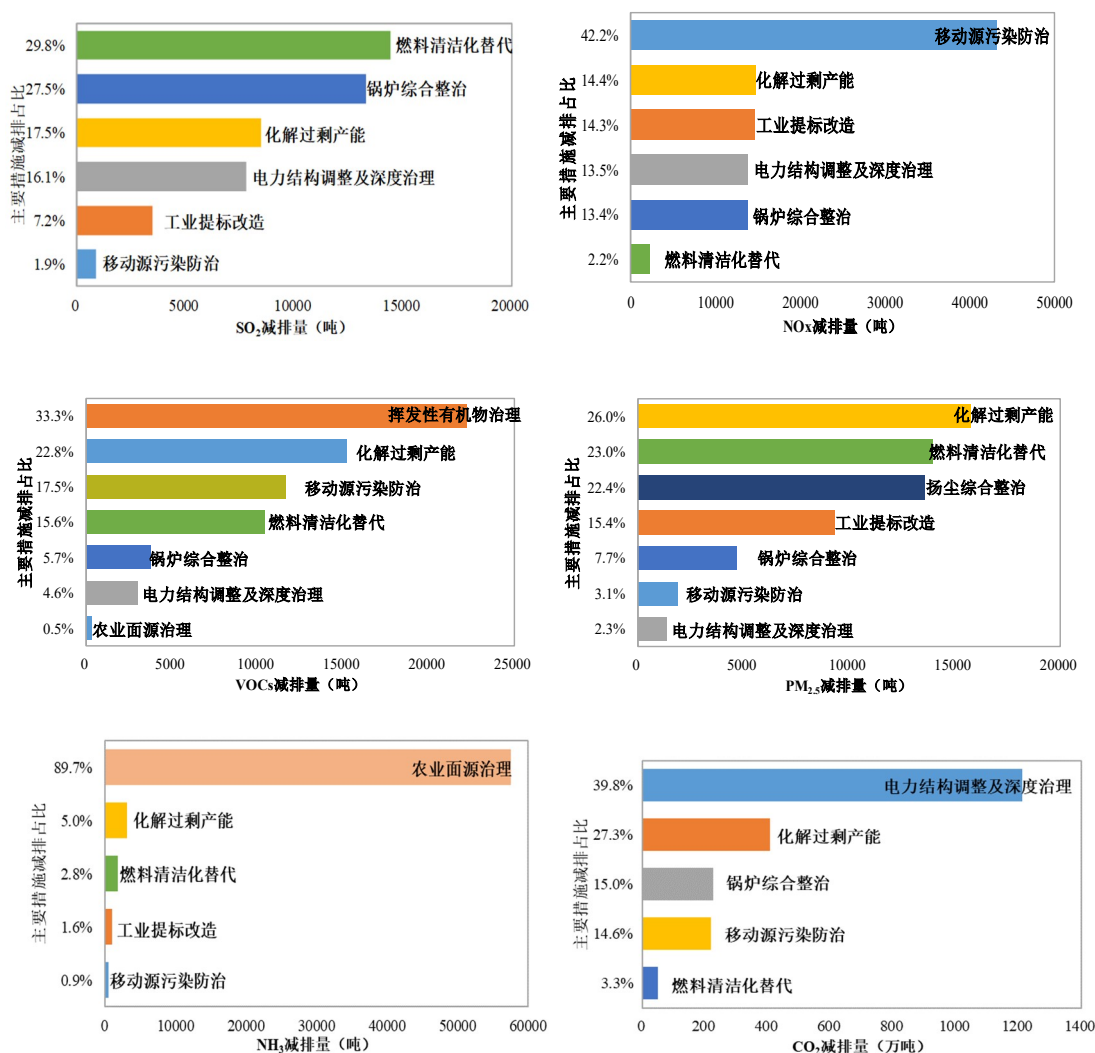
积极调整运输结构，完善绿色低碳交通体系。通过鼓励钢铁、电力等重点企业和大型专业化物流园区、交易集散地新建或改扩建铁路专线，到 2033 年，钢铁、电力等重点企业铁路专用线运输比例达到 80% 以上。优化调整地铁进出站口及公交站点布置，实现公共交通“无缝衔接”，到 2033 年公共交通机动化分担率达到 70% 以上，并在集中办公或商贸区域研究规划“零排放行驶区域”。积极推广新能源车，到 2033 年，全市公交、环卫、邮政、出租、通勤、轻型物流配送全部更换为新能

源车。由于石家庄市老旧车、高排放柴油车对污染物排放贡献率较大，因此还需加大老旧车淘汰力度和重型柴油车整治力度。到 2033 年，力争淘汰全部国四及以下排放标准的柴油车和国三及以下排放标准的汽油车。非道路移动机械防治主要为划定并公布禁止使用高排放非道路移动机械的区域，实施非道路移动机械第四阶段排放标准。

优化调整用地结构，推进面源污染治理。施工扬尘方面，各类工地严格落实“六个百分百”。道路扬尘方面，推行“以克论净、深度保洁”的作业模式，加强城乡结合部道路维修，加大村镇道路的保洁力度，到 2025 年，全市平均降尘量控制在 5 吨/月·平方公里以内。工业堆场方面，对重点区域的煤场、料场、渣场实现在线监控和视频监控 100%覆盖。加强农业面源控制。一是加大禁止农作物秸秆露天焚烧，建立和完善秸秆收储体系，促进秸秆资源化利用；二是大力发展低碳农业，到 2033 年，化肥利用率达到 50%以上。同时，实施绿色碳汇工程，通过加大矿山整治、平原绿化行动、城市土地硬化和复绿、农村裸露土地治理等措施大幅增加城市绿地面积，到 2033 年，全市森林覆盖率达到 50%以上。

4.4 减排潜力分析

基于石家庄市 2017 年大气污染源排放清单，通过预测 2033 年石家庄市新增机动车和天然气的排放增量，根据石家庄市在能源、产业、交通及用地结构的调整规划，通过减排措施评估，到 2033 年石家庄市将实现 SO₂、NO_x、VOCs、NH₃ 和一次 PM_{2.5} 排放总量分别较 2017 年下降 72.6%、72.2%、53.1%、49.0%和 71.7%。通过对比各类措施发现，对 SO₂ 减排贡献最高措施是燃料清洁化替代，约占减排总量的 29.8%，对 NO_x 减排贡献最高的措施是移动源污染防治，约占减排总量的 42.2%，对 VOCs 减排贡献最高的措施是挥发性有机物治理，约占减排总量的 33.3%，对 PM_{2.5} 减排贡献最高的措施是化解过剩产能，约占减排总量的 26.0%，对 NH₃ 减排贡献最高的是农业面源治理，约占减排总量的 89.7%，对 CO₂ 减排贡献最高的措施是电力结构调整及深度治理，约占减排总量的 39.8%。

图 4-1 主要措施对污染物和 CO₂ 减排的贡献评估

4.5 空气质量达标和碳达峰分析

基于上述石家庄本地污染物削减比例，建立了 2033 年石家庄市排放清单，综合考虑石家庄市本地减排和周边区域减排的影响，通过模拟结果可知，污染控制措施实施后，到 2033 年，石家庄市 PM_{2.5} 浓度相比 2017 年下降 63.9% (55.0 μ g/m³)，达到 31.0 μ g/m³ 左右。

基于 LEAP 模型模拟得到的石家庄市碳排放量见图 4-2。BAU 情景下，各部门

的能源结构改善不大，但随着整体产业结构调整，碳排放量增速也将趋缓，最终在 2030 年左右达到峰值。AQP 情景，也即石家庄市空气质量在 2033 年达标的情景下，石家庄碳排放可在 2020 年达到峰值（9860 万吨）。相较 BAU，AQP 情景下 2025、2030、2035 年碳排放分别减少 846 万吨、1348 万吨和 1582 万吨。

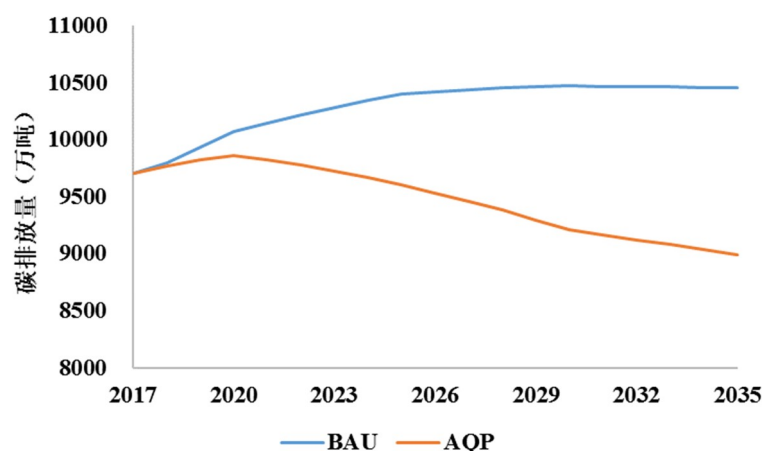


图 4-2 石家庄市长期碳排放量预测情景

石家庄市 AQP 情景下分部门的碳排放情况见图 4-3。工业部门相对基准情景到 2033 年产生了 1341 万吨碳减排量。分工业终端部门和转换部门来看，工业终端碳排放的主要贡献行业为钢铁、化工和水泥等，随着未来产能压减政策的实施，工业终端部门碳排放将自 2017 年起逐渐下降。转换部门方面，石家庄将逐渐淘汰小火电解决煤电围城带来的空气质量问题，同时清洁能源发电占比上升，电力部门总碳排放可在 2030 年左右达到峰值。因此，综合来看石家庄市工业部门碳排放将于 2018 年达到峰值。建筑部门通过取缔民用散煤、推广集中供热，能源利用效率上升，到 2033 年相对基准情景产生了 128 万吨碳减排量，但碳排放仍未达峰。交通部门未来主要推行电气化，然而由于石家庄未来本地煤电发电占比仍然较高，且小客车保有量继续增长，交通部门总体能源需求量和碳排放量未能达峰，相对基准情景到 2033 年碳排放反而增加 157 万吨。

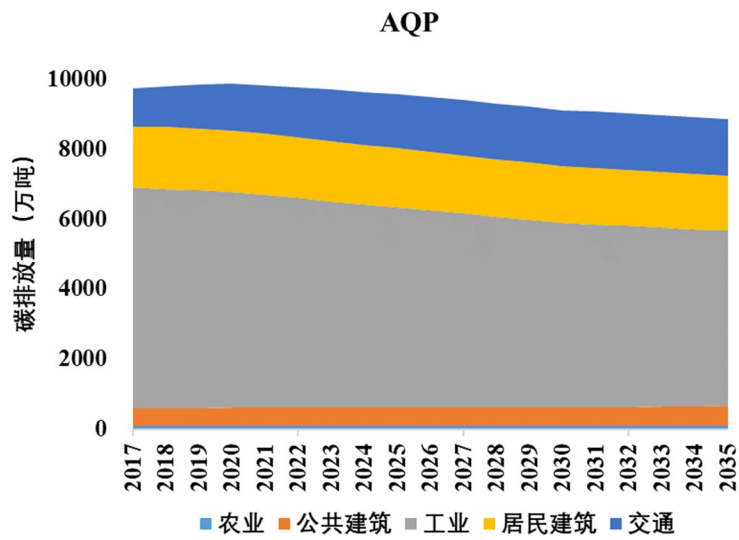


图 4-3 石家庄市空气质量达标情景下的分部门碳排放

第五章 湖州市实现“双达”路径分析

5.1 湖州市城市概况

湖州市位于浙江省北部，东邻嘉兴，南接杭州，东邻嘉兴，南接杭州，市辖 2 区 3 县，市域面积 5820 平方公里，2017 年全市常住人口达到 299.5 万人，城镇化率 62.0%。2017 年湖州市一、二、三产比例为 5.1:47.4:47.5，煤炭消费量占能源消费总量 49.6%，机动车保有量已突破 73.4 万辆。2017 年湖州市主要大气污染物 SO₂、NO_x、CO、VOCs、NH₃、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC 和 CO₂ 的排放量分别为 2.4 万吨、4.9 万吨、15.9 万吨、8.0 万吨、1.0 万吨、5.0 万吨、1.6 万吨、0.1 万吨、0.2 万吨和 3098.2 万吨。

湖州市 2017 年 PM_{2.5} 年均浓度为 42.2μg/m³，超过国家二级标准年平均浓度限值约 20.6%，O₃ 日最大 8 小时值第 90 百分位浓度为 186.6μg/m³，超过国家二级标准限值约 16.6%。考虑湖州市的空气质量现状及可采取的行动措施制定湖州市空气质量达标目标：到 2020 年，PM_{2.5} 达到国家环境空气质量二级标准 35μg/m³。

5.2 经济与能源发展预测

依据《湖州市城市总体规划（2017-2035）》及近年湖州市人口历史增长趋势，预计 2020 年湖州市常住人口达到 303.7 万人。综合考虑经济增速及其产业结构变化、经济发展效率等对人口机械增长的影响，预测 2020 年城镇化率约为 63.8%。根据历史数据推算，2018-2020 年湖州市国内生产总值年均增速为 6.8%，结合湖州市统计年鉴中 2008-2017 年生产总值年增长率，采用弹性系数法，预测到 2020 年湖州市生产总值为 2842.8 亿元。根据《湖州市能源发展“十三五”规划》，到 2020 年，预测全市能源需求总量为 1299 万吨标煤左右。

5.3 重点减排任务与措施

加快调整能源结构，建设清洁低碳能源体系。一是控制煤炭消费总量，到 2020 年，煤炭消费比重降至 40% 以下。二是深入推进高污染燃料设施淘汰，2019 年底前，全市基本淘汰 35 蒸吨/小时以下燃煤锅炉；基本淘汰热电联产供热管网覆盖范围内的燃煤加热、烘干炉（窑）；大力淘汰炉膛直径 3 米以下燃料类煤气发生炉。三是提升清洁能源利用水平，到 2020 年力争天然气占全市一次能源消费比重达到 10%；全市非化石能源消费占比提高到 18% 左右。四是提高能源利用效率，实施百项重大节能示范项目，全面推进能效提升，到 2020 年万元 GDP 能耗较 2015 年下降 18.5%。同时，加大绿色建筑推广力度，到 2020 年，城镇新建民用建筑实现一星级绿色建筑全覆盖，二星级以上绿色建筑比例达到 20% 以上。

调整优化产业结构，构建绿色低碳产业体系。加快原有工业体系绿色化改造，通过关停淘汰、整治入园、规范提升等方式，2020 年底前，全面完成建材、木业行业的转型升级工作，工艺装备、污染控制和碳排放水平均达到国内先进水平。加快淘汰一批能耗超标、污染严重的落后产能、工艺和设备，2018 年底前，关停 16 家粘土砖瓦企业、1 家水泥粉磨生产企业；2019 年底前，关停 1 家水泥粉磨生产企业、3 条水泥熟料生产线。同时，全面推进工业企业废气污染治理，实施燃煤电厂深度治理、全面提升锅炉烟气排放标准、提升重点行业废气治理水平、开展工业炉窑整治专项行动、实施挥发性有机物专项整治、全面推进重点园区废气治理等措施。

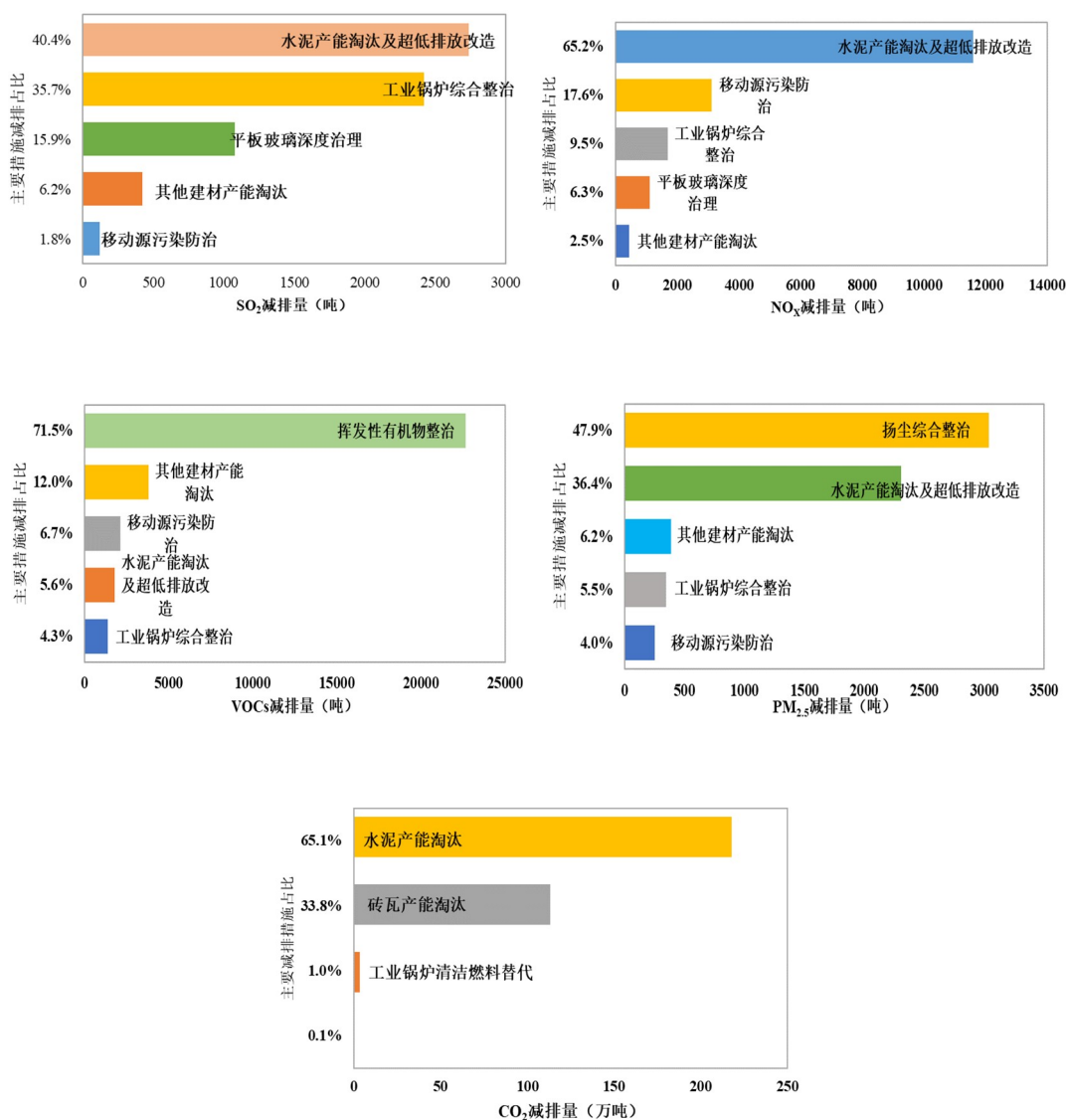
积极调整运输结构，完善绿色低碳交通体系。湖州市货物运输仍以公路运输为主，因此需发挥水运在大宗物资中长距离运输中的骨干作用，提高水路货运比例。同时，促进适箱货物集装箱化运输，提升“陆改水、散改集”的运输比例。绿色低碳交通体系建设要实施“公交优先”战略，到 2020 年公共交通机动化分担率达到 20% 以上。积极推广新能源车，新增及更新的公交、环卫、邮政、出租、通勤、轻型物流配送车辆新能源或清洁能源车辆使用比例达到 100%，市区公交车辆实现 100% 纯电动化。加大对现有机动车和船舶深度治理，到 2025 年，基本淘汰国三及以下排放标准的柴油车，积极引导水运业主淘汰使用 20 年以上的内河航运船舶，到 2020 年，

力争实现全市内河港口岸电基本全覆盖。

优化调整用地结构，推进面源污染治理。加强扬尘管理，施工扬尘主要是积极创建绿色工地，全面落实“七个 100%”长效机制；道路扬尘主要是严格落实清扫保洁质量标准，加快推进道路机械化清扫；堆场扬尘主要是所有煤堆场和卸煤场所等全面启动防风抑尘设施建设。开展农业面源治理，一是全市禁止秸秆露天焚烧，全面推广秸秆利用产业化，2020 年全市秸秆综合利用率达到 95%以上。二是大力推进种植业肥药减量增效，到 2020 年，化学农药使用量比 2017 年减少 6%，化肥利用率达到 40%以上。加大绿色碳汇，加大森林城市、城镇创建力度，建设城市绿道绿廊，实施“退工还林”，大力提高城市建成区绿化覆盖率。到 2020 年，森林覆盖率达到 48.5%。

5.4 减排潜力分析

以湖州市 2017 年大气污染源排放清单为基础，根据湖州市在能源、产业、交通及用地结构的调整规划，本研究预测了到 2020 年湖州市新增机动车和天然气的排放增量，并进行了减排措施评估。到 2020 年，湖州市将实现 SO₂、NO_x、VOCs 和一次 PM_{2.5} 排放总量分别较 2017 年下降 28%、33.8%、38.5%和 39.9%。通过对比各类措施发现，对 SO₂ 减排贡献最高措施是水泥产能淘汰及超低排放改造，约占减排总量的 40.4%，对 NO_x 减排贡献最高的措施是水泥产能淘汰及超低排放改造，约占减排总量的 65.2%，对 VOCs 减排贡献最高的措施是挥发性有机物治理，约占减排总量的 71.5%，对 PM_{2.5} 减排贡献最高的措施是扬尘综合整治，约占减排总量的 47.9%，对 CO₂ 减排最高的措施是水泥产能淘汰，约占减排总量的 65.1%。

图 5-1 主要措施对污染物和 CO₂ 减排的贡献评估

5.5 空气质量达标和碳达峰分析

基于上述湖州本地污染物削减比例，建立了 2020 年湖州市排放清单，通过综合考虑湖州市本地减排和周边区域减排的影响，对 2020 年湖州市主要大气污染物模拟年均浓度开展分析。通过模拟结果可知，污染控制措施实施后，污染控制措施实施后，到 2020 年，湖州市 PM_{2.5} 浓度相比 2017 年下降 23.7% (10 μ g/m³)，达到 32.2 μ g/m³ 左右。

LEAP 模型模拟得到的湖州市碳排放量见图 5-2。BAU 情景下各部门的能源结构转型和节能技术应用进程较为缓慢，但随着整体产业结构调整、高耗能行业工业占比下降、外调电力量增加，碳排放量增速也将趋缓，最终在 2030 年左右达到峰值。AQP 情景下，为使得湖州市空气质量在 2020 年达标，2017-2020 年间将关停数家水泥和砖瓦企业。水泥行业是高耗能行业和高碳排放行业（包括燃料燃烧排放和生产过程排放两部分），其产量下降将带来显著的碳减排效益，使得湖州市碳排在 2017 年就达到峰值（3309 万吨）。2020 年后，湖州市的碳排放基本保持平稳，不再出现大幅的上升，2028 年开始缓慢下降。相较 BAU，AQP 情景下 2020、2025、2030 年的碳排放分别减少 356 万吨、481 万吨和 647 万吨。

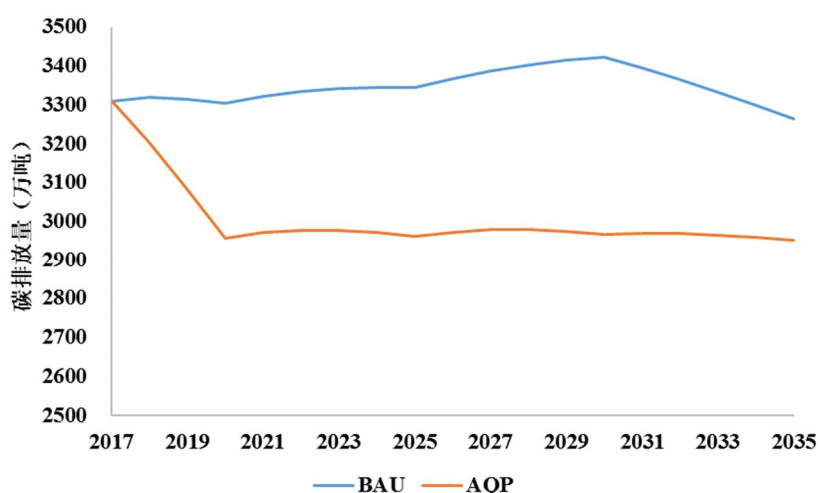


图 5-2 湖州市长期碳排放量预测情景

湖州市 AQP 情景下各部门的碳排放情况见图 5-3。到 2020 年，相比基准情景，工业部门减排量达到 334 万吨，占总减排量的 90%以上。随着未来高新技术产业占比的逐步提升、工业节能技术升级，湖州市工业部门碳排放将在 2017-2020 年出现明显下跌后继续平稳下降。电力部门方面，AQP 情景下外购电比例不断增加，同时清洁能源发电占比显著上升，电力部门碳排放自 2017 年起将持续下降。空气质量政策对公共建筑领域的减排较弱，到 2020 年相对基准情景的减排量为 7.6 万吨，民用部门碳排放的增加主要由居民用电需求增加引起，建筑部门碳排放未达峰。交通部门未来将继续推进电气化进程和运输结构调整，但主要集中在货运、公共车辆领域，碳减排效果并不显著，减排量仅为 0.21 万吨；未来小客车保有量的增长使得交通部

门总体能源需求量和碳排放量继续上升。

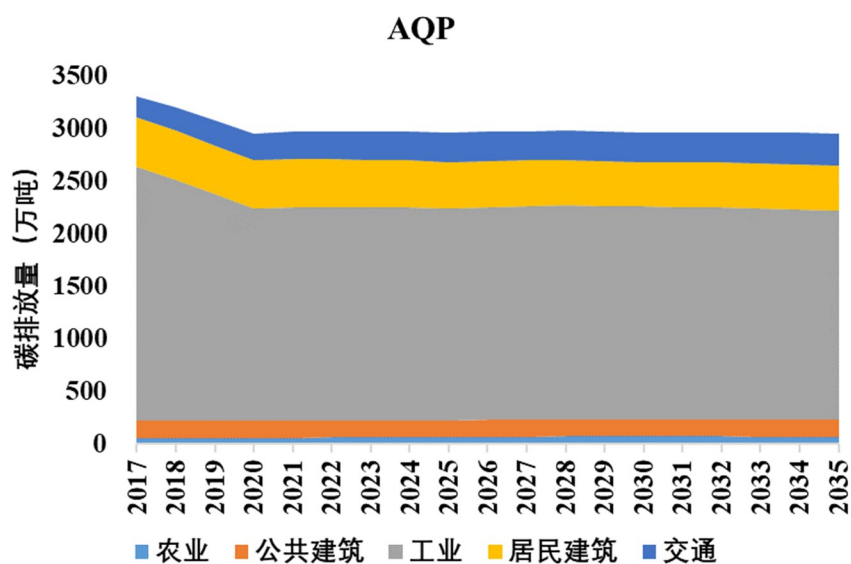


图 5-3 湖州市空气质量达标情景下的分部门碳排放

第六章 结论

6.1 “双达”路径协同分析方法总结

本研究建立了经济-能源-排放耦合动态响应分析方法以及城市空气质量达标与碳排放达峰协同分析框架，并选取了郑州、石家庄、湖州三个城市作为典型案例进行分析。该框架从城市大气污染物和温室气体排放清单出发，结合了 WRF-CMAQ、LEAP 等模型，可实现政策与技术干预条件下的能源和排放计算，进而分析目标年城市空气质量情况与碳排放变化情况。

目前我国城市空气质量政策相比城市低碳政策更为具体和完善，城市尺度协同减排主要由空气质量目标驱动。因此，本研究首先从案例城市概况、环境空气质量现状及大气污染排放特征出发，根据空气质量改善达标要求设定了以 PM_{2.5} 浓度达标为重点的城市空气质量达标期限，基于城市清单和模式模拟结果识别出空气质量达标的关键问题后，通过迭代法计算各污染物最大允许排放量，结合源解析结果、城市减排潜力和城市规划制定减排方案，得到未来的能源技术情景和相应的排放。验证目标可达性后，就可认为得到了城市空气质量达标路径；同时，通过分析该情景下的碳排放即可得到空气质量目标导向下城市的碳达峰情况并进一步分析各部门的碳减排效益。基于以上分析和实地调研结果，本研究为案例城市提供了产业结构调整、能源结构调整、运输结构调整及污染物控制技术等多个方面的空气质量达标和碳达峰政策建议。

6.2 案例城市分析的结论与启示

通过对湖州、郑州和石家庄三个案例城市的分析，表 6-1 总结了对各污染物和碳减排贡献最大的几类具体措施。加强工业和电力的末端控制措施以及淘汰落后产能对 SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 减排起到重要作用。对 CO₂ 减排较大的措施则主要集中于电力结构调整和淘汰落后产能，得益于化石燃料使用量及工业过程排放量的大幅削减。

不同污染物来源有差异，因此减排贡献最明显的措施也存在着明显差异，特别地如 NH_3 和 VOCs 的减排措施分别为农业面源治理和挥发性有机物治理，是仅对该污染物起到针对性减排的措施。末端治理类的措施如工业提标改造是实现空气质量达标的重要保障，但往往不具有碳减排的协同效益。相反地，末端装置的安装会导致碳排放略有增加，包括额外增加的电耗间接产生的碳排放以及吸收硫氮的化学反应释放的二氧化碳。但这部分增量总体来说较小，如电厂安装湿法 FGD 增加的电量大概在总发电量的 2-3% 左右[3]。

为实现“双达”目标，除末端控制措施外，必须进行能源结构、产业结构和运输结构的深度调整，这为培育城市经济增长新动能、倒逼绿色低碳转型提供了契机，是城市未来可持续发展的重要驱动力。工业部门以及电力、热力生产部门是协同减排效益最大的部门。电力结构调整、落后产能淘汰等政策具有显著的协同效益，是各城市应当优先考虑的措施。实施绿色碳汇工程也具有协同减排效益，但由于难以量化，此处未作深入讨论。

表 6-1 对各污染物和碳减排贡献最大的几类措施

物 种	措 施
SO_2	工业提标改造、重点行业落后产能淘汰、燃料清洁化替代
NO_x	移动源污染防治、工业提标改造、重点行业落后产能淘汰
VOCs	挥发性有机物治理
$\text{PM}_{2.5}$	扬尘综合整治、化解过剩产能、工业提标改造
NH_3	农业面源治理
CO_2	电力结构调整、重点行业落后产能淘汰

表 6-2 进一步总结了能够同时改善空气质量以及实现二氧化碳减排的协同政策，包括煤炭总量管控、改善电力结构、工业节能改造、淘汰落后产能、淘汰燃煤锅炉、民用燃料清洁化、运输结构调整、增加绿色碳汇等措施。值得注意的是，外购电以及机动车电动化政策的减排情况与电力结构有很大关系，如果火电比例高则并不一定具有协同效益，凸显了电力清洁化的重要性。以外购电政策为例，该政策能够有效地减少城市本地的污染物排放，但引起了生产电力城市污染物排放的增加，且由于目前火电能源转换效率低于 50%，当生产电力城市的电力结构以火电为主时反而

可能导致总碳排放增加。

表 6-2 具有协同减排效益的政策

部 门	领 域	政 策
ALL	ALL	控制煤炭消费总量，设置能源结构目标。
电力	能源结构调整	有序控制电厂用煤，削减的煤电及新增用电可依靠加大可再生能源比重及外购电替代*
	提高能效	全面关停 30 万千瓦等级及以下燃煤机组，设置平均供电煤耗目标
工业	能源结构调整	淘汰燃煤小锅炉，削减非电用煤量，煤改清洁能源
	提高能效	淘汰燃煤小锅炉，推进工业锅炉节能改造 单位生产总值能源消耗下降目标设定
	产业结构调整	淘汰低效、落后产能，整治“散乱污”企业 严控“两高”行业产能、严格控制燃煤项目、加严涉 VOCs 项目建设等措施严禁高污染高耗能企业进入 发展节能环保绿色低碳产业
民用	能源结构调整	推进可再生能源供暖工程
	提高能效	大力发展热电联产集中供热工程 设置农村清洁取暖率目标 实施既有建筑节能改造，扩大绿色建筑规模，发展超低能耗或近零能耗建筑建设试点和被动式太阳房试点
交通	需求控制	控制机动车保有量
	能源结构调整	电动车及其他新能源车辆推广**
	交通结构调整	公共交通机动化分担率目标设定
用地结构	用地结构调整	增加绿色碳汇，绿地率目标设定

*与外购电的来源有关。如果外购电产地的电力结构不够清洁，可能并不产生协同效益。

**推广电动车的协同效益与电力结构有关，当电力结构以火电为主时可能存在 SO₂ 增排的情况[4,5]。

三个案例城市分二级源减排贡献见图 6-3。在空气质量目标下，工业部门和电力供热部门是碳减排协同效益最大的部门，通过产业结构调整、压减高耗能产品产量、工业技术进步能产生显著的协同效益，对碳减排贡献占比均达 80%以上。对于民用和交通部门，现有的空气质量政策主要集中在加严排放标准和推进电气化进程，能带来较为显著的空气质量效益，但碳减排效益较小。考虑到人民生活水平提高、人口数量的增长和未来物流行业的发展，城市民用和交通部门的未来能源需求在较长一段时间内难以达峰，在总碳排放中的占比逐渐上升。未来，城市工业部门依靠节能技术发展、产能压减的减排空间将逐渐减小，减排重点将向产业结构调整转移。同时，城市应当进一步关注对民用和交通部门能源需求总量的控制和燃料结构低碳化转型，否则仍然存在碳排放再度回弹的风险。

本研究中的三个典型案例城市的碳排放达峰均在空气质量达标（ $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 $<35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）前实现（表 6-3）。在民用、交通的碳减排政策较弱的情况下，案例城市碳达峰由工业部门主导。例如，湖州市关停水泥、砖瓦厂，石家庄市压减钢铁产能，郑州压减水泥、炭素产能，都在中短期内快速削减化石燃料尤其是煤炭的使用量，从而推动实现碳达峰。现有的经验中，也有城市呈现相反的特征，如深圳市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度 2014 年已经达到国家二级标准，而研究预测碳排放在 2020 年才能实现达峰[6]。实现城市空气质量达标对各类污染物排放量的绝对量提出了要求，而碳达峰则是对碳排放量相对变化（逐年下降）提出要求。“双达”时间受到城市现有空气质量状况、经济发展情况、减排措施等多因素的综合影响，由于研究的案例数量还较少，还无法得出城市碳达峰和空气质量达标时间之间存在何种联系，有待于未来进一步开展研究。

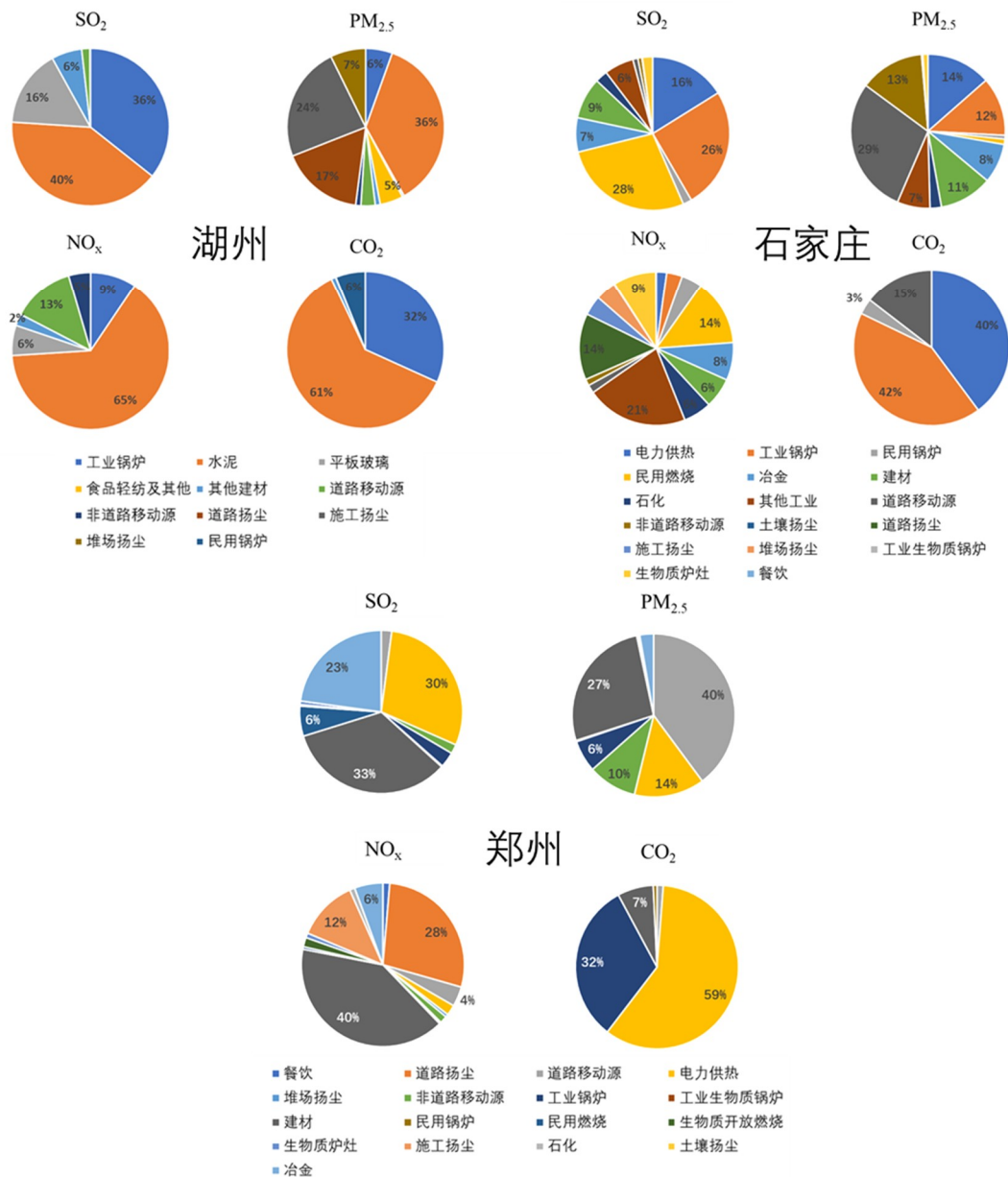


图 6-3 典型城市分二级源减排贡献

*此处 CO₂ 计算的是直接排放，未经过电力和热力二次能源分配。

表 6-3 三城市双达时间表

城 市	预测碳达峰时间	空气质量达标年限
湖州市	2017	2020
郑州市	2025	2028
石家庄市	2020	2033

本研究为城市“双达”目标下的综合政策制定提供以下几点建议：

1. 排放清单是实现“双达”目标研究的基础。为保证数据统计口径的一致性，城市应当对大气污染物与温室气体排放监测、统计体系进行整合，建立起含有源分类、活动水平、排放因子、末端控制等信息的城市基础数据库。参照本研究中介绍的方法建立高分辨率城市网格化的大气污染物和 CO₂ 排放清单后，可结合清单数据和空气质量情况进行污染成因分析及各污染物的来源解析，识别减排的重点领域。

2. 从城市自身的定位和规划出发，统筹考虑空气污染物和温室气体的协同减排。对于发达城市，更应提出明确的空气质量改善目标和气候减排目标，将其作为“十四五”生态环境领域攻坚战的重点。为此，城市应当加强环保能力建设、增强科技支撑能力，注重二氧化碳和污染物协同减排的机理、城市空气质量达标和碳排放达峰评估方法的研究。同时，由于在确定协同减排路径时涉及多方的协商，应当建立有效的沟通机制。

3. 为确保措施的顺利实施，城市应当进行措施成本有效性分析和可行性分析。设立目标后，城市应当综合考虑社会、经济、能源等各方面因素，优化减排策略，最终形成减排潜力大、综合成本低、切实可行的工作方案，并建立科学的政策预估、跟踪评估和后评估方法与体系，定期评估和优化策略。根据已开展工作的城市的经验来看，末端控制成本较高以及产业结构调整遇到的挑战是城市推进减排工作中的难点。

4. 完善相关制度，保障政策落地实施。城市应当加强执法监管能力，深入推进网格化环境监管工作。整合碳排放交易制度和排污许可证管理等污染源管理制度，降低企业和政府管理成本。建立协同考核机制，探索整体考核体系下的融合考核手段。

5. 强化区域协同减排。污染物传输分析的结果表明周边地区对湖州、石家庄、郑州的 PM_{2.5} 浓度年均传输影响分别为 32.2%、43.4%和 34.5%，若不进行周边整体减排，目标城市空气质量达标难度较大。同时，在考虑外购电时，区域电网碳排放因子的降低有利于目标城市实现碳达峰。因此，区域协同减排对城市实现“双达”至关重要。

参考文献

- [1] Peters, G.P., Andrew, R.M., Canadell, J.G. et al. Carbon dioxide emissions continue to grow amidst slowly emerging climate policies. Nat. Clim. Chang. (2019) doi:10.1038/s41558-019-0659-6
- [2] 贺克斌,《城市大气污染物排放清单编制技术手册》, 2018
- [3] Haijun Zhao, Weichun Ma, Hongjia Dong, Ping Jiang, Analysis of Co-Effects on Air Pollutants and CO₂ Emissions Generated by End-of-Pipe Measures of Pollution Control in China's Coal-Fired Power Plants, Sustainability, 2019
- [4] 能源基金会资助,《城市交通大气污染物与温室气体协同控制技术指南 1.0 版》, 2019
- [5] 能源基金会资助,《我国城市常规大气污染物与温室气体协同控制决策支持研究》
- [6] 能源基金会资助,《深圳市碳排放达峰、空气质量达标、经济高质量增长协同“三达”研究报告》, 2019

