

# 2024 年度 减污降碳协同治理领域科技进展 报 告



减污降碳协同治理研究中心

2024 年 12 月

# 目 录

|   |    |
|---|----|
| 摘 要.....  | 1  |
| 第一章 减污降碳协同治理领域研究综述.....                                     | 2  |
| 1.1 解析减污降碳协同治理的驱动要素和传导机制，完善减污降碳协同理论体系.....                  | 3  |
| 1.2 研发减污降碳技术适用性评估，推动重点行业/领域协同治理.....                        | 3  |
| 1.3 研究减污降碳调控技术，设计协同增效发展路径.....                              | 4  |
| 1.4 创新减污降碳协同政策体系，支撑减污降碳协同管理实践.....                          | 4  |
| 1.4.1 减污降碳协同理论机制研究.....                                     | 5  |
| 1.4.2 减污降碳协同调控技术研究.....                                     | 12 |
| 1.4.3 减污降碳协同治理技术研究.....                                     | 19 |
| 1.4.4 减污降碳协同政策仿真研究.....                                     | 20 |
| 第二章 减污降碳领域年度研究成果梳理.....                                     | 26 |
| 2.1 协同理论基础领域.....   | 26 |
| 2.1.1 基于能源-物质-排放关系的战略方法减少 CO <sub>2</sub> 和空气污染造成的环境损害..... | 26 |
| 2.1.2 结合短期和长期排放控制措施可持续地改善中国的空气质量.....                       | 28 |
| 2.1.3 兼顾城市边界内外温室气体排放的碳中和新框架.....                            | 35 |
| 2.1.4 识别中国空气污染与二氧化碳排放协同控制的关键来源.....                         | 38 |
| 2.1.5 中国城市“减污降碳”协同效应及其影响因素.....                             | 41 |
| 2.1.6 减污降碳协同效应时空特征分析.....                                   | 43 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.1.7 MEIC 全球碳排放数据库更新 .....  | 49  |
| 2.2 协同治理技术领域 .....   | 53  |
| 2.2.1 双活性位点以促进“非二”温室气体 N <sub>2</sub> O 增值利用 ...                               | 53  |
| 2.2.2 中国水泥行业超低排放转型的全生命周期减排潜力   | 60  |
| 2.3 协同路径优化领域 .....   | 62  |
| 2.3.1 中国城市“减污降碳”协同驱动因素及实现路径 .....  | 62  |
| 2.3.2 考虑区域不公平性的中国省级减碳路径优化 .....  | 65  |
| 2.3.3 通过部门行动实现中国二氧化碳排放达峰 .....   | 71  |
| 2.3.4 量化中国钢铁行业 CO <sub>2</sub> 排放与环境健康负担：可持续<br>转型之路 .....                     | 73  |
| 2.3.5 减污降碳协同效应时空特征分析 .....   | 77  |
| 2.3.6 为中国绘制碳中和与清洁空气协同路线图——新专栏<br>协同路线图 .....                                   | 84  |
| 2.4 协同政策与效益评估 .....  | 85  |
| 2.4.1 2013-2021 年中国减污降碳措施的协同增效评估 .....   | 85  |
| 2.4.2 2013-2020 年中国清洁空气行动应对 PM <sub>2.5</sub> 污染成效                             | 91  |
| 2.4.3 2013-2020 年中国清洁空气行动的碳减排协同效益  | 111 |
| 2.4.4 2012-2020 年间中国区域空气污染物排放减缓的异质<br>性 .....                                  | 117 |
| 2.4.5 成本效益的不确定性可能会影响中国煤电转型的决策<br>.....   | 122 |
| 2.4.6 清洁取暖在华北农村的健康效益与经济成本的不均衡<br>分布 .....                                      | 127 |
| 2.4.7 从省际交通和 PM <sub>2.5</sub> 减排成本的角度评估中国 PM <sub>2.5</sub><br>污染控制的有效性 ..... | 134 |
| 2.4.8 中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组发布  |     |

|  |            |
|--|------------|
| 2023 年“降碳 减污 扩绿 增长”主题报告 .....  | 138        |
| 2.5 碳中和路径与大气污染控制政策综合影响评价 .....   | 160        |
| 2.6 碳中和转型与可持续发展协同效益和潜在权衡评估 .....   | 161        |
| <b>第三章 2024 年减污降碳协同政策梳理 .....</b>  | <b>165</b> |
| 3.1 生态环境部在京召开 2024 年全国生态环境保护工作会议   | 165        |
| 3.2 中央经济工作会议 12 月 11 日至 12 日在北京举行 .....                                  | 166        |
| 3.3 国务院第 23 次常务会议通过《碳排放权交易管理暂行条例》<br>.....                               | 167        |
| 3.4 全国温室气体自愿减排交易市场（CCER）重启 .....   | 168        |
| 3.5 国务院发布《关于印发<2024—2025 年节能降碳行动方案><br>的通知》 .....                        | 169        |
| 3.6 生态环境部等十五部门联合发布《关于印发<关于建立碳足迹<br>管理体系的实施方案>的通知》 .....                  | 170        |
| 3.7 国务院办公厅发布《关于印发<加快构建碳排放双控制度体<br>系工作方案>的通知》 .....                       | 170        |
| 3.8 中共中央 国务院《关于加快经济社会发展全面绿色转型的<br>意见》正式对外发布 .....                        | 171        |
| 3.9 生态环境部发布《关于公开征求<全国碳排放权交易市场覆<br>盖水泥、钢铁、电解铝行业工作方案（征求意见稿）>意见的函》<br>..... | 172        |
| 3.10 生态环境部发布《中国应对气候变化的政策与行动 2024 年<br>度报告》 .....                         | 173        |
| 3.11 清洁空气政策伙伴关系发布《中国碳中和与清洁空气协同<br>路径（2024）》 .....                        | 174        |
| <b>第四章 减污降碳协同治理地方实践案例 .....</b>  | <b>176</b> |
| 4.1 京津冀及周边地区 .....   | 176        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 4.2 长三角地区 .....               | 178        |
| 4.3 珠三角地区 .....               | 181        |
| 4.4 其它地区 .....                | 183        |
| <b>第五章 减污降碳协同治理研究展望 .....</b> | <b>185</b> |
| 5.1 减污降碳协同理论与机制研究 .....       | 185        |
| 5.2 减污降碳协同治理技术适用性评价研究 .....   | 188        |
| 5.3 减污降碳决策模型与调控技术研究 .....     | 190        |
| 5.4 减污降碳协同政策仿真与体系构建 .....     | 195        |
| <b>参考文献 .....</b>             | <b>198</b> |

## 摘 要

“十四五”时期，我国生态文明建设进入了经济社会发展全面绿色转型、生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。面对新形势新任务新要求，必须更加注重协同推进污染减排和降低碳排放。减污降碳协同治理已成为我国下一阶段生态环境管理及绿色低碳转型发展方面的主要着力点和关键工作领域，是实现美丽中国建设和“双碳”目标的必然选择。

在此背景下，中国环境科学学会减污降碳协同治理专业委员会编撰了《减污降碳协同治理领域 2024 年度科技进展报告》，主要包括：第一章减污降碳协同治理领域研究综述，从减污降碳协同理论机制、减污降碳协同调控技术、减污降碳协同治理技术和减污降碳政策体系创新 4 个方面展开。第二章梳理了 2024 年部分科研机构在减污降碳领域的科研进展，主要聚焦于协同理论机制、协同治理技术、协同路径优化与协同政策分析等方面。第三章是梳理 2024 年度减污降碳领域重要的会议及相关政策、报告，第四章是减污降碳协同治理地方实践，第五章是在前文综述、科研进展的基础上，展望未来研究方向，从减污降碳协同理论与机制、减污降碳协同治理技术适用性评价、减污降碳决策模型与调控技术、减污降碳协同政策仿真与体系构建等几方面展望延伸了下一步的工作。

## 第一章 减污降碳协同治理领域研究综述

2022 年 6 月生态环境部等七部委联合印发了《减污降碳协同增效实施方案》（以下简称《实施方案》），对推动减污降碳协同增效进行系统谋划，明确到 2025 年减污降碳协同推进的工作格局基本形成，重点区域、重点领域结构优化调整和绿色低碳发展取得明显成效，形成一批可复制、可推广的典型经验，减污降碳协同度有效提升；到 2030 年减污降碳协同能力显著提升，助力实现碳达峰目标，大气污染防治重点区域碳达峰与空气质量改善协同推进取得显著成效，水、土壤、固体废物等污染防治领域协同治理水平显著提高，为 2030 年前协同推进减污降碳工作提供行动指引。《实施方案》是我国减污降碳方略的集大成者，是碳达峰碳中和“1+N”政策体系的重要组成部分，是全面贯彻落实党中央、国务院减污降碳有关部署要求的重要举措，标志着我国减污降碳协同治理工作迈入了新征程。

《实施方案》以突出协同增效、强化源头防控、优化技术路径、注重机制创新、鼓励先行先试为原则，提出了源头防控协同、重点领域协同、环境治理协同、管理模式协同及强化支撑保障等重点任务。

《实施方案》将加强减污降碳协同技术研发应用作为重要任务之一，强调加强减污降碳协同增效基础科学和机理研究，引领减污降碳协同管理体系与协同技术发展，有效推动重点区域、重点领域结构优化调整和环境质量改善，助力发展方式绿色转型和高质量发展。

2024 年 12 月刚召开的中央经济工作会议强调要加紧经济社会发展全面绿色转型，进一步深化生态文明体制改革，协同推进降碳减污扩绿增长，积极稳妥推进碳达峰碳中和，体现了二十届三中全会对减污降碳工作的全面部署和坚定决心，旨在推动经济社会发展全面绿色转型，实现生态环境根本好转和碳达峰碳中和的目标。

面向国家推进减污降碳协同治理的重大需求，国内外研究机构采用多学科交叉理论与方法，结合 AI、云计算、多源感知等新兴技术手段，建立成套模型工具，围绕减污降碳协同理论机制、减污降碳协同调控技术、减污降碳协同治理技术和减污降碳政策体系创新 4 个方向开展研究。

### **1.1 解析减污降碳协同治理的驱动要素和传导机制，完善减污降碳协同理论体系**

当前针对减污降碳协同治理这一创新理念的理论研究刚刚起步，缺少深层次理论剖析，减污降碳协同增效理论体系尚待系统构建。面对当前理论基础薄弱的情况，有关研究机构均致力于解析碳污排放的核心驱动要素与作用传导机制，突破减污降碳多维协同理论和系统优化理论，系统解析生态环境保护在目标、对象、措施等方面与温室气体治理的交互作用机制及污-碳多重目标的相互反馈机制，建立社会经济发展与减污降碳协同目标路径多维反馈理论、产业共生与减污降碳协同理论、跨行业减污降碳耦合机制等，为实现减污降碳协同增效提供理论基础。

### **1.2 研发减污降碳技术适用性评估，推动重点行业/领域协同治理**

减污降碳协同治理实践目前面临适用于重点领域、重点行业减污降碳协同治理的技术储备不足的问题，通过技术组合优化强化减污降碳协同治理效益的潜力有待进一步挖掘。为识别重点领域、重点行业减污降碳协同治理适用性技术，将梳理量化现行及潜在技术措施减污降碳协同效果和成本，建立减污降碳协同减排技术库；构建各类措施的减排效果与减排成本动态评估模型，突破措施-效果-成本参数之间的动态联动技术，评估不同时期、不同技术的协同减排效果及成本差异，进而识别不同阶段、不同行业协同减排关键技术；通过系统分析

全面评价减污降碳协同治理技术适用性，为重点领域减污降碳提供技术方案，显著提升重点领域、重点行业减污降碳协同治理能力，服务减污降碳协同增效目标。

### 1.3 研究减污降碳调控技术，设计协同增效发展路径

减污降碳协同调控当前面临底数不清、机制不清、工具不优、路径不明问题，污染物与温室气体排放表征尚未融合，缺乏对现有及潜在治理技术协同效果及适用场景的系统评估，缺少生态环境质量改善和温室气体减排多维协同调控技术方法，难以实现各层级减污降碳实施路径系统优化。针对协同治理的重大科技支撑需求，将基于人工智能、大数据、多源感知等前沿技术，集中力量在多介质精细化减污降碳融合排放清单、多目标减污降碳协同增效决策模型、多领域多层级减污降碳协同目标优化模型、减污降碳协同增效评估技术、智慧化减污降碳协同增效管理与调控平台等关键领域实现技术突破，显著提升我国减污降碳协同技术支撑能力，有效服务美丽中国建设和碳达峰碳中和目标。

### 1.4 创新减污降碳协同政策体系，支撑减污降碳协同管理实践

生态环境部等主管部门正持续推进气候变化应对与污染防治工作统筹融合，加快建设服务于减污降碳协同增效目标的政策体系和治理体系。面对管理支撑需求，将围绕政策评估技术、政策作用机制、政策工具、政策路径等方面展开攻关，针对城市、区域、国家等不同层级政策传导机制的特点，开展政策仿真研究与政策影响评估。包括研发减污与降碳政策协同性的评估与规划技术；解析减污降碳协同政策效应的区域异质性及驱动因素，识别多目标统筹下减污降碳协同政策要点及关键任务；建立完善服务于减污降碳协同增效目标各类源协同管理制度、排放总量控制与交易制度、金融财税政策体系以及法

规标准体系，提出减污降碳协同政策工具包；谋划国家、区域、行业中长期减污降碳协同路线图，全面支撑减污降碳协同政策体系及治理体系建设。

#### 1.4.1 减污降碳协同理论机制研究

大气污染物和碳之间存在着显著的差别，但是两者之间具有同源性和同效性，这是开展减污降碳协同增效工作的基础。所谓同源性是指大气污染物和碳排放的主要来源是一致的，均来自化石能源的生产和消耗、工业生产过程、农业活动、土地利用变化和林业以及废弃物处理等；同效性则是指大气污染物控制措施和碳减排措施在许多情况下是一致的，比如节约能源、发展绿色低碳清洁能源、能源结构调整、研发低碳技术等，这些措施在实现减少碳排放的同时也实现了大气污染物的减排。

通过耦合二氧化碳、非二氧化碳温室气体与大气、水、固废等多维环境要素协同治理目标，系统建立减污降碳协同增效研究范式，开展理论、技术、政策多维度解析优化，对协同推进“双碳”战略与美丽中国建设以及推动全球环境治理有重要意义。相关研究需求涉及减污降碳协同理论基础构建、减污降碳作用机制与协同效应量化、气候环境协同治理的综合评价与模型优化、减污降碳协同路径多维优化、减污降碳协同政策仿真与协同策略等。

##### 1.4.1.1 减污降碳协同增效理论内涵

大气污染和全球气候变化之间具有相互影响和反馈作用。一方面，大气污染物排放所形成的大气气溶胶对辐射产生直接的影响，同时还能通过改变云的特性或改变地表反照率而影响全球气候变化；另一方面，全球或区域的气候变化不仅会改变大气污染物的扩散、传输和沉降等过程，影响大气能见度形成中重度污染天气，而且还可以通过改

变大气氧化能力影响到大气污染物的光化学过程。此外，应对气候变化的政策措施也会改变污染物排放源的特征，从而影响大气环境质量。

国际上以 IPCC 系列研究报告为引领，持续深化减污降碳协同增效内涵。欧美等发达国家对温室气体减排及环境治理的研究、政策、实践均紧扣特定时期的迫切管理需求。由于多数欧美发达国家均是在环境治理取得显著进展、空气质量大幅改善后开始关注温室气体减排，因此直接针对减污及降碳两项目标协同开展的研究较少。20 世纪 90 年代，欧美学者初步对温室气体和空气污染物的协同治理进行了分析，以温室气体减排为切入点，指出相关措施可协同降低大气污染及其相关健康效应，产生间接效益。作为气候变化领域最具影响力的研究报告，IPCC 系列评估报告持续深化协同治理的理论内涵。IPCC 在第二次评估报告中提出了副效益（ancillary benefits）的概念，并在第三次评估报告中进一步提出了协同效益（co-benefits）的概念。在第三次评估报告中，IPCC 对以上两个效应的定义做出了区分，但在近期的评估报告中对二者赋予了相同的内涵。IPCC 在后续评估报告中进一步对协同效应的概念进行了深化。IPCC 第四次报告指出协同治理通常意味着实施“无后悔”政策（no-regrets），即实施政策所带来的协同效益会大于其实施成本，产生净负成本。对“无后悔”政策的研究很多关注温室气体减排政策在短期即可产生的空气质量改善及相关公共健康效益，这些显著效益为“无后悔”温室气体减排政策的实施奠定了基础。IPCC 第五次评估报告进一步区分了正协同效益和负协同效应的概念，并在 2018 年发布的《IPCC 全球升温 1.5°C 特别报告》中聚焦到正协同治理上，明确提出协同效益是指为了达到某一目标的一项政策或措施可能对其他目标产生的积极效果，从而可加强社会或环境的总体效益。最新的 IPCC 第六次评估报告进一步深化了对协同治理

的认识，识别了一些行业、区域独有的协同治理措施。

立足环境污染与温室气体排放同根同源的特性，国内对减污降碳协同治理的理论展开探索。王金南等较早探索了减污降碳协同治理的理论，于 2010 年提出了温室气体与常规大气污染物排放“同根同源同步”的概念，并基于此提出气候友好的大气污染防治战略的含义。推动实现减污降碳协同增效理念提出后，严刚等就目标指标、管控区域、控制对象、措施任务、政策工具五个方面的协同性系统讨论了减污降碳协同增效的基本内涵。高吉喜提出，“减污降碳”应以统筹经济高质量发展为目标，要利用经济转型实现减污降碳，同时也要基于减污降碳倒逼经济转型，牵引高质量发展。周宏春指出要依据碳达峰碳中和目标制定能源低碳发展路线图，推动实现减污降碳协同增效。王灿等指出要从加快发展方式绿色转型、加强污染减排与应对气候变化的协同融合、强化减污降碳的经济政策激励三方面深入打好污染防治攻坚战，实现减污降碳协同增效。

大气污染物和碳的性质在时间和空间尺度上均具有较大差异。大气污染物具有局地性和短寿命的特征，而碳则具有全球性和长寿命的特征；从管理层面上两者也有差别，大气污染物控制有国内法律法规管理（如《大气污染防治法》《循环经济法》等），而碳则是在国际公约的管控范围内（如《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）、《巴黎协定》等）。一般来说，大气污染治理比较注重末端治理，如脱硫、脱硝、除尘等大气污染防治措施，而碳的减排更多强调的是源头管控，如能源结构调整、产业结构调整和节能降耗等。

#### 1.4.1.2 减污降碳协同作用机制与协同效应量化研究

围绕减污降碳作用机制与协同效应量化研究，国内外学者针对污染物与温室气体排放对社会经济要素响应机制开展了广泛研究，并在

此基础上建立了能源环境政策对不同环境要素与温室气体协同治理作用机制的评价技术体系，识别关键协同效应与协同要点。减污降碳协同度的表示可以分为“正向协同、不协同和负向协同”三种情况。所谓“正向协同”，表示在宏观或微观层面上政策措施的实施等能够在减少大气污染物的同时也减少碳的排放，实现减污降碳协同；“负向协同”表示政策措施的实施等不仅增加大气污染物排放，同时还带来了碳排放的增加；“不协同”则表示的是实现大气污染物的减排，但却带来了碳排放的增加，即减污不协同，或实现碳排放减少的同时，却增加了大气污染物的排放，即降碳不协同。

一方面研究集中于基于因素分解法解析污染物及温室气体排放对社会经济耦合系统的复杂响应关系。社会经济发展、能源环境政策、气候气象波动等不同因素相耦合，通过复杂作用机制对温室气体及污染物排放与浓度产生影响。当前大量研究基于因素分解法开展相关作用机制解耦研究。因素分解法通过将目标变量的变动分解为若干个影响因素变动的组合，从而客观地识别目标变量变动的主要驱动因素或抑制因素。常见的因素分解法有指数分解法（Index Decomposition Analysis, IDA）和结构分解法（Structural Decomposition Analysis, SDA）。Howarth 等所提出的 Laspeyres 方法，是一种典型的 IDA 方法；在此基础上，Ang 对比分析了多种分解方法后提出对数平均迪氏指数法（Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI）分解框架，在研究二氧化碳及污染物排放变化方面获得了广泛应用。在碳排放变化驱动力解析方面，Guan 等采用 LMDI 方法分析了中国碳排放变化的驱动因素，发现产业结构升级、煤炭消费占比降低以及能效率提升使中国的碳排放进入新的阶段；Gao 等将碳排放变化的经济驱动力进一步分解为劳动力投入、资本存量 and 全要素生产率，细化了解析精度。在大气成分

变化驱动力解析方面，Guan 等耦合大气污染物排放清单、投入产出模型、结构分解法分析了 1997-2010 年间中国一次 PM<sub>2.5</sub> 排放的社会经济驱动力，发现中国显著提高的生产效率和能源效率抵消了经济增长引起的排放量增长，而出口则是唯一导致排放量增加的终端部门；Lyu 等进一步扩大了覆盖的污染物范围，利用对数平均迪氏指数分解法将 1997-2012 年间中国的一次 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放的变化归因到经济增长、能源强度变化等多个因素的共同作用；Xu 等利用结构分解法结合排放清单和投入产出模型定量了中国一次 PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放的社会经济驱动因素；Geng 等基于 LMDI 分解了 2002-2017 年间中国大气污染物排放变化的驱动力，并进一步解析了 PM<sub>2.5</sub> 浓度与相关过早死亡的驱动力，证实了末端减排措施的有效性。

另一方面研究着重于系统构建温室气体减排-空气质量改善协同效益评估技术框架，实现对气候能源政策对气候、环境、健康、经济等多维度影响的综合评价。在大气污染物与温室气体协同减排方面，国内外已建立了较为成熟的协同效益评估技术框架，通过耦合能源经济模型、污染物排放清单模型、大气化学传输模型、流行病学暴露-响应模型、环境健康经济评估模型等跨学科工具，实现多维度综合评价。研究发现了气候政策在推动结构转型过程中可产生显著的环境健康效益。在国家层面，国内学者对碳达峰及碳中和目标对空气质量改善及相关公共健康效益开展了广泛定量评估。针对中短期的碳达峰目标，Xing 等指出，中国仅依靠 2030 年前碳达峰目标难以实现空气质量目标，这将激励中国采取更激进的政策，实现额外的温室气体减排效益。针对中长期的碳中和目标，Cheng 等和 Shi 等指出了实现碳中和目标对我国未来空气质量根本改善的决定性作用，至 2060 年我国 PM<sub>2.5</sub> 浓度有望降低至 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  左右，其中碳中和目标牵引的革命性

结构调整贡献将达 80%；Zhang 等基于综合评估模型对中国未来以可再生能源为主导的低碳路径和以负排放技术为主导的低碳路径的空气质量与健康影响进行模拟，发现只有将强有力的气候和空气污染控制政策结合起来，才能使整个中国的空气质量得到实质性的改善。在区域层面，Zhang 等发现到 2035 年，在严格的末端治理措施的基础上，强化的气候政策可以推动四川省空气质量降低  $6\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，实现 230 亿美元的健康收益，远超减排成本。在行业层面，有一系列研究分析了不同行业各类政策的减污降碳协同效果。例如，Qian 等聚焦七大高能耗、高污染行业，从微观企业的视角揭示工业部门空气污染物与  $\text{CO}_2$  进行协同减排的潜力，发现持续提升能源使用效率、合理布局并调整现有工业部门的生产结构、加快推进电气化水平以及大力发展非化石能源发电是实现我国工业部门协同减排效益的重要途径。在电力部门，Peng 等指出减少煤电并大幅提升可再生能源比例对污染物及  $\text{CO}_2$  减排均可产生显著效果，且在不同部门开展电力替代的碳减排及环境健康影响在不同区域存在显著差异。在钢铁部门，Ma 等提出至 2030 年，将钢铁行业的废钢回收率提高 50% 能够推动 11 万吨  $\text{SO}_2$  和 2 万吨  $\text{NO}_x$  减排。Meng 等发现中国北方地区的清洁取暖政策能够在大幅削减民用部门化石燃料消费的基础上显著改善室内外空气质量，并带来额外健康收益。Liang 等发现推动 27% 的私家车和大部分特定行业商用车电气化可显著降低  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{O}_3$  及  $\text{NO}_2$  浓度，至 2030 年在全国避免近 2 万人过早死亡。另一方面，环境治理对碳减排、气候变化也可产生显著协同效应。如 Gu 等对“十一五”和“十二五”期间的电力、钢铁、水泥污染排放控制的协同降碳效应进行了评估，发现燃煤电厂脱硫工程减排措施发挥的作用最为关键，其中结构性减排相对容易实现主要污染物与温室气体的协同减排效应，但相比之下工程

削减并不容易实现协同效应；Shi 等发现 2013-2020 年间，中国清洁空气行动推动了清洁高效的能源设施取代低效、高碳能源设施的进程，加速了能效提升、能源结构转型和产业结构转型，减少了化石燃料消耗，实现累计净协同减碳 24.3 亿吨；Xu 等指出，中国的蓝天保卫战行动在京津冀地区实现了显著的 CO<sub>2</sub> 减排协同效应，且各区域 NO<sub>x</sub> 与 CO<sub>2</sub> 的协同效应均最高。

第三方面研究主要是基于多元方法，对水、固废等环境要素相关政策措施的减污降碳协同成效开展多维度评价。基于气候变化、土地利用或流域模型，通过预设碳减排情景，量化了不同碳减排措施对水系统的正面或负面影响。研究主要关注碳减排措施对于能源产业水资源消耗量的影响，并有少数研究拓展到了对流域水环境质量和水污染物排放影响研究。当前研究认为能源领域不同碳减排措施对水资源影响存在较大差异，仅少部分措施可以实现降碳和减污（节水）的协同效应。如 Fricko 等发现在全球气候变暖控制在 2 摄氏度以内的情景下，全球淡水耗水量将显著提升；Ou 等发现采用可再生能源代替的碳减排模式将大幅降低取水量和耗水量，可以实现降碳和节水的协同效应；Bonsch 等发现生物质能源的大规模应用情景下，全球农业用水量将大幅增加。在水系统治理对减排影响方面，现有研究主要关注常用的水系统治理措施对碳排放的影响，并有部分研究进一步探究了如何实现最优的减污降碳效果。研究普遍认同污水处理环节具备较大的生物质能利用潜力，而人工湿地等生态修复措施也可实现减污和降碳的协同效应。如 Rosso 等发现，在当前全球城市污水处理厂 19 万吨/日的二氧化碳净排放量现状情景下，实施全球城市污水处理厂的沼气利用措施改造，预期 2025 年全球城市污水处理厂将由碳排放源转变为碳汇，每日可实现 1 万吨的二氧化碳固定量；Hemes 等的研究表明，当

前针对退化湿地的生态修复行为可以实现碳固定效果，但是同时存在着甲烷排放量增加的潜在代价。在固废减污降碳协同方面，发展了面向不同需求的评价方法及工具。在方法学层面，主要包括在联合国气候变化框架公约各缔约方国建立国家温室气体清单和减排履约的方法和规则下形成的 IPCC 国家温室气体排放清单核算方法及在碳市场交易机制下不同组织开发了各类企业和项目的温室气体排放核算方法学和相关标准，比如欧盟 ETC 指南、联合国清洁发展机制 CDM 方法学、世界资源研究所（WRI）提出的“GHG Protocol”系列指南、国际标准化组织（ISO）建立的“ISO 14064”系列标准。此外，还开发了一系列固体废物管理温室气体排放核算工具，比如气候与清洁空气联盟（CCAS）发布的固体废弃物排放估算工具 SWEET、美国环境保护署（EPA）废弃物减量模型 WARM、日本全球环境战略研究所（IGES）发布的固体废物管理温室气体排放估算工具、丹麦科学技术大学开发的固体废弃物处理系统和技术的环境影响评估工具 EASEWASTE 等，这些工具可用于评估不同的固体废物处理方式（源头减量、回收、燃烧、堆肥、填埋等）实施后所产生的温室气体排放量及削减量。

## 1.4.2 减污降碳协同调控技术研究

### 1.4.2.1 气候环境协同治理的综合评价与模型优化方法

针对气候环境协同治理的综合优化研究需求，目前已有较多国内外学者从气候政策评估的角度出发构建了综合评估模型，其中国外学者研究开展较早，逐步建立了成熟的综合评估模型，但这些模型往往基于特定国家或区域背景开发，模型参数的设定和各类假设条件并不完全适用于中国，导致对中国减排路径的探究存在较大差异。近年来部分国内学者也自主构建了针对中国的综合评估模型（如气候变化综合评估集成模型 C3IAM、能源环境综合评价模型 IPAC 等）。

相关模型方法在区域划分方面，针对中国的区域刻画经历了从粗到细的发展过程。早期的部分气候变化综合评估模型将中国和部分其他亚洲国家作为一个集体，如 IIASA 开发的 MESSAGE 模型将中国、日本和韩国放在一起组成中东亚，美国环保署开发的 ASF 将中国、朝鲜和越南等合成中央亚洲等。也有部分模型考虑到中国这个重要的经济体并且给予单独刻画，如日本国立环境研究所开发的 AIM、美国 EPRI 开发的 CETA、美国西北太平洋国家实验室开发的 GCAM、PIK 开发的 REMIND 和英国大学学院开发的 TIAM 等。为了更精细的区域层面分析，不同模型都在进行区域细化，IIASA 的能源团队将 MESSAGE 的中国地区给予单独刻画，GCAM 将 GCAM-China 细化到省区尺度。同时部分国内模型也将区域划分至中国省区。如清华大学 3E 研究院开发的中国分省区动态 CGE 模型。在 C-REM 基础上开发的 REACH 模型将 CREM 和排放清单模型、大气化学传输模型相结合，同样在中国分省尺度构建。考虑到中国幅员辽阔，地区间自然条件迥异，区域发展不充分、不平衡，在省市级尺度构建模型展开协同治理研究，更加符合中国实际情况。

相关模型方法在行业划分方面，当前多数综合评估模型采用自上而下方法构建，具备完整能源系统，但对工业行业的划分仍相对粗糙。大多数全球尺度和国家尺度的模型在行业刻画上较为粗糙，AIM/CGE 模型涵盖 42 个行业，按照较为粗糙的国民经济行业分类来划分。GAINS 模型覆盖较为全面，包括能源、工业、交通、建筑、农业、其他部门，但对于行业内部的刻画不足。Zhang 等利用 GAINS 模型对中国的水泥行业进行了研究，发现在能源效率提升的措施下，其碳排放可下降 5%，而 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM 则可分别下降 15%、12%和 3%。Li 等则将 TIMES 模型和 GAINS 模型进行连接，研究了中国的

国家自主贡献与 2°C 目标下的协同减排效益，发现工业部门和电力部门可逐步减少化石能源使用，从而降低 PM<sub>2.5</sub> 浓度，进而降低过早死亡的人数，带来健康效益。Zhao 等通过 MESSAGEix-氨模型对氨工业的整个能源系统进行评估，发现随着可再生电力成本的下降，电解制氨技术与 CCS 的整合是实现深度减排的合适选择。IPAC 模型的排放部门涉及电力、工业、交通、建筑、农业。China-MAPLE 模型的部门划分包括资源供应、炼油厂、发电、运输、工业和建筑等几大类。Ma 和 Chen 通过建立中国 TIMES 模型，分析中国不同碳达峰路径下各部门的能源消费结构，优化结果显示电力和工业部门在碳达峰时减排贡献分别为 75% 和 15%。而少数中国分省的模型尝试细化行业分类，LEAP 模型附有丰富的技术工艺和终端能源使用的参数，评估上较为精细，这一模型多用于交通领域的研究。例如，Jiao 等利用这一模型对中国广州市进行了研究，发现在其交通运输部门，通过调整交通运输方式和提高电气化水平能够实现 CO<sub>2</sub> 和大气污染物的协同减排。

相关模型方法在碳-污耦合响应方面，已有部分基于中国气候、环境治理政策的特点，结合行业、措施层面的温室气体与大气污染物协同减排和协同效益分析目标进行了拓展和改造。当前国外用于协同减排成本核算的主流模型主要有 AIM/Enduse、GAINS、CoST 等。其中，AIM/Enduse 包含不同的能源技术和末端治理技术。但该模型多用于气候变化适应和经济发展政策评估，对大气污染控制工程的成本估算较少。GAINS 模型是目前全球范围内应用最广的大气污染控制模型，污染物种类和污染排放行业覆盖度广。借助这一模型，Wagner 和 Amann 对《京都议定书》下各个国家的温室气体减排目标进行了模拟，发现即使上述目标较为宽松，但仍能产生较为明显的协同减排效应，SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM 等大气污染物的排放量可下降约 10%。CoST

模型包含全面的末端技术数据库，但是没有多污染物的响应机制，难以进行长期协同效益评估。国内自主开发的温室气体、大气污染治理协同效益模型主要包括清华大学环境学院开发的空气污染控制成本效益及达标评估系统（ABaCAS）和发改委能源研究所开发的中国能源环境综合评价模型（IPAC）。ABaCAS 含有详细的末端治理数据库，可以详细刻画污染末端治理技术的成本-效益，但缺乏对能源技术成本的计算分析。IPAC 含有详细的能源技术数据库，可以详细刻画能源系统转型、能源技术演替的成本效益，但缺乏末端治理技术成本的深入计算分析。

#### 1.4.2.2 减污降碳协同路径多维优化研究

在路径研究方面，围绕温室气体减排路径、污染物治理路径、温室气体和污染物多维协同治理路径等方面，国内外已经开展了广泛研究。通过综合模型和情景分析，基于公平性原则或成本最低原则等开展多目标协同分析，提出治理路径的优化方案。

在温室气体减排路径方面，已有研究从全球、国家和区域等层面开展分析，综合考虑政策、经济或技术等因素的影响，分析未来的减排路径和减排中潜在的机遇和挑战。如 IPCC 基于全球温升控制和排放特征，充分结合未来社会经济发展的情景，提出了具有统一标准的全球共享社会经济路径（Shared Socio-economic Pathways，IPCC-SSPs），不同的 SSPs 情景能够充分评估不同气候政策下的发展路径；国际能源署（International Energy Agency，IEA）使用世界能源模型（World Energy Model，WEM），基于不同社会经济和技术情景假设，研究了世界主要经济体的能源和排放转变路径，并就未来实现净零排放目标所需的政策措施展开了分析；欧盟采用 FORECAST（FORecasting Energy Consumption Analysis and Simulation Tool）模型，

探索了全面考虑社会经济和技术因素的排放情景和减排路径，分析了不同减排技术组合的可行性，并阐述了未来减排中面临的潜在机遇和挑战。此外，重点部门的温室气体减排将在未来减排路径中扮演重要角色。如 Zhao 等基于国家能源技术模型（C3IAM/NET）发现，能源部门转型是全球实现 2°C 目标的关键，其中电力部门将承担最大的减排责任，其次是工业、交通和建筑部门；Hasan 等针对航空领域的未来减排路径开展了研究，发现未来实现航空部门的温室气体减排将依赖于可持续航空燃料的研发、合理的市场机制和利益相关者的共同努力；Walsh 等从温室气体排放和抵消的视角预测了全球到 2100 年的减排路径，发现要想实现全球气候目标，人为排放需在未来 10 年内达到峰值，且由于负碳领域在技术和经济上具备不确定性，化石能源也面临着需要持续降低的挑战。

在污染物治理路径方面，研究发现政策工具、技术手段、控制方式等对制定合理的路径有重要意义。如 Rao 等分析了社会经济共享路径中不同控制目标对大气污染物排放水平的影响，并评估了不同政策、减排技术、减排目标等对污染物排放路径的影响；Tong 等考虑京津冀地区的污染物及碳排放形势，提出了京津冀地区至 2030 年实现空气质量达标和碳减排目标的协同治理路径，并强调了能源转型的重要意义；Zhao 等以京津冀地区为研究对象，探索了传输路径和排放源分布对于污染形成的影响，提出将单个地区的污染防治拓展到区域间的重要性；Kaleem 等使用 EnerNEO Pakistan 和 GAINS 软耦合模型，分析了在 BAU 情景和采用先进技术措施和可持续发展措施的替代政策情景下巴基斯坦空气污染控制和气候变化缓解战略的协同效益，解释了气候缓解如何成为空气污染控制的附加效益。Wu 等深度耦合多个模型，通过碳减排、污染物排放、空气质量改善和人群健康影响等

方面来刻画不同政策带来的协同效益，为制定气候与环境协同控制战略的经济可行性路径提供参考。除大气污染外，已有研究针对水污染、重金属污染等领域展开治理路径研究。如 Cooper 等针对减轻水污染的源头措施、流通过程和终端保护等展开分析，指出欧洲国家防治措施受到具体政策的影响，并强调了监管、财政激励和咨询服务等工具组合对减排具有很大作用；Zheng 等以广东省为例，基于省内和省外的双路径视角建立了重金属环境模拟模型。研究识别出了减排路径中的关键部门，分析了不同优化情景下的减排路径，强调了省内外生产、投资和减排行动协调发展的重要性。

在不同环境要素与温室气体的协同控制路径方面，部分研究拓展了效益分析的维度，开展了多维目标下的减排与治理路径设计。大气污染和温室气体协同减排方面，Tang 等针对中短期的碳达峰目标，从社会经济和气候政策强度两个维度评估了不同的碳排放路径，并分析了其对环境空气质量和人群健康的协同效应，研究发现我国提前实现碳排放达峰可产生显著的空气质量及环境健康效益，并大概率能够抵消未来的碳减排成本；Rogelj 等针对污染物和温室气体排放源进行多重假设，通过探索典型温室气体浓度路径（Representative Concentration Pathways, RCPs）下污染物排放范围，发现严格的污染控制和清洁能源政策可以将全球大气污染负荷进一步降低到 RCPs 水平以下；Tong 等基于综合评估模型探索 SSPs、RCPs 情景和污染物控制政策下的排放路径，发现强有力的低碳政策和空气污染控制政策将显著改善中国 2050 年的空气污染，且 2030 年后低碳政策将发挥更重要的作用；Hong 等<sup>86</sup>通过耦合全球气候模式、区域空气质量模型和健康效应模型，定量评估了 2050 年全球气候变化对我国空气质量和人群健康的影响，研究发现气候变化可能对我国绝大多数人口居住地

区的空气质量产生不利影响，在 RCP4.5 情景下，到本世纪中叶，气候变化将使我国 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧的人均暴露浓度增加 3%-4%；Duan 等建立基于综合评估模型的多模型比较框架，关注全国宏观及关键性行业层面，从经济发展、能源体系变革和排放路径演化三个维度回答了 1.5°C 目标对中国而言意味着什么。Wu 等以广州市为例，构建了碳排放达峰和空气质量达标“双达”的综合评估体系，并推动精准“减污降碳”热点网格管理，为城市“双达”路径的精细化管理提供支撑。Jiang 等以深圳市为例，探究创新协同治理体系在城市实现“双达”目标中的作用，研究发现积极的气候变化与大气污染的协同治理可以带来显著的减排效果，且与需求管理和结构调整相关的减排措施的协同减排效应最显著，需要优先实施；在部门方面，Tong 等基于电厂的历史信息和未来营业额及控制技术的发展，评估了 2010-2030 年电力部门的减排路径，发现过去严格的环境立法推动了主要污染物的大幅减少，然而碳排放却不降反升，未来实现污染物和温室气体减排目标需要积极的能源发展规划和“近零”排放控制措施；水污染和温室气体协同减排方面，Yang 等评估了可再生能源利用及能源结构调整实现的协同效应，发现风力发电在实现温室气体和污染物减排的同时，能够减少中国电力行业 2.34% 的耗水量；固体废物和温室气体协同减排方面，Zhang 等基于 IPCC、对数平均指数和机器学习模型，预测了不同政策情景和共享的社会经济路径下城市固体废物处理的温室气体减排潜力，提出了区域差异化、城市生活垃圾分类处理和循环经济的政策建议方案。

此外，目前已有较多国内外学者借助协同减排成本、效益或损失函数，从成本最优、社会公平的视角优化减排路径。如 Legras 通过损失函数设定了大气污染物排放和碳排放对于温升的影响，并将综合

影响加总为对全球气温的统一作用；Moslener 和 Requate 在研究中考虑了大气污染排放和碳排放的增量与存量关系，并传导到函数设定的衰减率中，实现减排成本函数动态化；Larson 等在《净零美国：潜力，路径，基础设施和影响》研究中，通过应用优化工具（Regional Investment and Operations model, RIO），将能源和经济计量模块中的供应侧参数进行优化，探索能源供应的低成本脱碳方案，服务与净零排放目标下能源系统的情景路径；Cai 等在自上而下和自下而上的模型基础上，利用社会公平和成本最低原则进行优化分析，提出了中国特定目标约束下的碳排放路径。

#### 1.4.3 减污降碳协同治理技术研究

在减污降碳协同治理技术研究方面，已有研究多从宏观视角出发，基于综合评估模型框架来量化实施协同治理技术所能带来的环境及健康协同效益。如 Wang 等通过对能源系统转型、跨部门连接和技术渗透的详细建模，为加州在 2050 年实现温室气体净零排放制定了路线图，并对减少共同排放的空气污染物带来的相关健康协同效益进行量化，发现使用带有碳捕获和封存技术的生物能源能够抵消一些温室气体排放，但该技术将排放相当数量的空气污染物，并减少 40 亿美元的健康协同效益；Jon 等基于综合建模框架，证明了需要具有适当技术细节水平的模型来进行准确的协同效益评估，发现一系列的技术部署，如限制生物能源、碳捕集与封存（CCS）或核电，可以带来显著的协同效益；Zhang 等开发了一个集成关系框架，量化了 2010-2030 年京津冀水泥行业在能源效率提高、CO<sub>2</sub> 和空气污染物减排以及与空气污染相关的公共卫生效益方面的潜力，研究发现在技术潜力情景下，实施所有最佳可用技术将节省 23% 的能源，CO<sub>2</sub> 排放量减少 5%，空气污染减少 16%；Ren 等基于综合评估框架来探索水泥行业的碳中和

路径及相关环境影响，发现中国应充分利用节能技术来协同控制 CO<sub>2</sub> 和空气污染物的排放，同时避免 BECCS 的负面效应；Zhu 等量化了加州不同的长期低碳方案的健康协同效益以及它们在不同社区的分布，发现健康效益的大小和分布取决于个别终端使用部门的技术和燃料转换。还有少数研究聚焦于某一行业微观视角来评估技术应用所产生的协同效益，如 Zhao 等基于 MESSAGEix-氨模型，考虑了能源效率（EE）技术和替代技术，量化了氨工业最新的能效措施带来的节能和减排，研究发现到 2060 年，实施的具有成本效益的能效措施可以将 CO<sub>2</sub>、PM<sub>2.5</sub>、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放量分别减少 33%、24%、24%和 24%，而电解技术与 CCS 技术的集成可带来 98%的碳减排；Yang 等对中国石化和化工行业中长期被忽视的减排技术的碳减排效果和环境协同效益进行评估，发现在化工行业的 18 项技术中，余热利用和技术工艺改造技术的边际减排效益最高，石化行业中边际减排效益最大的技术则存在于效率提升、余热利用和涂层等三类技术；Peng 等研究了不同情景下中国目前各种基于部门的政策所带来的空气质量和 CO<sub>2</sub> 的协同效益，情景包括具体部门的燃料转换或技术升级策略，强调了工业能效提高和空气污染控制技术升级对中国的空气质量、健康和气候效益的重要性。

#### 1.4.4 减污降碳协同政策仿真研究

##### 1.4.4.1 减污降碳协同政策仿真

协同减排政策的优化设计需要综合评估减排成本与经济、社会、环境综合效益，并通过政策组合情景的设置，寻找成本收益最优的政策机制。相关工作在探讨协同减排政策优化设计的过程中，需要考虑多维度政策交互影响、不确定性条件下的政策工具优化组合、区域和行业异质性特征对政策机制的差异化需求，以及微观主体非完全理性

行为对政策作用机制和效果的影响。

**在政策工具选择与组合方面**，Weitzman 在其研究中提出了一个经典且有力的分析框架，其在信息不对称条件下，针对数量规制与价格规制进行了讨论，并分析了在不同边际减排成本与边际减排收益曲线的相对斜率下，应选择何种类型的政策，但其研究仅针对单一排放物开展讨论。而后，随着对多种排放物共同减排的关注度提升，Ambec 和 Coria、Evans、Stranlund 和 Son 等在其研究中也将在 Weitzman 的讨论框架从单一排放物拓展至多种排放物。Muller 认为考虑协同减排效益将提高地区的最优减排量，并减少外生约束导致的扭曲，而若以其作为减排责任的划定标准，则由于协同减排的异质性，不同地区的减排责任与福利水平也将出现分异。类似地，Jiang 等也发现，考虑气候政策的协同减排效益后，均衡的碳减排量将会收敛到更高的水平。而在价格规制方面，Muller 发现协同减排视角纳入后，污染物排放的影子价格有明显下降，Li 等关注到协同减排对碳定价的影响，在均衡下，单位碳排放的价格应等于边际碳减排成本，而在考虑协同减排效益后，会抵扣一部分的成本，导致均衡下的碳价也下降。Fullerton 和 Karney 具体减排成本的变化方向与两类排放在不同部门生产中互补性和替代性有关，同时也与生产过程中的要素替代弹性有关，这说明政策间存在复杂的互动关系，其效应也可能存在抵消或强化。由此，Reeling 等建议在不同排放物间建立综合交易，以减少一项政策对非目标排放物减排的负面影响，同时提升对碳排放与大气污染排放的综合管制效率。

**在区域和行业异质性影响方面**，Ayres 和 Walter 认为，大气污染与人群的接触范围，是影响各国协同减排效益大小的重要因素，人口密度较大的国家，其协同减排效益往往较大。Zheng 等对长三角地

区的碳减排政策进行了研究，同样发现协同减排效应在不同省市间存在异质性，且这一异质性来自于能源密集型行业占比、一次能源结构等因素的差异。傅京燕和原宗琳对中国电力部门的 CO<sub>2</sub> 与 SO<sub>2</sub> 协同减排进行了研究，发现在部分省市存在协同增排的情况，同时其也探讨了协同减排的扩张机制，并发现电力行业固定资产投资与能源效率的增进可强化这一效应，而研发经费的投入则会弱化这一效应，实际上也说明了省际间异质性的来源。Wang 等则对中国各省市的工业排放进行了研究，并发现针对大气污染的环境规制强度会强化协同减排效应。而 Dong 等则发现碳排放上升对居民健康的损害存在较强的地区异质性，并且工业化水平与城市化水平较高的地区，其碳排放增加带来的健康风险也往往更高。行业异质性方面，Wang 等发现传统的重工业部门和能源转化部门的协同减排效应明显较大，主要与其生产投入结构中化石能源比重较高有关。Qian 等发现非电力高耗能行业相较电力行业具有更高的协同减排潜力。Tan-Soo 等对参与上海碳交易试点的企业进行研究，发现其每周的 SO<sub>2</sub> 排放量与碳排放权价格间的负相关关系，主要在钢铁行业生效，系政策设计时对这一行业的实际约束较强。

**在微观行为对减排政策效果的影响方面**，现有主要的仿真模型均基于新古典经济理论和代表性主体行为构建的模型体系，对于微观主体有限理性、异质性行为，以及不确定性的刻画都存在天然的短板。基于主体的建模技术模型（Agent-Based Modeling, ABM）刻画在给定环境下具有代表性的个体之间错综复杂的交互行为，允许解决异质性和社会互动问题，用一个自下而上的方式刻画系统，用于解释基于微观主体行为的集体涌现现象。Lempert 就提出，在不确定性的市场环境下，引入 ABM 模型分析政策作用机制，对于优化政策设计是非常

有效的工具。Ghazi 等基于多智能体模型（MBM）分析了人类行为与大气污染之间的双向影响。Thober 等基于 ABM 模型研究了大气污染对人口迁徙行为的影响，提出了应对政策。Sun 等基于 ABM 模型分析了农业环境政策的优化设计。ABM 模型在温室气体排放领域也有了越来越多的应用，如 Niamir 等分析了家庭的社会经济性质，通过心理学建模家庭对绿色投资的选择过程，直接影响到间接效用函数。Lamperti 等在凯恩斯-熊彼特创新模型的基础上，分析不同公司市场竞争地位的差异，及其对绿色技术创新潜在收益的影响，刻画绿色技术转型中的公司行为；Kraan 等研究了发电资产配置、可再生能源技术的学习率等对异质性投资者回报率的影响。ABM 模型对主体异质性、不确定性和主体的有限理性学习过程的刻画，对减排政策研究的 IAM 可以形成有效的补充。目前已开展了一些 CGE 与 ABM 链接方法的研究，通过对异质性行为的精准刻画，实现了更好的模拟效果。不过目前针对协同减排，以及 ABM 和综合评估模型耦合建模的研究尚待发展，这也是本研究希望填补的空白。

#### 1.4.4.2 减污降碳协同政策实践

欧美以管理需求为牵引逐步在政策体系中强化气候变化应对与环境治理协同推进的理念。美国方面通过逐步完善《清洁空气法》覆盖范围，在联邦层面构建大气污染物与温室气体“协同治理”的法律基础。1963 年颁布的《清洁空气法》是全美国空气质量治理的基本框架，2007 年前后，面对温室气体减排需求，碳排放的规范和限制逐渐被加入美国联邦层面空气污染治理方案中。美国在《清洁空气法》中明确将温室气体定义为“大气污染物”，这为在同一法律框架下以传统“命令-控制”手段对温室气体和大气污染物进行统筹规制提供了法律基础。目前，美国环保署是美国在减污和降碳两方面的主要职责机

构，实现了管理职责上的统一归属。美国联邦层面大气污染物治理政策和碳排放治理政策也在工业、交通、能源领域中逐步趋于协同方向，包括在工业领域通过许可以实行“一证双管”，在交通领域对车辆规定强制性燃油效率最低标准，在能源领域尝试设定发电厂的碳排放标准等。欧盟方面，2016年前没有明确的环境污染与气候变化协同治理政策，空气质量治理主要依托于各项环境指令的颁布，而温室气体减排依托于各项能源结构调整政策的实施。2016年，欧盟在修订空气质量目标和相应的减排规划时强调空气质量目标设置应考虑与国家能源和气候政策的关联性和一致性，体现了欧盟减污降碳协同减排政策开始走向统一。2019年12月欧盟委员会公布了应对气候变化、推动可持续发展的《欧洲绿色协议》，希望能够在2050年前实现欧洲地区的“碳中和”，在法律层面，欧盟确定了在2050年前实现“碳中和”的愿景，并将这一目标写入了《欧洲气候法》草案，为对温室气体和大气污染物进行统筹规制提供了法律基础。2021年5月欧盟发布了最新的《欧盟行动计划：实现空气、水和土壤零污染》，致力于到2050年将空气、水和土壤污染降低到对人类健康和自然生态系统不再有害的水平，明确提出以综合方案来协同治理污染，污染防治政策应最大化与气候、能源、建筑、交通、工业、贸易等政策的协同效应。整体而言，欧盟在施政逻辑上逐步向减污降碳协同治理靠拢，但在具体政策措施层面，环境治理与气候变化应对工作在整体上仍处于分别推进的阶段。由于欧美等发达国家大多在基本解决环境污染问题后转入碳排放控制，缺乏对减污降碳两者协同治理的现实需求，因此尽管欧美等国在施政逻辑上逐步向减污降碳协同治理靠拢，但在具体实施层面尚未形成系统的协同治理体系，缺乏可以借鉴的技术方法与政策机制，特别是针对温室气体与大气、水、固废、生态环境等多要素协同治理

领域的耦合研究尚属空白。

锚定美丽中国建设和实现“双碳”目标，统筹大气、水、土壤、固体废物、温室气体等多领域减排要求，在科学把握污染防治和气候治理整体性的基础上，以碳达峰行动进一步深化环境治理，以环境治理助推高质量达峰，提升减污降碳综合效能，实现环境效益、气候效益、经济效益多赢。《实施方案》在顶层设计了我国实现减污降碳协同增效的具体路径，同时还引领了全球气候和环境协同治理，将对其他发展中国家协同推进实现气候变化应对及环境治理目标提供参考。在《实施方案》指导下，部分省市开展了管理实践。其中，浙江省主动争先，提出“争创减污降碳协同创新示范省”，经生态环境部同意后成为全国首个减污降碳协同增效创新区。《浙江省减污降碳协同增效创新区建设方案》确定了加强源头防控协同等六大重点任务与措施路径，提出了创新区建设改革、政策、实践、模式“四张清单”。浙江省还在全国率先发布了减污降碳协同增效指数，系统评估了该省 11 个设区市的减污降碳工作成效，识别出各地的工作亮点与短板，为持续完善减污降碳工作提供决策指引。青岛市在城市层面率先颁布实施了《青岛市温室气体减排和大气污染治理协同控制三年行动计划（2021-2023 年）》，通过开展体制机制融合创新行动、产业结构转型升级行动、空间要素集约发展行动、现代能源体系创建行动、交通运输结构优化行动、新型建筑规模发展行动，推动实现减污降碳协同增效。随着我国对减污降碳协同治理顶层设计的持续加强及各地区、行业试点示范工作的逐步推进，我国减污降碳协同治理的多层级实践体系正逐步展开，并将引领全球生态环境多要素与气候变化协同治理。

## 第二章 减污降碳领域年度研究成果梳理

### 2.1 协同理论基础领域

#### 2.1.1 基于能源-物质-排放关系的战略方法减少 CO<sub>2</sub> 和空气污染造成的环境损害

**标题：** Strategic approach to reduce environmental damage by CO<sub>2</sub> and air pollution based on Energy-Material-Emission Nexus: Insights from Beijing

**作者：** Daiwei Ouyang, Qingru Wu, Shuxiao Wang, Kaiyun Liu , Shengyue Li, Yao Li, Xinyun Chen, Kun Wang, Wenhao Wu, Zhaoxin Dong, Yueqi Jiang, Yanning Zhang, Zhezhe Shi, Bin Zhao, Kebin He

**期刊：** Resources, Conservation and Recycling

**链接：** <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108078>

**研究背景：** 许多发展中国家，如中国，面临着气候变化缓解和减少空气污染的双重压力。中国拥有全球最大的人为二氧化碳排放量，2021 年约占全球二氧化碳排放量的 31%。为缓解气候变化，中国已宣布其人为二氧化碳排放量将在 2030 年前达到峰值，并在 2060 年前实现净零排放。中国近年来实施了多项行动，显著改善空气质量的同时也减少了二氧化碳排放。然而，2023 年中国地级及以上城市的平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度为 30 微克/立方米，仍远高于世界卫生组织（WHO）最新指南范围的 0-5 微克/立方米。由于二氧化碳和空气污染物排放具有相似的来源，中国政府提出了协同控制二氧化碳排放和空气污染。城市是制定和实施政策以协调减少二氧化碳和空气污染物排放的基本行政区域。了解与能源和物质流动相关的二氧化碳和空气污染物排放的影响对于城市中碳和空气污染物排放的协同控制至关重要。

**研究内容：** 基于能源-材料-排放关系（Energy-Material-Emission

Nexus) 框架, 研究建立一个综合评估框架, 该框架结合了跨区域和跨部门的能源和物质流动、CO<sub>2</sub>和空气污染物 (SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub>、VOCs 和 NH<sub>3</sub>) 排放, 以及环境损害评估方法。这个框架旨在评估目标城市的能源-材料-排放关系, 并量化归因于关键产业链中二氧化碳和空气污染物排放的隐含货币化环境损害。

将这种方法应用于北京表明, 进口的一次能源、电力、水泥和钢铁中的间接排放对环境损害贡献了 56.2%。包括提高建筑能效和推广电动汽车在内的减排措施, 可以减少超过 35% 的环境损害, 其中超过 80% 得益于消费端措施, 大约 40% 发生在周边地区。这项研究强调了消费型城市实施战略方法的迫切需要, 通过利用消费端措施控制能源和物质消费的增长, 并与其他地区协调以减少能源和物质生产中二氧化碳和空气污染物排放强度。

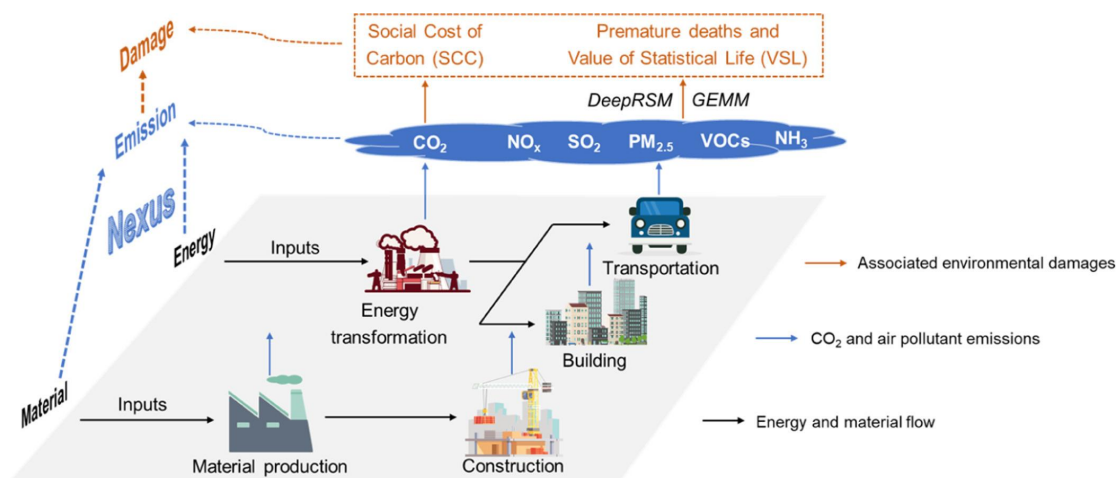


图 2.1-1 能源-材料-排放关系 (Energy-Material-Emission Nexus) 框架图

**研究结论:** 该项研究建立了能源-物质-排放关系框架, 并以北京作为案例区域, 评估了 2021 年关键产业链引起的能源和物质消耗、相关的二氧化碳和空气污染物排放以及环境损害。结果表明, 北京消费造成的环境损害中有很很大一部分转移到了周边地区。北京的消费端措施可以有效减少北京及其周边地区的总环境损害。

结果强调了在消费型城市实施消费端措施对于实现城市群中减碳和污染控制协同效应的重要性。

### 2.1.2 结合短期和长期排放控制措施可持续地改善中国的空气质量

**标题：** Combined short-term and long-term emission controls improve air quality sustainably in China

**作者：** Zhang Wen, Xin Ma, Wen Xu, Ruotong Si, Lei Liu, Mingrui Ma, Yuanhong Zhao, Aohan Tang, Yangyang Zhang, Kai Wang, Ying Zhang, Jianlin Shen, Lin Zhang, Yu Zhao, Fusuo Zhang, Keith Goulding & Xuejun Liu

**期刊：** Nature Communications

**链接：** <https://www.nature.com/articles/s41467-024-49539-9>

**研究背景：** 过去 40 年，中国经济迅速增长。与此同时，环境问题日益严重，破坏了生态系统和人类健康。人们对空气污染的体验普遍、直接且强烈。因此，公众对改善空气质量的需求强烈。从 20 世纪 80 年代开始，中国开始关注二氧化硫（SO<sub>2</sub>）排放和酸雨的破坏及必要的控制措施。2010 年后，对空气质量改善的关注转向了反应性氮（Nr）污染和细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）。在此期间，随着经济的稳步发展，中国组织了一些重要的国际大型活动。为了确保“蓝天”（即清洁空气），中国政府在活动期间实施了许多短期污染物排放控制措施（每次持续约一个月），包括暂停工业活动以减少 SO<sub>2</sub> 和氮氧化物（NO<sub>x</sub>）排放，以及减少活动地点及周边的车辆流动，主要针对 NO<sub>x</sub>，即最小化大气污染，但代价是巨大的经济损失。为了维持“蓝天”，中国政府发布了一系列旨在长期减少污染物排放的政策（即应持续多年的政策），如 2013 年发布的《大气污染防治行动计划》（被称为大气十条），2018 年发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》（被称为三年保卫战），以及行动计划的第二阶段。预计长期减排策略更有可能实现环境目标。

大型煤炭消费者、发电厂、工业和交通部门是优先目标，已显著减少 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放。这有效地缓解了酸雨并降低了 PM<sub>2.5</sub> 浓度，这一点已通过排放清单、环境监测和模型模拟得到证实。那么，当长期排放控制政策似乎有效时，引入短期、临时措施是否合理且必要呢？

**研究内容：**国家政策对空气污染控制的有效性已得到证明，但短期减排措施与国家政策相比的相对有效性尚有待验证。研究显示，在重要国际活动期间的短期减排措施显著降低了 PM<sub>2.5</sub> 浓度，但在措施停止后，空气质量反弹至活动前的水平。长期坚持严格的减排政策，使得北京的 PM<sub>2.5</sub> 浓度成功下降了 54%，中国大气氮沉降下降了 23%，这一成果是从 2012 年到 2020 年实现的。在“蓝天”类运动的激励下，经济发展与反应性氮污染迅速脱钩，表明结合激励性的短期措施和有效但持久的长期政策可以实现空气质量的持续改善。然而，氨浓度的增加、跨境污染物流动以及在气候变化情景下实现减排目标的复杂性，强调了需要协同控制多种污染物和跨区域行动的必要性。

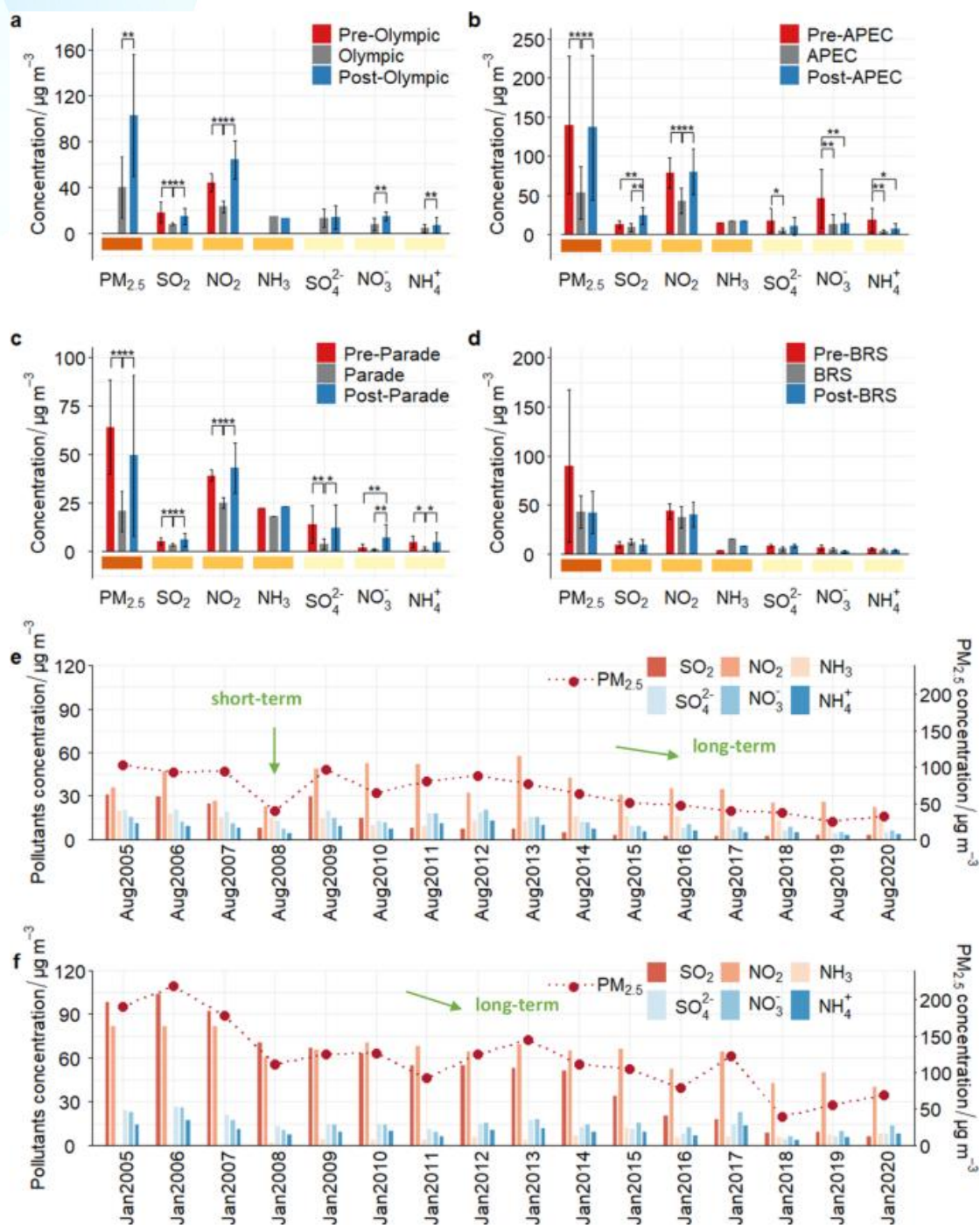


图 2.1-2 北京的  $PM_{2.5}$ 、气态前体物 ( $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $NH_3$ ) 以及二次无机离子 ( $SNA: SO_4^{2-}$ 、 $NO_3^-$ 、 $NH_4^+$ ) 浓度 (平均值 $\pm$ 标准差)。

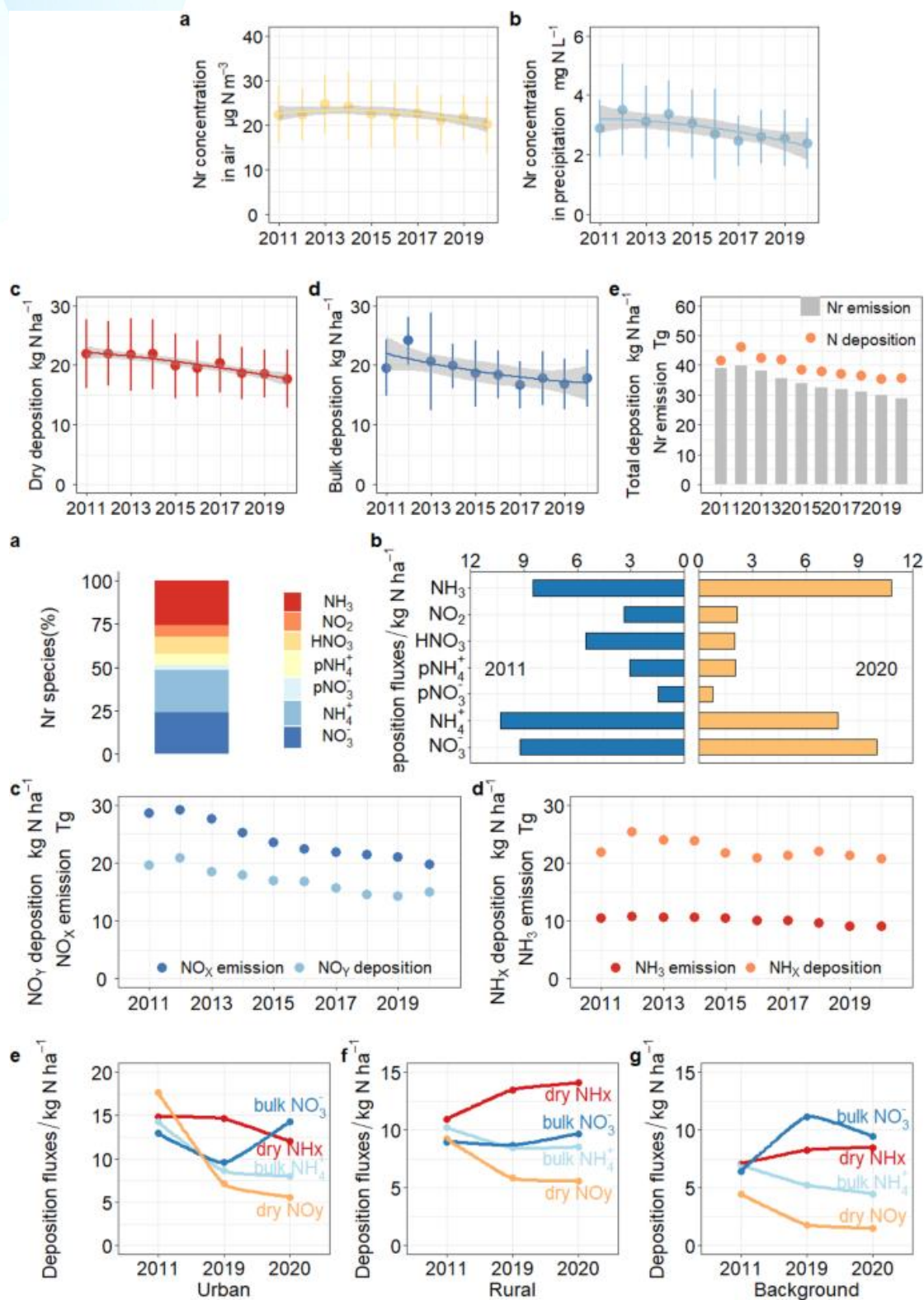


图 2.1-3 还原态和氧化态氮沉降的年际变化

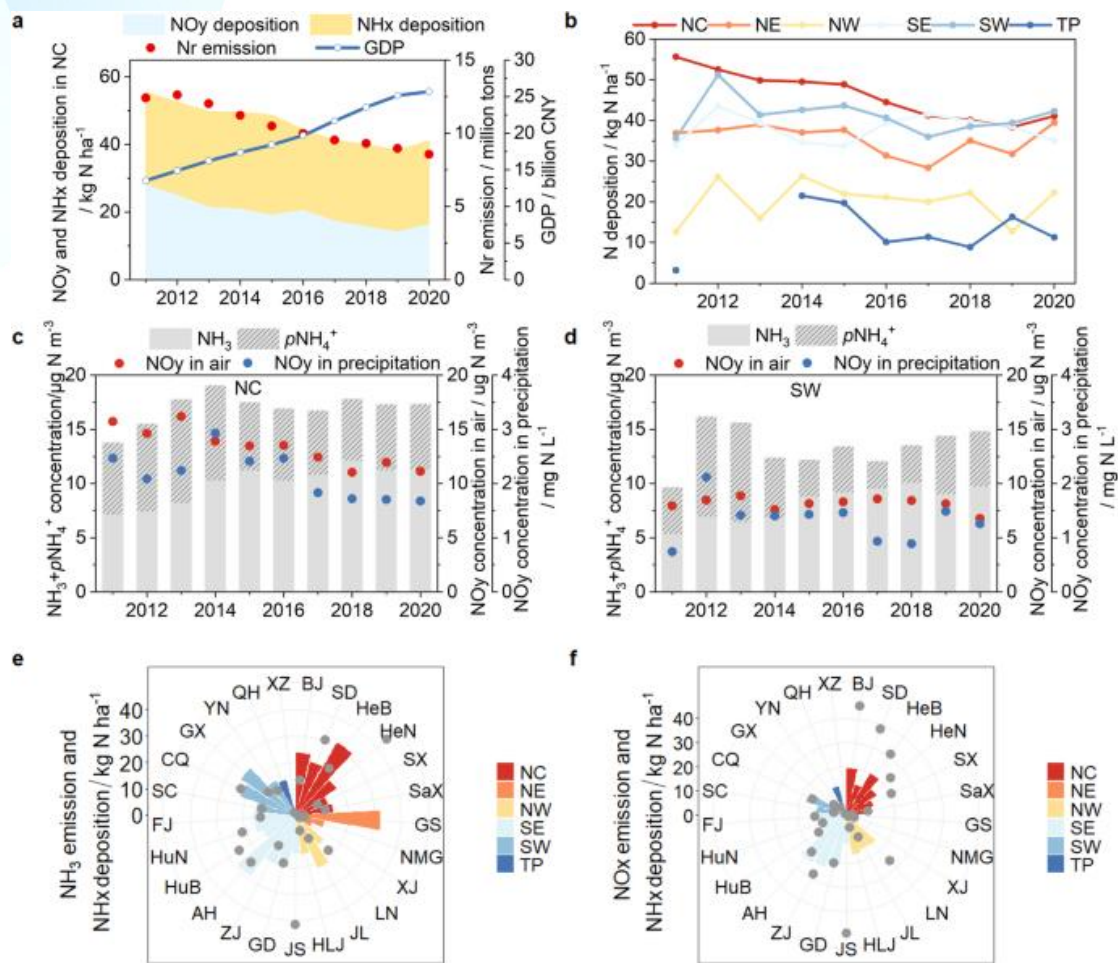


图 2.1-9 不同区域氮沉降年际变异性的特征

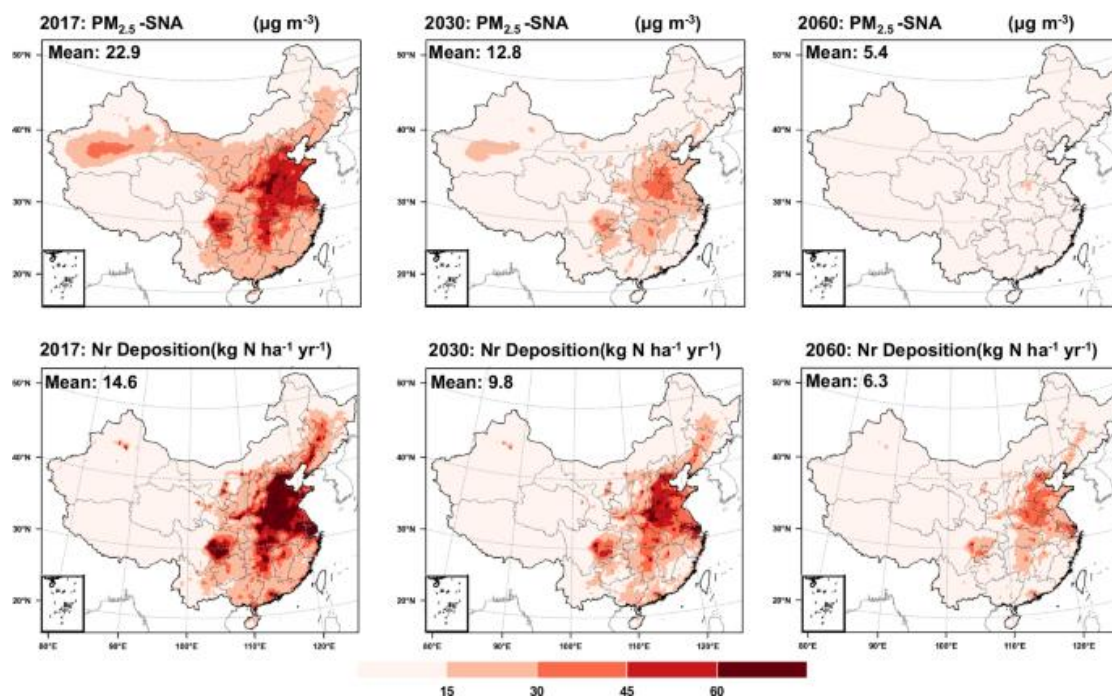


图 2.1-4 2017 年、2030 年和 2060 年中国年均 PM<sub>2.5</sub>-SNA 浓度和氮沉降

与酸性气体排放减少不同，后者可以通过短期措施和长期政策实现，非点源  $\text{NH}_3$  排放的控制只能通过提高作物氮利用效率和减少环境影响的农业创新来实施。目前，空气质量控制措施主要集中于末端处理和清洁生产，这对空气污染排放控制目标有益，但可能无法实现改善空气质量和减缓气候变化的双重目标。因此，政策制定者应该推动影响所有必要部门和目标的可持续方法，例如通过原料、产品结构和生产设备升级实现工业的低/零/负碳生产方法，通过普及电动汽车和对柴油卡车、飞机和船只的协同污染控制实现交通领域的超低污染物排放，以及通过作物育种和生产的精准管理实现农业的绿色发展。

与现行政策相比，政策制定应考虑三个权衡关系。一是前文提到的激励性但激进的短期措施与有效但持久的长期政策之间的权衡。长期和短期排放控制政策的结合是改善空气质量的可持续解决方案。频繁或长期实施高强度的短期控制措施将扰乱工业、交通和居民生活的发展。因此，在长期排放控制效果尚不确定时，应每 1-2 年进行一次短期但重大的排放控制行动，以明确区域减排潜力。政策制定者应逐步调整控制强度，并与长期目标保持一致，确保平稳过渡和持续进展，为空气质量改善定义具体且可实现的长期目标，这些目标应以短期减排的成功为基础。从长远来看，需要明确两个方面。首先，“污染者识别”。例如，钢铁行业的烧结是  $\text{NO}_x$  排放的主要来源，而在农业中，来自畜禽粪便处理的大量  $\text{NH}_3$  被排放。因此，为了提高污染管理效率，必须明确减排的具体目标（包括关键排放部门和关键排放阶段）。其次，应实现“污染者付费”的原则。为了确保污染管理在环境和经济方面的公平性，必须识别区域间污染物的输入和输出。需要更精确地量化跨界贡献，这可以为后续区域间的补偿机制提供数据支持。

第二是氧化态-还原态氮沉降/干-湿氮沉降的权衡，因为氧化态氮干沉降的减少被总沉降的增加所抵消，酸性气体排放的减少增加了  $\text{NH}_3$  浓度。为了避免这种情况，需要协同控制多种前体物。与  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  相比，几乎不可能迅速实现  $\text{NH}_3$  浓度的快速降低。我们在 COVID-19 封锁期间的案例研究证明，尽管 2020 年 2 月交通和工业  $\text{NH}_3$  排放大幅减少，但 1 月至 2 月的  $\text{NH}_3$  环境浓度（17%）仍超过往年水平（9%），而  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  的浓度分别下降了 24% 和 49%。这表明，与酸性气体的大幅减少相反， $\text{NH}_3$  排放只能通过更好的肥料和粪便管理逐步减少。由于缺乏政府监管的国家  $\text{NH}_3$  监测系统， $\text{NH}_3$  对空气质量和环境的影响仍然是理论上的争论。目前，中国各地已建立了“绿色示范区”，在这些区域，精准和智能农业的系统转型将提高氮利用效率并减少  $\text{NH}_3$  挥发。我们建议在这一领域加强  $\text{NH}_3$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和大气氮沉降的研究，将空间上的“区域”与时间上的“短期”研究类比，从而通过案例研究识别国家减少  $\text{NH}_3$  排放的潜力和环境影响。

第三是区域间  $\text{Nr}$  污染和控制的权衡。面对空间异质性和跨界空气污染，需要采取区域特定和跨区域的预防措施。在跨界污染传输的情况下，实施更严格的排放标准和生产技术创新可以为起源和目的地区域带来双赢的空气污染减少。我们的区域化结果将有助于设计需要进一步研究的区域特定污染控制策略。此外，将公众意见纳入策略和政策制定及实施过程中很重要，平衡公民改善空气质量的愿望与确保他们生活正常进行的需求。特别是对于非点源  $\text{NH}_3$  排放的控制，为了实现全面和可持续的空气质量改善，至关重要是专注于促进可持续农业实践的目标策略，并涉及包括政府机构、农民和公众在内的所有利益相关者的合作。量化与污染传输相关的经济利益和环境成本有助于揭示区域排放和污染的环境不平等。正如本研究所反映的，经济发达

地区将 Nr 排放转移到邻近地区，导致这些地区遭受经济和环境损失。目前，几乎未讨论在多重约束（空气污染、气候变化、生态影响）下的区域间经济补偿。鼓励经济更发达的地区增加在减排技术转型中的绿色投资，并可能需要补偿周围的污染地区。这可以通过税收激励、补贴和贷款等经济措施来实现，鼓励企业和消费者做出更环保的选择。例如，可以为使用清洁能源和节能技术的企业和农场提供财政支持，并对购买环保产品和服务的消费者给予税收减免。我们的工作还表明，长期监测对于有效理解环境变化和空气质量改善至关重要，这是单独的短期研究所无法实现的。

### 2.1.3 兼顾城市边界内外温室气体排放的碳中和新框架

**标题：** Expanding carbon neutrality strategies: Incorporating out-of-boundary emissions in city-level frameworks

**作者：** Zhe Zhang, Mingyu Li, Li Zhang, Yunfeng Zhou, Shuying Zhu, Chen Lv, Yixuan Zheng, Bofeng Cai, Jinnan Wang

**期刊：** Environmental Science and Ecotechnology

**链接：** <https://doi.org/10.1016/j.esec.2023.100354>

**研究背景：**随着全球变暖速度加快，实现《巴黎协定》的各目标变得至关重要。城市在缓解气候变化、减少二氧化碳排放方面发挥着重要作用，然而，传统的城市碳中和策略往往忽略了城市边界之外的排放，但这一部分恰恰是实现全方位碳减排战略的关键。为此，本研究构建了一个综合分析预测框架，该框架既考虑了城市内部产生的碳排放，也考虑了城市边界外的碳排放。

**研究内容：**本研究以中国服务型城市武夷山为研究对象，提出了一项开创性的城市碳中和战略，介绍了一套计算并减少温室气体排放的全面的方法，强调了经常被忽视的城市边界外排放的重要性，界外排放占武夷山碳排放总量的 42%。该框架创新性地将生命周期评估与

IPCC 清单法相结合，涵盖了城市碳排放的全范围（范围一、范围二和范围三）。对于武夷山实现全范围碳中和而言，减排措施包括太阳能发电、推广电动汽车和改善农业生产方式等。武夷山计划到 2035 年前大幅提高可再生能源和电气化水平，这表明了武夷山对可持续低碳发展的坚定承诺。本研究强调，要制定有效的碳减排战略，必须从城市内部和外部两个方面着手，这对发展中国家的城市尤为重要。随着快速的城市化和产业变革，这些城市在可持续发展方面将面临着巨大且特殊的挑战，本研究为全球城市制定综合可行的碳中和方案提供了科学依据。

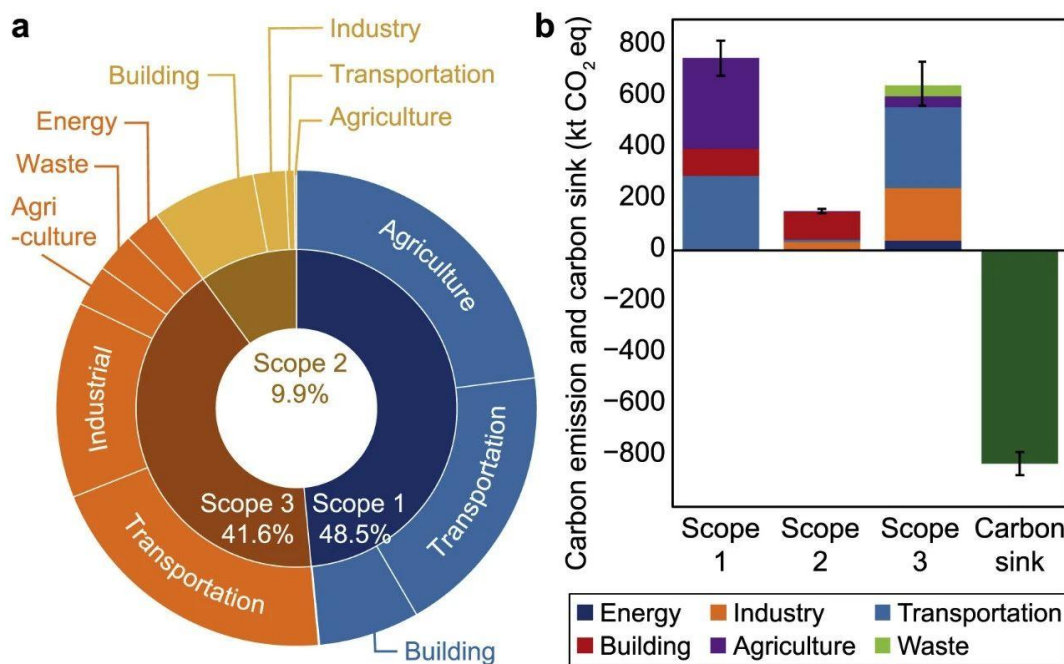


图 2.1-5 各范围和部门的相对贡献；b, 不同来源的预估温室气体排放量和碳汇

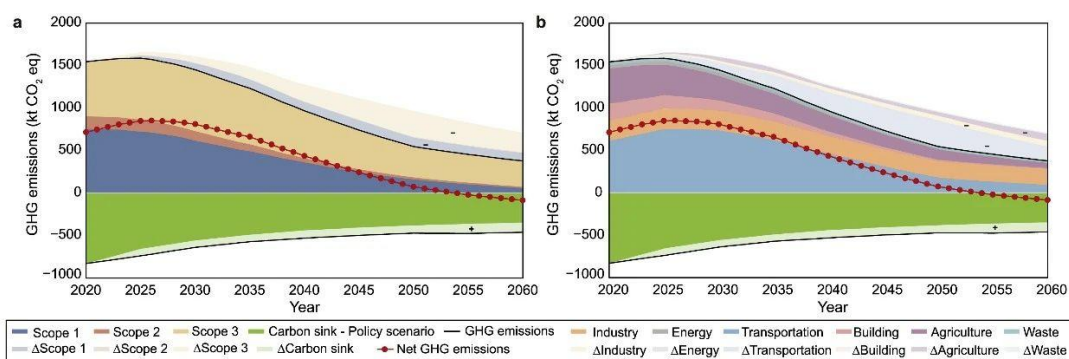


图 2.1-6 低碳情景下的温室气体排放路径，以及政策情景与低碳情景之间的差异，按范围（a）和部门（b）划分。负号（-）表示温室气体减排量，正号（+）表示与政策情景相比，低碳情景下的碳汇增加量。

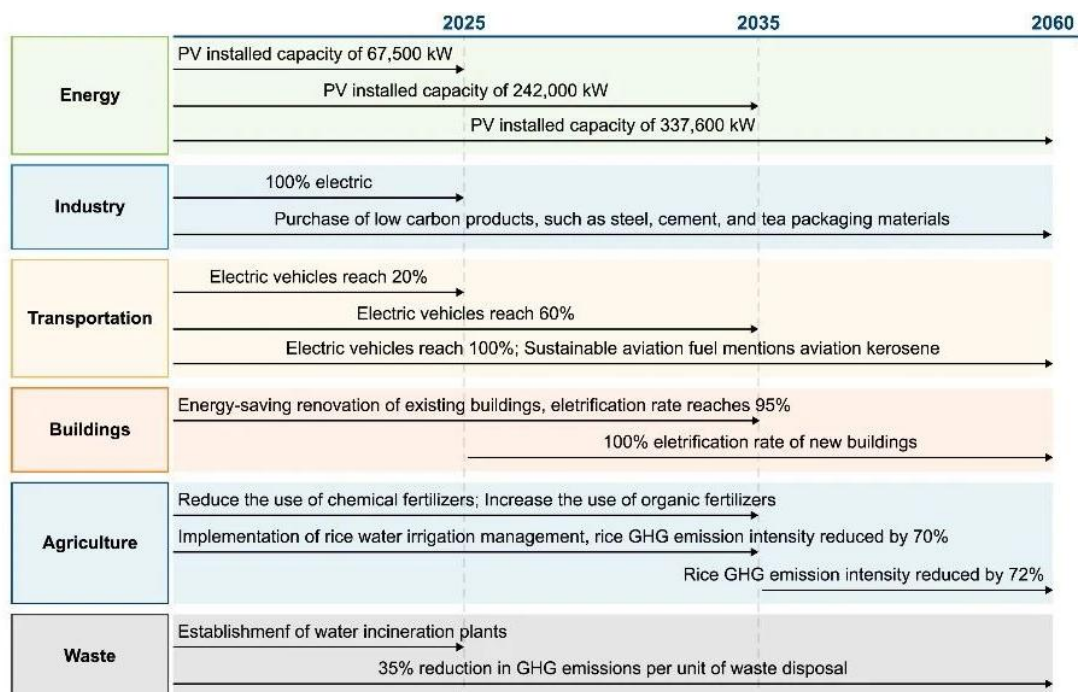


图 2.1-7 武夷山市短期、中期和长期碳中和路线图

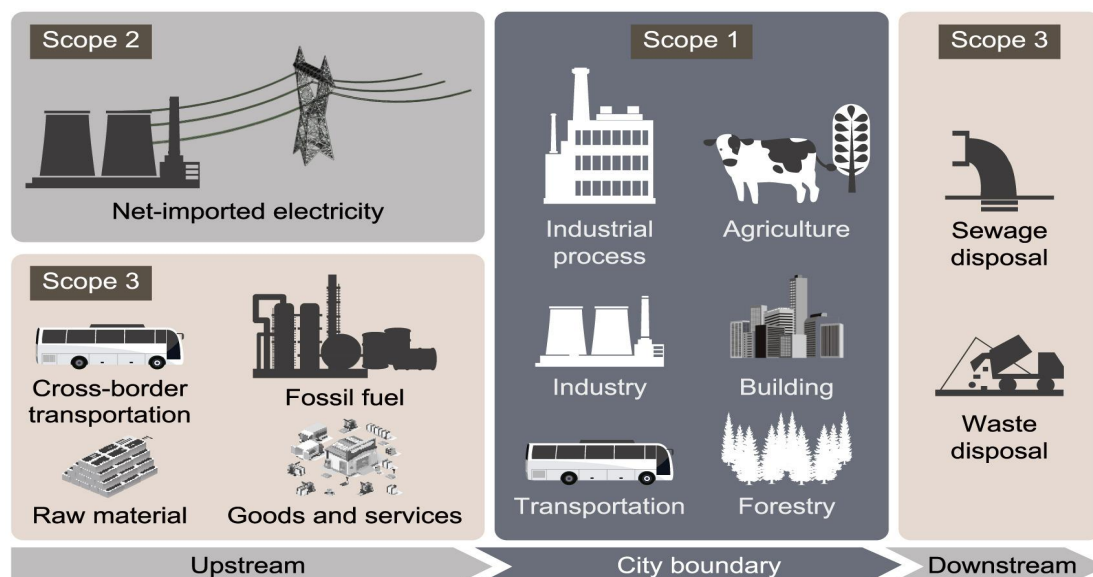


图 2.1-8 温室气体排放的系统边界涵盖了范围 1、范围 2 和范围 3

#### 2.1.4 识别中国空气污染与二氧化碳排放协同控制的关键来源

**标题：** Identifying Key Sources for Air Pollution and CO<sub>2</sub> Emission Co-control in China

**作者：** Yixuan Zheng, Wenxin Cao, Hongyan Zhao, Chuchu Chen, Yu Lei, Yueyi Feng, Zhulin Qi, Yihao Wang, Xianen Wang, Wenbo Xue, Gang Yan

**期刊：** Environmental Science & Technology

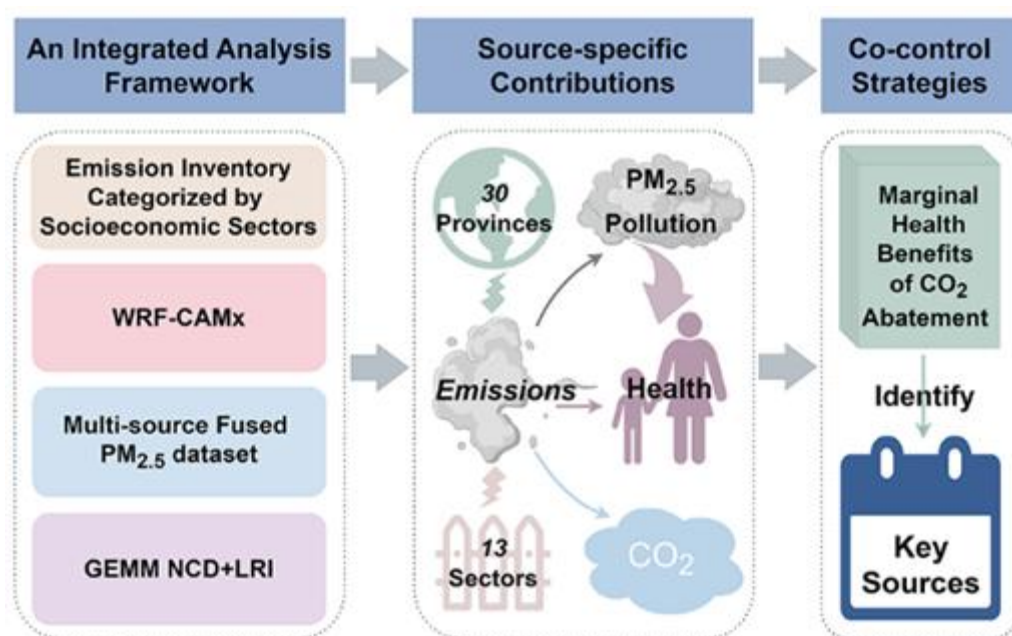
**链接：** <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.4c03299>

**研究背景：** 研究耦合基于社会经济部门分类的大气污染物与碳排放清单、大气化学传输模型及其排放溯源模块、多源融合的高精度 PM<sub>2.5</sub> 浓度数据集以及流行病学暴露-响应关系模型，建立了识别碳污协同治理重点排放源的综合分析框架。基于这一分析框架，量化了全国 390 个排放源对于国家 CO<sub>2</sub> 排放、人口加权平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度及 PM<sub>2.5</sub> 相关健康影响的贡献，识别了碳污排放环境影响的空间-部门二维异质性。在此基础上，逐一量化了各排放源单位碳减排的边际环境健康效益，遵循优先减缓空气污染相关健康负担的原则，识别出中国大气污染和 CO<sub>2</sub> 协同治理的关键排放源。

**研究内容：** 不同排放源对 CO<sub>2</sub> 排放的贡献与对 PM<sub>2.5</sub> 污染及其健康影响的贡献呈现显著异质性。例如，电力和供热部门对全国碳排放贡献显著（占比>40%），是降碳的关键部门，但由于超低排放改造的大规模实施，在这一部门进一步减污的潜力相对较小；另一方面，农村民用对全国 PM<sub>2.5</sub> 污染相关过早死风险的贡献为 18%，是减污的关键部门，但其对全国 CO<sub>2</sub> 排放相对有限（~2%）。以上差异表明，不同排放源的治理优先级与政策偏好直接相关，在控碳为主、减污为主、或碳污协同控制等不同偏好下，所形成的治理策略将存在显著差异。

研究进一步对不同排放源的协同治理潜力开展分析，聚焦在大气

污染物和 CO<sub>2</sub> 排放具有“同源”或“同过程”的部门（包含电力及供热、金属冶炼业、非金属矿物制品业、交通、农村民用、城市民用等 10 个部门），发现全国 300 个排放源单位碳减排的边际环境健康效益相差近 3 个数量级。从优先减缓空气污染相关健康风险的原则出发，应在协同治理政策制定过程中优先考虑单位碳减排边际环境健康效益更高的排放源；同时也应关注整体碳污排放影响均显著的部门。基于以上原则，本研究识别出农村民用、交通、金属冶炼及电力和供热部门等大气污染物和 CO<sub>2</sub> 排放协同治理的关键部门。对农村民用和交通部门而言，单位碳减排的健康效益相对较高；对电力和供热部门而言，单位碳减排的健康效益虽相对较小（相关源集中在左侧区域），但 CO<sub>2</sub> 排放贡献大高，且对 PM<sub>2.5</sub> 相关健康风险的贡献仍相对显著；对金属冶炼业而言，其碳污排放总体影响较大，且单位碳减排的健康效益呈现显著的空间异质性。此外，山东、河南等人口密集的重工业省份被识别为协同治理的重点地区。



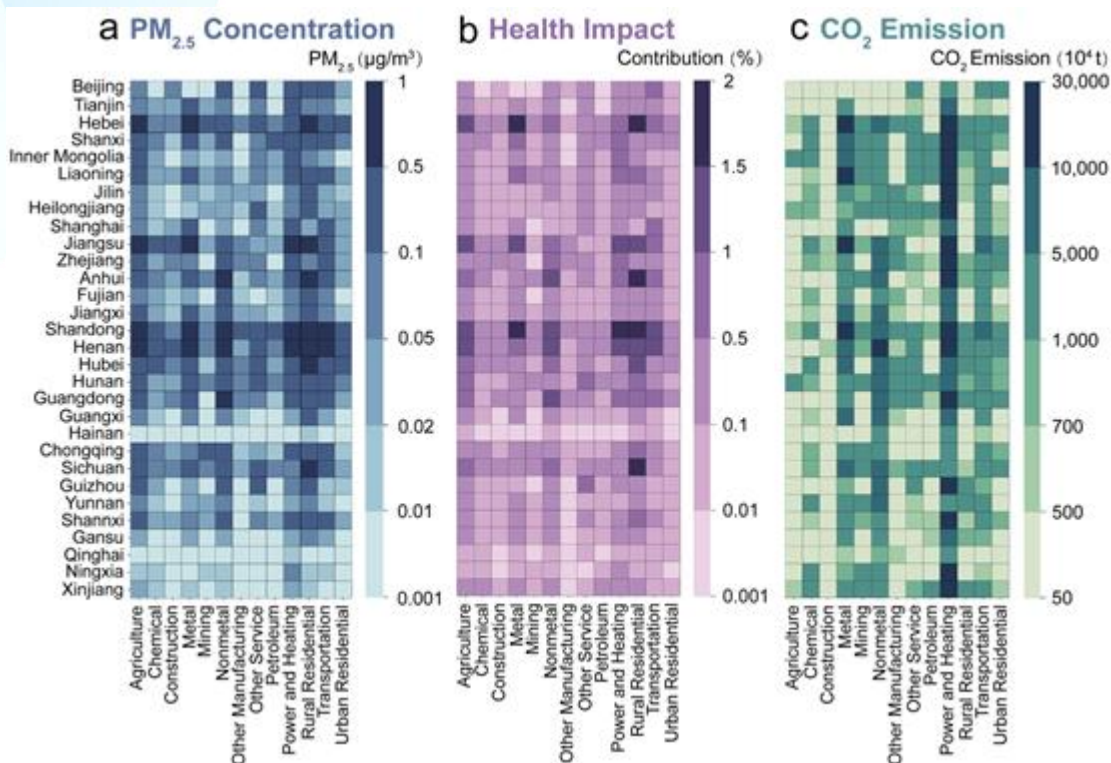


图 2.1-9 全国 390 个排放源对全国 PM<sub>2.5</sub> 污染及相关健康影响、CO<sub>2</sub> 排放的贡献

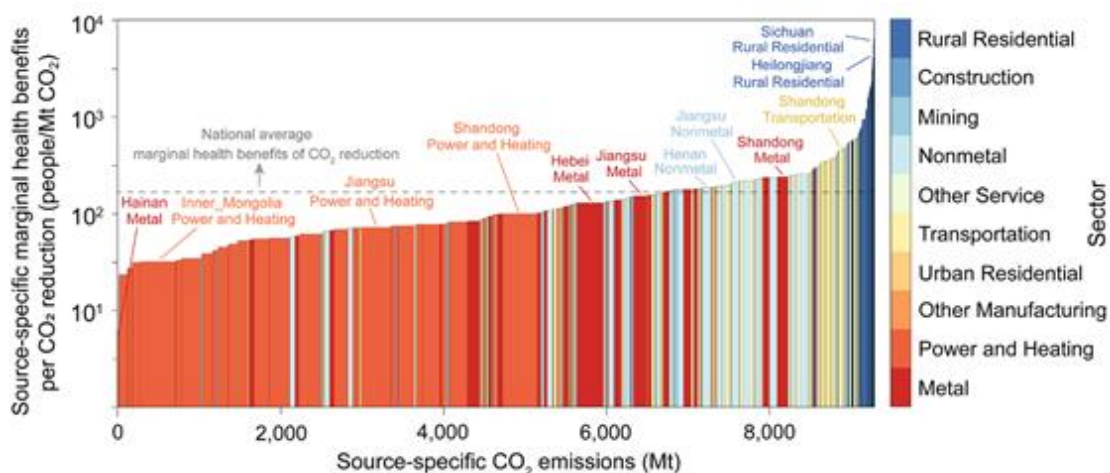


图 2.1-10 全国 300 个排放源的单位碳减排的边际健康效益

**研究结论:** 综上所述, 考虑到各类排放源在大气污染治理与 CO<sub>2</sub> 减排方面的优先级存在显著差异, 建议在设计大气污染与 CO<sub>2</sub> 排放协同治理策略时, 优先考虑大气污染改善及公众健康保护的需求, 以提升政策整体的社会福祉。未来, 应积极探索针对关键排放源的结构调整措施, 推动实现减污降碳协同增效。例如, 对于农村民用部门, 可在

深化北方地区清洁取暖改造的基础上，面向全国推广民用清洁能源转型；对于交通部门，需持续提高客、货运车队的电气化比例；对于金属冶炼业，应加快淘汰落后产能和化解过剩产能的步伐，提升基于清洁能源的冶金技术占比；对于电力和供热部门，应持续深化可再生能源的规模化部署，加快构建新型电力系统。

### 2.1.5 中国城市“减污降碳”协同效应及其影响因素

**标题：** The synergy between pollution reduction and carbon reduction in Chinese cities and its influencing factors

**作者：** Kai Liu, Guixiu Ren, Shumin Dong, Yuting Xue

**期刊：** Sustainable Cities and Society

**链接：** <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105348>

**研究背景：** 减少空气污染和碳排放是实现全球可持续发展目标（SDGs）的两个关键因素，因此，国际社会长期关注解决这两个问题。在中国，空气污染成为制约经济增长、生态文明建设和公共卫生安全的主要环境难题。同时，中国作为全球能源消费和碳排放的大国，在应对气候变化方面扮演着至关重要的角色。与那些在解决气候变化问题之前就已经着手治理环境污染的发达国家相比，中国正面临着同时减少空气污染和碳排放的双重任务。因此，推动污染减排（Pollution Reduction, PR）和碳减排（Carbon Reduction, CR）的协同发展是中国当前环境政策的核心内容。深入研究和理解这种协同效应及其影响因素，对于制定高效的政策措施具有极其重要的价值。

**研究内容：** 本研究选取中国 295 个城市作为研究对象，评估空气污染物和碳排放同步减少的趋势，并从自然和人文角度探讨其影响因素。建立了改进的 Tapio 脱钩原理（Tapio Decoupling Principle）来评估这些城市 PR 和 CR 之间的协同作用，并采用 Probit 模型分析各种因素的影响。旨在全面了解中国城市 PR 和 CR 的协同效应及其影

响因素，为中国 PR-CR 协同效应的政策制定提供理论基础。研究发现：（1）大约 51.5%（152 个）的城市展示了 PR 和 CR 之间的协同效应。这种协同效应在不同年份有所变化。（2）剩余的 48.5%（143 个城市）没有展现出这种协同效应，这主要是由于碳排放的增加。这些城市可以分为三类：主要受空气污染影响的、主要受碳排放影响的，以及两者都受影响的。（3）环境规制成为促进这种协同效应的最重要因素，其系数为 81.47，影响显著。其他正向影响因素包括年降水量、海拔、植被、第二产业比重、建筑用地面积比例和绿色专利。相反，年平均温度和地形起伏幅度对协同效应产生了负面影响。



图 2.1-11 中国城市“减污降碳”协同效应及其影响因素

**研究结论：**（1）有效减少碳排放对于城市实现 PR 和 CR 之间的协同至关重要。这个目标可以通过技术进步、税收、金融和财政激励

等措施实现。(2) 环境规制被确定为促进 PR-CR 协同的最重要因素。在全国范围内,环境规制政策的完善提供了改进的机会,特别是在公众参与和环境信息披露方面。此外,利用环境规制对技术创新的积极溢出效应可以刺激绿色技术市场,增强 PR-CR 协同。(3) 在制度层面建立 PR 和 CR 的协调管理系统是至关重要的。此外,可以将 PR 和 CR 的协同情况纳入评估指标,以鼓励这些城市的政府部门关注 PR 和 CR 之间的协同。(4) 政府对绿色技术的投资和知识产权制度的改进至关重要。鼓励私人投资并在城市和地区之间的绿色创新平台之间建立联系,可以优化资源共享和配置。

### 2.1.6 减污降碳协同效应时空特征分析

**标题:** Spatiotemporal Characteristics and Influencing Factors of the Synergistic Effect of Pollution Reduction and Carbon Reduction in China

**作者:** 王雅楠, 李冰迅, 张艺芯, 赵滢, 苗程凯, 安嘉琪

**期刊:** 环境科学

**研究背景:** 当前,我国同时面临实现生态环境根本好转和实现碳达峰碳中和两大战略任务,生态环境发生根本性变革,在此背景下,协同推进减污降碳协同增效是推动我国生态环境改善由量变到质变的必然选择。从大气减污和碳减排的源头治理来说,减污和降碳是高度一致的、协同性很强。减污降碳协同增效可以实现提高政策效率、降低成本、强化公共健康等多重效益对此,生态环境部等七部门于 2022 年 6 月联合印发《减污降碳协同增效实施方案》,标志着我国进入推动减污降碳协同治理的崭新阶段。但当前我国减污降碳协同治理协同度水平较低,碳减排与大气污染控制系统间尚处于不稳定、不协调的状态,减污降碳协同效应及其多重效应尚未有效发挥。因此,对减污降碳协同效应的时空演变趋势及其影响机制进行研究同时识别重点区域,是提高政策

效率，助力我国经济社会全面绿色转型、区域协调发展、推动我国生态环境治理根本性变革的必然选择。

**研究方法：**运用耦合协调模型计算碳减排与大气污染控制系统的耦合协调度，分析减污降碳协同效应在全国、区域和省域层面的时空分布特征；采用 2006~2020 年省级面板数据构建固定效应模型，对各层面的减污降碳协同效应的影响因素进行研究，引入研发经费投入强度作为调节变量，构建调节效应模型对减污降碳协同效应的影响机制进行进一步探究。结果表明：①碳排放与大气污染排放存在协同效应，2006~2020 年我国减污降碳协同效应演变呈现倒“U”型趋势，且减污降碳协同存在空间聚集性以及空间溢出效应；②我国减污降碳协同治理水平较低，各省份和区域在减污降碳协同治理水平上存在发展不平衡的特点，协调度呈现出东部地区、中部地区和西部地区依次递减的特征；③从全国层面来看，能源消费结构、人均 GDP 以及环保投资占比是减污降碳协同效应的主要影响因素；产业结构、能源消费结构、能源利用效率、人均 GDP、城镇化率、环保投资占比以及交通运输结构对减污降碳系统效应的影响在中、东、西部地区间存在异质性；④研发投入强度在东、中部均起到显著的调节效应，但在西部地区未识别出显著的调节效应。在东部地区，城镇化率、环保投资占比和交通运输结构无法单独对减污降碳协同效应产生影响，要与研发投入强度相配合能够对减污降碳协同效应产生显著影响。

**研究内容：**本研究从减污和降碳双视角出发，利用耦合协调度模型，从全国、区域和省域多层面揭示减污降碳协同效应的现状和时空演变特征。基于面板固定效应回归模型，在对中国以及区域减污降碳协同效应影响因素进行定量分析的基础上引入研发

投入强度这一调节变量，进行影响机制的进一步探究，最后提出相应政策建议，以期为我国以及各区域提高减污降碳政策实施效率、促进区域协调发展和经济社会全面绿色转型提供参考。

从全国层面来看，人均 GDP 在 10% 的水平下显著正向影响减污降碳协同效应，人均 GDP 和研发投入强度的交互项显著为负，说明随着研发投入强度的提高，抑制人均 GDP 提高对碳排放与大气污染物协同减排作用。意味着现阶段我国研发投入强度的提高所带来技术水平提升在提高生产效率的同时带来了大气污染物的增排以及更大程度的碳增排从而抑制了两系统协调作用的发挥；环保投资占比在 1% 的水平下显著促进减污降碳协同效应，环保投资占比与研发投入强度的交互项为正，意味着随研发投入强度的提高，增强了环保投资占比提高对减污降碳协同效应的正向影响。研发投入的提高节约生产成本、提高生产效率，从而使企业和政府有更多的资金用于环境治理，在一定程度上促进了碳与大气污染物的协同减排。

能源利用效率、交通运输结构以及城镇化率在引入调节变量后交互项显著，说明以上不能单独对减污降碳协同效应产生影响，必须结合研发经费投入强度相配合，即提高能源利用效率、改善交通运输结构以及提高城镇化率的相关政策必须与研发经费投入强度调整的相关政策相配合才能对减污降碳协同效应产生显著影响。

从东部地区来讲，能源利用效率、能源消费结构分别在 10% 和 5% 的水平上显著为负，且两个变量与研发投入强度的交互项均显著为负；人均 GDP 在 10% 的水平上显著为正，人均 GDP 与研发投入强度交互项显著为负，表明研发投入强度的提高增强了

能源利用效率提高和能源消费结构改善对减污减碳协同增效的抑制作用,同时抑制了人均 GDP 的增长对温室气体与大气污染物协同减排的促进作用;总体上,东部地区随着研发投入强度的提高,生产技术得到改善,技术改善在提高生产效率的同时加快了能源消耗使能源消耗总量提高,从而抑制了减污降碳协同增效.因此对于该地区,要注意在经济发展的同时注意研发经费的适量投入,避免对生态环境和双碳目标带来不可逆的影响。

对于中部地区,研发投入强度与环保投资占比的交互项显著为正;为正向调节作用,即研发投入强度的增加增强了环保投资增加对于减污降碳协同效应的促进作用;研发投入强度与产业结构交互项显著为负;为负向调节作用,即研发投入强度的增加抑制产业结构升级对减污降碳协同效应的抑制作用;且随着研发投入强度的提高,产业结构的改善所带来的负向调节作用要远强于正向调节作用,整体上该调节变量的引入抑制了二氧化碳与大气污染物的协同减排。随研发投入强度的提高,相比于第三产业,技术进步其在更大程度上提高了第二产业的生产效率,节约了生产成本,导致大量生产资料和资金涌向第二产业,而第二产业作为碳排放和大气污染物的主要源头,在带来更多生产总值的同时也会带来更多的碳排放和更为严重的大气污染,进而抑制碳减排和大气污染控制系统间协同效应的发挥。

在西部地区未识别出显著的调节效应。由于西部地区相较于其他地区发展较为落后,研发经费投入少,研发水平较为落后,研发投入的提高尚未显著提高技术水平进而使当地的产业结构、交通运输情况以及经济特征发生明显改善,进而达到促进温室气体与大气污染物协同减排的效果。

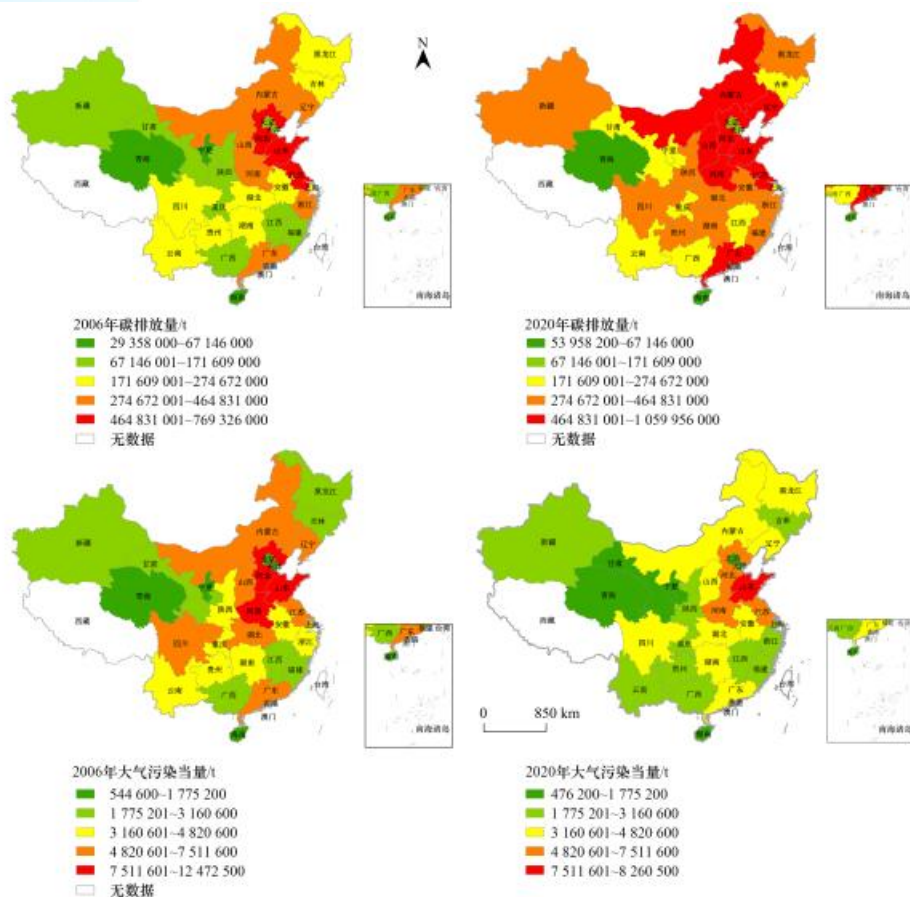


图 2.1-12 2006-2020 年我国各省污染物排放当量和碳排放量时空变化特征

**研究建议：**（1）调整能源结构，同时加强对能源消耗总量的控制。推动化石能源清洁高效利用、提升非化石能源在能源供应中的比重，合理适度布局发展天然气发电，优先发展可再生能源，推动加强光伏、风电、核能发电配套基础设施建设，提高能源利用效率；积极推动交通运输结构的调整，如加快推进“公转铁”、“公转水”，实现交通运输部门的节能减排。（2）发挥科技创新的引领作用。各地结合实际加大专项研发经费的投入，如设立专项研发经费，加强科研监管机制建设等，激发各创新主体的活力。增强能源科技创新能力，尤其是西部地区要充分利用科技创新的第一生产力作用，发掘节能减排潜力；政府、企业、科研院所和高校等各方要各司其职明确自身定位，积极推动能源重大领域科技

创新，加快成果转化，创新赋能产业结构升级以及能源结构调整。

(3) 政府加大财政资金对环保投资的支持力度。工业作为碳排放与大气污染的主要源头，尤其要加大对工业污染的治理投资投入；如对污水处理费、船舶油污损害赔偿金等加大环保支出力度；另外，各地区可结合当地实际设立奖惩制度，规范企业排污行为，同时鼓励各地积极探索创新融资机制同时积极引导市场各主体进行环保投资。(4) 坚持顶层设计的同时鼓励各地区因地制宜。在顶层设计的指导下结合当地实际制定能源发展战略、注意多项政策的配合使用，积极开展能源革命，在实践中探索适合当地的治理方式，同时，要积极发挥空间溢出效应，深化各区域和地区间的交流与合作，可通过签订合作协议、开展交流座谈会等形式构建联防联控格局，促进区域协调发展。

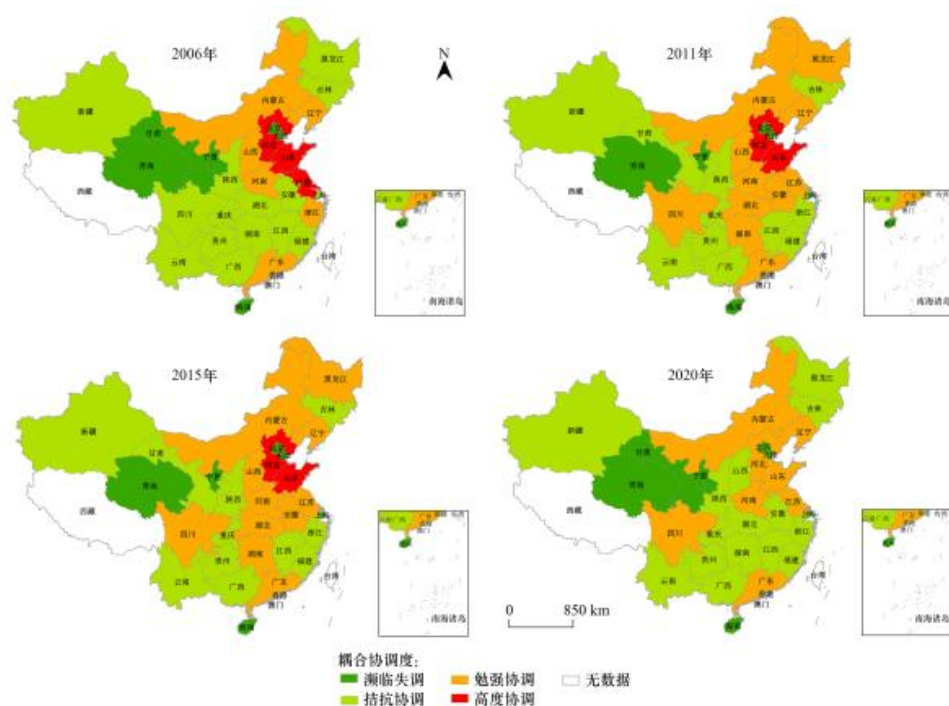


图 2.1-13 2006-2020 年我国各省减污降碳耦合协调度的时空分布

**研究结论：**（1）碳排放与大气污染排放间存在协同效应，2006~2020 年我国减污降碳协同效应演变呈现倒“U”型趋势，且减污降碳协同存在空间聚集性以及空间溢出效应。（2）整体上来看，我国减污降碳协同治理水平较低，碳排放与大气污染物排放系统间尚处于不稳定和不协调的状态，各省份和区域在减污降碳协同治理水平上存在发展不平衡的特点，协调度呈现出东部地区、中部地区和西部地区依次递减的特征。（3）从全国层面来看，能源消费结构、人均 GDP 以及环保投资占比是减污降碳协同效应的主要影响因素；从区域层面来看，能源利用效率、能源消费结构和人均 GDP 为东部减污降碳协同效应影响因素；能源利用效率、能源消费结构、产业结构和环保投资占比为中部减污降碳协同效应影响因素；产业结构、人均 GDP、城镇化率和交通运输结构为西部减污降碳协同效应的影响因素。（4）研发投入强度在全国和东、中部均起到显著的调节效应，但在西部地区未识别出显著的调节效应。在东部地区，城镇化率、环保投资占比、交通运输结构无法单独对减污降碳协同效应产生影响无法单独对减污降碳协同效应产生影响，必须要与研发投入强度相配合才可对减污降碳协同效应产生显著影响。

### 2.1.7 MEIC 全球碳排放数据库更新

**标题：** MEIC-global-CO<sub>2</sub>: A new global CO<sub>2</sub> emission inventory with highly-resolved source category and sub-country information

**作者：** Ruochong Xu, Dan Tong, Qingyang Xiao, Xinying Qin, Cuihong Chen, Liu Yan, Jing Cheng, Can Cui, Hanwen Hu, Wenyu Liu, Xizhe Yan, Huaxuan Wang, Xiaodong Liu, Guannan Geng, Yu Lei, Dabo Guan, Kebin He & Qiang Zhang

**期刊：** Science China Earth Sciences

**链接：** <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1230-3>

**研究背景：**工业革命以来人类活动产生的碳排放是导致当前全球气候变化的主要原因。如何准确估算人类活动碳排放及时空分布，构建高精度、高分辨率、更新及时的全球 CO<sub>2</sub> 排放清单，是气候变化和大气科学领域关注的前沿问题，也是支撑气候变化归因、碳预算评估、未来情景构建、减排效果评估等相关研究的重要基础。

**研究内容：**通过构建数据驱动的排放清单方法，融合了来自 24 个国际统计数据库和 65 个本地统计资料的活动水平数据，在精细源分类下（1484 个）建立了覆盖 208 个国家和地区、797 个州省行政区划、42 个燃料类型和 52 个部门的无缝连续的能源数据立方体。在此基础上，在精细源分类下核算了包含次国家信息的全球化石燃料燃烧和水泥生产过程产生的 CO<sub>2</sub> 排放。

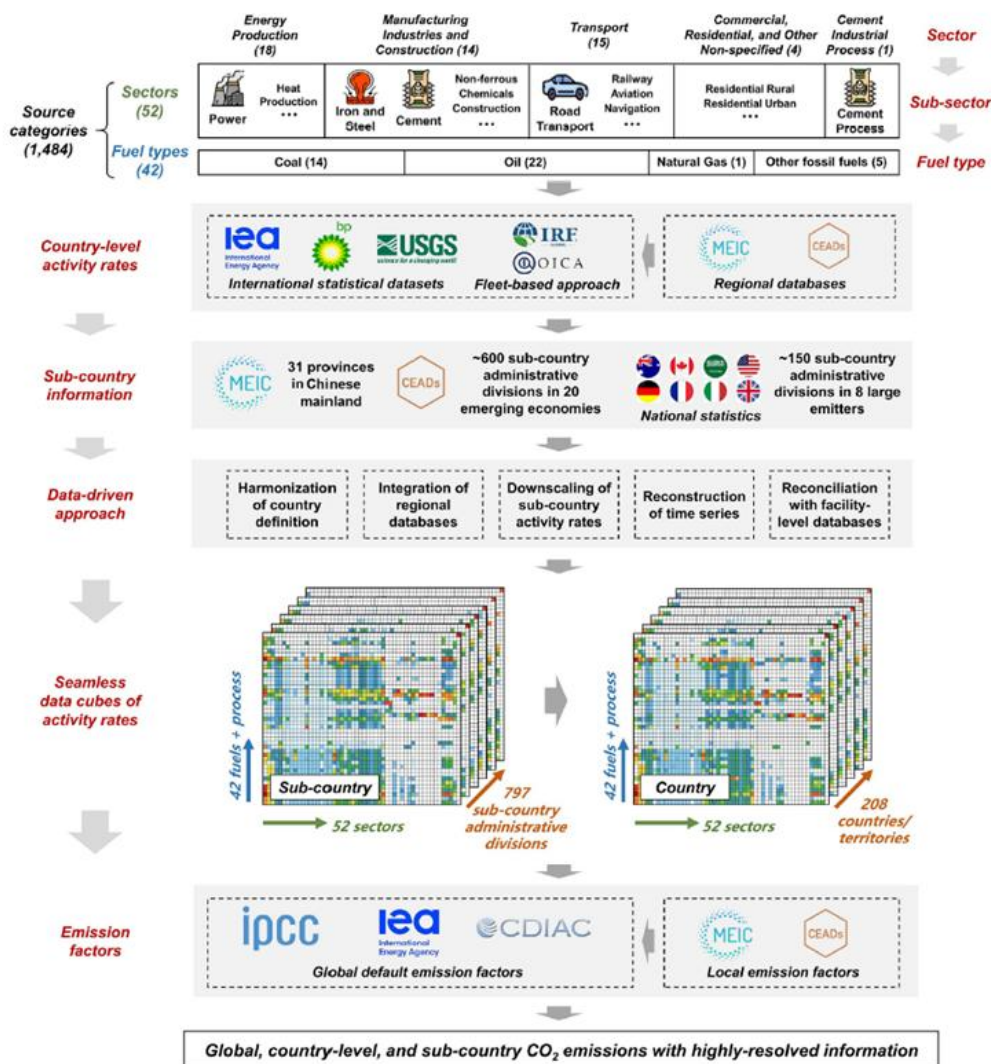


图 2.1-14 MEIC 全球碳排放数据库方法学框架

MEIC 网站发布了精细源分类（52 个部门、42 种燃料类型及水泥生产过程）下全球 208 个国家和地区的化石燃料燃烧及水泥生产过程碳排放数据，并更新至 2022 年。核算结果显示，2022 年全球人为源 CO<sub>2</sub> 排放再创新高（352 亿吨），同比增长 0.9%，与 2010-2022 年平均增速相当。如碳排放继续保持这一水平，全球 1.5 度目标剩余碳预算（约 3300-4300 亿吨）将于 9-12 年内耗尽，全球气候治理和低碳转型仍面临巨大挑战。

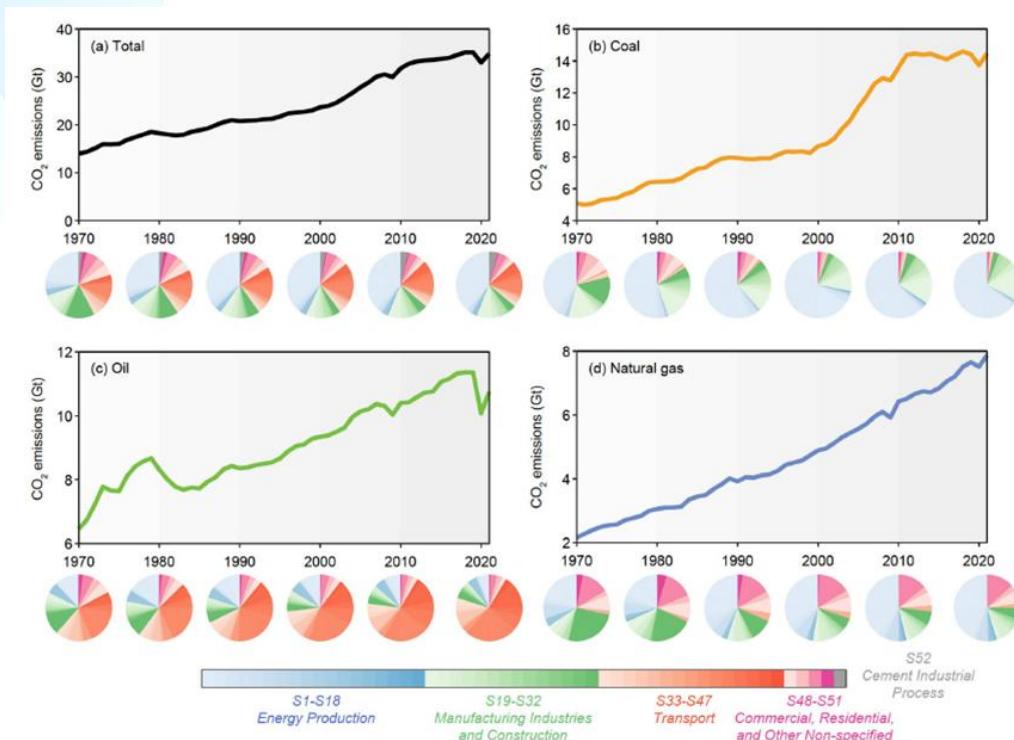


图 2.1-15 1970-2021 年全球分部门分燃料 CO<sub>2</sub> 排放变化

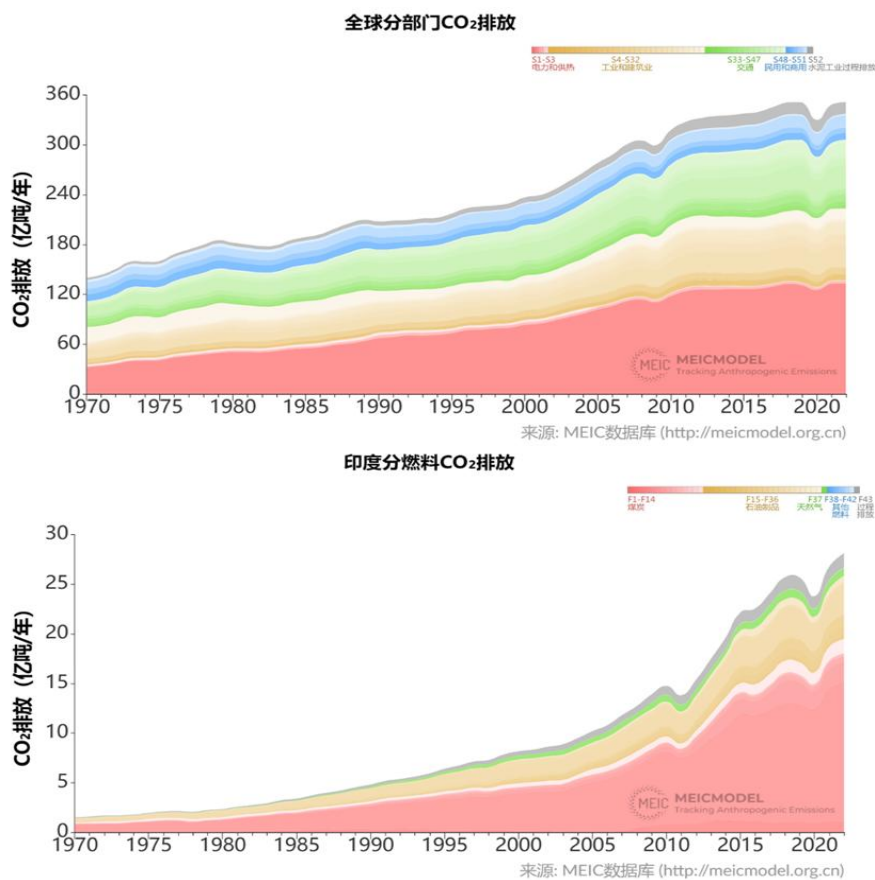


图 2.1-16 MEIC 网站在线生成的排放专题图示例

## 2.2 协同治理技术领域

### 2.2.1 双活性位点以促进“非二”温室气体 N<sub>2</sub>O 增值利用

**标题：** Reversed Charge Transfer Enables Dual Active Sites on Ir/hBN for Synergistic N<sub>2</sub>O Valorization and Propane Selective Oxidation

**作者：** Yunshuo Wu, Yuxin Sun, Xuanhao Wu, Haiqiang Wang, Zhongbiao Wu

**期刊：** ACS Catalysis

**链接：** <https://doi.org/10.1021/acscatal.4c03697>

**研究背景：** 随着全球变暖加剧，温室气体（如 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O）排放控制成为人类面临的重大挑战之一。其中，CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的转化受到广泛关注，但对 N<sub>2</sub>O 的资源化利用研究相对较少。N<sub>2</sub>O 不仅是强效温室气体（全球增温潜势为 CO<sub>2</sub> 的 300 多倍），还会破坏臭氧层。N<sub>2</sub>O 作为一种温和的氧化剂，具有轻烃（如甲烷、丙烷）选择性氧化反应中的应用潜力，如甲烷氧化偶联（OCM）、丙烷氧化脱氢（ODHP）和丙烷干法重整（DRP）。但实际应用中，N<sub>2</sub>O 的活化通常需要 400-600°C 的高温条件，这虽然提高了转化效率，但容易导致产物过度氧化，生成大量二氧化碳，从而降低反应选择性。因此，针对 N<sub>2</sub>O 的资源化转化，如何在高转化率下控制高附加值产物的选择性是目前面临的关键难题。

**研究内容：** 本研究利用反向电荷转移（RCT）有效分离氧化还原中心，从而得到不同电子密度的双活性中心，分别参与氧化和还原半反应，并通过中间物种的迁移，在 450 °C 的 N<sub>2</sub>O-丙烷干法重整（DRP）制合成气（CO+H<sub>2</sub>）反应中，该催化剂实现了 99.5% 的 N<sub>2</sub>O 转化率，95.9 mol kgcat<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup> 的 CO 产率和 41.9 mol kgcat<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup> 的 H<sub>2</sub> 产率，同时获得了高活性和高选择性。该研究为实现温室气体减排与绿色化学过程提供了新的研究思路。

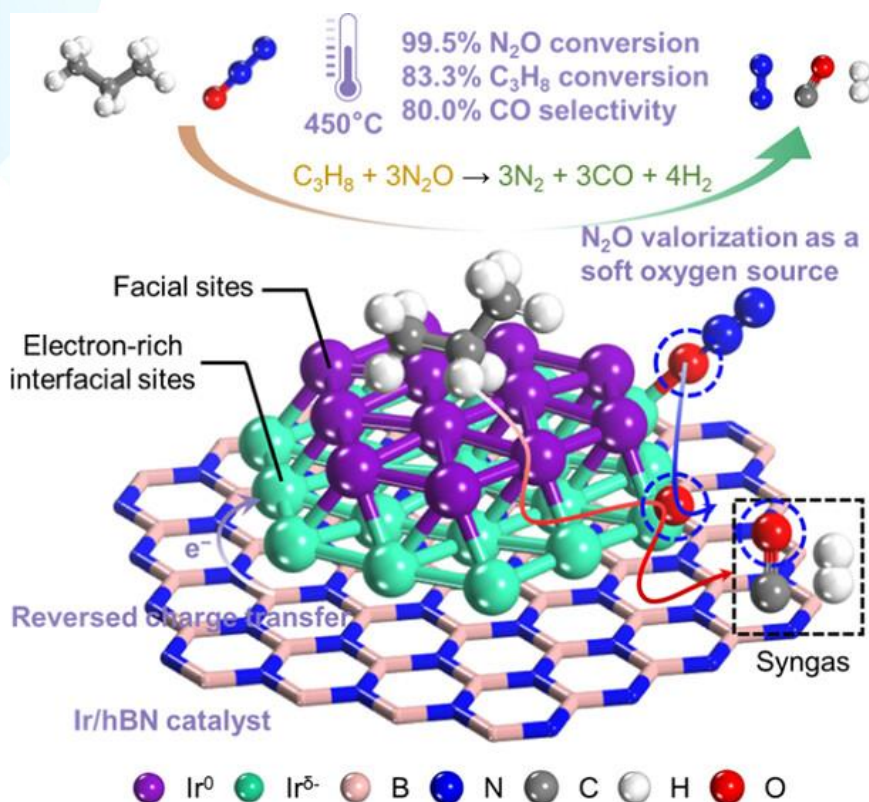


图 2.2-1 双活性位点以促进“非二”温室气体  $\text{N}_2\text{O}$  增值利用

研究团队开发了一种基于六方氮化硼（hBN）负载铱（Ir）的催化剂。由于氮化硼中的硼（B）电负性为 2.04，低于铱（Ir）的 2.20，这种电负性差异引入了反向电荷转移（RCT）机制，使得电子从载体转移至金属位点，形成了具有不同功能的双活性位点。在 450°C 的  $\text{N}_2\text{O}$ -DRP 反应中，该催化剂实现了 99.5% 的  $\text{N}_2\text{O}$  转化率，95.9 mol  $\text{kgcat}^{-1}\text{h}^{-1}$  的 CO 产率和 41.9 mol  $\text{kgcat}^{-1}\text{h}^{-1}$  的  $\text{H}_2$  产率。通过近常压 X 射线光电子能谱（NAP-XPS）、原位红外（DRIFTS）和密度泛函理论（DFT）计算，进一步揭示了  $\text{N}_2\text{O}$  与  $\text{C}_3\text{H}_8$  协同转化中的反应机理，并证实了 RCT 在调控反应活性和选择性方面的关键作用。

本研究为非二氧化碳温室气体  $\text{N}_2\text{O}$  的资源化转化提供了新的途径。通过引入 RCT 机制和双活性位点设计，不仅有效利用了  $\text{N}_2\text{O}$ ，还在丙烷选择性氧化中获得了高效的合成气产物。这一创新发现为温室气体转化与可持续化工生产的未来应用提供了新的思路，同时基于

RCT 机制的双活性位点设计也为多相催化剂的设计开发提供了有益的借鉴。

催化剂的制备与表征：通过在不同的氢气还原温度下制备具有不同 Ir 物种的 Ir/hBN 催化剂，从而获得了包含 Ir 团簇和 Ir 纳米颗粒的催化剂。密度泛函理论（DFT）计算表明，Ir 团簇在 hBN 载体上能够实现反向电荷转移（RCT），而 Ir 纳米颗粒则表现出典型的金属 Ir 催化特性。值得注意的是，当 Ir 团簇负载在其他金属氧化物载体（如  $\text{CeO}_2$ ）上时，无法实现 RCT。此外，通过 X 射线光电子能谱（XPS）、拉曼光谱和拉曼 mapping 等表征手段，确认了催化剂中各物种的电子结构变化，显示出 Ir 得到电子而 hBN 载体失去电子，进一步验证了 RCT 的存在。

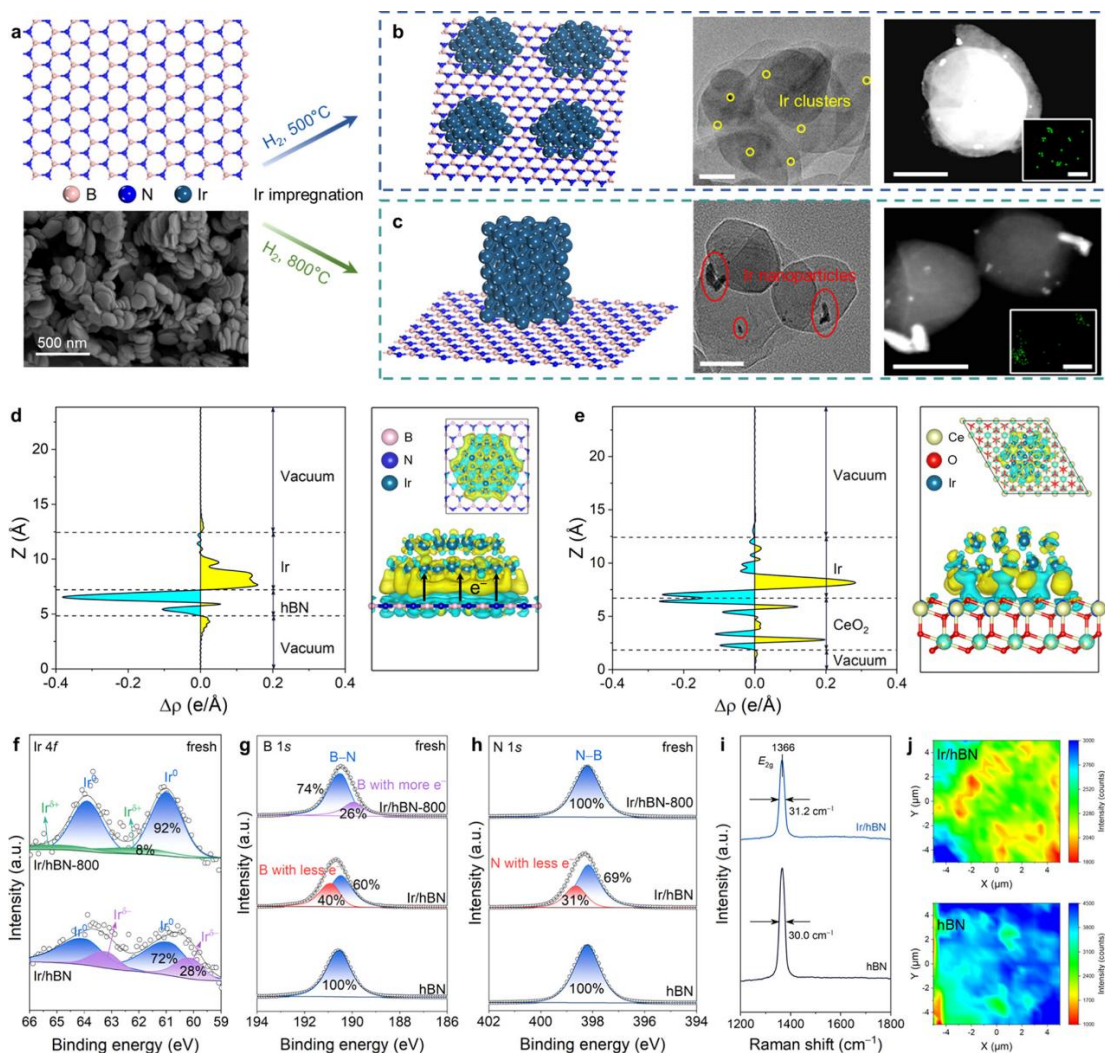


图 2.2-2 (a-c) 催化剂制备示意图及电镜结果。(d-e) Ir/hBN 与 Ir/CeO<sub>2</sub> 的电荷密度差分结果。(f) XPS 谱图。(i) Raman 谱图。(j) Raman mapping 结果。

催化剂性能测试：在 N<sub>2</sub>O 与丙烷的协同氧化反应中，合成气的生成具有重要的工业应用价值。合成气是一种由一氧化碳（CO）和氢气（H<sub>2</sub>）组成的气体混合物，广泛应用于化工领域，如费托合成制取液体燃料和氢气生产等。研究团队通过实验表明，Ir/hBN 催化剂在 N<sub>2</sub>O-DRP 反应中展示了出色的催化性能。在 450°C 条件下，该催化剂实现了 99.5% 的 N<sub>2</sub>O 转化率，并且 CO 和 H<sub>2</sub> 的产率分别达到 95.9 mol kgcat<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup> 和 41.9 mol kgcat<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>，体现了其高活性与高选择性。

此外，研究还系统地考察了不同反应条件和催化剂体系（包括不同金属位点和载体）对反应活性的影响。对比研究表明，Ir/hBN 催化剂在 N<sub>2</sub>O-DRP 反应中的表现优于其他载体上的 Ir 基催化剂，不仅能高效催化 N<sub>2</sub>O 与丙烷的反应，还能以高选择性生成 CO 和 H<sub>2</sub>。这一结果表明，反向电荷转移（RCT）机制和双活性位点的设计在多相催化的氧化还原反应中具有打破活性与选择性“跷跷板”效应的潜力。

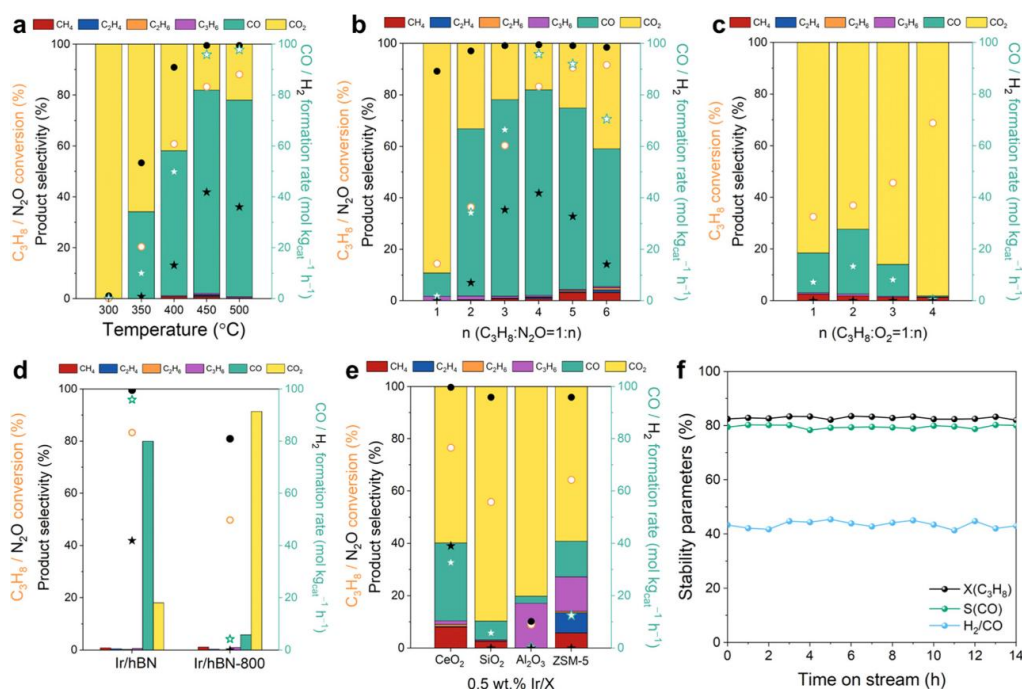


图 2.2-3  $\text{N}_2\text{O}$ -DRP 活性测试结果。(a) 不同反应温度。(b) 不同  $\text{C}_3\text{H}_8/\text{N}_2\text{O}$  比例。(c)  $\text{O}_2$ -DRP 活性数据结果。(d) 不同还原温度。(e) 不同载体。(f) 稳定性测试。

反应机理解析：通过近常压 X 射线光电电子能谱 (NAP-XPS)、原位红外光谱 (DRIFTS) 和密度泛函理论 (DFT) 计算，作者深入解析了 Ir/hBN 催化剂在  $\text{N}_2\text{O}$ -DRP 反应中生成合成气的反应机理。研究表明，Ir/hBN 催化剂通过反向电荷转移 (RCT) 机制，产生了电子性质不同的双活性位点，实现了氧化还原中心的有效分离：富电子的  $\text{Ir}\delta^-$  位点作为还原中心，而金属态的  $\text{Ir}^0$  位点则作为氧化中心。

在反应过程中， $\text{Ir}\delta^-$  位点主要负责  $\text{N}_2\text{O}$  的活化。当  $\text{N}_2\text{O}$  分子与该位点接触时，由于其高电子密度， $\text{N}_2\text{O}$  中的 N-O 键容易断裂，生成活性氧物种 ( $\text{O}^*$ )。与此同时， $\text{C}_3\text{H}_8$  分子被吸附到金属态的  $\text{Ir}^0$  位点上，在该位点上 C-H 和 C-C 键较易断裂，生成  $\text{CH}_2$  和  $\text{CH}_3$  等中间体。在反应过程中，H 和 O 中间体的有效分离及 H/O 溢流的受阻，促进了  $\text{H}_2$  的生成。此外，丙烷裂解产生的  $\text{CH}_2$  中间体会迁移至  $\text{Ir}\delta^-$  位点（相比之下， $\text{CH}_3$  中间体的迁移能垒更高），并与  $\text{O}^*$  物种反应，最终氧化生成碳酸根 ( $\text{b-CO}_3^{2-}$ )，随后分解释放出 CO。因此，Ir/hBN 催化剂在  $\text{N}_2\text{O}$ -DRP 反应中实现了高活性和高选择性。

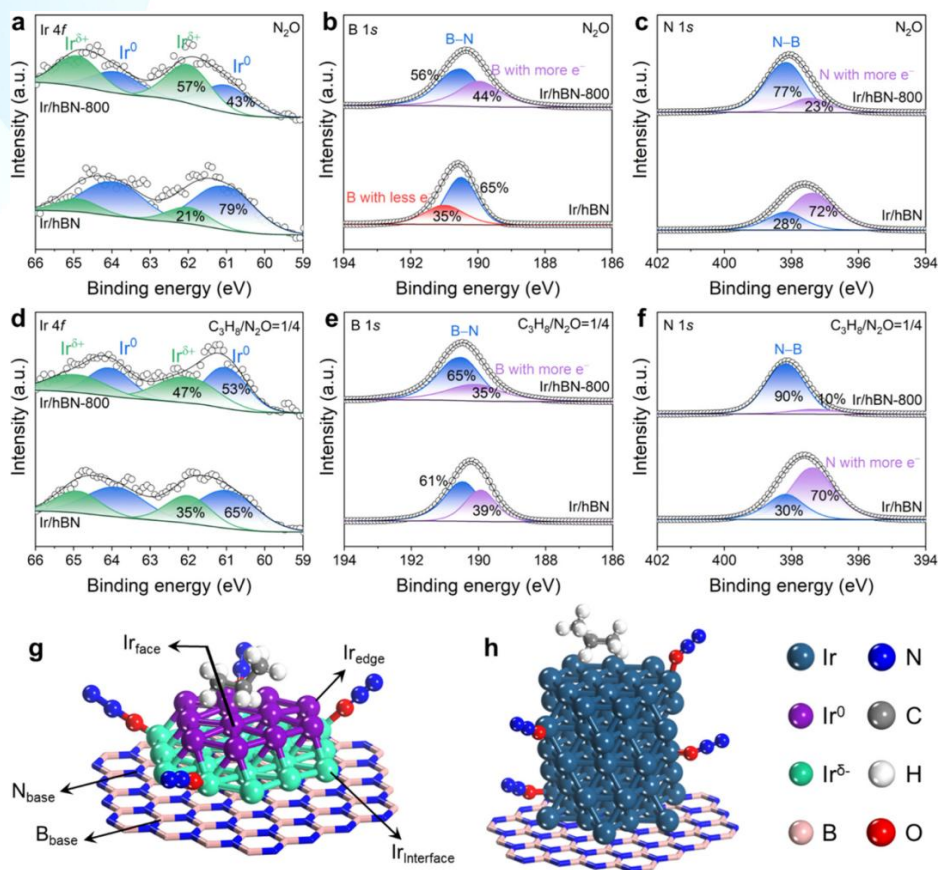


图 2.2-4 (a-c) NAP-XPS 谱图 ( $N_2O$ , 450 °C)。(d-f) NAP-XPS 谱图 ( $C_3H_8/N_2O=1/4$ , 450 °C)。(g-h) 两种催化剂  $N_2O$  和  $C_3H_8$  吸附过程示意图

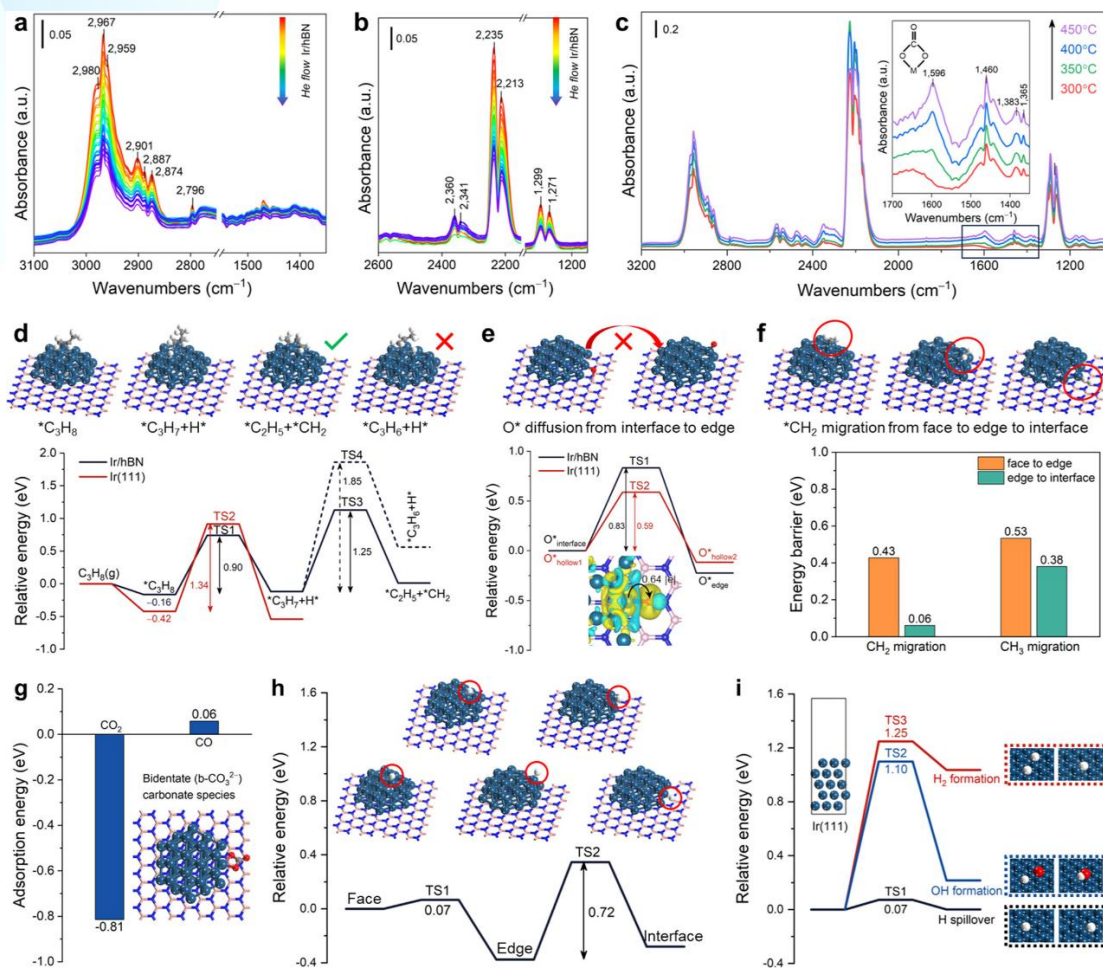


图 2.2-5 (a–b) 反应物吸脱附原位红外结果。(c) 反应原位红外结果。(d) 丙烷活化的 DFT 计算结果。(e) 活性氧物种扩散的 DFT 计算结果。(f) 甲基/亚甲基迁移能垒对比。(g)  $\text{CO}_2$  产  $\text{CO}/\text{CO}_2$  的 DFT 计算结果对比。(h) Ir/hBN 氢溢流 DFT 计算结果。(i) Ir(111) 表面的氢原子行为 DFT 计算对比结果。

**研究结论：**本研究通过设计一种基于六方氮化硼 (hBN) 负载铱 (Ir) 的催化剂，通过引入反向电荷转移 (RCT) 机制，成功解决了传统催化剂在氧化还原反应中的活性与选择性之间的矛盾。研究表明，催化剂中的富电子  $\text{Ir}\delta^-$  界面和金属  $\text{Ir}^0$  位点通过 RCT 机制实现了氧化还原中心的有效分离，显著提升了催化性能。这一设计不仅优化了  $\text{N}_2\text{O}$  干法重整丙烷 ( $\text{N}_2\text{O}$ -DRP) 反应的效率，也揭示了双活性位点在复杂反应中的重要作用。展望未来，进一步优化催化剂的结构和反应条件，将有助于提升其在实际工业应用中的稳定性和效率。将 RCT

机制和双活性位点设计扩展到其他温室气体（如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ ）的转化过程，能够为化工生产的可持续发展提供新的思路。这不仅有助于推动温室气体资源化利用，还将对实现绿色化工和减污降碳做出积极贡献。总体而言，本研究为多相催化领域的催化剂设计提供了重要的理论基础和实践经验，未来的研究将进一步验证其应用潜力。

本文的亮点主要集中在以下三个方面：

(1) Ir/hBN 催化剂的合成、表征与反向电荷转移 (RCT) 机制的验证：本研究成功合成了一种基于六方氮化硼 (hBN) 负载铱 (Ir) 的催化剂，并通过 DFT 计算和实验表征确认了其反向电荷转移(RCT) 机制。

(2) Ir/hBN 催化剂在  $\text{N}_2\text{O}$ -DRP（丙烷干法重整）反应中的优异表现：在  $450^\circ\text{C}$  条件下，该催化剂表现出卓越的催化性能，实现了 99.5% 的  $\text{N}_2\text{O}$  转化率，CO 产率为  $95.9 \text{ mol kgcat}^{-1}\text{h}^{-1}$ ， $\text{H}_2$  产率为  $41.9 \text{ mol kgcat}^{-1}\text{h}^{-1}$ 。这表明该催化剂同时具有  $\text{N}_2\text{O}$  转化的高活性与生成产物的高选择性。

(3) 基于 RCT 的氧化还原中心分离及其在  $\text{N}_2\text{O}$ -DRP 反应机理中的作用：通过近常压 X 射线光电电子能谱 (NAP-XPS)、原位红外光谱 (DRIFTS) 和密度泛函理论 (DFT) 计算，揭示了催化剂中双活性位点如何通过分离氧化还原中心及中间物种迁移，同时有效提高了反应的选择性与活性。上述研究亮点展示了通过 RCT 机制设计双活性位点催化剂的新方法，为  $\text{N}_2\text{O}$  的资源化利用和丙烷选择性氧化提供了全新的研究思路，也为未来多相催化的深入拓展提供了重要借鉴。

## 2.2.2 中国水泥行业超低排放转型的全生命周期减排潜力

**标题：** Full life cycle emission reduction potential of ultra-low emission transformation in China's cement industry

**作者：**

Shiyu Hou, Yanchao Wang, Miao Ning, Jie He, Yuezhi Zhong, Yixuan Zheng, Yu Lei, Tianle Zhu, Zheng-Hong Huang, Xianen Wang, Gang Yan

期刊: Journal of Cleaner Production

链接: [Full life cycle emission reduction potential of ultra-low emission transformation in China's cement industry - ScienceDirect](#)

**研究背景:** 中国已陆续实施了“大气污染防治行动计划”和“打赢蓝天保卫战三年行动计划”，主要措施包括全面改善燃煤锅炉和窑炉、北方地区清洁取暖、清理整顿“散乱污”企业、交通结构调整、重点行业深度治理和超低排放改造。中国空气质量改善取得了显著成果，从 2018 年到 2022 年，六大污染物（PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、O<sub>3</sub>、SO<sub>2</sub>、CO 和 NO<sub>2</sub>）的浓度逐年下降，空气质量达标率从 35.8% 提高到 62.8%。特别是，全国 PM<sub>2.5</sub> 浓度从 2015 年的 46 微克/立方米下降到 2022 年的 29 微克/立方米，重点地区秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降超过 35%。然而，空气质量与“美丽中国”的要求仍存在较大差距，改善效果仍不稳定。全国 PM<sub>2.5</sub> 浓度是世界卫生组织指导值（5 微克/立方米）的 5.8 倍，分别是欧洲（10.6 微克/立方米）和美国（8.5 微克/立方米）当前水平的 2.7 倍和 3.4 倍，仍远未达到保护人类健康要求和国际先进水平。平均臭氧浓度呈现上升趋势，与 2018 年相比，2022 年上升了 4.3%，并已超过 PM<sub>2.5</sub>，成为影响 2022 年优良空气质量天数比例的最重要因素。此外，重点地区秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染仍然是一个严重问题。因此，迫切需要挖掘减排潜力，以促进空气质量的持续稳定改善。

**研究内容:** 中国占全球水泥总产量的 50% 以上，水泥工业的污染物排放在各工业中占有很大比例。一些省份已经率先对水泥工业进行了深度治理，国家层面也将出台水泥工业超低排放改造的实施方案，以促进中国空气质量的持续改善。在这项工作中，基于污染物排放许可证、连续排放监测系统（CEMS）数据库和现场调查，

建立了涵盖水泥工业全生命周期的污染物排放清单，包括有组织排放、无组织排放和运输。评估了水泥工业实施超低排放改造后颗粒物（PM）、二氧化硫（SO<sub>2</sub>）和氮氧化物（NO<sub>x</sub>）的减排潜力。结果表明，现有的除尘、脱硫和脱硝技术可以将 PM、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的浓度分别控制在 10 毫克/立方米、35 毫克/立方米和 50 毫克/立方米以下。水泥工业的 PM、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 减排潜力分别为 259.54 千吨、14.98 千吨和 607.04 千吨，相应的减排比例分别为 37%、24%和 64%。此外，这项工作揭示了水泥工业污染物排放水平和减排潜力的空间特征，有利于超低排放改造的合理布局，并按区域和阶段推进改造任务。

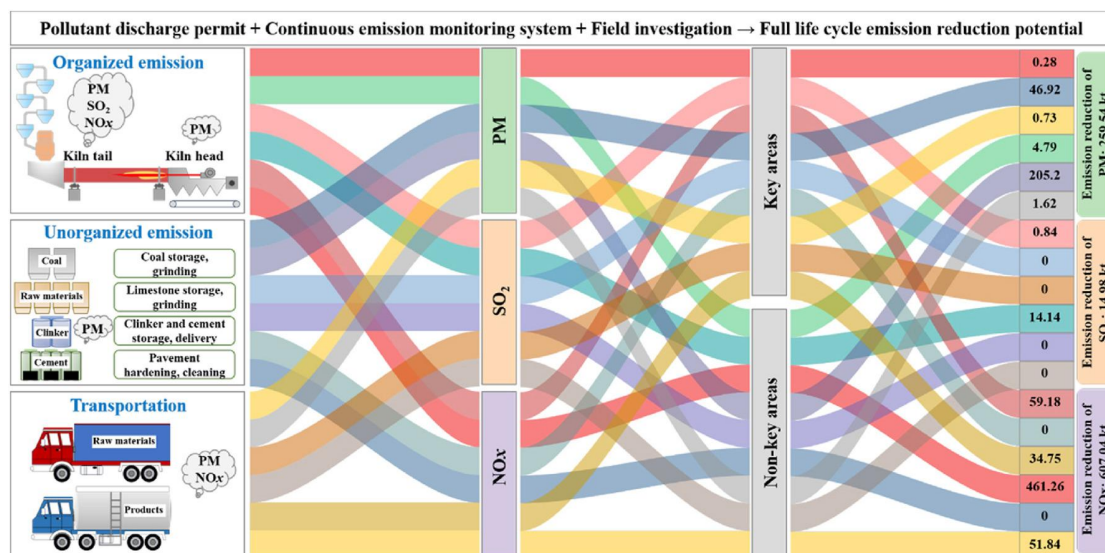


图 2.2-6 水泥行业超低排放转型的全生命周期减排潜力

## 2.3 协同路径优化领域

### 2.3.1 中国城市“减污降碳”协同驱动因素及实现路径

**研究背景：**党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央以前所未有的力度抓生态文明建设，推动我国生态环境保护取得历史性成就，生态环境质量持续改善，碳排放强度显著降低。然而，在“美丽中国”建设迈出重大步伐、绿色低碳发展取得显著进展同时，我国生

态文明建设的结构性、根源性、趋势性压力却尚未根本缓解，发展与污染间的长期性矛盾仍然存在。2021 年全国地级及以上城市中仍有 40% 空气质量未达标，PM<sub>2.5</sub> 年均浓度较世界卫生组织（WHO）准则值高出 6 倍。2020 年 9 月，习近平总书记在第 75 届联合国大会一般性辩论中宣布“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和”，双碳目标时间紧、任务重，面临着巨大挑战。

与发达国家基本解决环境污染问题后才强化碳排放控制不同，当前我国生态文明建设存在“实现生态环境根本性好转”和“碳达峰、碳中和”等两大任务，生态环境面临“多目标治理”的要求愈发凸显，因而协同推进“减污降碳”就成为新发展阶段全面绿色转型的必然选择。党的二十大报告中更是明确指出，“推进美丽中国建设，就是要统筹产业结构调整、污染治理、生态保护、应对气候变化，协同推进降碳、减污、扩绿、增长”。然而，具体推进减污降碳过程中却存在诸多矛盾和问题，严重情况下甚至会出现减污或降碳任何一个目标的实现是以另一方加剧为代价。如 2018 年后尽管我国京津冀地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度持续下降，但碳排放量却持续回升，减污降碳陷入瓶颈期，大气污染治理难以继续发挥降碳的协同效应。同时，减污降碳的本质在于倒逼经济社会绿色转型以兼顾减污降碳与经济增长，如何在保证经济增长同时促进减污降碳协同增效，就成为当前生态环境治理亟需解决的重大问题。

**主要内容：**学界就我国减污降碳问题已进行了一定讨论，但大多研究都只是对“减污”或“降碳”政策协同效益的模拟与评估，部分研究虽然讨论了“减污降碳”的实现路径但多是定性讨论且互动机理研究还相对较少，而这是制定相关治理政策、减少治理成本的重要基础。

本文在从投入和产出端对产出密度模型改进的基础上，通过构建联立方程组模型研究了中国 275 个城市 2000~2017 年减污降碳、城市发展与经济增长间的互动关系，在此基础上基于《纲要》2035 远景目标与 2030 碳达峰约束，设立基准、经济增长优先、减污降碳优先和双赢等情景，模拟 2035 年基本实现社会主义现代化的目标来模拟基准、减污降碳优先、经济增长优先与“双赢”情景下的城市发展之路。本文可能的边际贡献包括 3 个方面：首先，本文从投入与产出端改进了产出密度模型，构建了减污降碳、城市发展与经济增长的互动理论框架，弥补了相关研究的理论空白；其次，考虑到城市发展的系统整体性，采用联立方程组模型探究了减污降碳、城市发展与经济增长的互动关系，既厘清了“减污降碳”在城市发展系统中的作用路径，又为制定协同增效政策奠定了理论基础；最后，本文基于 2035 目标模拟了多个不同情景下的城市发展之路，为我国“减污降碳”与经济发展间的动态平衡提供了多个可能路径。

**研究结论：**（1）城市发展既是减污降碳的重要驱动因素，也对经济增长有着重要影响。其中，人口与制造业集聚是促进城市经济增长的关键，虽能够抑制  $\text{PM}_{2.5}$  污染但却也会加剧  $\text{CO}_2$  排放。中国式现代化进程中，城市集聚效应还将持续发挥，因而需要把握碳达峰前的窗口期来充分发挥人口与制造业集聚的正外部性，从而促进经济增长与  $\text{PM}_{2.5}$  污染治理；此外，空间扩张与环境规制同时加剧了  $\text{PM}_{2.5}$  污染和  $\text{CO}_2$  排放，这表明减污降碳协同增效的关键在于抑制空间无序扩张与充分发挥环境规制的减排效应，未来在建设紧凑型城市空间同时还需要以环境规制来引导企业绿色技术创新；由于  $\text{PM}_{2.5}$  污染、 $\text{CO}_2$  排放与经济增长还尚未实现脱钩，促进减污降碳可能会造成经济发展的阵痛，但实现污染排放与经济增长间的脱钩是实现高质量发展的关键。

(2) 面向 2035 远景目标，减污与降碳目标很难同时实现，特别是减污目标。经济增长优先情景下，CO<sub>2</sub> 排放为 38.57 百万吨可以实现高排放达峰，但 PM<sub>2.5</sub> 浓度却为 36.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，远超既定目标；减污降碳优先情景下，无论是高或低排放约束下碳达峰与经济增长目标均可同时实现，但减污约束下经济增长只能达到 75779.76 元，远低于既定增长目标；双赢情景下，减污与经济增长目标同时实现要求城市人口规模达到 915.29 万人，并不具有可行性，而 CO<sub>2</sub> 达峰与经济增长目标同时实现时，人口规模为 487.69、制造业集聚为 0.6、空间扩张为 1.17、环境规制为 0.46，此时碳排放总量为 32.66 百万吨、人均生产总值为 160040.58 元，PM<sub>2.5</sub> 污染为 58.22 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。因此，当前城市发展模式下，减污与降碳目标间存在冲突。

**政策建议：**未来我国促进城市减污降碳，首先要科学规划城市用地，树立“寸土寸金，寸土必争”的集约型发展意识，要精打细算管理城市空间，提高城市空间利用效率；其次，要制定有针对性且差异化的环境规制制度，鼓励企业加大减污降碳投入和技术创新。同时，建立和完善隐性经济活动排污行为监督机制和惩罚机制，加大对隐性经济的规制力度，控制隐性经济规模对减污降碳的不利影响；最后，有序、有重点地推进减污与降碳，在充分发挥集聚正外部性以抑制 PM<sub>2.5</sub> 污染与碳排放同时，加快绿色技术创新以实现减污降碳与城市经济发展间的脱钩，从而实现经济增长与减污降碳的双赢。

### 2.3.2 考虑区域不公平性的中国省级减碳路径优化

**标题：**Approaching national climate targets in China considering the challenge of regional inequality

**作者：**Biying Yu, Zihao Zhao, Yiming Wei, Lancui Liu, Qingyu Zhao, Shuo Xu, Jianing Kang, Hua Liao

**期刊：**Nature Communications

**链接：** <https://www.nature.com/articles/s41467-023-44122-0>

**研究背景：**国家气候目标实现及其代价取决于区域行动，由于区域间的社会、经济、技术、资源禀赋等方面存在显著的不平等性和异质性，对于发展中国家而言，过于激进和全国统一目标可能会造成巨大经济损失，制约气候目标的实现。迫切需要为实现气候目标制定可行、公平的区域行动策略，但现有研究缺乏充分考虑区域不平等性、国家整体和区域成本收益关系。

**研究内容：**本研究开发了国家能源技术模型（C3IAM/NET）和区域协同减排路径优化模型（Mr. COEP），综合考虑社会、经济、技术、碳汇可用性等不确定性，以及能源供给-转化-运输-终端使用-末端治理的全行业 800 余种用能技术排放，提出了全国碳达峰碳中和的时间表和路线图；在此基础上，创建区域达峰成熟度指数优化能够保证全国和区域经济收益并兼顾区域公平性的分省减排路径。

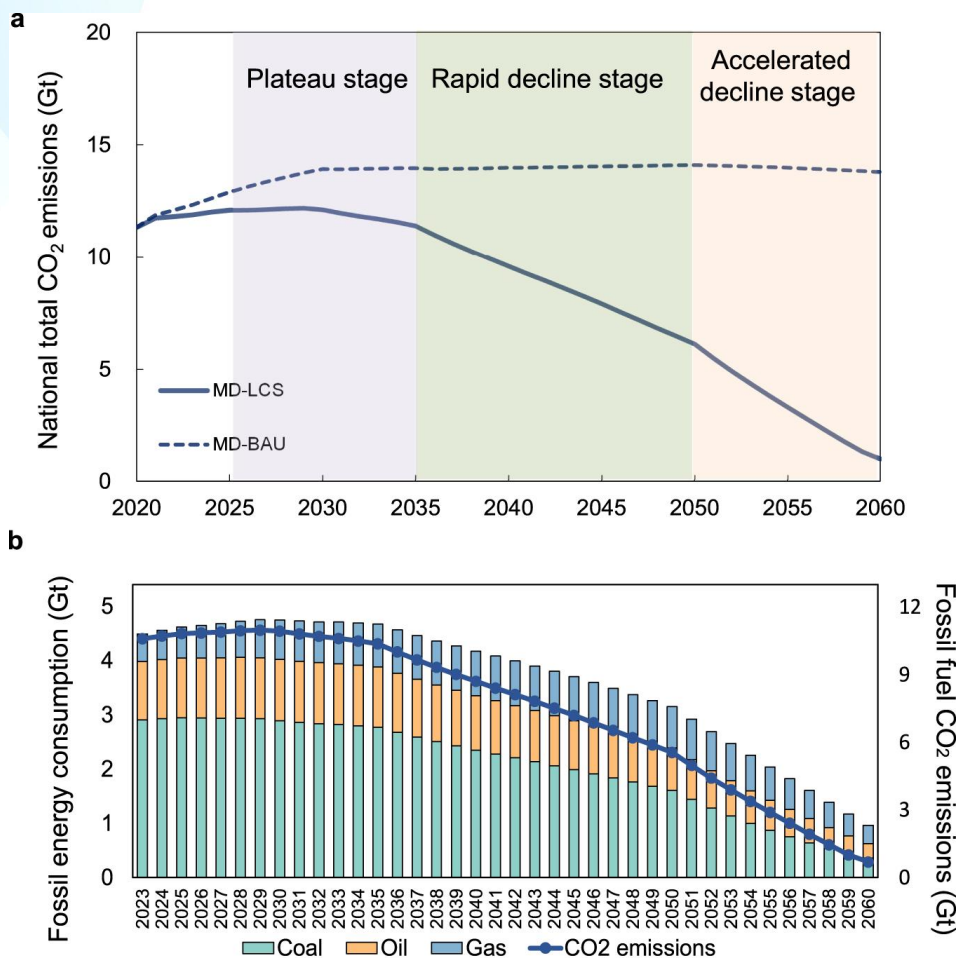


图 2.3-1 碳达峰碳中和路径

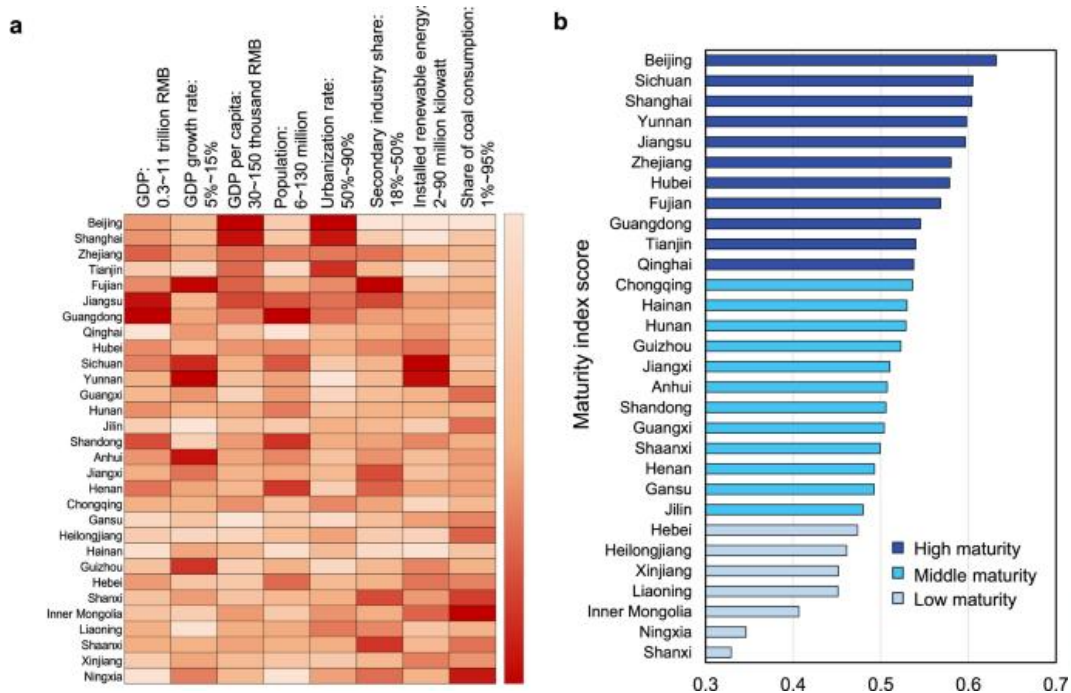


图 2.3-2 碳减排特征与区域成熟度指数

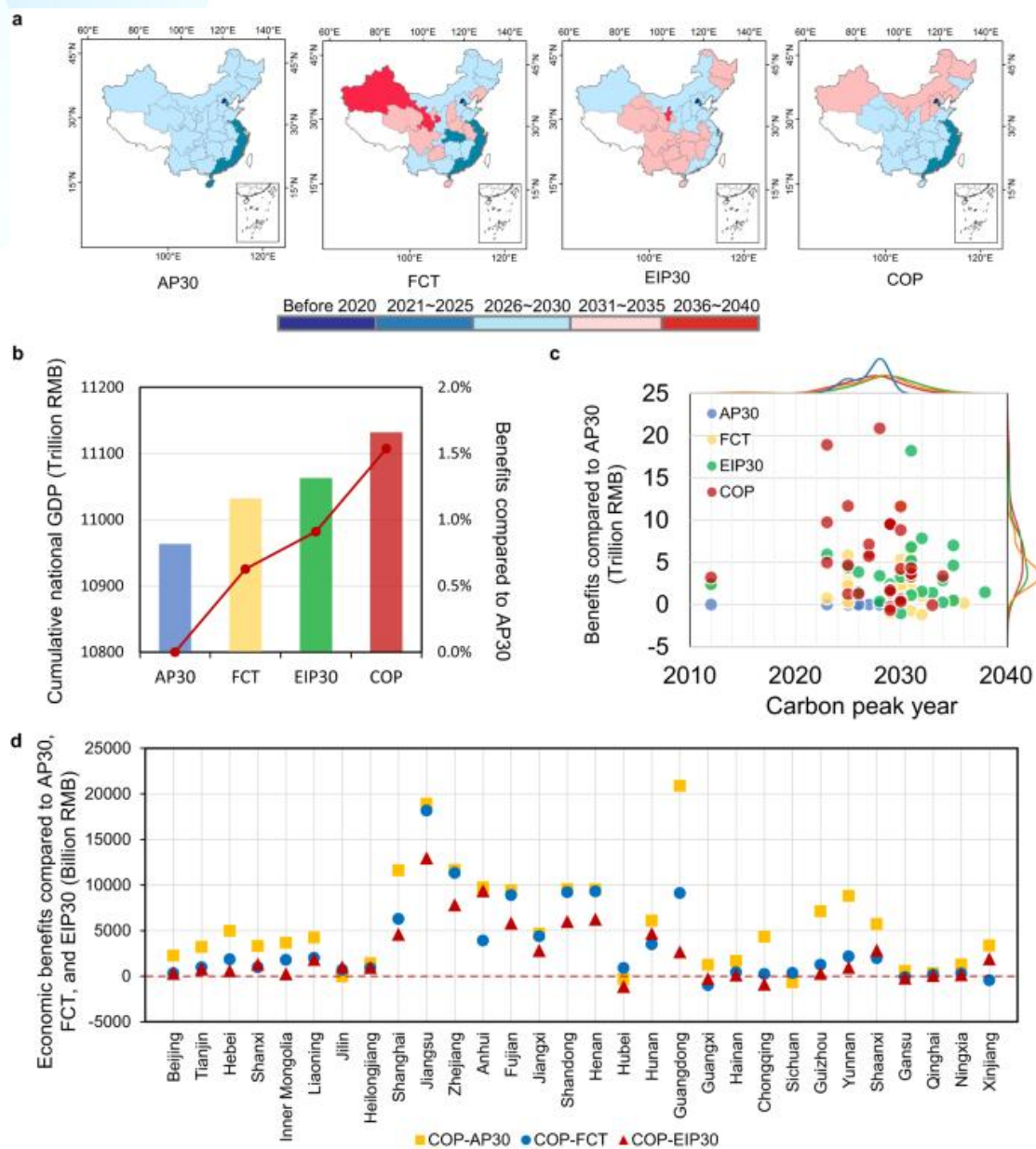


图 2.3-3 不同情景下各省的经济影响和碳达峰时间

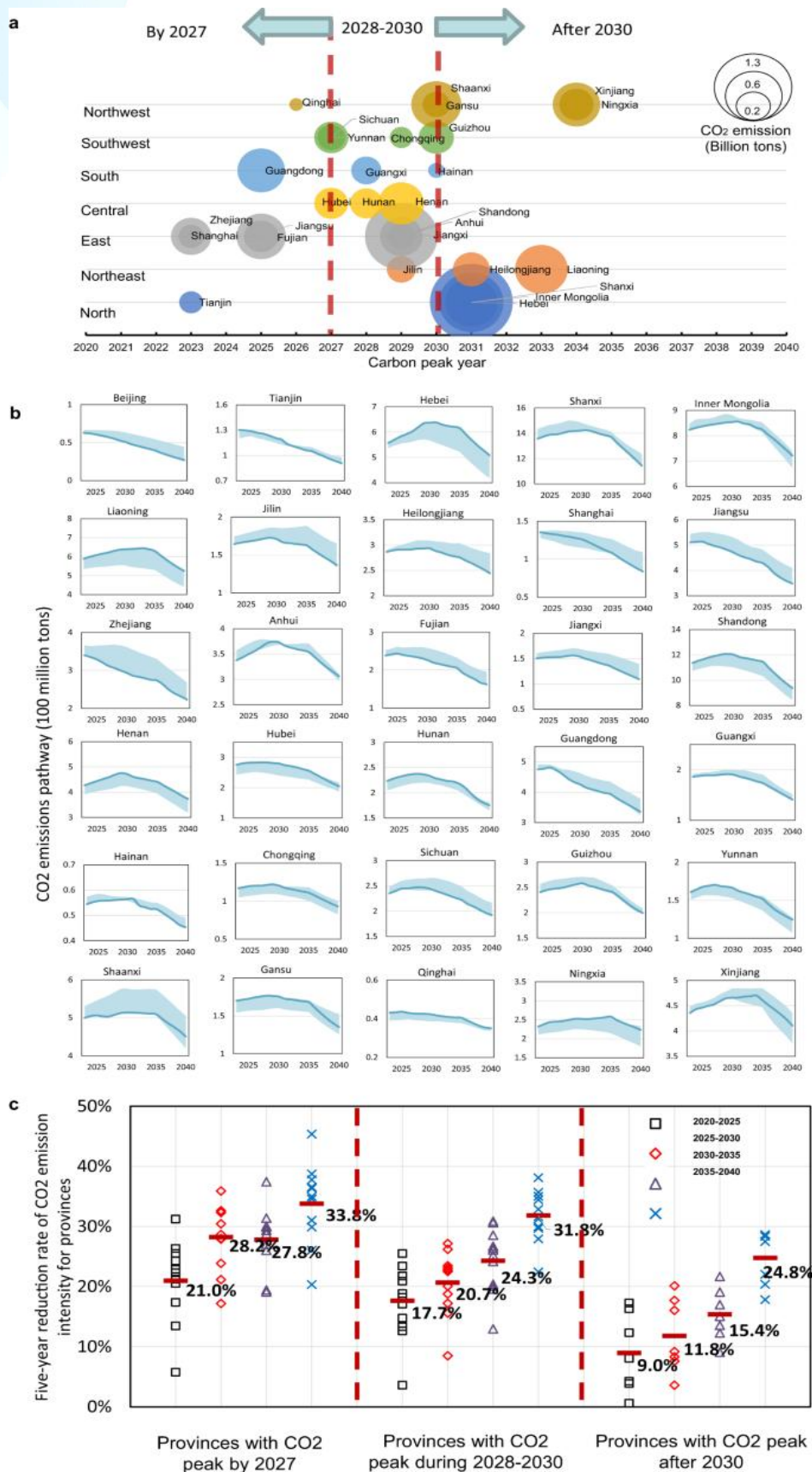


图 2.3-4 各省减污降碳协同策略

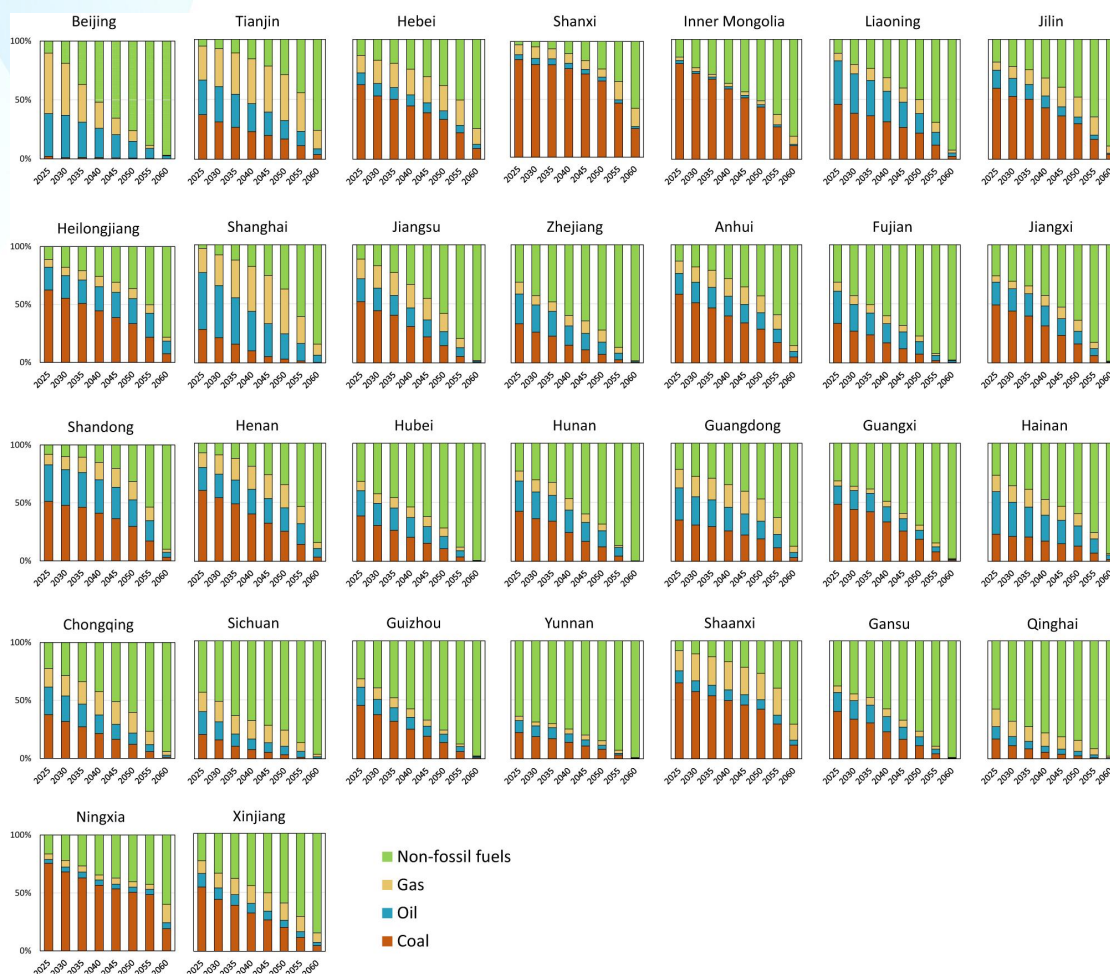


图 2.3-5 全国和各省能源结构

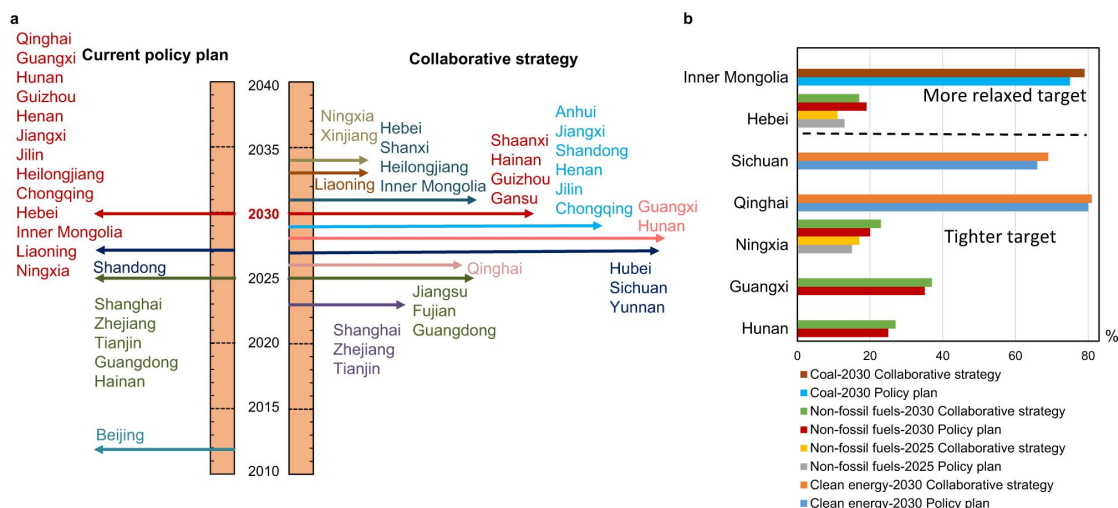


图 2.3-6 碳减排和能源转型目标建议

**研究结论：**通过研究发现，相比于所有省份均在 2030 年前实现碳达峰的统一战略和各省已经提出的政策规划，兼顾效益和区域公平

性的策略能够分别使全国 GDP 累积增长 1.54% 和 0.92%，且 90% 的省份都将获得经济收益，此外，研究还确定了区域碳减排和能源消费结构的最佳路径。

### 2.3.3 通过部门行动实现中国二氧化碳排放达峰

**标题：** Peaking China's CO<sub>2</sub> emissions by sectoral actions

**作者：** Yixuan Zheng , Bofeng Cai , Yu Lei , Gang Yan

**期刊：** Environmental Science and Ecotechnology

**链接：** [Peaking China's CO<sub>2</sub> emissions by sectoral actions - PMC](#)

**研究背景：** 减少中国这个世界上最大的碳排放国的二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 排放对全球气候缓解至关重要。在中国对巴黎协定修订的国家自主贡献中，中国已承诺在 2060 年前实现碳中和，第一步是在 2030 年前达到碳排放峰值。然而，中国经济仍处于快速增长阶段，这将给 2020 年代达到 CO<sub>2</sub> 排放峰值带来巨大挑战。因此，这个世界最大发展中国家的经济需要进行快速而深远的清洁转型是迫在眉睫的。

**研究内容：** 中国的燃料燃烧和工业过程在 2020 年共排放了 115 亿吨二氧化碳 (CO<sub>2</sub>)，约占全球总排放量的 30%。电力、制造业、交通和建筑部门直接排放的 CO<sub>2</sub> 分别占全国总量的 40%、44%、9% 和 6%。细分制造业部门，钢铁、水泥、铝、石化和煤化工行业是与总生产相关的主要排放行业。因此，针对这八个主要部门和行业的定制措施是实现中国 CO<sub>2</sub> 排放达峰的关键。在这里，我们开发了八个部门碳排放预测模型，这些模型包含了详细的能源分类和技术选项，这些模型是基于 100 多位中国各领域专家和政策制定者的投入而开发的。基于此，我们提出了减少关键部门 CO<sub>2</sub> 排放的基本行动，并设计了一条路线图，为不同部门安排了错峰达峰的时间表，以支持中国雄心勃勃但具有挑战性的碳减排策略。

绿化制造业部门 中国是世界著名的工厂。中国 40% 以上的主要工业产品的产量位居世界第一。例如，在 2023 年，中国生产了 10 亿吨粗钢和 20 亿吨水泥，这超过了所有其他国家的总和。如果包括间接排放，与制造业相关的 CO<sub>2</sub> 排放约占全国总量的 2/3，因此，在很大程度上直接影响着中国总排放量的趋势。具体来说，制造业部门必须迅速达到排放峰值，为电力和交通部门潜在的排放增加腾出空间，从而减轻中国在指定达峰时间内总体排放量急剧上升的压力。

淘汰旧设施。重工业长期以来一直是许多地区的经济助推器。这种惯性一直在影响许多地方政府。然而，随着新的碳承诺，改变发展理念以避免追求高碳未来是不可避免的。关键是加强产能置换政策，该政策要求在建设新设施时必须淘汰相当或更大的工业生产能力。也就是说，先关闭过时的设施，然后建造具有较小生产能力的先进新设施。提高效率。尽管中国的工业部门在过去几十年经历了根本性转变，但在效率提升方面仍存在巨大潜力。例如，2022 年中国水泥生产每吨的平均能耗（126 千克标准煤/吨）相当于日本 2000 年的水平。重工业的能耗强度标准可以进一步收紧，以促进先进节能技术的实施，如钢铁厂和铝电解槽的余热回收技术。

循环利用资源。循环利用废弃资源将有效减少生产过程的能源消耗和环境足迹。中国的资源循环利用率普遍处于较低水平。例如，中国的钢铁循环利用率约为 22%，而美国约为 70%。根据我们的分析，到 2030 年将这一循环利用率提高到 35% 将减少中国约 1.3 亿吨的 CO<sub>2</sub> 排放。通过将铝的循环利用率从约 20% 提高到 30%，也可以实现类似的 CO<sub>2</sub> 减排效果。

### 2.3.4 量化中国钢铁行业 CO<sub>2</sub> 排放与环境健康负担：可持续转型之路

**标题：** Quantifying China's Iron and Steel Industry's CO<sub>2</sub> Emissions and Environmental Health Burdens: A Pathway to Sustainable Transformation

**作者：** Weiling Wu, Qian Tang, Wenbo Xue\*, Xurong Shi, Dadi Zhao, Zeyuan Liu, Xin Liu, Chunlai Jiang, Gang Yan\*, Jinnan Wang

**期刊：** Environmental Science & Ecotechnology

**链接：** <https://doi.org/10.1016/j.esec.2023.100367>

**研究背景：** 中国面临着改善空气质量和减缓气候变化的双重挑战。作为全球最大的钢铁生产国，中国钢铁行业排放了大量的大气污染物和 CO<sub>2</sub>；与发达国家相比，中国钢铁工业 90% 以上为高炉-转炉长流程工艺，具有巨大的低碳转型潜力。然而，当前中国钢铁工业缺乏工序级别的大气污染物和 CO<sub>2</sub> 排放清单，基于钢铁企业、生产工序对空气污染物和 CO<sub>2</sub> 排放特征的协同性分析不足。因此，定量研究钢铁行业工序级大气污染物与 CO<sub>2</sub> 排放清单以及环境健康影响，对于治理空气污染和减少 CO<sub>2</sub> 排放具有重要科学价值。

**研究方法：** 本研究基于全国 811 家钢铁企业 5 个主要生产工序的活动水平数据，建立了中国 2020 年钢铁行业分工序 CO<sub>2</sub> 和大气污染物融合排放清单。利用空气质量模型（WRF-CMAQ）和环境健康影响评估模型（GEMM），模拟评估了不同省份不同工序造成的网格化 PM<sub>2.5</sub> 相关过早死亡。

**研究结果：** 排放清单结果表明，2020 年中国钢铁行业 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 CO<sub>2</sub> 排放量分别为 51 万吨、97 万吨、42 万吨和 16.4 亿吨左右。分工序来看，烧结工序排放了大部分的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>，排放占比分别达 71%、73% 和 54%，然而高炉工序是 CO<sub>2</sub> 排放主要贡献

者，占比为 80%左右。另外，前 200 家企业排放了钢铁行业接近 80% 的污染物和 CO<sub>2</sub>。

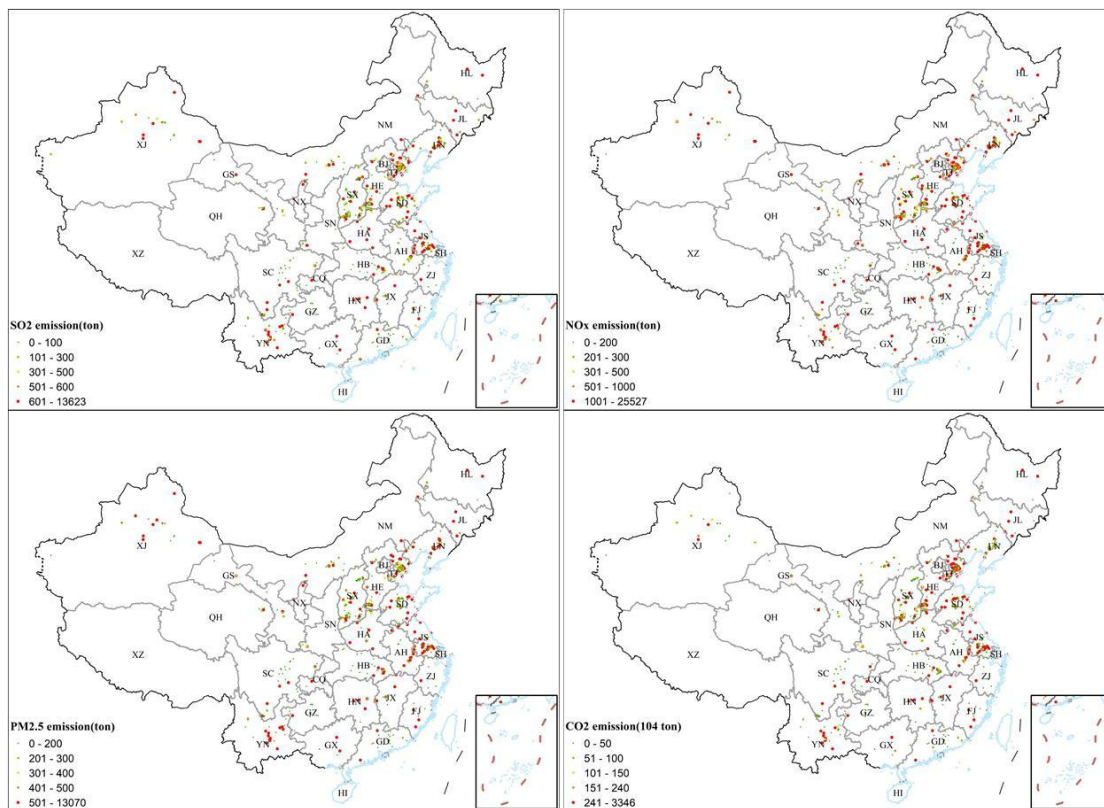


图 2.3-7 2020 年中国钢铁企业大气污染物和 CO<sub>2</sub> 排放

空气质量模拟结果显示，中国钢铁行业排放导致的全国 PM<sub>2.5</sub> 人口加权浓度约为 3.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。环境健康影响评估结果显示，2020 年全国钢铁行业 PM<sub>2.5</sub> 暴露相关过早死亡人数约 5.9 万，占有所有 PM<sub>2.5</sub> 相关过早死亡人数约 6%。分工序来看，烧结和球团工序对 PM<sub>2.5</sub> 相关死亡贡献最大(69%)，其次是高炉工序(23%)，转炉和电炉工序约占 8%；从省份贡献来看，河北、江苏、山东、山西和内蒙等省份污染物排放导致全国过早死亡人数累计占比约为 48%。

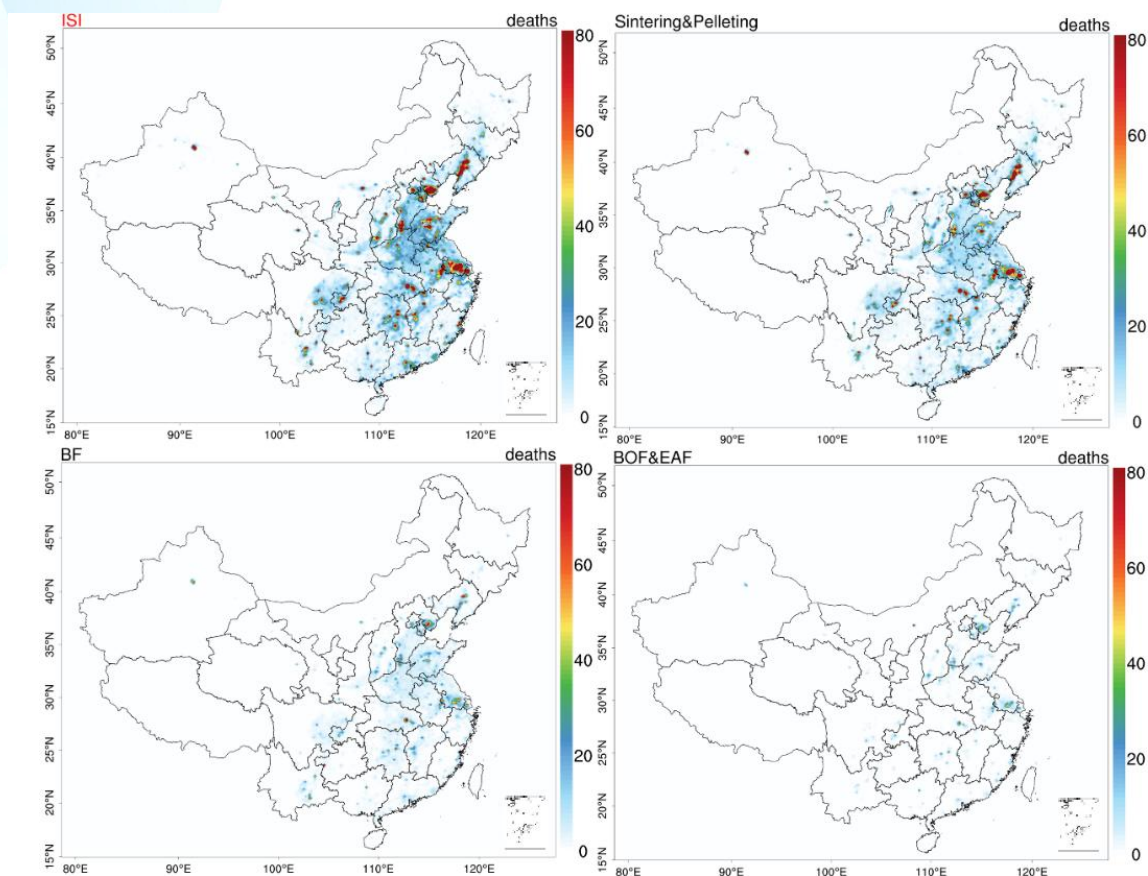
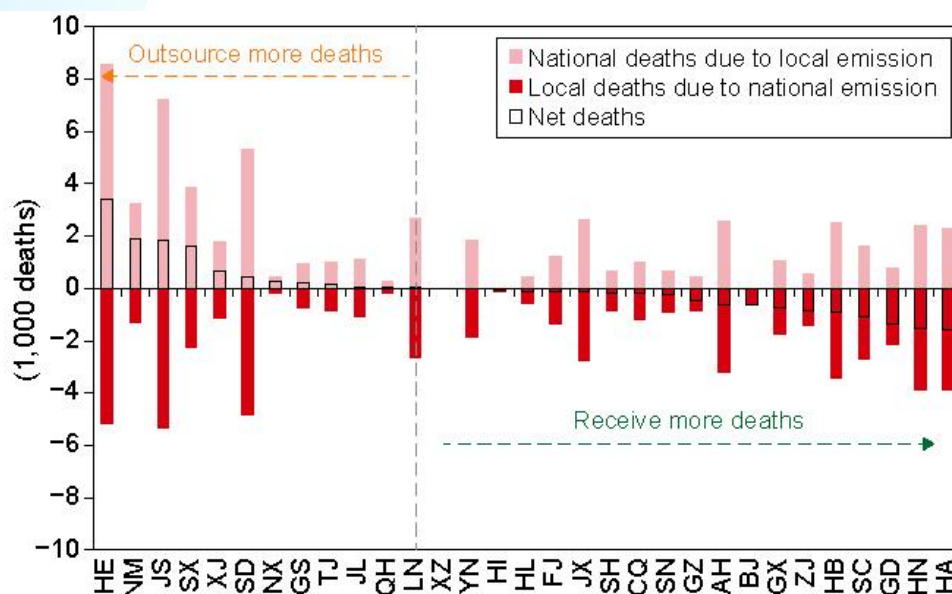


图 2.3-8 2020 年钢铁行业污染物排放导致  $PM_{2.5}$  相关死亡空间分布图

(a) 钢铁行业, (b) 烧结和球团, (c) 高炉, (d) 转炉和电弧炉

$PM_{2.5}$  相关过早死亡省际转移特征在空间上存在显著差异。河北、内蒙、江苏和山西等省钢铁行业排放造成的过早死亡将外溢到邻近省份；相比之下，河南、湖南和广东等省过早死亡人数则主要来自排放量较大的邻近省份。钢铁行业排放对周边省份的溢出效应导致了环境健康不平等问题。

图 2.3-9 钢铁行业跨省级传输 PM<sub>2.5</sub> 相关死亡人数

注：全国排放造成的本地死亡人数（Local deaths due to national emission）= 各省因当地排放和边界外排放导致死亡人数；当地排放造成的全国过早死亡人数（National deaths due to local emission）= 该省排放导致全国过早死亡人数；外溢过早死亡人数（Net deaths）= 当地排放导致全国死亡人数 - 全国排放导致当地死亡人数

此外，我们分析了不同省份大气污染物排放导致的全国 PM<sub>2.5</sub> 相关过早死亡人数与 CO<sub>2</sub> 排放的关系。结果表明，河北、江苏和山东三省的环境健康影响和 CO<sub>2</sub> 排放水平均显著高于其他省份。因此，从协同减少环境健康影响和 CO<sub>2</sub> 排放的角度来看，这些省份应优先采取更严格的控制措施。



## 期刊：环境科学

**摘要：**运用耦合协调模型计算碳减排与大气污染控制系统的耦合协调度，分析减污降碳协同效应在全国、区域和省域层面的时空分布特征；采用 2006~2020 年省级面板数据构建固定效应模型，对各层面的减污降碳协同效应的影响因素进行研究，引入研发经费投入强度作为调节变量，构建调节效应模型对减污降碳协同效应的影响机制进行进一步探究。结果表明：①碳排放与大气污染排放存在协同效应，2006~2020 年我国减污降碳协同效应演变呈现倒“U”型趋势，且减污降碳协同存在空间聚集性以及空间溢出效应；②我国减污降碳协同治理水平较低，各省份和区域在减污降碳协同治理水平上存在发展不平衡的特点，协调度呈现出东部地区、中部地区和西部地区依次递减的特征；③从全国层面来看，能源消费结构、人均 GDP 以及环保投资占比是减污降碳协同效应的主要影响因素；产业结构、能源消费结构、能源利用效率、人均 GDP、城镇化率、环保投资占比以及交通运输结构对减污降碳系统效应的影响在中、东、西部区间存在异质性；④研发投入强度在东、中部均起到显著的调节效应，但在西部地区未识别出显著的调节效应。在东部地区，城镇化率、环保投资占比和交通运输结构无法单独对减污降碳协同效应产生影响，要与研发投入强度相配合能够对减污降碳协同效应产生显著影响。

**研究背景：**当前，我国同时面临实现生态环境根本好转和实现碳达峰碳中和两大战略任务，生态环境发生根本性变革，在此背景下，协同推进减污降碳协同增效是推动我国生态环境改善由量变到质变的必然选择。从大气减污和碳减排的源头治理来说，减污和降碳是高度一致的、协同性很强。减污降碳协同增效可以

实现提高政策效率、降低成本、强化公共健康等多重效益<sup>[1]</sup>对此，生态环境部等七部门于 2022 年 6 月联合印发《减污降碳协同增效实施方案》，标志着我国进入推动减污降碳协同治理的崭新阶段。但当前我国减污降碳协同治理协同度水平较低，碳减排与大气污染控制系统间尚处于不稳定、不协调的状态，减污降碳协同效应及其多重效应尚未有效发挥。因此，对减污降碳协同效应的时空演变趋势及其影响机制进行研究同时识别重点区域，是提高政策效率，助力我国经济社会全面绿色转型、区域协调发展、推动我国生态环境治理根本性变革的必然选择。

**研究内容：**本研究从减污和降碳双视角出发，利用耦合协调度模型，从全国、区域和省域多层面揭示减污降碳协同效应的现状和时空演变特征。基于面板固定效应回归模型，在对中国以及区域减污降碳协同效应影响因素进行定量分析的基础上引入研发投入强度这一调节变量，进行影响机制的进一步探究，最后提出相应政策建议，以期为我国以及各区域提高减污降碳政策实施效率、促进区域协调发展和经济社会全面绿色转型提供参考。

从全国层面来看，人均 GDP 在 10% 的水平下显著正向影响减污降碳协同效应，人均 GDP 和研发投入强度的交互项显著为负，说明随着研发投入强度的提高，抑制人均 GDP 提高对碳排放与大气污染物协同减排作用。意味着现阶段我国研发投入强度的提高所带来技术水平提升在提高生产效率的同时带来了大气污染物的增排以及更大程度的碳增排从而抑制了两系统协调作用的发挥；环保投资占比在 1% 的水平下显著促进减污降碳协同效应，环保投资占比与研发投入强度的交互项为正，意味着随研发投入强度的提高，增强了环保投资占比提高对减污降碳协同效应的正向影

响。研发投入的提高节约生产成本、提高生产效率，从而使企业和政府有更多的资金用于环境治理，在一定程度上促进了碳与大气污染物的协同减排。能源利用效率、交通运输结构以及城镇化率在引入调节变量后交互项显著，说明以上不能单独对减污降碳协同效应产生影响，必须结合研发经费投入强度相配合，即提高能源利用效率、改善交通运输结构以及提高城镇化率的相关政策必须与研发经费投入强度调整的相关政策相配合才能对减污降碳协同效应产生显著影响。从东部地区来讲，能源利用效率、能源消费结构分别在 10% 和 5% 的水平上显著为负，且两个变量与研发投入强度的交互项均显著为负；人均 GDP 在 10% 的水平上显著为正，人均 GDP 与研发投入强度交互项显著为负，表明研发投入强度的提高增强了能源利用效率提高和能源消费结构改善对减污降碳协同增效的抑制作用，同时抑制了人均 GDP 的增长对温室气体与大气污染物协同减排的促进作用；总体上，东部地区随着研发投入强度的提高，生产技术得到改善，技术改善在提高生产效率的同时加快了能源消耗使能源消耗总量提高，从而抑制了减污降碳协同增效。因此对于该地区，要注意在经济发展的同时注意研发经费的适量投入，避免对生态环境和双碳目标带来不可逆的影响。对于中部地区，研发投入强度与环保投资占比的交互项显著为正；为正向调节作用，即研发投入强度的增加增强了环保投资增加对于减污降碳协同效应的促进作用；研发投入强度与产业结构交互项显著为负；为负向调节作用，即研发投入强度的增加抑制产业结构升级对减污降碳协同效应的抑制作用；且随着研发投入强度的提高，产业结构的改善所带来的负向调节作用要远强于正向调节作用，整体上该调节变量的引入抑制了二氧化碳与大气

污染物的协同减排。随研发投入强度的提高，相比于第三产业，技术进步其在更大程度上提高了第二产业的生产效率，节约了生产成本，导致大量生产资料和资金涌向第二产业，而第二产业作为碳排放和大气污染物的主要源头，在带来更多生产总值的同时也会带来更多的碳排放和更为严重的大气污染，进而抑制碳减排和大气污染控制系统间协同效应的发挥。在西部地区未识别出显著的调节效应。由于西部地区相较于其他地区发展较为落后，研发经费投入少，研发水平较为落后，研发投入的提高尚未显著提高技术水平进而使当地的产业结构、交通运输情况以及经济特征发生明显改善，进而达到促进温室气体与大气污染物协同减排的效果。

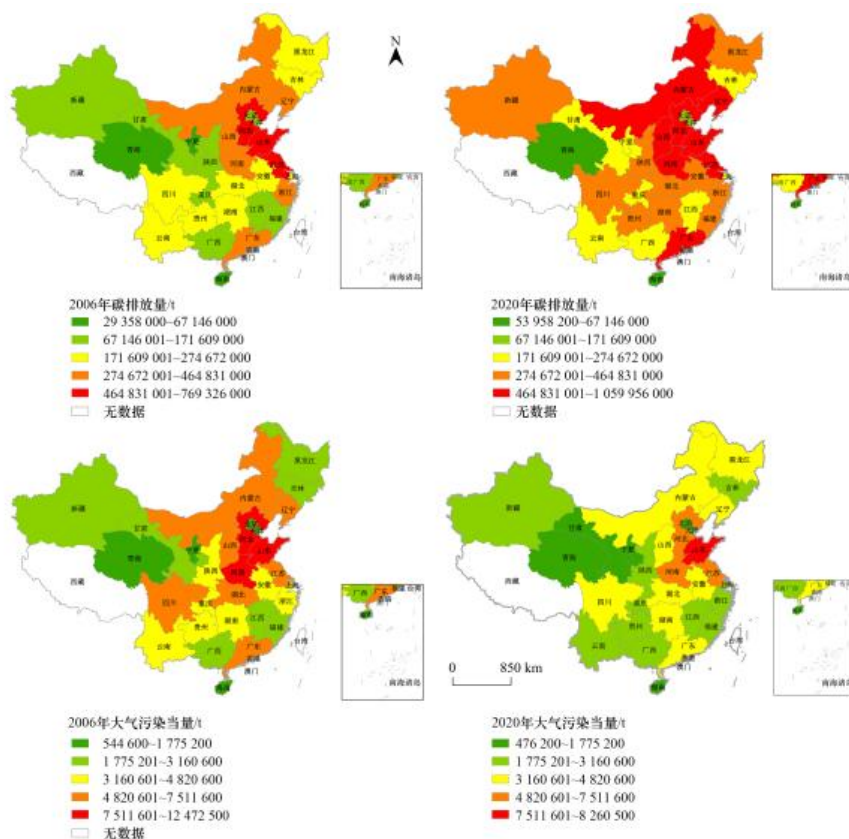


图 2.3-11 2006-2020 年我国各省污染物排放当量和碳排放量时空变化特征

研究建议（1）调整能源结构，同时加强对能源消耗总量的控制。推动化石能源清洁高效利用、提升非化石能源在能源供应中的比重，合理适度布局发展天然气发电，优先发展可再生能源，推动加强光伏、风电、核能发电配套基础设施建设，提高能源利用效率；积极推动交通运输结构的调整，如加快推进“公转铁”、“公转水”，实现交通运输部门的节能减排。（2）发挥科技创新的引领作用。各地结合实际加大专项研发经费的投入，如设立专项研发经费，加强科研监管机制建设等，激发各创新主体的活力。增强能源科技创新能力，尤其是西部地区要充分利用科技创新的第一生产力作用，发掘节能减排潜力；政府、企业、科研院所和高校等各方要各司其职明确自身定位，积极推动能源重大领域科技创新，加快成果转化，创新赋能产业结构升级以及能源结构调整。（3）政府加大财政资金对环保投资的支持力度。工业作为碳排放与大气污染的主要源头，尤其要加大对工业污染的治理投资投入；如对污水处理费、船舶油污损害赔偿金等加大环保支出力度；另外，各地区可结合当地实际设立奖惩制度，规范企业排污行为，同时鼓励各地积极探索创新融资机制同时积极引导市场各主体进行环保投资。（4）坚持顶层设计的同时鼓励各地区因地制宜。在顶层设计的指导下结合当地实际制定能源发展战略、注意多项政策的配合使用，积极开展能源革命，在实践中探索适合当地的治理方式，同时，要充分发挥空间溢出效应，深化各区域和地区间的交流与合作，可通过签订合作协议、开展交流座谈会等形式构建联防联控格局，促进区域协调发展。

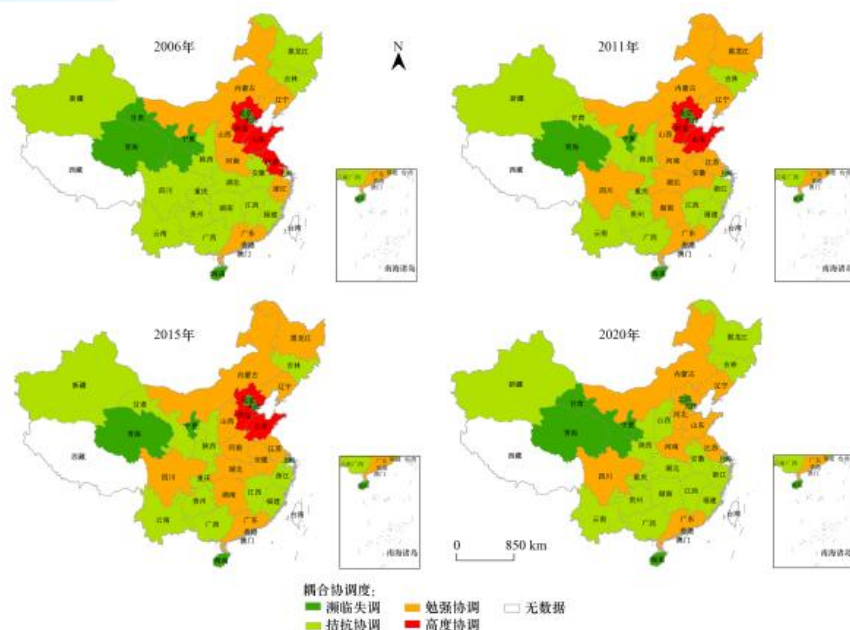


图 2.3-12 2006-2020 年我国各省减污降碳耦合协调度的时空分布

**研究结论：**（1）碳排放与大气污染排放间存在协同效应，2006~2020 年我国减污降碳协同效应演变呈现倒“U”型趋势，且减污降碳协同存在空间聚集性以及空间溢出效应。（2）整体上来看，我国减污降碳协同治理水平较低，碳排放与大气污染物排放系统间尚处于不稳定和不协调的状态，各省份和区域在减污降碳协同治理水平上存在发展不平衡的特点，协调度呈现出东部地区、中部地区和西部地区依次递减的特征。（3）从全国层面来看，能源消费结构、人均 GDP 以及环保投资占比是减污降碳协同效应的主要影响因素；从区域层面来看，能源利用效率、能源消费结构和人均 GDP 为东部减污降碳协同效应影响因素；能源利用效率、能源消费结构、产业结构和环保投资占比为中部减污降碳协同效应影响因素；产业结构、人均 GDP、城镇化率和交通运输结构为西部减污降碳协同效应的影响因素。（4）研发投入强度在全国和东、中部均起到显著的调节效应，但在西部地区未识别出显著的调节效应。在东部地区，城镇化率、环保投资占比、

交通运输结构无法单独对减污降碳协同效应产生影响无法单独对减污降碳协同效应产生影响，必须要与研发投入强度相配合才可对减污降碳协同效应产生显著影响。

### 2.3.6 为中国绘制碳中和与清洁空气协同路线图——新专栏协同路线图

**标题：** Drawing a synergetic roadmap of carbon neutrality and clean air for China — Introduction to the new column synergetic roadmap

**作者：** Jinnan Wang, Yixuan Zheng

**期刊：** Environmental Science and Ecotechnology

**研究背景：** 在全球环境变化的背景下，气候变化和空气污染的交织挑战已成为对人类福祉的关键威胁。这些问题主要由人为活动产生的排放驱动，如化石燃料消耗、工业制造和农业实践，它们有许多共同的来源。此外，这两个问题通过大气物理过程、大气化学反应和气溶胶-辐射相互作用相互联系。鉴于空气污染控制和气候变化缓解之间存在强烈的协同效应，迫切需要制定策略同时应对这两个挑战。中国在“碳达峰碳中和”与大气污染防治领域已取得较为显著成就，可再生能源的迅速发展、大气环境质量的不断改善获联合国赞誉，这些工作同时促进了社会经济发展绿色转型，助推了三样绿色产业蓬勃发展。然而，协同推进碳中和与清洁空气任重道远，2023年我国部分地区大气污染反弹，极端天气气候事件频发，给碳污减排工作带来新挑战。

**研究内容：** 作为最大的发展中国家，中国面临着应对气候变化和空气污染的紧迫需求，目标是建设美丽中国以及实现碳排放达峰和碳中和。与美国和英国等发达经济体依次处理空气污染和气候变化不同，较不发达的经济体同时面临这些问题，这表明需要立即优先考虑协同控制。因此，中国积极推动温室气体（GHG）排放和空气污染的共

同控制，并在 2022 年 6 月发布了《污染和碳排放协同减排实施计划》。该计划是首个大型经济体为减少空气污染物和 CO<sub>2</sub> 排放而采取的综合策略，并为同时对抗空气污染和气候变化提供了协同路线图。政策的有效性在很大程度上取决于科学评估提供的信息。这对于中国的碳污染共同控制政策尤其如此，因为几乎没有经验可以借鉴。因此，2021 年启动了协同路线图项目，通过设计一个包含评估指标的分析框架，系统地跟踪和分析中国协同控制的进展，并定期跟踪这些指标的进展。评估后也将提出相关的政策建议。

为了分享中国共同控制努力的最新进展，我们很高兴向环境科学与生态技术读者介绍一个名为“协同路线图”的特别栏目。这个新栏目将提供协同路线图项目的年度更新。这个特别栏目将只发表邀请文章，通过在线系统或电子邮件提交给该栏目的文章将不被考虑。

新栏目以题为《2022 年中国碳中和与清洁空气协同路线图报告：加速关键部门转型》的创始报告开始。本文全面回顾了 20 个指标，提供了五个方面的洞见：协同治理体系和实践；结构转型的进展；空气污染及其相关的天气-气候相互作用；大气成分的来源、汇和减缓途径；以及协调控制的健康影响和效益。它提供了最新的进展洞见，特别关注 2021 年的发展。2021 年对中国的空气污染和 GHG 排放共同控制具有重要意义，因为它标志着碳市场发展和关键部门结构转型的几个里程碑，如电力、钢铁和水泥部门。2022 年的报告是协同路线图项目的第一个年度更新。通过 2020 年的 18 个指标进展的初步分析，已作为视角在环境科学与生态技术中发表。

## 2.4 协同政策与效益评估

### 2.4.1 2013-2021 年中国减污降碳措施的协同增效评估

**标题：**Integrated Benefits of Synergistically Reducing Air Pollutants

and Carbon Dioxide in China

作者： Shengyue Li, Shuxiao Wang, Qingru Wu, Bin Zhao, Yueqi Jiang, Haotian Zheng, Yifan Wen, Shaojun Zhang, Ye Wu, Jiming Hao

期刊： Environmental Science Technology

链接： <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acs.est.4c00599>

**研究背景：**世界各国普遍面临着空气污染和气候变化的双重严峻挑战，中国近年来在空气污染防治和二氧化碳减排方面取得的进步可为推进协同减污降碳战略提供经验。现有研究已表明空气污染防治和气候政策分别具有协同减碳和减污的效益，然而不同措施在减污或降碳方面的差异化表现使得实施方案的制定陷入两难。当前尚缺乏对措施协同减排综合效益的清晰认知。本研究通过建立措施减污降碳协同增效的定量评价方法，针对中国 2013-2021 年间减排措施的协同增效表现开展了系统评估和对比分析，识别出在促进协同、增加效益方面的优势措施，可为未来协同减排策略的制定和优化提供科学支撑。当前研究普遍证明了气候政策的空气质量改善协同效益和清洁空气政策的协同减碳效益，但尚缺乏对政策措施在减污降碳协同增效方面的综合认识。本工作通过建立措施减污降碳协同增效的评价方法，针对中国 2013 年以来实施的各类措施展开了系统评估和对比分析。

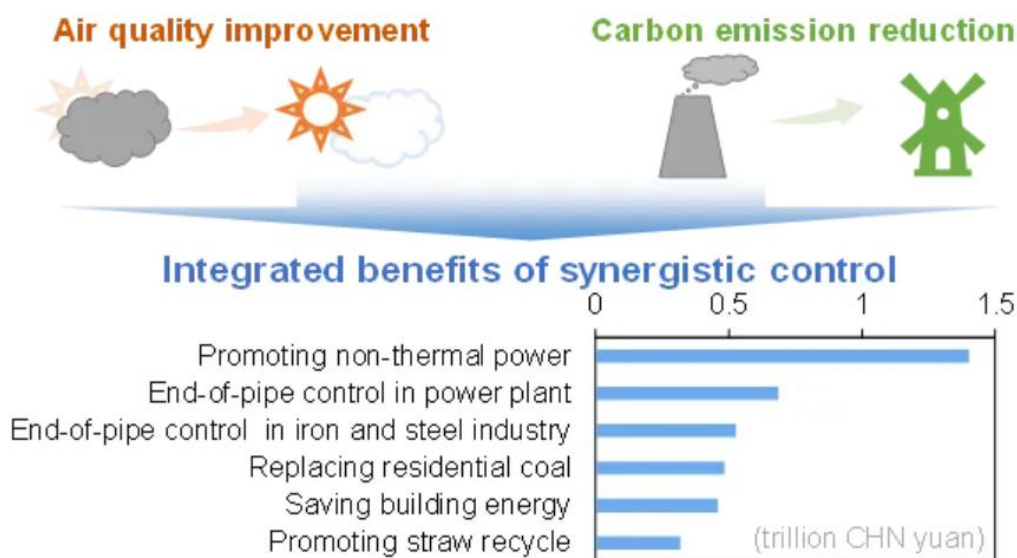


图 2.4-1 本研究图文摘要

**研究内容：**尽管社会经济的快速发展促进了大气污染物和 CO<sub>2</sub> 的排放，但末端治理措施（EOP）最终驱动了大气污染物排放量的下降，而结构调整措施（SA）和节能降耗措施（EMS）则有效减缓了 CO<sub>2</sub> 排放的快速增长。具体而言，EOP 措施贡献了 54%-76% 的大气污染物减排；其中，电厂末端治理主导了 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 的减排，加严钢铁行业和道路机动车的排放标准分别主导了 PM<sub>2.5</sub> 和 VOCs 的减排。SA 和 EMS 措施分别贡献了 17 和 10 亿吨的 CO<sub>2</sub> 减排；其中，推广清洁低碳能源发电（非火电）贡献了近六成的碳减排。

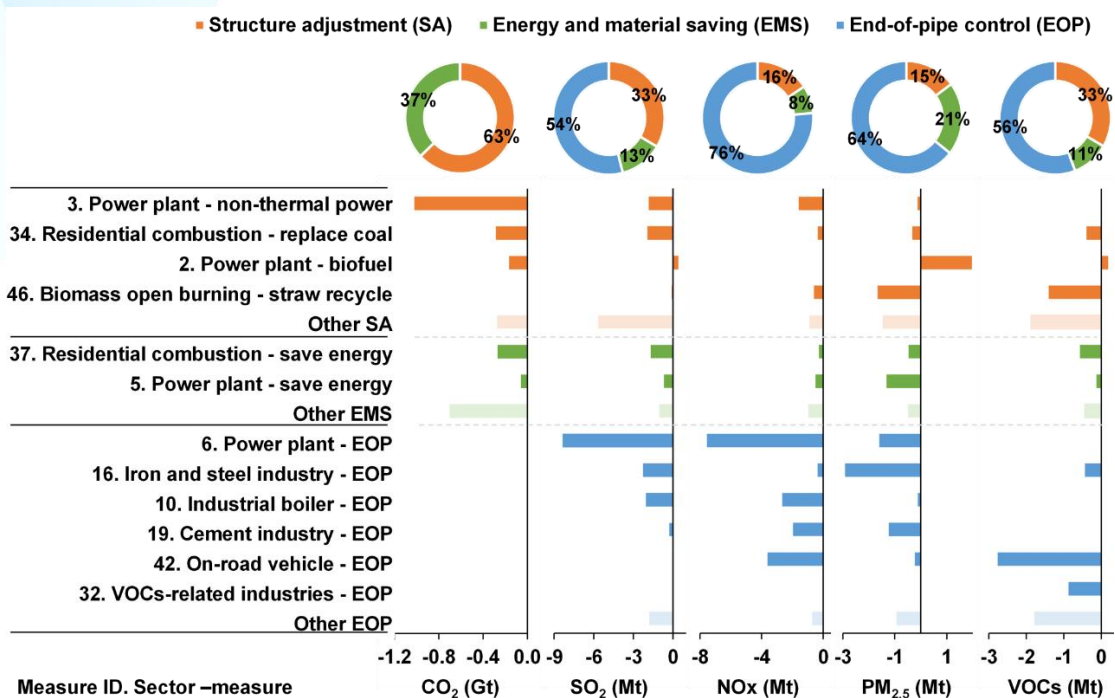


图 2.4-2 2013-2021 年间主要部门措施的大气污染物和 CO<sub>2</sub> 减排效果

在 2013-2021 年期间，华东地区为大气污染物和 CO<sub>2</sub> 减排效益的主要贡献地区，但各地区的主导措施有所不同。对于 CO<sub>2</sub> 减排，60% 的省份以推广清洁低碳发电措施贡献。对于大气污染防治，减排措施促进了 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度下降了 31.6 μg/m<sup>3</sup>，避免了近 40.7 万人的早逝；促进了暖季（4 月-9 月）MDA8 O<sub>3</sub> 浓度下降了 7.8 ppb，避免了近 6.7 万人的早逝。其中，半数以上的省市以电厂末端治理措施贡献为主。

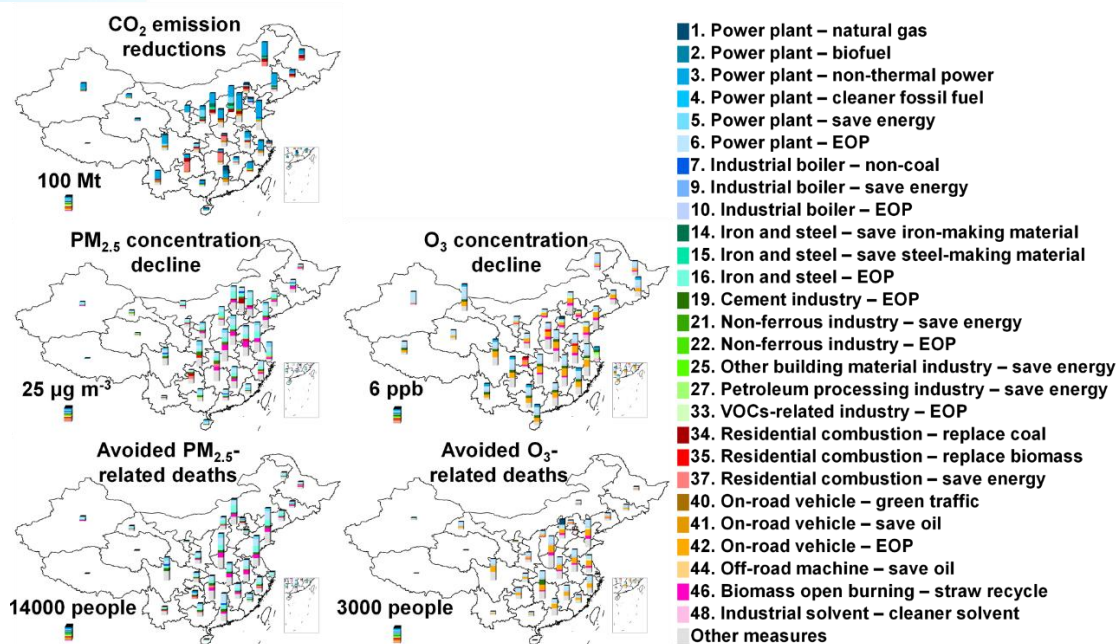


图 2.4-3 2013-2021 年间中国 31 省市在 CO<sub>2</sub> 减排、空气质量改善和保障人体健康方面的主要贡献措施

在过去十年，中国大气污染防治与 CO<sub>2</sub> 减排取得了相当效益，但主要贡献措施存在显著差异。从综合效益方面看，减污降碳措施共带来了 6.7 (2.4-12.6) 万亿元的效益。效益最大的五项措施依次为推广清洁低碳能源发电、电厂末端治理、钢铁行业末端治理、民用散煤替代和建筑节能改造；其中，只有民用部门两项措施获得了较高的协同度。其他高协同度的措施（如钢铁行业降耗、推广绿色交通和降低供热能耗）尚未得到充分实施而获得了较低的效益。

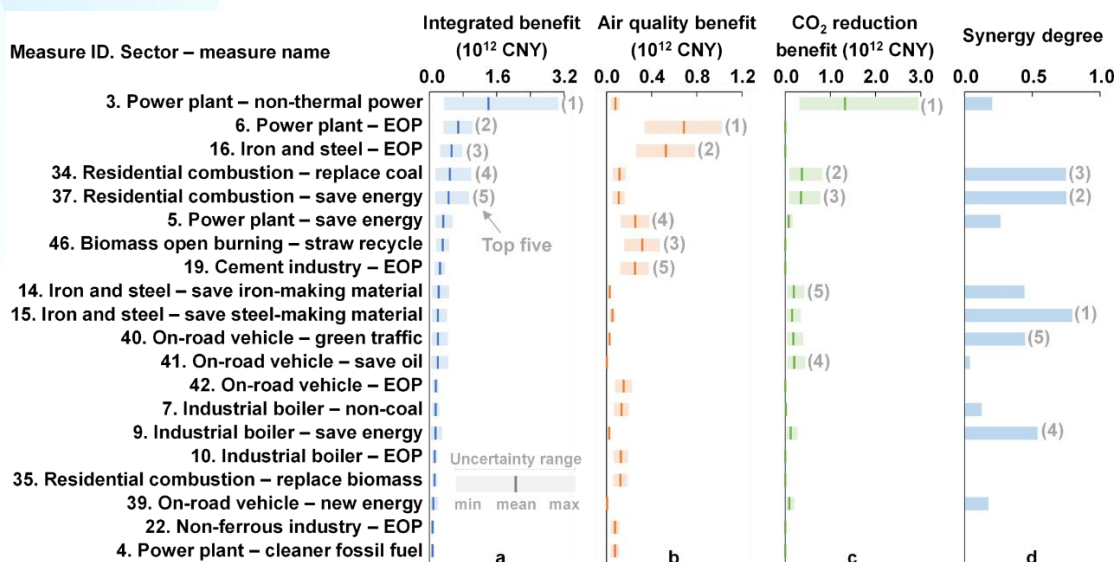


图 2.4-4 2013-2021 年中国大气污染物和 CO<sub>2</sub> 减排措施的综合效益和协同度

建议未来优先推广单位综合效益较大的措施。具体而言，当一项措施同时多方面具有较高单位综合效益时，表明其较高的协同度和较大的增效潜力，建议优先推广，如对于京津冀及周边区域而言，推广清洁低碳能源发电具有较高的 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 协同防治效益。另一方面，当一组措施具有不同方面的高单位综合效益时，虽各自协同度较低，但组合实施可最终保证社会-经济-环境系统总效益的增加，如对于长三角地区而言，共同推进清洁低碳能源发电和电炉钢工艺可有效提升减污和降碳的效益。

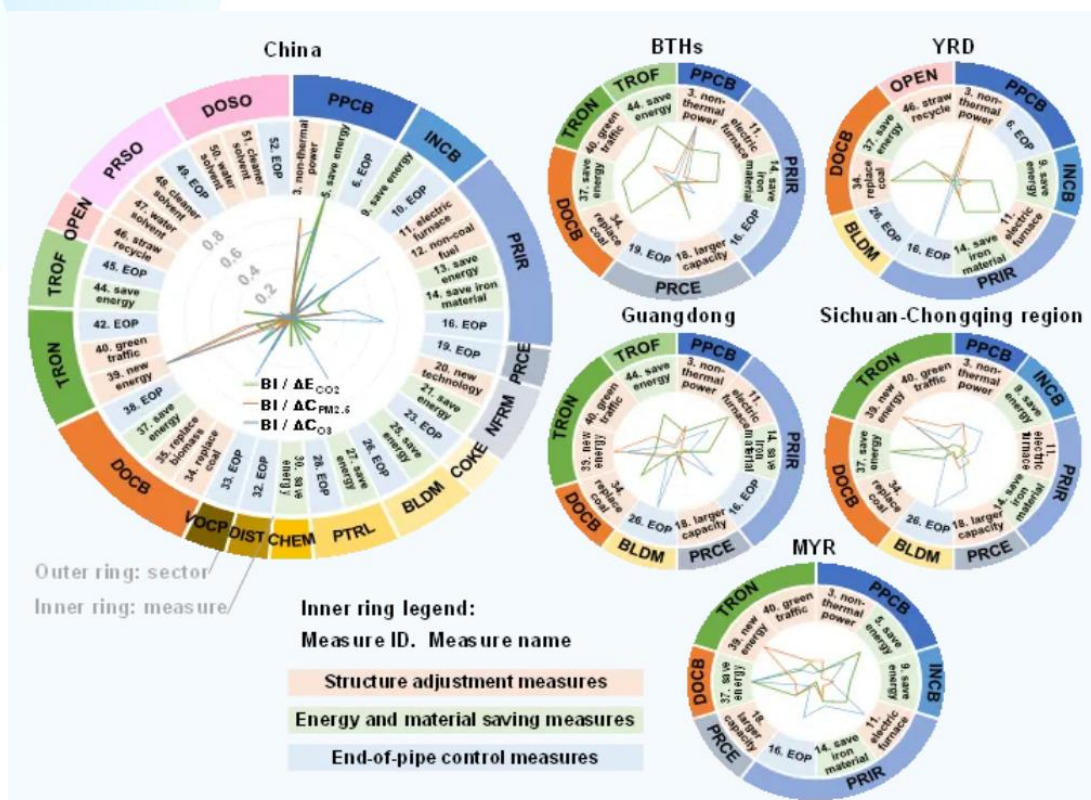


图 2.4-5 2013-2021 年中国及重点区域单位减污降碳的综合效益

**研究结论：**本研究通过提出综合效益和协同度指标，为定量评估协同减污降碳效益提供了一种更加综合直观的工具。通过系统对比分析各类措施的优劣势，识别不同地区、部门重点减排措施，为未来精细化减污降碳协同增效战略的制定和优化提供思路。

#### 2.4.2 2013-2020 年中国清洁空气行动应对 PM<sub>2.5</sub> 污染成效

**标题：** Efficacy of China's clean air actions to tackle PM<sub>2.5</sub> pollution between 2013 and 2020

**作者：** Guannan Geng, Yuxi Liu, Yang Liu, Shigan Liu, Jing Cheng, Liu Yan, Nana Wu, Hanwen Hu, Dan Tong, Bo Zheng, Zhicong Yin, Kebin He & Qiang Zhang

**期刊：** Nature Geoscience

**链接：** <https://www.nature.com/articles/s41561-024-01540-z>

**研究背景：**我国于 2013 年和 2018 年先后发布实施两阶段清洁空气行动计划，即 2013-2017 年《大气污染防治行动计划》（简称《大气十条》）和 2018-2020 年《打赢蓝天保卫战三年行动计划》（简称《三年行动计划》），推动 PM<sub>2.5</sub> 污染显著改善。然而，PM<sub>2.5</sub> 污染改善幅度在《三年行动计划》期间明显放缓。本研究结合排放清单模型、大气化学传输模型和成本评估模型，量化了 2013-2020 年间中国 PM<sub>2.5</sub> 污染改善成效及其驱动因素，并评估了两阶段清洁空气行动的实施成本。研究发现，全国人群平均 PM<sub>2.5</sub> 污染暴露水平在第一和第二阶段期间分别下降 19.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 10.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。研究测算结果表明，在剔除气象条件变化及新冠疫情封控影响后，两阶段减排措施分别推动 PM<sub>2.5</sub> 污染暴露水平平均每年下降 4.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，第二阶段期间的减排措施效果明显收窄。《三年行动计划》期间的强化结构调整以及针对 VOC 和 NH<sub>3</sub> 的减排措施成功削减了大气污染物排放，但末端治理措施的减排效果有所减弱。2018-2020 年减少单位 PM<sub>2.5</sub> 污染的治理成本约为 2013-2017 年的两倍，PM<sub>2.5</sub> 污染治理难度日益增加。研究表明，未来亟需制定强化、均衡的减排措施以推动多污染物协同减排。

**研究内容：**PM<sub>2.5</sub> 污染是我国主要环境问题之一，每年导致上百万人过早死亡。为应对 PM<sub>2.5</sub> 污染问题，我国于 2013 和 2018 年分别发布实施了两阶段清洁空气行动计划，即《大气污染防治行动计划》（以下简称《大气十条》）和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》（以下简称《三年行动计划》）。清洁空气行动实施以来，我国 PM<sub>2.5</sub> 浓度大幅降低，获得显著健康效益。然而，2017-2020 年间全国 74 个重点城市 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度每年下降 3.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，比 2013-2017 年间年均 6.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  的下降速度低 48%，《三年行动计划》期间 PM<sub>2.5</sub> 污染改善幅度明显收窄。上述变化是受多种自然和人为复杂因素影响共同叠加的结果。

自然因素方面，气象要素的年际变化可通过影响天然源排放、气团传输、污染物清除以及大气化学过程而对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度趋势产生重要影响，在评估减排措施成效时不容忽视。人为因素方面，两阶段清洁空气行动减排措施的重点方向和实施力度均有所区别，《大气十条》重点针对电力和工业部门开展末端治理，《三年行动计划》则更强调结构调整以及对多污染物（ $\text{NO}_x$ 、 $\text{VOC}$  和  $\text{NH}_3$ ）的协同控制，因此两阶段期间的排放变化趋势可能存在差异。除此之外，2017-2020 年的排放变化还受到新冠疫情期间管控措施的影响，这些措施显著减少了人类活动和污染物的排放，在评估清洁空气行动成效时应去除其影响。如何科学评估清洁空气行动成效，厘清各项措施对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度下降的贡献，是科学界与决策者共同关心的问题。过去已有研究评估了《大气十条》的实施效果，分离了减排和气象条件变化对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度下降的贡献，量化了《大气十条》各项减排措施对空气质量改善和相关健康效益的贡献。然而对《三年行动计划》期间  $\text{PM}_{2.5}$  污染改善幅度收窄的主要影响因素仍缺乏全面评估。此外，我国政府投入大量资源和资金支持清洁空气行动，但两阶段行动的减排成本及变化趋势尚不清楚。针对上述问题，本研究通过耦合自下而上排放清单模型、大气化学传输模型和污染暴露-响应模型，量化了 2017-2020 年间气象条件变化、新冠疫情管控以及《三年行动计划》八项减排措施（扩展数据图 1）对  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化及健康效应的贡献，并与前期工作测算的《大气十条》期间评估结果进行对比。研究同时量化了两阶段清洁空气行动的成本和效益。研究首先利用中国多尺度排放清单模型（MEIC，<http://meicmodel.org.cn/>）计算 2013-2020 年间我国大气污染物排放变化，并估算了 2017-2020 年间新冠疫情管控和各项污染控制措施对污染物减排量的贡献。在此基础上结合详细的减排措施和成本数据，估

算了两阶段各项措施的减排成本。其次，利用天气研究与预报模式和通用多尺度空气质量模型（WRF-CMAQ）对 PM<sub>2.5</sub> 浓度进行模拟，并设计多个模拟情景以分离气象变化、新冠疫情管控以及八项减排措施对 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化的贡献。最后，利用全球疾病负担研究开发的综合暴露响应函数（IER）计算与 PM<sub>2.5</sub> 相关的健康损失。后续分析中关于 2013-2017 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化及驱动因素的结果取自研究团队之前的工作。如图 2013-2020 年我国五种主要大气污染物的排放变化趋势，排放趋势与卫星观测和地面观测的趋势较为一致，证实了排放估算的准确性。这一时期我国的大气污染物排放整体呈下降趋势，而国内生产总值（GDP）和能源消费呈上升趋势，说明大气污染物排放与经济活动和能源消费逐步脱钩。2013-2020 年间 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和一次 PM<sub>2.5</sub> 排放量持续下降，证实了清洁空气行动的有效性，但《三年行动计划》期间的减排幅度低于《大气十条》期间。2013-2017 年间，由于缺乏针对 NMVOC 和 NH<sub>3</sub> 的有效排放控制措施，NMVOC 排放量持续增加（每年增加 0.3 万吨或 1%），NH<sub>3</sub> 排放量基本保持平稳；而在《三年行动计划》期间，相关强化减排措施推动 NMVOC 和 NH<sub>3</sub> 排放量下降。

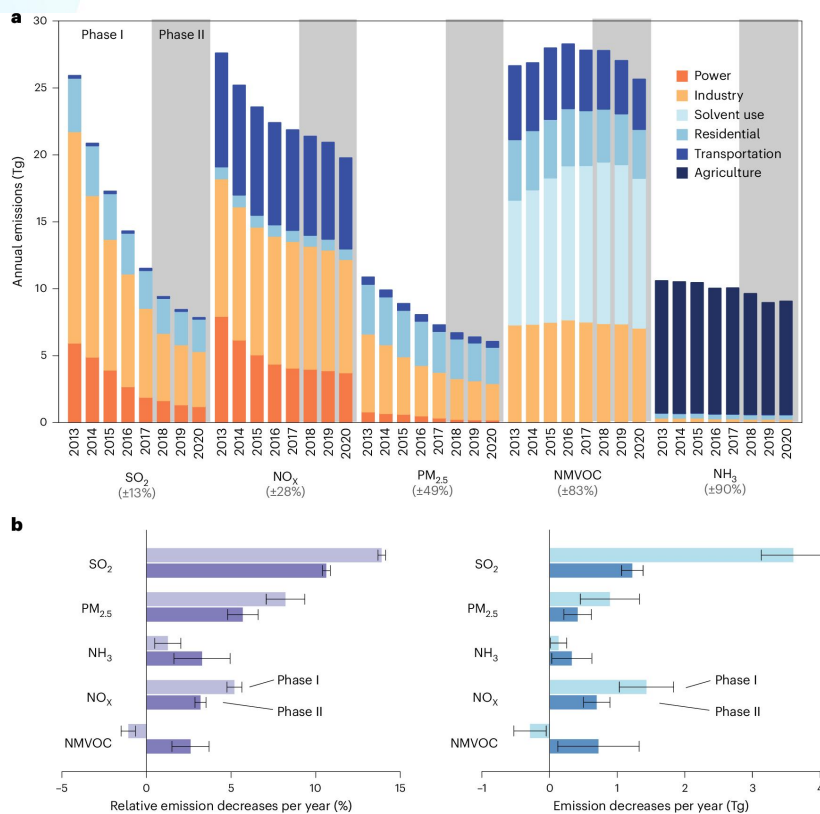


图 2.4-6 2013-2020 年中国人源排放变化趋势以及在两阶段清洁空气行动期间的排放下降幅度。**a**, 2013-2020 年分部门的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、一次 PM<sub>2.5</sub>、NMVOC 和 NH<sub>3</sub> 排放。排放分为电力、工业、溶剂使用、居民、交通和农业等六个部门。括号中的数字代表不确定范围 (95%置信区间)。**b**, 《大气十条》和《三年行动计划》期间的相对排放变化率和绝对排放变化率。污染物按 2017-2020 年间相对排放变化率从高到低排序。误差线表示 1000 次蒙特卡洛模拟中的 95%置信区间。

扩展数据进一步将 2013-2020 年污染物排放变化分解为活动水平变化和污染控制措施的贡献。尽管许多控制措施在两阶段清洁空气行动期间持续实施,但由于两阶段措施的发力对象、实施强度和速度均有所区别,导致两阶段排放变化存在显著差异。2013-2020 年间,污染控制措施是排放下降的主要驱动因素,而活动水平变化仅对 SO<sub>2</sub> 和一次 PM<sub>2.5</sub> 产生减排效果,表明我国清洁空气行动成效主要与末端治理措施有关,结构调整的减排潜力有待进一步释放。《三年行动计划》期间全国人群 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平下降 25%, 每年平均下降 3.6 μg/m<sup>3</sup>,

明显低于《大气十条》期间  $5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的年均降幅。2013-2020 年间，基于 CMAQ 模拟计算的全国人群  $\text{PM}_{2.5}$  年均暴露水平从 2013 年的  $61.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  下降至 2020 年的  $32.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2020 年全国人群  $\text{PM}_{2.5}$  平均暴露水平自 2013 年以来首次低于  $\text{PM}_{2.5}$  空气质量年均浓度标准 ( $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。京津冀及周边地区 (BTHSA)、长江三角洲 (YRD) 和汾渭平原 (FWP) 是《三年行动计划》中明确的重点区域。2017-2020 年间京津冀及周边地区的  $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平降幅在三个重点区域之中最大，平均每年下降  $6.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，其次是汾渭平原 (每年下降  $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 和长三角 (每年下降  $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。CMAQ 模拟的  $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平变化趋势与基于多源数据融合估算的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度变化趋势以及 337 个城市的平均  $\text{PM}_{2.5}$  观测浓度一致，验证了 CMAQ 模拟结果的准确性。



图 2.4-7 2017-2020 年全国及重点区域人群  $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平变化。a. CMAQ 模型模拟的人口加权年均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度。误差线表示 1000 次蒙特卡罗模拟的 95% 置信区间。b. TAP 数据集 (<http://tapdata.org.cn/>) 的人口加权年均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度。c. 基于我国 337 个城市地面观测数据的年均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度。

**气象条件变化和新冠疫情管控措施的影响：**研究结果表明，2020年气象条件相较2017年更有利于PM<sub>2.5</sub>污染改善，气象条件变化对2017-2020年全国人群PM<sub>2.5</sub>暴露水平下降的贡献为3.3μg/m<sup>3</sup>，高于《大气十条》期间的1.7μg/m<sup>3</sup>。在区域尺度，气象条件变化对京津冀及周边地区、长三角和汾渭平原2017-2020年PM<sub>2.5</sub>污染下降的贡献分别占总降幅的28%、36%和5%。研究进一步使用结合了风速、边界层高度和降水量的空气静稳日指数来表征PM<sub>2.5</sub>的扩散条件。分析结果表明，2020年与2017年相比风速偏高，降水偏多，空气静稳日出现频次偏低。2020年冬季“暖北极-冷欧亚”模态推动冷空气频繁南下，导致强风和寒潮显著增加，为PM<sub>2.5</sub>污染扩散提供了有利条件。此外，2019年强印度洋偶极子事件引发印度洋持续变暖，导致2020年夏季中国出现异常强降水，对PM<sub>2.5</sub>产生显著湿清除效应。

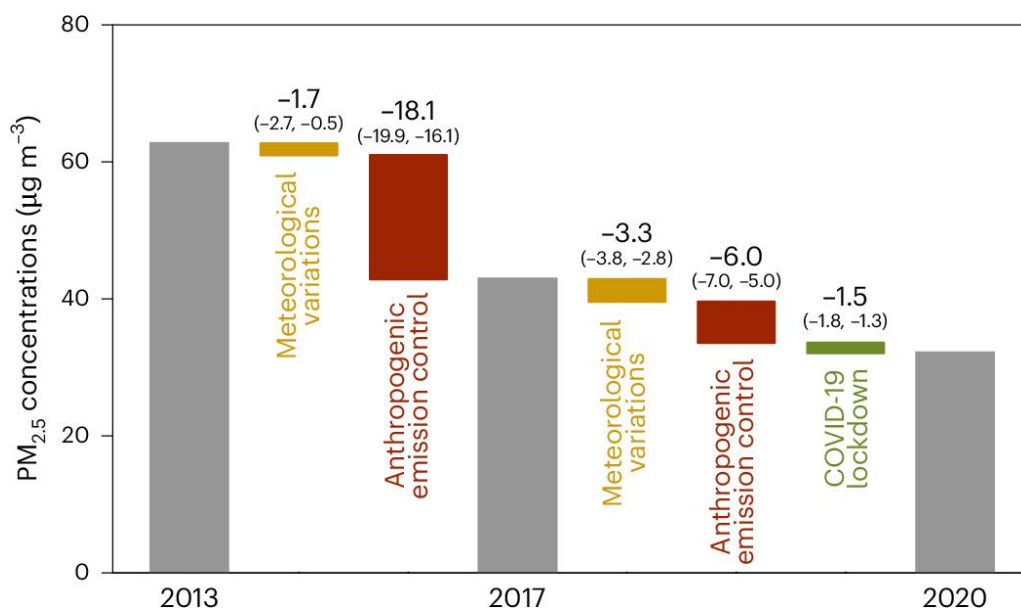


图 2.4-8 2013-2020 年中国 PM<sub>2.5</sub> 变化的主要驱动因素。黄色、红色和绿色柱状图分别代表气象变化、减排控制措施和新冠疫情管控的影响。括号中的数值表示 95% 置信区间。

为遏制新冠疫情传播，我国在 2020 年采取了严格的管控措施，导致大气污染物排放显著减少，NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降。管控措施从 2020 年 1 月开始至 4 月大部分省份管控结束，在此期间主要工业和社会经济活动相较于 2019 年同期明显下降。2020 年 4 月之后，能源消耗和碳排放基本恢复到疫情前的水平。因此，此研究将 2020 年前四个月相较于 2019 年同期排放的下降量归因于新冠疫情管控措施的影响。这部分减排量导致我国 PM<sub>2.5</sub> 年均暴露水平下降 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，约占 2017-2020 年间 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平总降幅的 14%。在区域尺度，新冠疫情管控措施对京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区 2017-2020 年间 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平总降幅的贡献在 12–17% 之间。

**清洁空气行动减排措施的影响：**在分离气象条件变化和新冠疫情管控措施影响之后，研究估算《三年行动计划》减排措施推动 2017-2020 年全国人群 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平下降 6.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （年均降幅为 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ），占这一期间 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平总降幅的 56%，减少 15.8 万人的过早死亡风险。与此相比，《大气十条》减排措施推动 2013-2017 年间 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平下降 18.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，年均降幅为 4.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，《三年行动计划》期间的减排措施效果明显收窄。2017-2020 年间《三年行动计划》八项主要减排措施对大气污染物减排、人群 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平下降及健康效益的贡献。在全国尺度，民用部门清洁取暖、电力工业提标改造、燃煤锅炉整治以及移动源排放管控是最有效的四项措施，对 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平下降的贡献合计占全部措施贡献的 82%。在京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角地区等三个重点区域，《三年行动计划》

主要减排措施对  $PM_{2.5}$  暴露水平下降的贡献分别为 11.4、6.1 和  $10.8\mu g/m^3$ 。

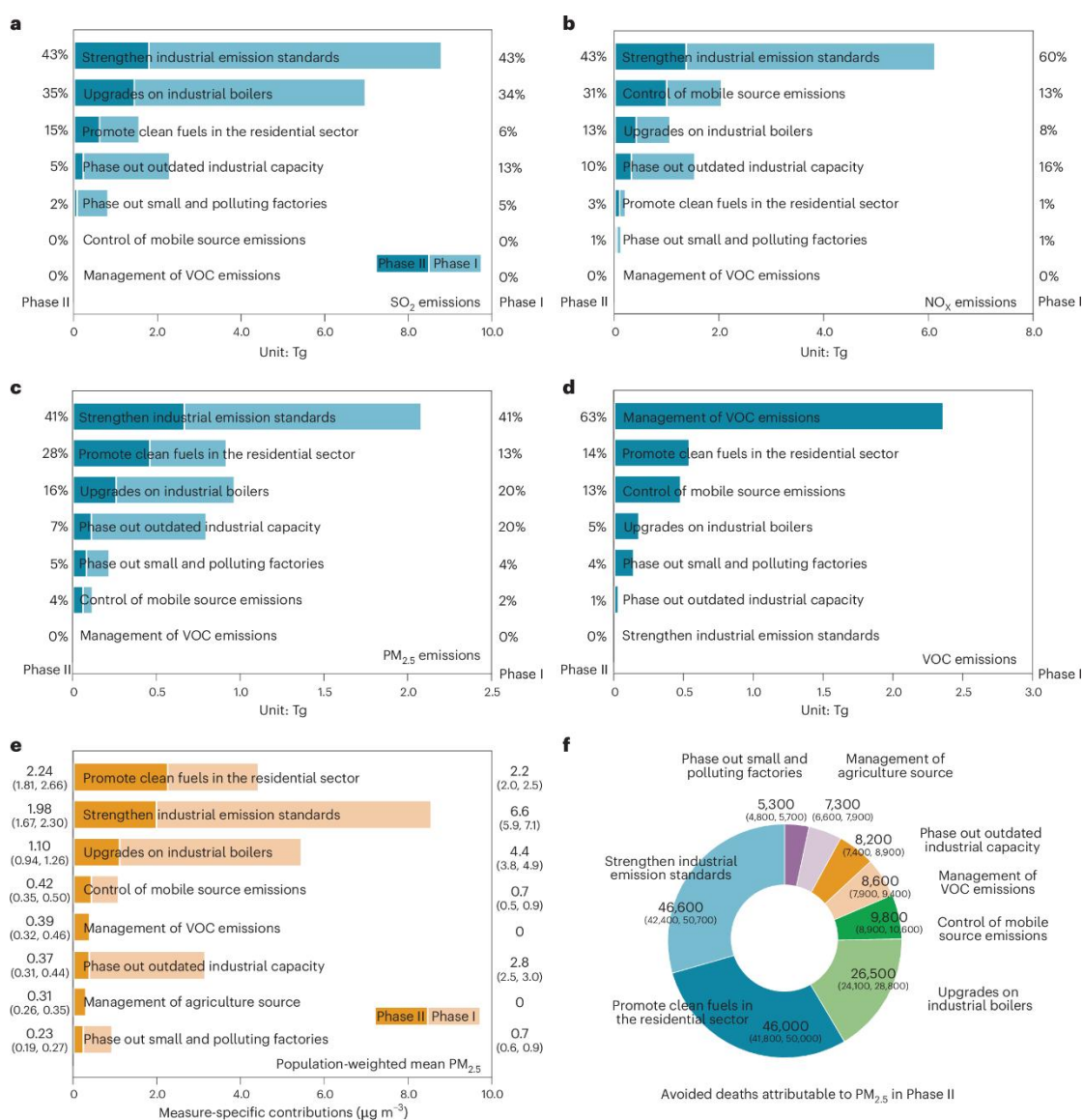


图 2.4-9 《大气十条》和《三年行动计划》期间八项控制措施对人为排放削减、人群  $PM_{2.5}$  暴露水平下降和相关健康效益的贡献。a-d，两阶段八项措施对  $SO_2$  (a)、 $NO_x$  (b)、 $PM_{2.5}$  (c) 和 NMVOC (d) 排放削减的贡献比例。e，两阶段八项措施对全国人群  $PM_{2.5}$  暴露水平下降的贡献。f，《三年行动计划》中各项措施对全国范围内  $PM_{2.5}$  相关健康效益的贡献。括号中的数值表示 95% 置信区间。

进一步比较了《大气十条》和《三年行动计划》期间各项措施对污染物减排和  $PM_{2.5}$  暴露水平下降的贡献。不同措施贡献大小及排序

的差异反映了两阶段政策重点方向和实施力度的差别。在八项措施中，电力工业提标改造、燃煤锅炉整治、落后产能淘汰以及散乱污企业整治在《三年行动计划》期间对  $\text{PM}_{2.5}$  污染改善的贡献相较《大气十条》期间显著降低。这四项措施均为《大气十条》期间措施的延续，重点针对电力和工业部门排放开展末端治理。2013 年之前我国电力和工业部门排放控制水平较低，排放量占据主导地位，因此上述措施在 2013-2017 年间减排效果明显。而随着排放控制水平显著提升，2017 年之后进一步通过末端治理措施实现减排的潜力有限。例如，电力工业提标改造是《大气十条》期间最有效的减排措施，通过在燃煤电厂和排放密集型工业部门安装和升级末端治理设施，截止 2017 年底已有 770GW 的燃煤机组完成超低排放改造。而《三年行动计划》期间共有 170GW 的燃煤机组完成超低排放改造，同时 620 万吨钢铁产能完成或正在超低排放改造。电力工业提标改造使得  $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平下降  $1.98\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，约为《大气十条》期间该项措施效果的 30%。随着政策目标的调整与执行力度的加强，《三年行动计划》中民用部门清洁取暖、移动源排放管控、挥发性有机物排放治理和农业综合治理等四项措施的减排成效与《大气十条》期间相当或更佳。上述四项措施推动《三年行动计划》期间全国  $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平下降  $3.36\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，高于《大气十条》期间的  $2.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。2013-2017 年间，京津冀及周边地区 600 万户居民通过“煤改电”和“煤改气”实现清洁采暖；《三年行动计划》期间民用部门清洁取暖推广至整个北方地区，涉及居民 2300 万户，推动  $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平下降  $2.24\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，减少 46000 人过早死亡风险。民用清洁取暖主要在大气扩散条件较差的冬季实现减排，对  $\text{PM}_{2.5}$  污染的改善效果更为明显（扩展数据图 9）。在移动源方面，《三年行动计划》期间实施了新的机动车和非道路移动机械排放标准，并积极

推动“公转铁”和“公转水”。移动源排放管控是《三年行动计划》期间对 NO<sub>x</sub> 减排贡献第二大的措施，削减 NO<sub>x</sub> 排放 99 万吨，使得 PM<sub>2.5</sub> 污染暴露水平下降 0.42μg/m<sup>3</sup>。与《大气十条》期间不同，《三年行动计划》期间积极实施了针对 VOC 和 NH<sub>3</sub> 的减排措施。在 VOC 减排方面，针对重点行业颁布了 VOC 排放标准并加强了对溶剂中 VOC 含量的限制，从而减少 VOC 排放 236 万吨，推动 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平下降 0.39μg/m<sup>3</sup>。测土配方施肥技术可有效减少化肥使用，降低 NH<sub>3</sub> 排放。2017-2020 年间全国测土配方施肥技术应用面积达 1340 万公顷，化肥使用量减少 10%，进而削减 NH<sub>3</sub> 排放 90 万吨，降低 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平 0.31μg/m<sup>3</sup>。

**两阶段清洁空气行动的治理成本：**展示了《大气十条》和《三年行动计划》期间各措施的减排成本和效益。研究发现，燃煤锅炉整治和民用部门清洁取暖是 PM<sub>2.5</sub> 污染治理费效比较高的控制措施，每削减 1μg/m<sup>3</sup> 的 PM<sub>2.5</sub> 的减排成本相对较低。上述两项措施对《大气十条》期间 PM<sub>2.5</sub> 暴露下降的贡献为 38%，对《三年行动计划》期间 PM<sub>2.5</sub> 暴露下降的贡献为 47%，两项措施合计花费了两阶段总减排成本的 23%。移动源排放管控措施的费效比相对较低，分别花费了《大气十条》和《三年行动计划》期间总减排成本的 22%和 23%，贡献了 4%和 6%的 PM<sub>2.5</sub> 暴露下降。

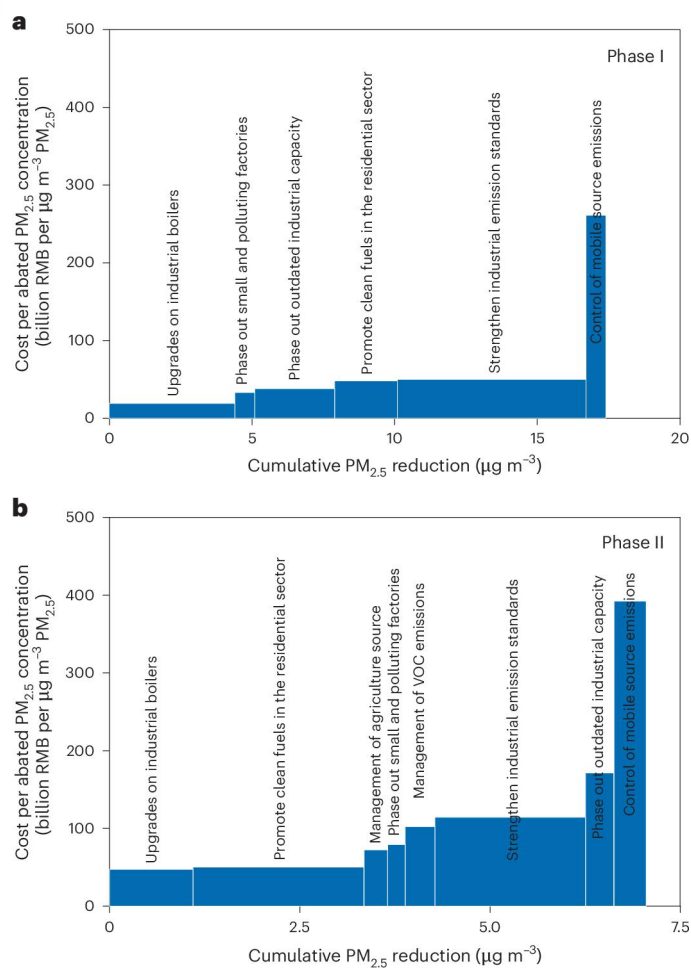


图 2.4-10 清洁空气行动两阶段的减排成本曲线。a,b 图中展示了每项控制措施对 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降的贡献及每减少一单位 PM<sub>2.5</sub> 浓度的治理成本。

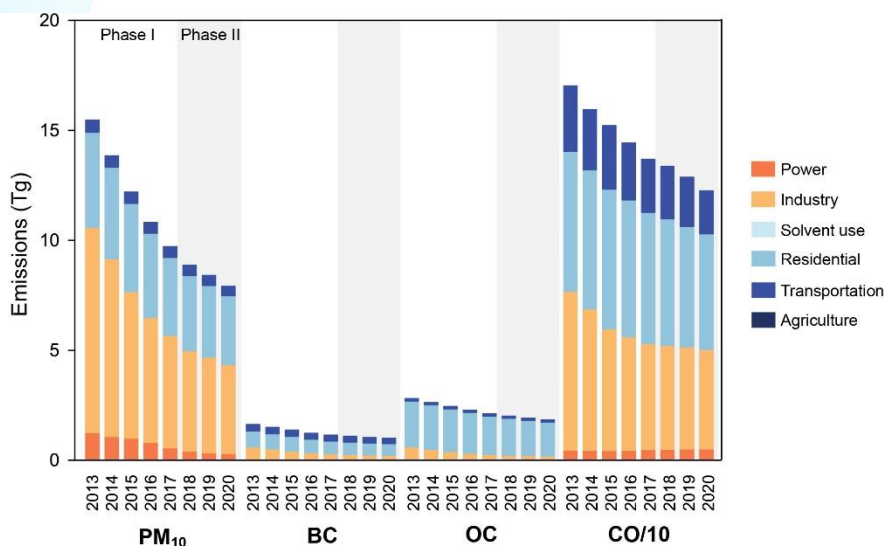
不同减排措施的费效比差异一方面与减排措施本身的成本相关，同时也受到前体物排放和 PM<sub>2.5</sub> 浓度之间非线性响应关系的影响。已有研究表明，PM<sub>2.5</sub> 浓度对前体物排放变化的非线性响应与二次无机气溶胶（如硫酸盐、硝酸盐和铵盐）生成的热力学平衡过程密切相关。扩展数据图 10 展示了 2013-2020 年我国四种主要 PM<sub>2.5</sub> 化学成分浓度与其前体物排放之间的关联关系。硫酸盐浓度对 SO<sub>2</sub> 排放变化几乎呈线性响应，但 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度下降幅度明显低于 NO<sub>x</sub> 减排幅度，个别年份甚至出现负向响应。NH<sub>3</sub> 在大气中优先与硫酸根离子中和，之后若仍有游离氨存在，才会与液态硝酸反应生成硝酸铵。2013-2020 年间，

由于我国  $\text{NH}_3$  排放控制政策相对滞后， $\text{NH}_3$  排放居高不下，与此同时硫酸盐大幅减少，导致大气中存在更多游离氨，促进  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  的形成，从而部分抵消了  $\text{NO}_x$  排放控制的效果。燃煤锅炉整治和民用部门清洁取暖主要减排一次  $\text{PM}_{2.5}$ （如黑碳和有机碳）和  $\text{SO}_2$ ， $\text{PM}_{2.5}$  浓度下降对减排呈近似线性响应关系，因而措施的费效比更高。移动源排放管控主要削减  $\text{NO}_x$  和  $\text{NMVOC}$  的排放，由于浓度和排放存在非线性响应关系，硝酸盐下降幅度低于  $\text{NO}_x$  减排幅度，影响了措施的费效比。研究发现 2013 至 2020 年间  $\text{PM}_{2.5}$  治理成本显著增加。《三年行动计划》期间，将全国人群  $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平每降低  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  的单位治理成本约为 1000 亿元人民币，是《大气十条》期间的两倍左右。各项措施的单位治理成本都有所增加，表明未来  $\text{PM}_{2.5}$  污染治理将更具有挑战性。

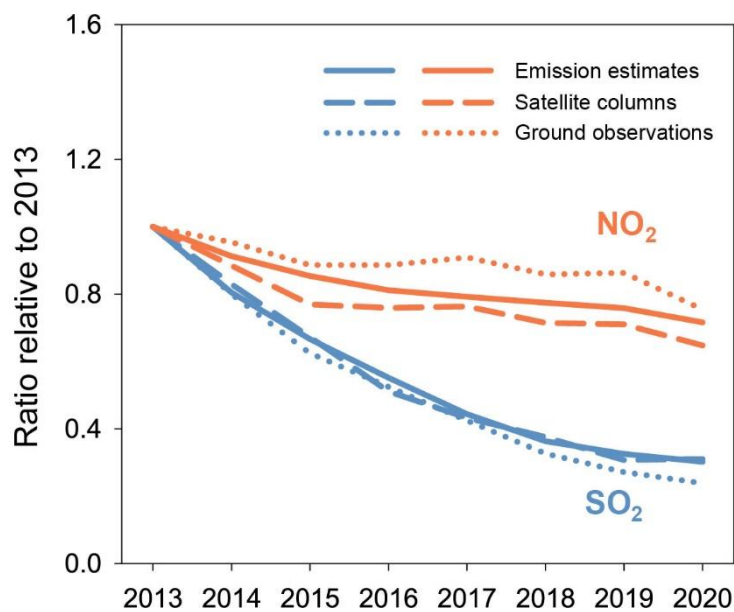
|  |  | Phase I                        | Phase II   |
|--|--|--------------------------------|--|
| <b>Strengthen industrial emission standards</b>      | Enforce ultra-low emission retrofits in power sector                     | 770 GW                         | 170 GW   |
|  | Enforce ultra-low emission retrofits in iron and steel                   | -                              | 620 million ton  |
|  | Tighten emission limit for cement industry                               | Emission limit in GB 4915-2013 | Special emission limit in GB 4915-2013                     |
| <b>Phase out small and polluting factories</b>       | "Small and polluting" enterprises were phased out or rectified           | 62,000 enterprises             | 360,000 enterprises  |
| <b>Phase out outdated industrial capacities</b>      | Phase out outdated coal-fired power generation                           | 25 GW                          | 20 GW  |
|  | Phase out outdated iron and steel capacity                               | 200 million ton                | 120 million ton  |
|  | Phase out outdated cement capacity                                       | 250 million ton                | 140 million ton  |
|  | Phase out outdated flat glass capacity                                   | 110 million weight box         | 50 million weight box                                      |
| <b>Upgrades on industrial boilers</b>                | Promote new emission standard  | GB 13271-2014                  | Ultra-low emission limit for large boilers in key regions  |
|  | Phase out small boilers  | 200 thousand                   | 110 thousand   |
| <b>Promote clean fuels in the residential sector</b> | Upgraded to clean stoves   | lower sulfur and ash           | -  |
|  | Applied washed clean coal  | -                              | -  |
|  | Coal substituted by natural gas and electricity                          | 6 million households           | 23 million households                                      |
| <b>Control of mobile source emissions</b>            | Tighten emission standard for light duty vehicles                        | China 5                        | China 6a   |
|  | Tighten emission standard for heavy duty vehicles                        | China 5                        | China 5  |
|  | Eliminate old and yellow label vehicles                                  | 20 million                     | 6 million  |
|  | Promote new energy vehicles  | increased by 1.5 million       | increased by 3.4 million                                   |
|  | "Highway to Railway": Railway cargo volume                               | decreased by 7%                | increased by 23%   |
| "Highway to Waterway": Waterway cargo volume         | increased by 19%   | increased by 14%               |  |
| <b>Management of VOC emissions</b>                   | Release VOC emission control standard                                    | -                              | GB 37823-2019, GB 37824-2019, GB 37822-2019                |
|  | Release VOC content limit standard                                       | -                              | GB 18581-2020, GB 18582-2020, GB 33372-2020, GB 38508-2020 |
|  | Promote the use of water-based paints                                    | 35% water-based paints in 2017 | 48% water-based paints in 2020                             |
| <b>Management of agricultural source</b>             | Croplands applied with soil testing and formula fertilization technology | -                              | 13.3 million ha  |
|  | Reduce national fertilizer consumption                                   | decreased by 1%                | decreased by 10%   |

GB 4915-2013: Emission standard of air pollutants for cement industry  
 GB 13271-2014: Emission standard of air pollutants for boiler  
 GB 37823-2019: Emission standard of air pollutants for pharmaceutical industry  
 GB 37824-2019: Emission standard of air pollutants for paint, ink and adhesive industry  
 GB 37822-2019: Standard for fugitive emission of volatile organic compounds  
 GB 18581-2020: Limit of harmful substances of woodware coatings  
 GB 18582-2020: Limit of harmful substances of architectural wall coatings  
 GB 33372-2020: Limit of volatile organic compounds content in adhesive  
 GB 38508-2020: Limits for volatile organic compounds content in cleaning agents

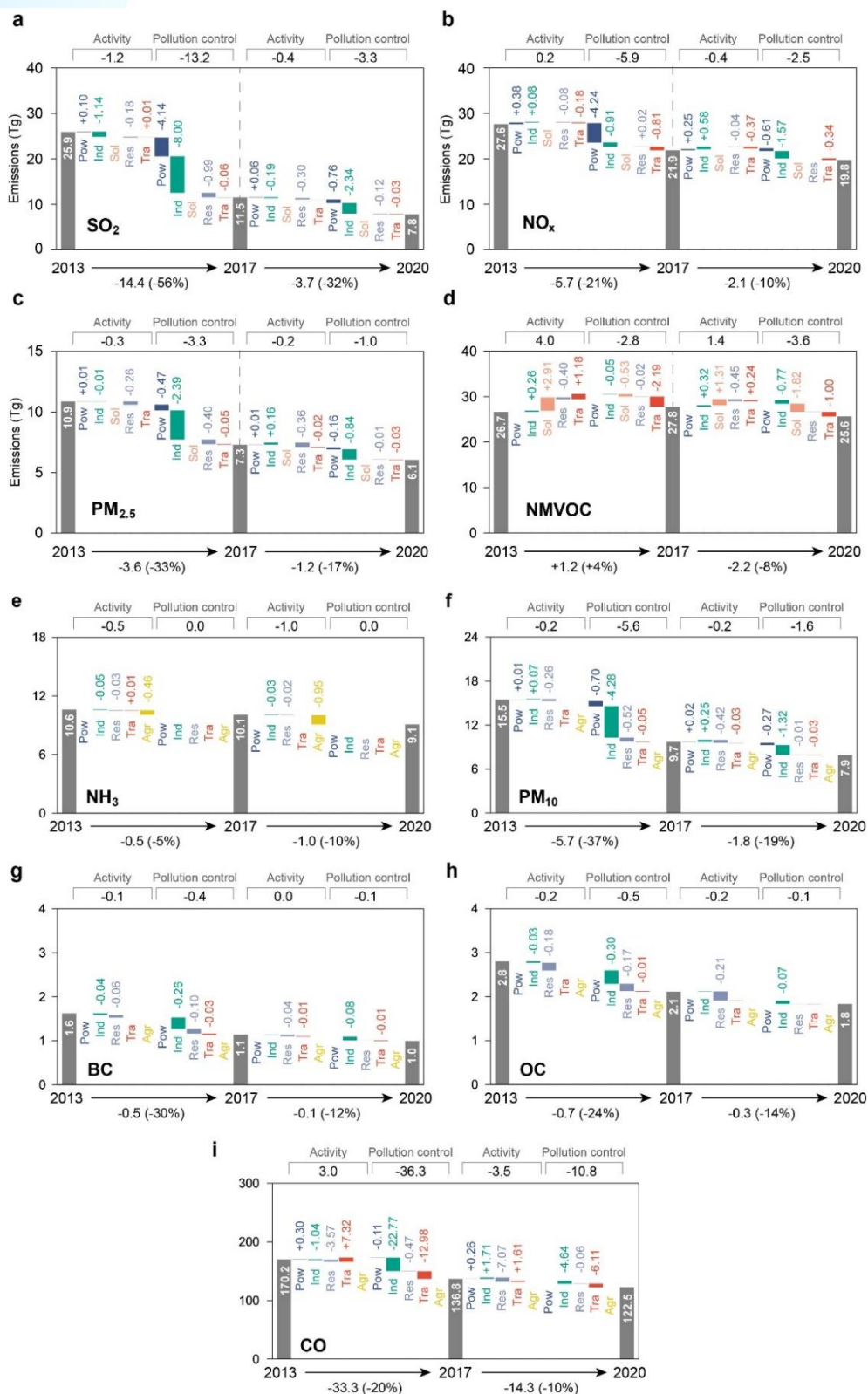
扩展数据图 1. 《大气十条》（2013-2017）和《三年行动计划》（2018-2020）期间主要减排措施和执行力度。



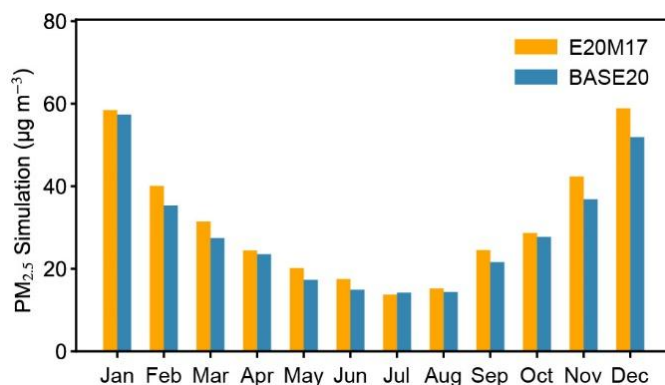
扩展数据图 2. 2013-2020 年分部门 PM<sub>10</sub>、BC、OC 和 CO 排放变化趋势。排放分为电力、工业、溶剂使用、居民、交通和农业等六个部门。



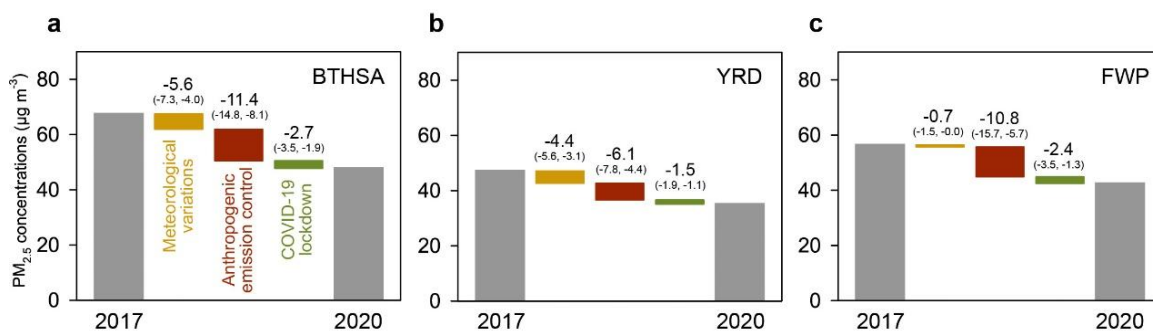
扩展数据图 3. 2013-2020 年间排放趋势与卫星和地面观测的对比。蓝色和橙色实线分别代表全国 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放趋势，蓝色和橙色虚线分别代表 OMI 卫星观测的中国东部 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 对流层柱浓度（东部范围为 29°N-41°N, 108°E-123°E），蓝色和橙色点线分别代表地面观测的 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 趋势。所有数据均根据其 2013 年的数值进行了归一化。



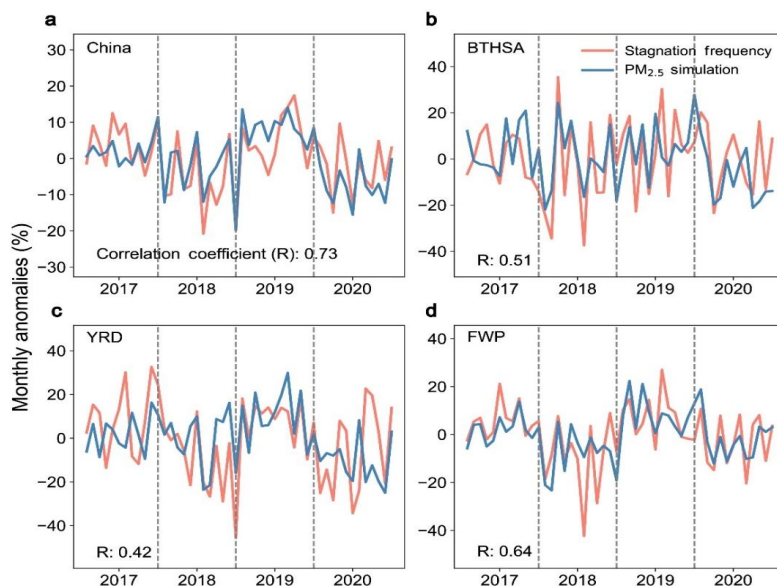
扩展数据图 4. 2013-2020 年间中国主要大气污染物排放变化的驱动因素。对于每种污染物，排放变化被分解为两阶段各行业活动水平和污染控制变化的影响。小于 0.01 Tg 的数值未显示。Pow、Ind、Sol、Res、Tra 和 Agr 分别代表电力、工业、溶剂使用、居民、交通和农业。



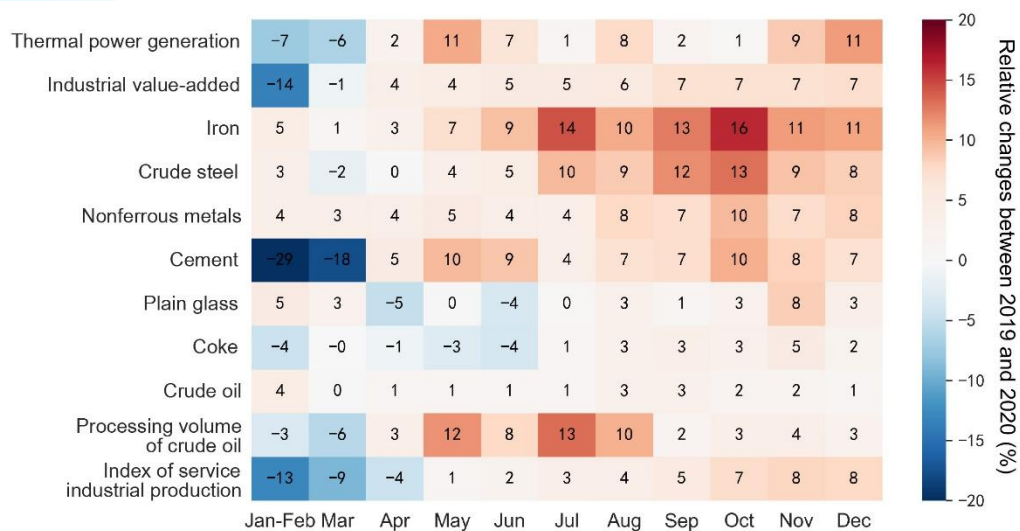
扩展数据图 5. 2017 和 2020 年气象驱动的 PM<sub>2.5</sub> 浓度月变化。排放固定为 2020 年，E20M17 和 BASE20 分别为 2017 年和 2020 年气象条件下的 PM<sub>2.5</sub> 浓度。



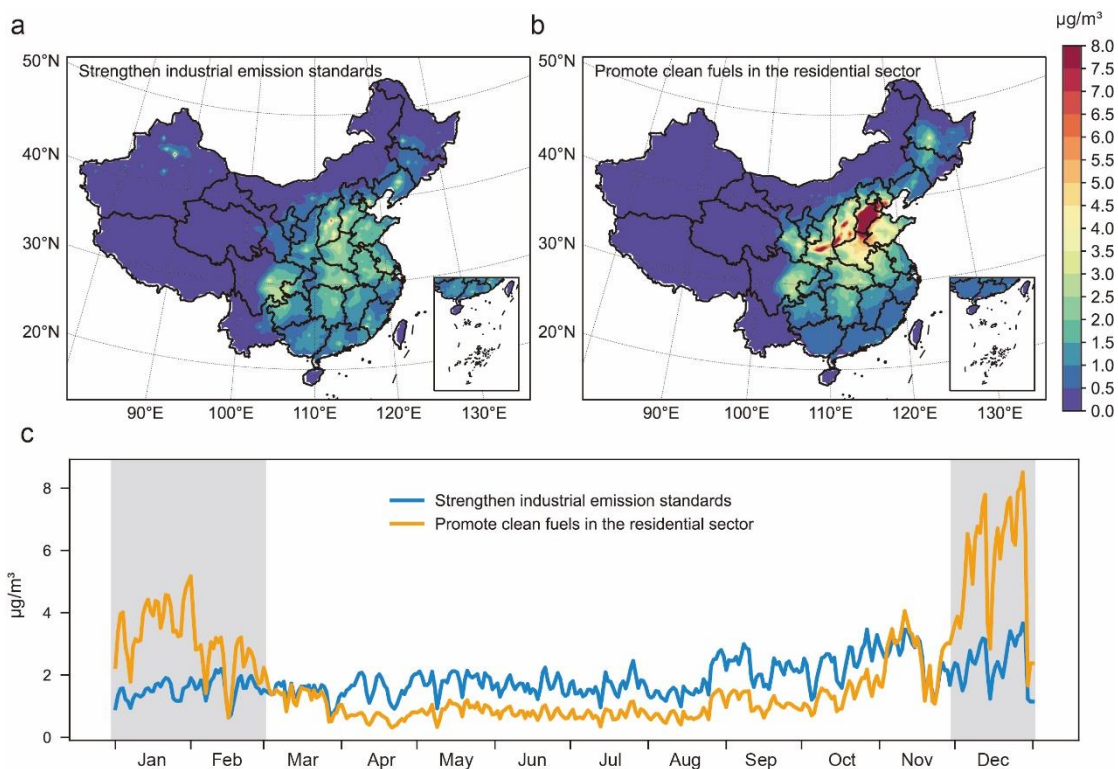
扩展数据图 6. 2017-2020 年三个重点区域 PM<sub>2.5</sub> 变化的驱动因素。



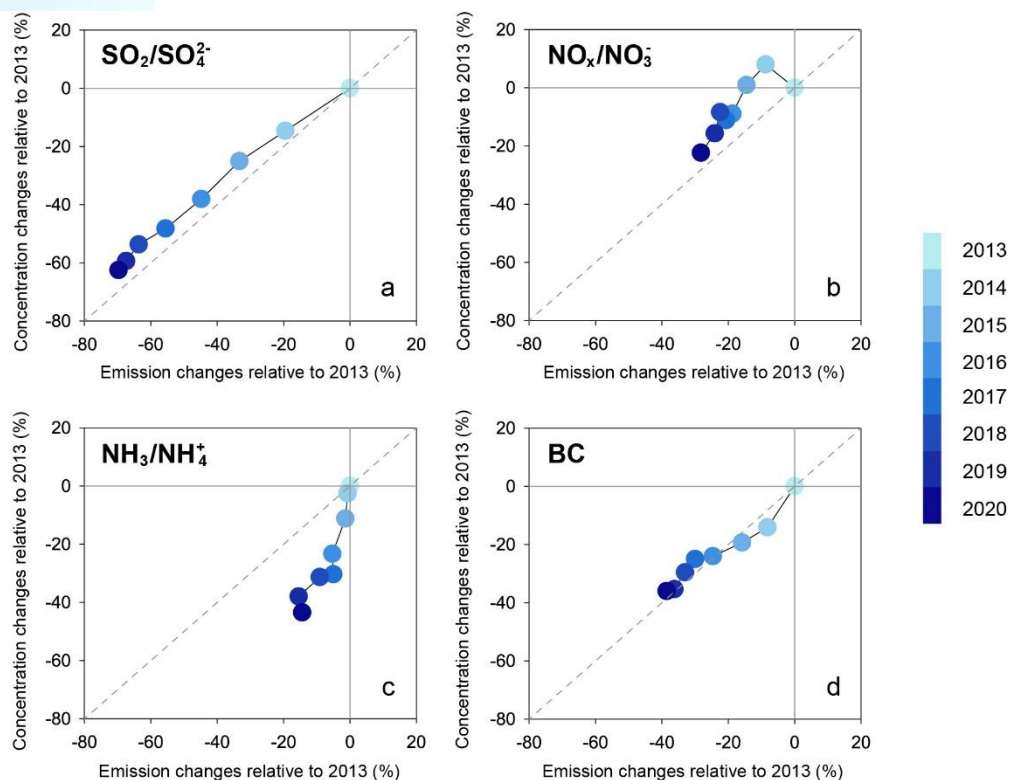
扩展数据图 7. 气象驱动的 PM<sub>2.5</sub> 浓度变化以及空气静稳日指数各月份相对于 2017-2020 年平均值的变化。



扩展数据图 8. 2019 与 2020 年间中国各月主要工业和社会经济活动的相对变化。每一行表示不同的活动类型，每一列代表相应月份的变化情况。



扩展数据图 9. 电力工业提标改造和民用清洁取暖减少 PM<sub>2.5</sub> 浓度的效果。a、b 为年均贡献的空间分布；c 为两项措施贡献的日变化情况。



扩展数据图 10. 2013-2020 年间 PM<sub>2.5</sub> 化学组分浓度变化与其前体物排放变化的对比。(a) SO<sub>2</sub> 排放与硫酸盐浓度, (b) NO<sub>x</sub> 排放与硝酸盐浓度, (c) NH<sub>3</sub> 排放与铵盐浓度, (d) BC 排放与黑碳浓度。PM<sub>2.5</sub> 化学组分浓度为固定气象条件下的全国人口加权平均值。所有数据均为相对于 2013 年的百分比变化, 符号颜色的深浅代表不同年份。

**研究结论:** 在 2013-2017 年间成功实施《大气十条》之后, 我国于 2018-2020 年间进一步实施了《三年行动计划》。研究表明, 在剔除气象条件变化及新冠疫情管控措施影响之后, 《三年行动计划》中各项措施削减全国人群 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平的效果明显低于《大气十条》中各项措施。《三年行动计划》中的多项措施是《大气十条》措施的延续, 但由于这些措施在《大气十条》时期大规模实施之后剩余的减排潜力有限, 因此在《三年行动计划》期间的空气质量改善效果明显减弱。《三年行动计划》实施期间, 民用清洁采暖等强化结构调整的措施取得了显著减排效果。尽管《三

年行动计划》期间新实施的相关措施减少了 NMVOC 和  $\text{NH}_3$  排放，但其减排力度和对  $\text{PM}_{2.5}$  空气质量改善的贡献相对有限。通过实施两阶段清洁空气行动，我国  $\text{PM}_{2.5}$  空气质量虽有显著改善，但年均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度仍高于当前世界卫生组织指南标准六倍。随着我国人口老龄化加剧，空气污染对人群健康的影响日益凸显，迫切需要制定更为有效的空气污染控制策略，以持续改善空气质量，保护公众健康。我国近期提出了碳达峰与碳中和气候目标，由于碳排放与大气污染物排放高度同源，这一目标将为未来空气质量改善注入新动能。2013-2020 年间，能源结构调整措施在减排和改善空气质量方面已初现成效，但这一时期的煤炭消耗量和钢铁、水泥等高能耗产品产量依然居高难下。即便在淘汰落后产能和关停小型工厂的背景下，现存的大型化石能源基础设施仍可能长期运行，进而对应对气候变化和空气质量改善带来持续挑战。因此，应在对投资成本、运营成本和健康效益开展综合评估的基础上，制定经济高效的精细化减排策略，推动高污染设施提前退役，并尽早停止新建化石能源基础设施。2013-2017 年间，不同污染物之间减排不均衡导致硝酸盐污染居高不下，臭氧污染持续上升。最新研究发现，若在大幅削减  $\text{NO}_x$  排放的同时未同步削减 VOC 排放，将显著加剧冬季二次  $\text{PM}_{2.5}$  污染。在《三年行动计划》实施期间， $\text{NO}_x$  和 NMVOC 的协同减排有效遏制了臭氧污染的进一步恶化，但与其他污染物相比， $\text{NO}_x$  和 NMVOC 的减排幅度仍显不足。 $\text{NO}_x$  和  $\text{NH}_3$  的减排力度明显滞后于  $\text{SO}_2$ ，导致富氨环境中硝酸盐持续生成。同时，VOC 排放控制力度不足导致二次有机气溶胶下降幅度低于一次有机气溶胶。因此，未来应进一步针对  $\text{NO}_x$ 、

NMVOC 和  $\text{NH}_3$  制定强化减排政策,加大多污染物协同减排力度,推动我国  $\text{PM}_{2.5}$  和臭氧污染持续改善。

#### 2.4.3 2013-2020 年中国清洁空气行动的碳减排协同效益

**标题:** Co-benefits of  $\text{CO}_2$  Emission Reduction from China's Clean Air Actions Between 2013-2020

**作者:** Qingren Shi, Bo Zheng, Qiang Zhang, et al.,

**期刊:** Nature Communications

**链接:** <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32656-8>

**研究背景:** 随着经济的快速发展和城市化进程,中国已经成为世界上最大的能源消费国。大量的能源消耗化石燃料的大量使用导致了严重的空气污染和二氧化碳排放的增长。为了改善空气质量,中国政府在 2013 年发布了《大气污染防治行动计划》(简称 "行动计划"),旨在到 2017 年底实现重点地区细颗粒物 ( $\text{PM}_{2.5}$ ) 浓度明显下降。紧接着是 2018 年的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》,即《行动计划》的第二阶段,要求在全国范围内进一步改善空气质量。经过八年的努力,在空气污染物排放量大幅下降的推动下,中国的空气质量得到了极大的改善。

尽管最初的政策目标与气候变化无关,但清洁空气措施也可以通过影响当地的能源系统来促进二氧化碳排放的减少。中国清洁空气行动中与能源有关的措施包括能源使用上限、能源结构调整和提高能源效率,这些措施导致了化石燃料消耗的减少和二氧化碳减排的共同利益。经过几十年的爆炸性增长,中国的二氧化碳排放量在 2013 年左右出人意料地进入了一个四年的平稳期。目前对清洁空气政策如何影响气候变化的理解主要集中在空气污染引起的气候变化,而对减少二氧化碳的效果却知之甚少。以前以区域为重点的研究已经证明了实施清洁空气行动措施对减少二氧化碳排放的共同效益。然而,中国两阶

段清洁空气行动中不同的空气污染控制措施是如何刺激二氧化碳减排的仍不清楚，并且自 2013 年以来，中国清洁空气行动对中国二氧化碳排放增长减速的贡献也没有被量化。

在本研究中，通过使用一个建模框架来评估清洁空气措施对空气质量改善的有效性，量化了 2013-2020 年中国清洁空气行动的二氧化碳减排共同效益。基于对中国清洁空气行动的全面回顾，本文总结了清洁空气行动所激活或加强的六项措施，并将末端措施与其他改变能源使用效率的行动区分开来。然后，根据政府收集的每项措施的实际执行率（未公布的数据），本文进行了事后评估以量化这些能源相关措施对中国能源终端流和二氧化碳排放的影响。每项措施的二氧化碳减排共同效益是通过使用中国多分辨率排放清单（MEIC）的模型估计的。

**研究方法：**（1）CO<sub>2</sub> 排放估计，利用 MEIC 模型 (<http://www.meicmodel.org>)，通过自下而上的方法估算了 2005-2020 年中国二氧化碳排放的历史趋势。MEIC 模型是清华大学为中国开发的一项基于动态技术的库存模型，包括统一的源分类、排放因子数据库、基于技术的方法和云计算平台上的高分辨率排放处理系统。本研究通过将活动数据乘以相应的排放系数，估算了源自化石燃料燃烧和水泥生产的二氧化碳排放量。（2）五种协同效益措施的二氧化碳减排量估计，根据政府事后收集的各项措施的实际执行率，对 2013-2020 年中国清洁空气措施的二氧化碳减排共同效益进行了事后评估。中国自上而下的体系采用了以工程为导向的方法来设定空气质量目标，并规定了实现目标的措施。政府定期检查这些措施的实际进展，以确保规定的措施得到有效实施，并在统计报告中总结进展情况。本文将实际执行率

与 MEIC 模型和生态环境部的数据库结合起来。结合 MEIC 模型和生态环境部 (MEP) 数据库, 估算出二氧化碳减排的共同效益。在此对对评估中选定的五项协同效益措施做更详细的解释:

#### ① 工业锅炉的升级改造

污染严重的小型燃煤工业锅炉被更大的锅炉所取代, 或转向更清洁的能源, 导致能源节约。燃煤锅炉的淘汰能力从地方自检报告中收集。根据《北京市清洁空气行动计划》的估算, 燃煤工业锅炉和采暖锅炉的燃煤强度分别为 366 吨/兆瓦和 377 吨/兆瓦。在 2013-2020 年期间淘汰的 424 吉瓦燃煤锅炉中, 192 吉瓦被完全淘汰, 95 吉瓦被大型锅炉 (集中供热) 取代, 112 GW 转为 NG。

#### ② 逐步淘汰污染严重的小工厂

由于在小型污染工厂中实施末端污染控制既不现实也不符合成本效益, 因此, 我们做出了巨大的努力, 以消除污染严重的小工厂, 这些工厂通常包括含有超级排放物的小工厂。所涉及的部门包括石灰生产、砖的生产, 以及其他工业流程。

#### ③ 逐步淘汰落后的工业产能

在这里, 我们主要考虑淘汰四个关键部门的落后工业能力四个关键部门: 燃煤电厂、钢铁生产 (包括炼焦)、水泥生产和玻璃生产。假设过时的能力被先进的能力所取代, 并且通过淘汰的落后工业产能的数量 (由当地自检报告提供) 和先进技术与落后技术之间的能源强度差异来估计能源节约。

#### ④ 在住宅部门推广清洁燃料

零散的煤炭使用替代的共同减排效益是通过用清洁燃料替代煤炭的家庭数量来估计的。根据地方自查报告, 2013-2015 年, 在 1270 万户参与散煤替代的农村家庭中, 54% 的家庭由煤改为天

然气，33%改用电，6%改用清洁，5%的家庭转为取暖，1%的家庭不再使用煤。

#### ⑤ 报废黄标车和旧车

这项措施与加强车辆排放标准相对应，有报告显示，从2013年到2020年，将有超过2680万辆黄标车和老旧车退役。估计相关的能源节约考虑了淘汰的黄标车和老旧车的数量和其他参数。

#### ⑥ 加强工业排放标准带来的二氧化碳排放增加的估计

除了因节能或能源转换措施而减少的二氧化碳排放量，本研究还考虑了因加强工业排放标准而增加的二氧化碳排放量。在此，我们估计了在四个关键部门（燃煤电厂、钢铁生产、水泥生产和工业锅炉）更广泛地应用管道末端技术而增加的二氧化碳排放量。以消除SO<sub>2</sub>为例，直接的二氧化碳排放是通过石灰石或消石灰和二氧化硫之间的反应产生。间接的二氧化碳排放是由于额外的电力消耗而产生的，这是根据管道末端技术所增加的能力和电力消耗的强度来估计的。

由于空气污染物浓度始终呈非正态分布，因此本研究中使用了非参数统计检验，选择泰尔-森中值斜率来客观地代表PM<sub>2.5</sub>浓度的年际变化或PM<sub>2.5</sub>相关的过早死亡率。

除人为和自然排放外，气象条件也是影响地表PM<sub>2.5</sub>的重要因素。PM<sub>2.5</sub>和气象变量之间的关系复杂，因地区和季节而异。因此，为了更准确地呈现中国30年来PM<sub>2.5</sub>浓度的趋势，本文使用逐步多元线性回归模型（MLR）来消除气象对PM<sub>2.5</sub>变化的影响。

**研究结果：**（1）2013-2020年排放和空气质量变化趋势，在MEIC模型的框架下，通过自下而上的方法估算了2013-2020年中国主要大气污染物和二氧化碳的人为排放量。2013-2020年，

SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的排放量估计将分别下降 69%、28%和 44%。因此，中国 74 个重点城市的 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度从 2013 年 72μg/m<sup>3</sup> 下降到 2020 年的 34μg/m<sup>3</sup>。虽然气象条件的变化也可能导致 PM<sub>2.5</sub> 浓度的变化，但在清洁空气行动期间，显著的排放减缓已被确定为国家空气质量改善的主要驱动力。与空气污染物排放的下降趋势相反，中国同期的能源消耗和二氧化碳排放呈现出整体上升趋势。在 2000 年之后的快速增长之后，中国的二氧化碳排放量在 2013-2016 年达到了一个高点，这与煤炭消费的下降趋势密切相关。2016 年后，由于其中以电力部门为主的化石燃料消费的增长，二氧化碳排放量出现反弹。2017 年的火力发电量比 2016 年增加 7.2%，导致电力部门的二氧化碳排放量增加了 2.2 亿吨。

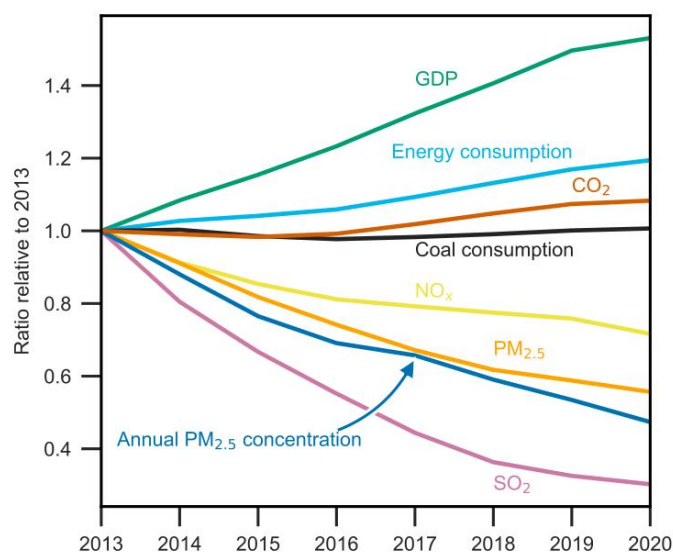


图 2.4-11 2013-2020 年中国人均排放、PM<sub>2.5</sub> 年浓度、能源消耗和 GDP 的趋势（期间 PM<sub>2.5</sub> 年浓度的变化趋势是根据 74 个重点城市的地面观测数据计算的）

（2）具体措施的二氧化碳减排共同效益，根据估计，中国清洁空气行动的实施成功地避免了 0.57 亿吨的人为二氧化碳排放，占 2020 年现实世界排放量的 5.5%。图 2b 显示了 2020 年五项共同受益

措施所推动的能源终端使用流。在 2013-2020 年期间，小型、过时的燃烧设施被更大、更清洁、更高效的基础设施广泛取代，这提高了燃烧效率，减少了能源使用，特别是煤炭使用。因此，五项具有共同效益的措施在 2020 年提供了 0.25 千兆吨煤当量的净能源节约，并在 2013-2020 年期间累计节约了 1.06 千兆吨能源。减少二氧化碳排放的两个最有效的措施包括淘汰落后的工业能力和升级工业锅炉，估计在 2020 年分别减少 0.20 和 0.17Gt 的二氧化碳排放。自 2013 年以来，一些工业部门的落后产能被淘汰，并被先进技术所取代，包括燃煤电厂总产能 45GW，钢铁产能 3.12 亿吨，水泥产能 3.88 亿吨，平板玻璃产能 1.92 亿重量箱。容量低于 7 兆瓦的小型工业锅炉通常达到的燃烧效率低至 65%，并且通常缺乏末端污染控制。大约 424 千兆瓦的燃煤小锅炉被淘汰，被更高效的锅炉取代（效率高达 84%），或被转移到低碳能源，如天然气和生物质燃料。在住宅领域推广清洁燃料有助于在 2020 年减少 0.12Gt 的二氧化碳排放。在清洁空气行动中，超过 2900 万户家庭放弃了燃煤供暖系统，转而使用天然气和电力，超过 7.5 千兆瓦的居民燃煤锅炉被淘汰。逐步淘汰污染严重的小工厂，又减少了 0.07 亿吨二氧化碳的排放。从 2016 年开始，大约 66 万家小型污染工厂被关闭或升级，包括生产砖、石灰、有色金属、铸造等工厂。从 2017 年到 2020 年，由于专项整顿措施，超过 3000 万吨的小型工业炉的零散用煤被淘汰。黄标车和老旧车辆的淘汰为二氧化碳减排贡献了 0.06Gt。在 2013-2020 年期间，超过 2600 万辆黄标车和老旧车辆（即不符合国三排放标准的汽油车和不符合国四排放标准的柴油车）被提前淘汰。另一方面，我们估计安装末端控制设备在 2020 年增加了 0.05 亿吨二氧化碳，主要贡献来自电力部门和钢铁部门。估计表明，中国的清洁空气措施与 2013-2020 年期间累计减少 2.66

亿吨的二氧化碳排放量有关，远远大于新安装的末端污染控制设备累计增加的 0.23 亿吨的二氧化碳排放量。累计净减排量达到 2.43Gt，占 2013-2020 年中国二氧化碳排放的 3.1%。这也超过了同期中国二氧化碳排放的累计增长 (2.03Gt CO<sub>2</sub>)。

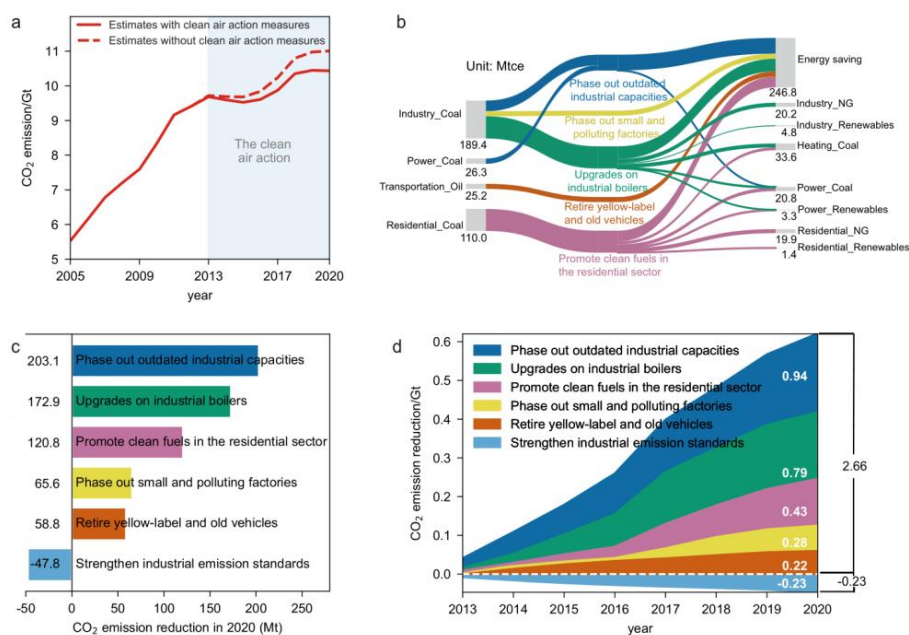


图 2.4-12 中国能源终端使用量的变化和具体措施对二氧化碳减排的贡献。a.有清洁空气行动措施和没有清洁空气行动措施的二氧化碳排放量估计；b.2013-2020 年期间中国能源结构的转变；c.2020 年具体措施的二氧化碳减排量；d.每项措施在 2013-2020 年之间的累计二氧化碳减排量。

#### 2.4.4 2012-2020 年间中国区域空气污染物排放减缓的异质性

**标题：** Heterogeneities in Regional Air Pollutant Emission Mitigation Across China During 2012–2020

**作者：** Hongyan Zhao, Wenjie He, Jing Cheng, Yang Liu, Yixuan Zheng, Hezhong Tian, Kebin He, Yu Lei, Qiang Zhang

**期刊：** Earth' future

**链接：**

<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2023EF004>

139

**研究背景：**为了缓解近年来的严重空气污染，中国各地区根据自身所处的不同发展阶段、能源和产业结构以及污染水平，实施了差异化的减排目标和减缓策略。为了更有效地指导区域减缓行动，我们编制了 2012 年、2017 年和 2020 年按省份和行业划分的空气污染物清单，然后分别量化了 2012-2017 年和 2017-2020 年期间各种社会经济因素对区域排放及其排放强度变化的贡献。我们的结果显示，末端控制措施在中国污染物排放的减少中贡献最大，但随着减排率的提高，其边际效用下降，能源政策措施的相对效应增加，甚至在南方地区超过了末端控制措施的效果。化工、非金属、金属、能源和住宅部门在全国范围内贡献了最多的排放减少；而由于不同的工业属性，它们在不同地区和种类中受到不同因素的驱动。末端控制措施和能源政策已经减少了几乎所有地区的排放强度差距，但北方和西部中国的污染密集型产业结构和低能源效率仍然是显著的，阻碍了这些地区进一步的排放减少。

**研究内容：**为了更有效地指导区域减缓策略，我们编制了中国 30 个省份的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、一次  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{CO}_2$  的时间序列排放清单，详细划分了社会经济部门，然后使用时空指数分解分析评估了 2012 年至 2017 年和 2017 年至 2020 年区域污染物排放和排放强度变化的驱动力。我们的结果显示，末端控制措施主导了中国污染物排放的下降趋势（ $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  和一次  $\text{PM}_{2.5}$  的下降幅度为 38%至 68%），但它们的相对主导地位逐渐减弱，能源政策的效果显现，甚至在第二阶段在南方地区超过了前者。尽管由不同因素驱动，化工、非金属、金属、能源和住宅部门主导了区域减排趋势，并在不同程度上有所差异。清洁

空气行动导致了区域排放强度的趋同，而优化和升级产业结构以及提高能源效率仍然是目前北方和西部地区进一步减排所必需的。

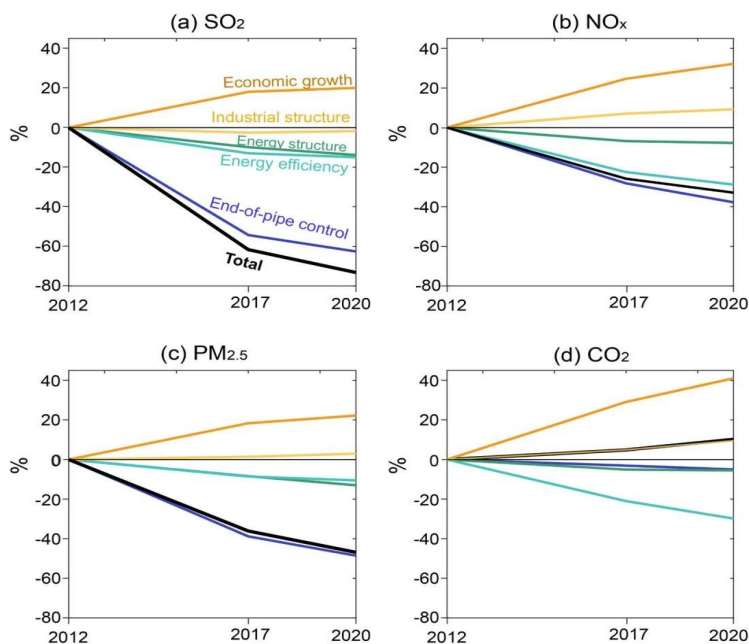


图 2.4-13 2012-2020 年中国 (a) 二氧化硫 (SO<sub>2</sub>), (b) 氮氧化物 (NO<sub>x</sub>), (c) 细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>), 以及 (d) 二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 排放变化的驱动力。

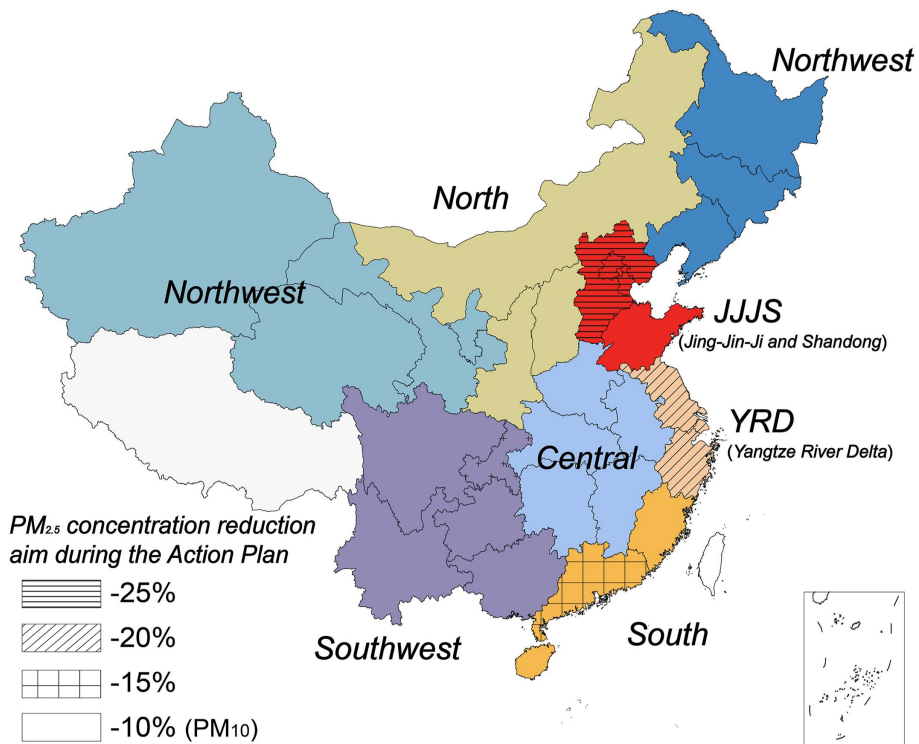


图 2.4-14 中国各省份在行动计划期间的 PM<sub>2.5</sub> 浓度降低目标的区域分类和具体目标

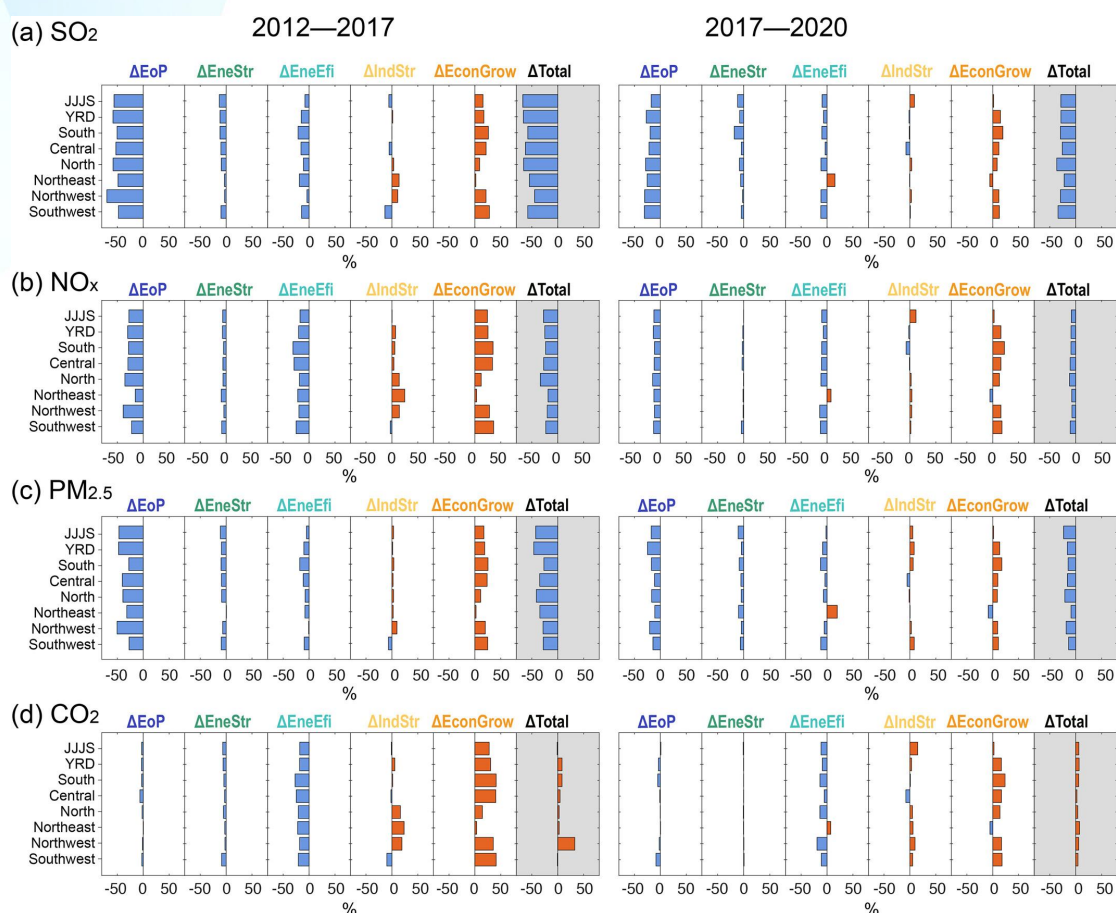


图 2.4-15 2012-2020 年间中国八个区域的 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>2.5</sub> 和 CO<sub>2</sub> 排放变化的驱动力

大气污染是中国最严重的环境问题之一。过去几年中，协调各区域和部门之间的减缓工作以减轻污染及其相关的健康影响取得了令人印象深刻的成果。本研究编制了一个详细的社会经济部门的时间序列排放清单，然后使用指数分解分析评估了 2012 年至 2020 年国家、区域和部门层面各种污染物排放变化的异质性演变路径。进一步比较了区域排放强度，以识别阻碍其持续减排的区域不利影响。对区域污染减缓概况进行时空比较，可以为全中国更有针对性的和有效的区域减缓行动提供信息。

与以往研究一致，我们的结果证实了在行动计划期间和三年计划期间，末端控制措施对中国各种污染物排放减少的有效性，

并为各种污染物排放（SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub>）的减少贡献了 38%至 68%。随着末端控制措施的减少空间逐渐耗尽，能源相关政策的效果，特别是能源效率的提高，在三年计划期间显现出来；它们的总效应甚至接近或超过了大多数区域的末端控制措施的效果。这些证实了三年计划行动的初步成功，该行动旨在通过优化工业和能源系统来减少中国的空气污染。然而，尽管中国在能源系统（包括能源效率和能源结构）方面取得了更高的改进，但与其他国家相比仍存在显著差距。2020 年，中国中央政府发布了“双碳”目标，旨在促进中国能源系统中可再生能源的部署。在不久的将来，我们预计通过全国范围内的能源结构优化将进一步减少污染。未来的研究人员和政策制定者应更多关注关键部门（例如，住宅、金属和非金属部门）和区域的能源效率进一步提高，特别是对于在研究期间获得相对较低减排量的欠发达的北部、西北部和东北部省份。此外，我们的结果还确定了 2017-2020 年产业结构的微妙但积极的影响（对所有污染物的影响均<10%），这部分可以归因于 COVID-19 大流行导致的经济恶化，因为资源和能源密集型经济结构被优先考虑以克服这一经济衰退。随着全球自然灾害的频率和影响日益增加，未来的环境政策执行应考虑这些意外的剧变，并更多关注工业系统的弹性建设。例如，应加强供应链的适应性，并强调行业或系统之间必要的联系。

**研究结论：**末端控制措施显著降低了中国的空气污染物强度，但由于各区域在减缓战略中的进展不平衡，各区域之间的差异程度不同。对目标较少的区域实施更严格的排放标准可以更有效地进一步减少它们的排放，例如，在东北地区的 NO<sub>x</sub> 和西南地区的 SO<sub>2</sub>，那里的末端控制措施取得了相对较低的效果。对于欠发达

的北部和西部地区，加速产业优化升级和提高能源效率将是目前阶段更有效和有益的。幸运的是，“双碳”目标的部署将为这些地区带来更多机会，因为实现碳中和高度依赖于可再生能源，例如，风能和太阳能，这些在中国北部和西部地区非常丰富。据估计，北部、西北部和西藏贡献了全国总物理可用的风能和太阳能安装容量的 90%。此外，在 2020 年，中国国家发展和改革委员会(NDRC)发布了《西部地区鼓励类产业目录》，其中包括与光伏和风力发电技术研究、开发和设备生产相关的一系列产业。这些地区的省份应利用这些机会，通过建立和/或引入相关产业和研究部门，这可以加速区域产业系统的清洁转型，减少相关的环境负担。

#### 2.4.5 成本效益的不确定性可能会影响中国煤电转型的决策

**标题：** Cost-effectiveness uncertainty may bias the decision of coal power transitions in China

**作者：** Xizhe Yan, Dan Tong, Yixuan Zheng, Yang Liu, Shaoqing Chen, Xinying Qin, Chuchu Chen, Ruochong Xu, Jing Cheng, Qinren Shi, Dongsheng Zheng, Kebin He, Qiang Zhang & Yu Lei

**期刊：** Nature Communications

**链接：** <https://www.nature.com/articles/s41467-024-46549-5>

**研究背景：** 尽管能源需求不断增加，但由于一系列行动，包括电力舰队优化、超低排放标准实施和节能改造，中国煤炭发电部门的空气污染排放和与 PM<sub>2.5</sub> 相关的健康风险已经大幅减少。然而，2017 年，煤炭发电舰队仍然是国家碳排放和空气污染物的重要来源，分别占 CO<sub>2</sub> 的 35%、SO<sub>2</sub> 的 17%、NO<sub>x</sub> 的 19% 和 PM<sub>2.5</sub> 的 8%。在提高终端电气化水平和减少末端控制减排潜力的压力下，实现碳中和和清洁空气协同目标的最可行途径是加快缩减以煤炭为主的电力系统。自“十一五”规划（即从 2006 年起）实施以

来，中国引入了一系列政策，旨在逐步淘汰落后的热电厂，以解决严重的空气污染问题，在此期间淘汰了超过 119 吉瓦的小、旧、低效燃煤产能。即将到来的淘汰将在稳定但渐进的转型中构成巨大障碍，因为大多数机组是在 2010 年左右建造的，寿命相似。除了优先考虑污染控制外，政策偏好的转变（例如，健康保护和气候减缓）增加了淘汰决策的复杂性。在没有捕捉到先前实践中的模式和不确定性的情况下，很难确定政策选择。因此，未来的煤炭转型（即淘汰和新建电力单位的决定）在寻找可能甚至具有成本效益的途径方面一直具有挑战性。在塑造未来的转型时，必须充分考虑成本、气候影响和健康负担等主要因素，这反过来又需要对淘汰和新建的决定进行全面评估。

**研究内容：**该研究从煤炭发电转型总是保持着高度的复杂性，如技术可行性、经济成本以及环境和健康影响，基于一个开发的单元级不确定性评估框架，探索不同煤炭发电淘汰和新建策略（即淘汰优先级的干扰）的政策实施干扰带来的成本效益不确定性。我们通过偏好分析揭示了煤炭转型决策的机会和风险。我们发现，政策实施的不确定性可能会导致最初的年度净收益延迟实现。例如，在实施先前的淘汰实践时，可能会发生六年的延迟。在淘汰政策的实施中仍存在一定程度的风险，因为并非所有策略都能保证从 2018 年到 2060 年累积的正净收益。由于单元级异质性塑造了淘汰的不同方向，决策偏好会显著改变煤炭发电转型策略的选择。更引人注目的是，成本效益的不确定性可能导致错过识别最优策略的机会。我们的结果强调了最小化政策实施干扰的重要性，这有助于减轻负面收益的风险，增强淘汰决策的实用性。

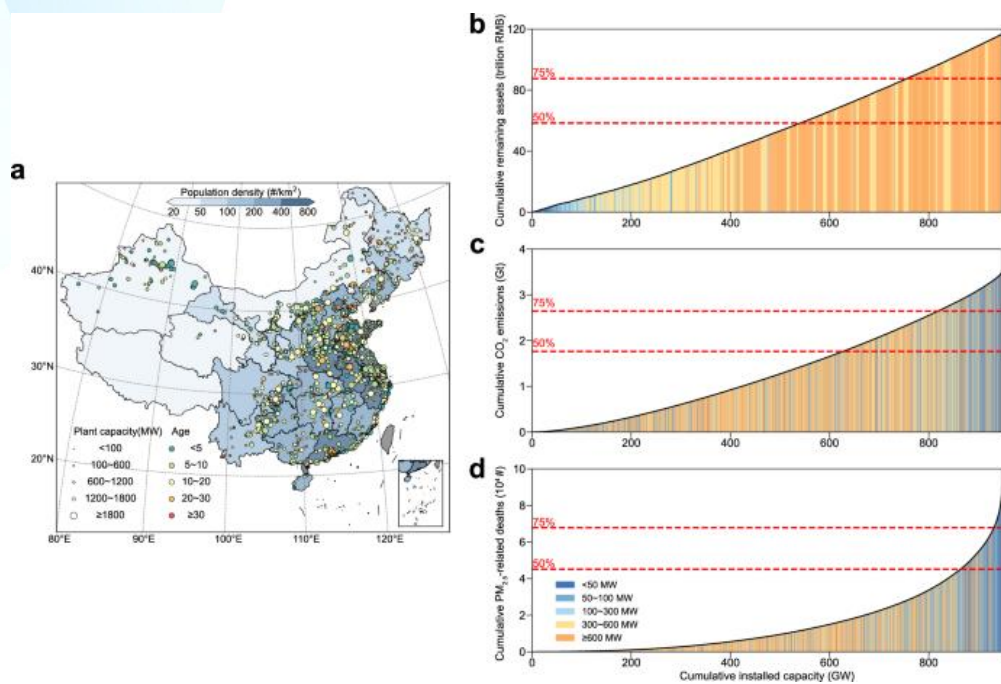


图 2.4-16 中国燃煤发电单元的异质性特征

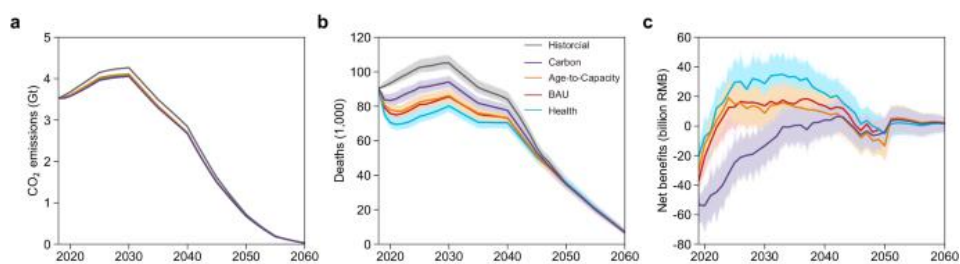


图 2.4-17 每种策略的 CO<sub>2</sub> 排放、死亡人数和效益的趋势及可能范围

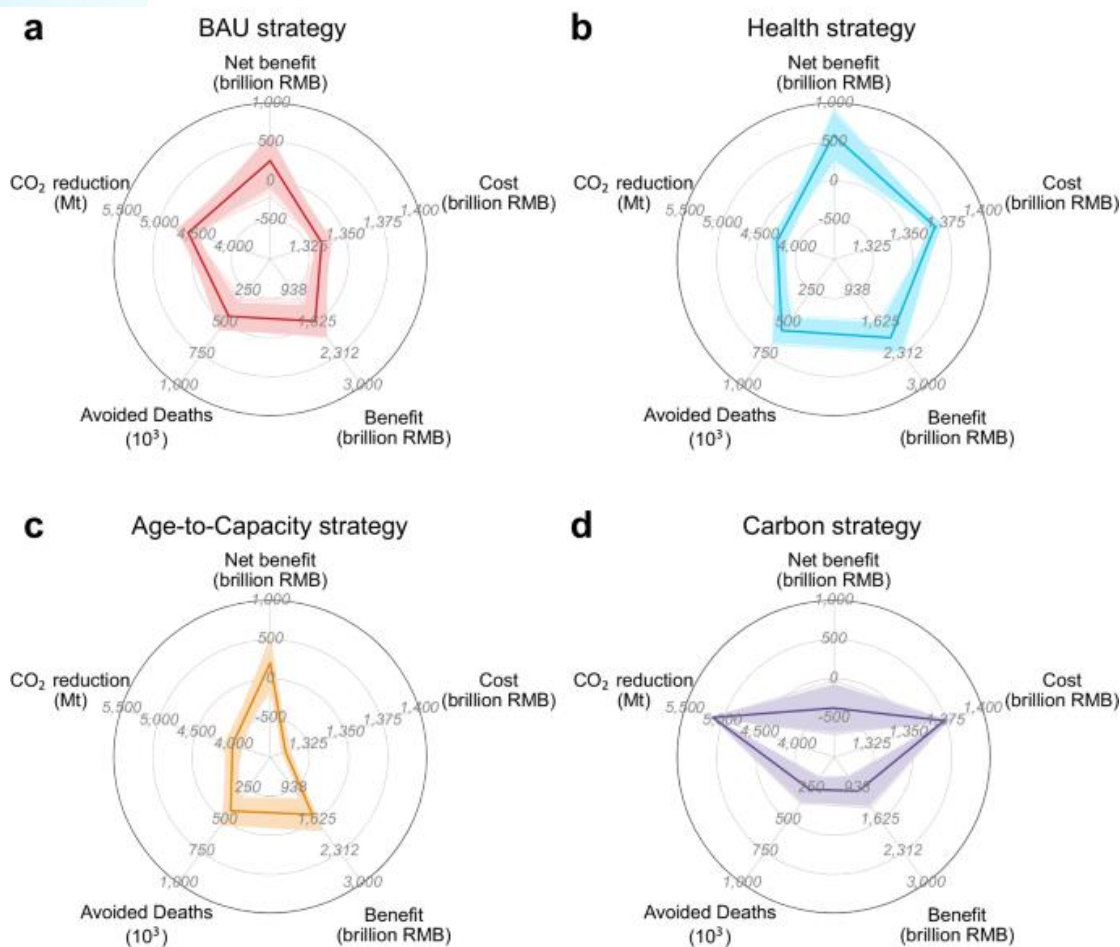


图 2.4-18 每种策略的累计成本和效益

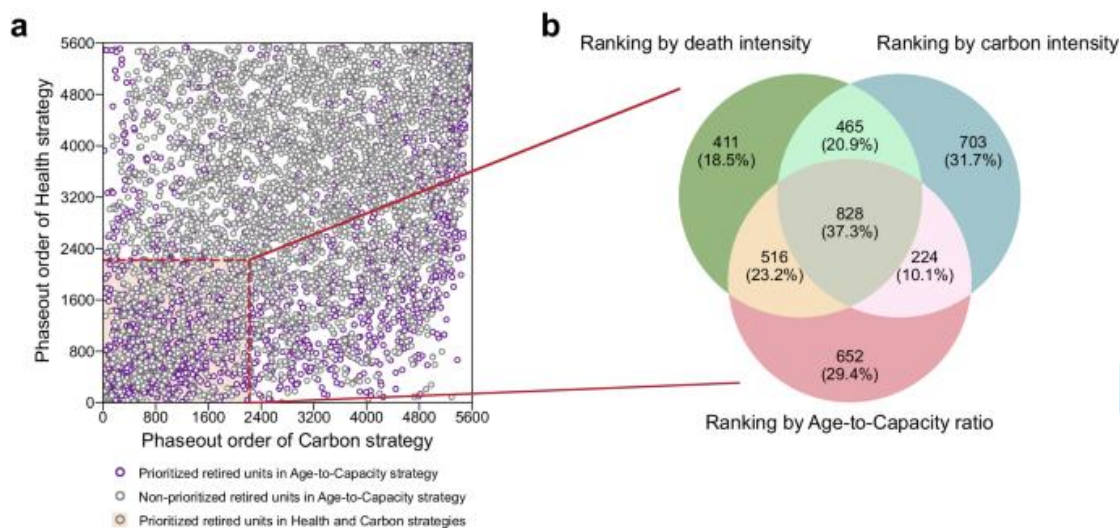


图 2.4-19 不同策略间净效益差异的来源

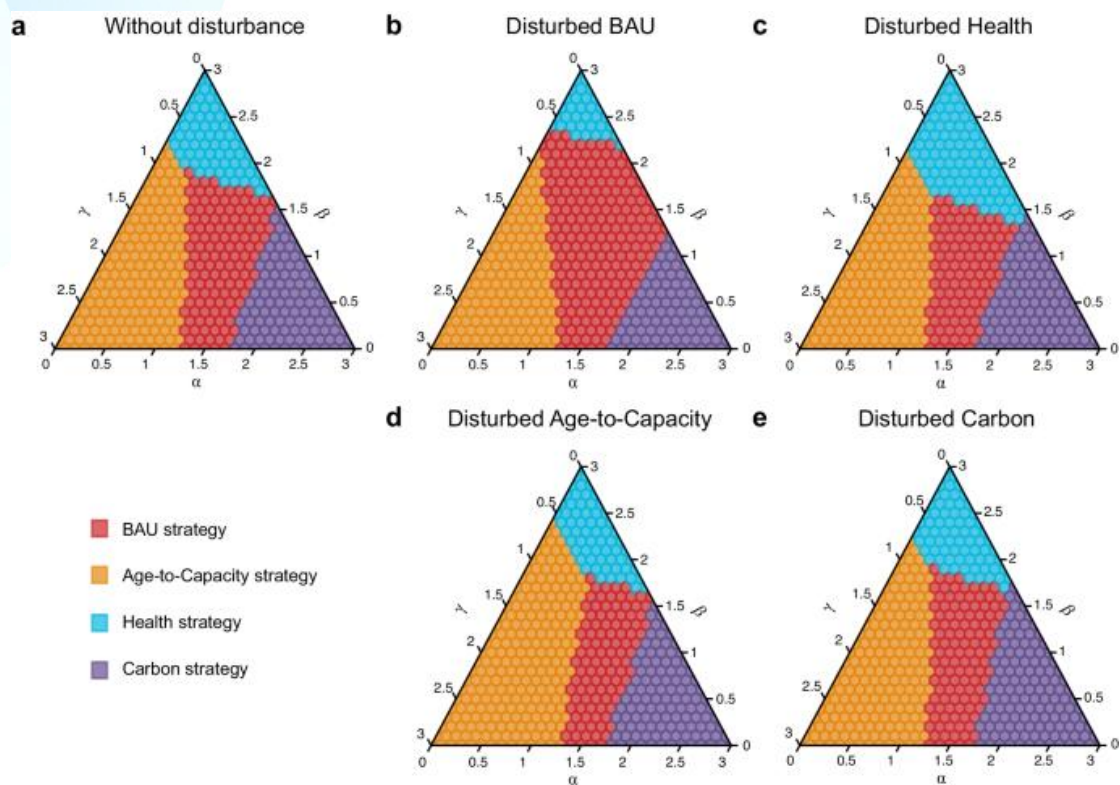


图 2.4-20 煤炭发电淘汰策略设计的偏好分析

**研究结论：**所有策略在初期（即 2019-2021 年）可能都会承受前所未有的年度负净收益，而在实施不同策略时，实现高概率（>95%）正年度净收益的时间也各不相同。以健康策略为例，2019 年的年度净收益为-20.6 亿人民币（CI，-25.1~-16.5），很快在 2022 年达到有希望的正年度净收益 12.2 亿人民币（CI，4.9-19.3）。在按年龄到容量和 BAU（业务即 usual）策略中也可以观察到类似的趋势，但后者直到 2024 年才能达到高概率的正年度净收益，这表明针对性的淘汰决策在早期阶段的净收益将经历一个适应期。这是因为一方面，淘汰政策的实施在短期内必须承受相当大的经济损失，然后随着当前年轻车队的老化过程而减轻。另一方面，经济损失很快就会被总收益超过（除了碳策略），这是由于淘汰决策推动的电力车队结构变化（例如，保

留更清洁的) 所导致的。BAU 策略的年度搁浅资产可能比按年龄到容量策略滞后约 3 年。

在政策实施干扰的情况下, 达到策略开始产生正年度净收益的时间可能会有所延迟。健康和按年龄到容量策略实现初始正净收益的时间可能会推迟 3 年, 而令人惊讶的是, BAU 策略可能会经历 6 年的延迟(即从 2021 年推迟到 2027 年), 因为在 2021-2027 年期间, BAU 策略的潜在总收益与可能的成本相对可比。值得注意的是, 到 2030 年, 淘汰政策实施的干扰贡献了总收益不确定性的 30-55% (补充图 8)。虽然, 随着大多数现有单元在 2050 年左右被淘汰, 新建容量在所有目标策略中在未来煤炭发电供应中的作用越来越占主导地位(从 2030 年的约 65% 增加到 2040 年的约 85%), 尤其是在现有和新建容量利用率降低的预期下, 这表明新建容量在塑造净收益及其相关不确定性方面确实具有重要性。因此, 由于其在快速和持续实现正净收益中的关键作用, 淘汰和新建决策都应该谨慎规划。

#### 2.4.6 清洁取暖在华北农村的健康效益与经济成本的不均衡分布

**标题:** The uneven distribution of health benefits and economic costs from clean heating in rural Northern China

**作者:** Wei Zhang, Pengfei Zhang, Jing Zhao, Feng Wang, Yuzhu Shang, Pei Fang, Wenbo Xue, Pengyan Zhang, Lingling Song, Hongqiang Jiang, Jinnan Wang, Jiashuo Li

**期刊:** Science Bulletin

**链接:** <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38724305/>

**研究背景:** 中国农村居民燃煤已被确定为空气污染物的主要来源。研究表明, 2015 年家庭(主要是农村家庭)燃煤对京津冀地区月平均 PM<sub>2.5</sub> 浓度的贡献为 46%-57%。为了促进能源转型并减少农村地区的散煤取暖, 我国在 2017 年启动了《北方地区冬季清洁取暖规划》, 以

下简称农村清洁取暖政策。“十三五”期间，华北平原地区约有 2500 万个农村家庭进行了清洁取暖改造，有效改善了当地空气质量。然而，目前清洁取暖行动面临多重挑战。在一些人均收入较低的地区，尽管能够得到财政补贴，农村家庭在采用清洁取暖时仍面临相当大的经济压力。同时，一些地方政府由于财政压力正在削减清洁取暖补贴。此外，由于缺少区域间补偿机制，低收入地区承担了相对更高的取暖成本而无法从相关受益地区取得相应补偿。因此，迫切需要对各地区在清洁取暖行动中的成本和收益进行全面评估，深入了解该行动的分配效应，为未来政策调整优化提供科学依据。

**研究内容：**本研究基于重点实验室构建的“减排成本—环境效益—健康收益—经济影响”的大气环境政策综合评估模型，对清洁取暖的经济成本和环境健康收益进行量化分析。首先，本研究构建了京津冀地区“2+26”城市 2.5 万个村庄的高空间分辨率清洁取暖数据集，该数据集包括清洁取暖家庭数量、改造措施和平均家庭取暖用煤量等内容。其次，通过耦合空气质量模型（CAMx）、天气预报模型（WRF）和全球暴露死亡模型（GEMM），量化清洁取暖政策带来的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度下降水平和相关的可避免死亡人数。最后，使用人力资本法（HCL）将该项政策避免的死亡人数转换为健康效益和经济收益，并追踪了各地级市清洁取暖行动的跨区域影响。

### 研究结果：

#### （1）散煤减少与空气质量改善

2017-2020 年，“2+26”城市因清洁取暖政策减少了 4,034 万吨的散煤使用。河北省减少了约 2,474 万吨的散煤消耗，占散煤总减少量的 61.33%，其中，保定、邯郸、沧州、廊坊和唐山是减少散煤消耗最多的城市。山东和河南分别占散煤减少总量的 14.34%和 8.71%。煤

改气、煤改电和集中供热这三种清洁供暖改造措施分别减少了 2,782 万吨、988 万吨和 263 万吨的散煤消耗。

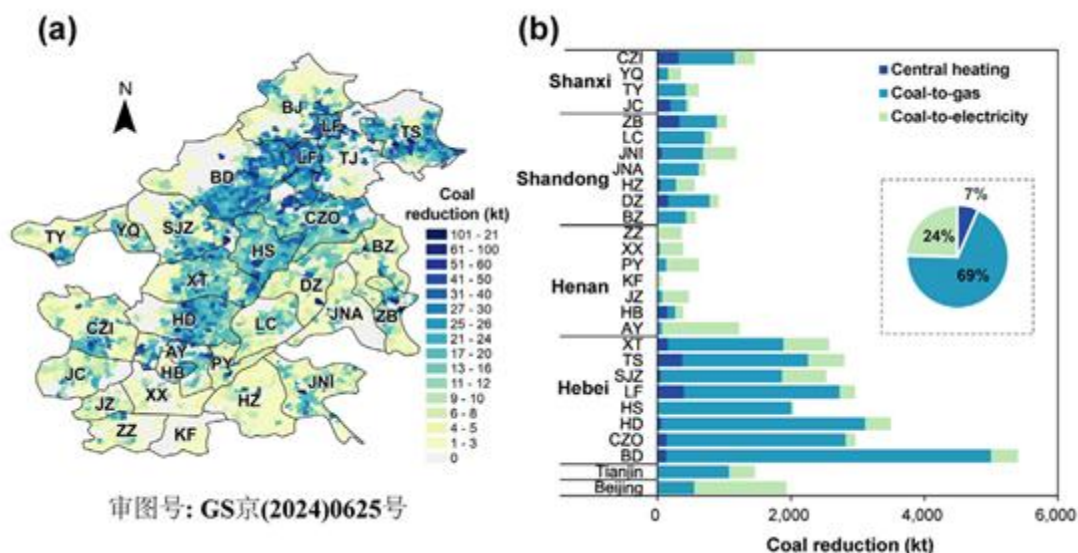
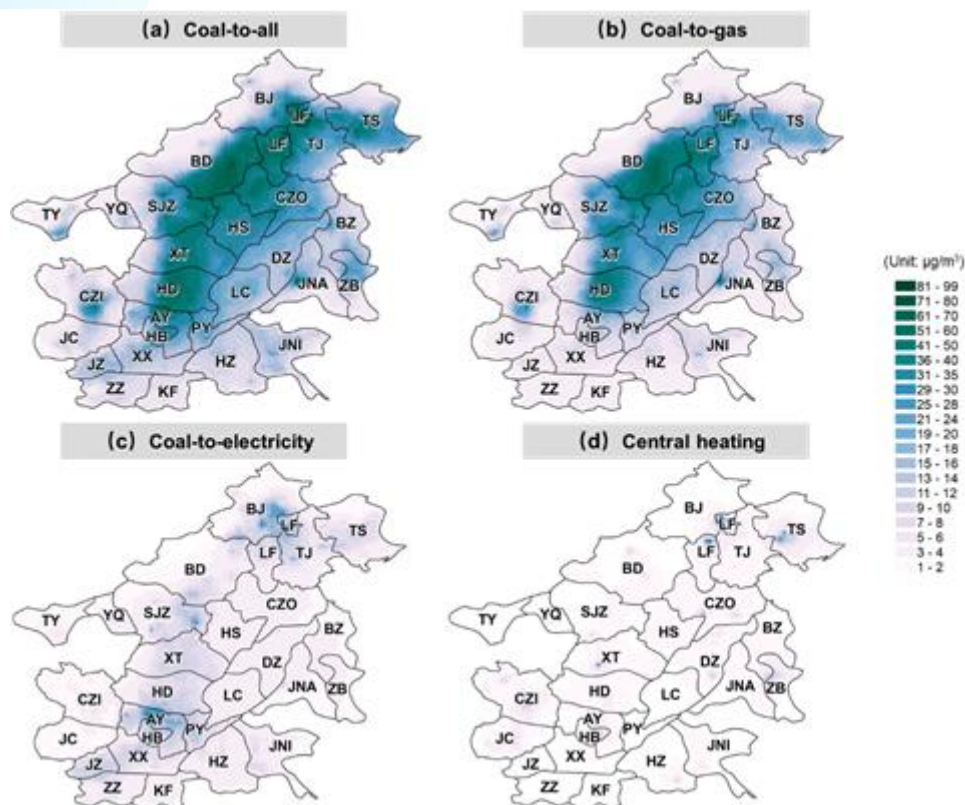


图 2.4-20 散煤消耗减少的空间分布；(b)各城市分措施散煤消耗减少量

散煤消耗的减少带来了空气污染物排放减少，使“2+26”城市  $PM_{2.5}$  年均浓度在 2020 年下降了 23%，特别是农村地区的平均  $PM_{2.5}$  浓度下降了 24.7%，比城市地区高出 2.3%，这主要是由于在农村地区广泛实施了清洁取暖改造措施。在市级层面，廊坊、保定、衡水和沧州等地的空气质量改善最为显著， $PM_{2.5}$  浓度下降了 31%-40%。

图 2.4-15 人口加权年均  $PM_{2.5}$  浓度减少空间分布

## (2) 空气质量改善的健康效益

基于全球暴露死亡模型 (GEMM) 测算显示, 清洁取暖政策避免了“2+26”城市约 7.5 万例  $PM_{2.5}$  相关的过早死亡。分区域看, 河北省获得了最多的健康效益, 避免了约 4 万例过早死亡, 北京和天津等高城镇化率和高人口密度的城市也获得了显著的健康效益。其中, 煤改气措施对健康效益贡献最大, 占总避免死亡人数的 69%, 煤改电和集中供热措施分别占 25%和 6%。分城乡看, 城市地区避免了约 1.4 万例过早死亡, 占“2+26”区域避免过早死亡人数的 18%, 农村地区避免的死亡人数占 82%。

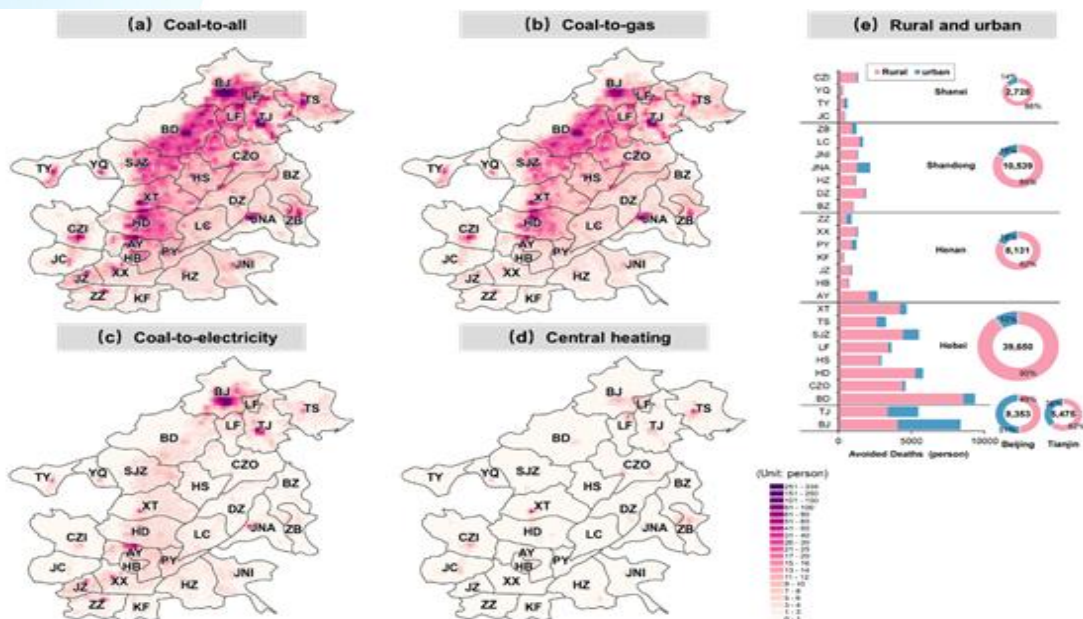


图 2.4-16 避免的 PM<sub>2.5</sub> 相关的死亡人数空间分布和城乡分布

本研究进一步量化了清洁取暖政策的跨区域健康溢出效应。清洁取暖政策的跨区域健康溢出效应指因其他地区清洁取暖实施而在某一地区产生的健康效益。在“2+26”区城市，有 45% 的健康效益归功于其他城市清洁取暖政策的实施。值得注意的是，北京和天津获得了最显著的溢出效应，这主要归功于河北省清洁取暖政策的实施。相反，河北省实施清洁取暖避免了其他地区约 1.1 万例过早死亡，但其他地区的实施清洁取暖仅避免河北省 4190 例过早死亡。

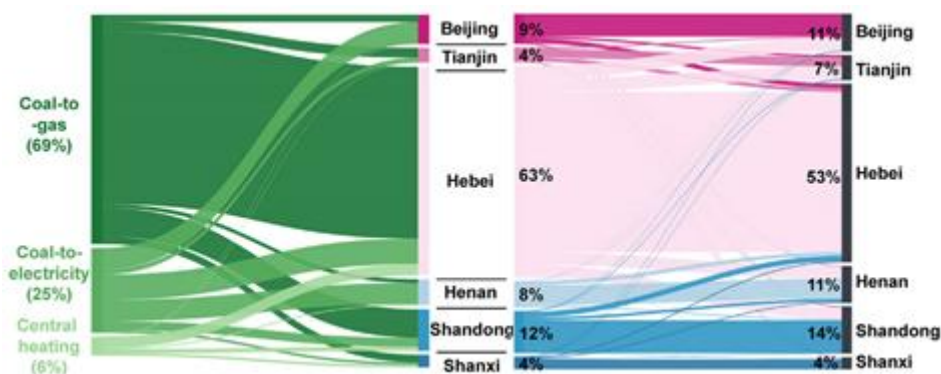


图 2.4-17 跨区域健康效益溢出效应

### （3）经济成本和健康收益的错配问题

本研究基于高空间分辨率清洁取暖数据集，核算了“2+26”城市清洁取暖政策的总成本，包括家庭的运营成本和设备购买成本以及政府的补贴成本。结果表明，“2+26”城市清洁取暖政策总成本约为 506 亿元，其中居民支付了 60%，政府支付了 40%。但不同城市之间，居民和政府成本支付占比存在显著差异，天津、太原、聊城、滨州和长治由政府承担了 50% 以上取暖成本，而濮阳、焦作、鹤壁、开封和新乡的居民承担了超过 70% 的取暖成本。清洁取暖成本在各城市之间也存在巨大差距，人均收入较高的城市平均取暖成本相对较高，但本研究同样发现，河南和山西一些经济较落后的城市（如濮阳、安阳、新乡和阳泉），由于大多采用煤改电取暖方式，其农村居民平均成本也相对较高。

使用市级人力资本损失（HCL）数据估算了清洁取暖政策健康效益的经济价值。总体而言，“2+26”城市的货币化后的健康收益为 704.6 亿元，约为总经济成本的 1.4 倍，但各城市间成本收益分配存在显著不均衡特征。其中，经济较为发达的北京、天津和济南收获了总健康收益的 44%，但仅承担了约 11% 的总经济成本；经济欠发达、农村人口比重大的七座城市（保定、邯郸、衡水、邢台、安阳、菏泽和聊城），承担了约 40% 的总经济成本，但获得的总健康收益不到 20%。

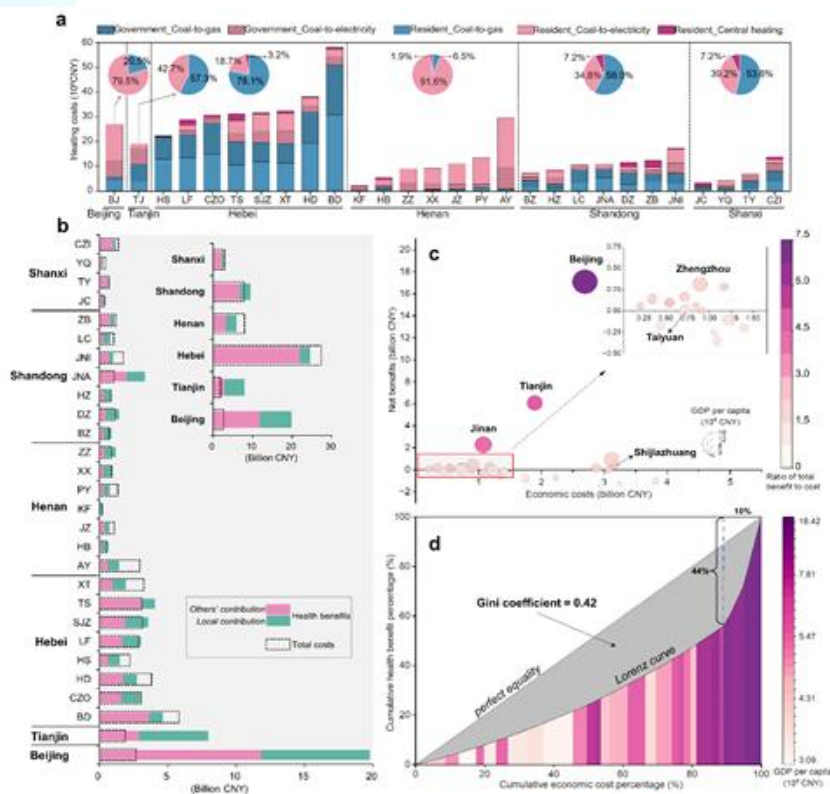


图 2.4-18 “2+26”城市农村清洁取暖政策的成本效益比较分析。(a)各城市清洁取暖成本；(b)健康收益与经济成本对比；(c)各城市净收益；(d) 成本效益洛伦兹曲线及基尼系数。

**研究结论：**本研究对我国北方“2+26”城市农村清洁取暖的经济成本和环境健康收益进行量化分析，并追踪了各地级市清洁取暖行动的跨区域影响，研究发现各城市间成本收益分配不均衡，相对于北京等经济发达区域，欠发达地区农村居民承担了更大的清洁取暖成本压力，在地方政府补贴逐渐退坡的预期下，未来如何维持清洁取暖，降低欠发达地区农村居民取暖压力，防止散煤复燃需要针对性对策。

**研究建议：**（1）未来的散煤治理政策需要根据地方财政状况和居民收入水平，动态调整现有的中央和地方政府补贴，确保低收入地区和居民能够承受清洁取暖成本负担，这既是保障污染防

治的重要基础，也是脱贫攻坚与乡村振兴的重要内容。（2）基于“2+26”城市内部的健康溢出效应，可以探索建立城市之间的跨区域大气补偿机制或散煤治理基金，对贡献溢出效益显著的地区提供补偿。同时，可以结合发展屋顶光伏、农村风电等新能源发展契机，通过技术创新和政策创新，切实降低农村居民取暖成本。

#### 2.4.7 从省际交通和 PM<sub>2.5</sub> 减排成本的角度评估中国 PM<sub>2.5</sub> 污染控制的有效性

**标题：** Assessing the effectiveness of PM<sub>2.5</sub> pollution control from the perspective of interprovincial transport and PM<sub>2.5</sub> mitigation costs across China

**作者：** Zhenya Hu, Li Huang, Mengyuan Ma, Lin Xu, Hui Liu, Wenqing Xu, Jun Yang

**期刊：** Environmental Science and Ecotechnology

**链接：** <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666498424000620>

**研究背景：** 细颗粒物（PM<sub>2.5</sub>）污染是中国目前面临的最主要的大气环境问题之一。2013 年以来，中国全社会投入了上万亿元，通过结构调整和末端治理推动大气环境改善。由于 PM<sub>2.5</sub> 及其前体物的传输距离可长达数百公里甚至上千公里，中国各地的大气环境治理措施除了改善本地的空气质量，也可对其他省份的空气质量改善发挥作用；此外人口分布的空间差异也对 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降所产生的健康效益有显著影响。因此在全国尺度系统分析各省大气污染防治措施对其自身及其他省份 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平的影响，并基于此识别污染跨省传输带来的治理成本转移，评价当前大气污染防治投入方案的成本有效性，对于优化中国大气污染防治资金分配，提升大气污染治理效率具有重要意义。

**研究内容：** 该研究在 WRF-CMAQ 模型的基础上建立了一套分析



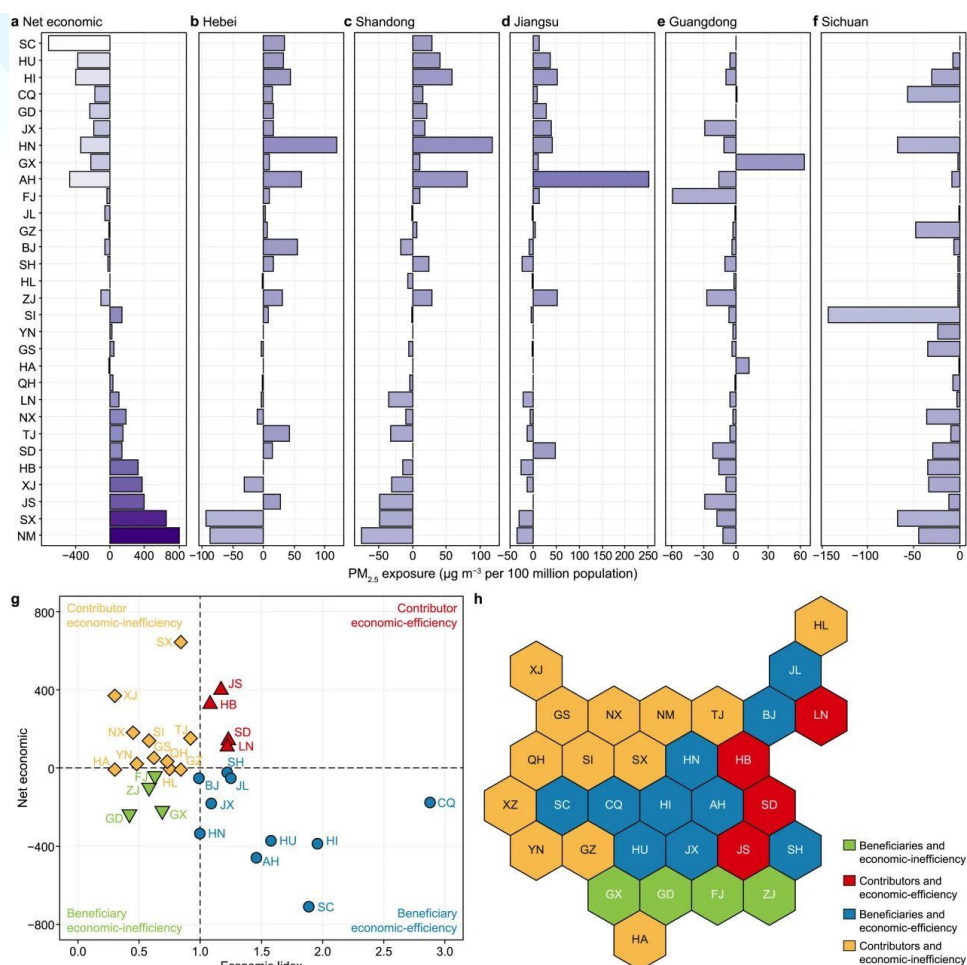


图 2.4-19 各省 PM<sub>2.5</sub> 控制成本的净溢出。a-f, 全国及重点省份的 PM<sub>2.5</sub> 控制成本净溢出值及省际间传输关系。g-h. 将 31 个省份按照控制成本有效性和成本净输出进行分类的结果

耦合各省大气污染防治投入的分析结果发现，受到 PM<sub>2.5</sub> 污染跨省传输的影响，2013 至 2020 年期间，58.8% 的 PM<sub>2.5</sub> 控制成本直接贡献于各省本地 PM<sub>2.5</sub> 暴露削减，而 41.2% 的成本贡献于其他省份的 PM<sub>2.5</sub> 暴露降低。2013 至 2020 年间，中国大陆地区 31 个省份中，14 个省份的外溢控制成本超过了外省输入成本，体现为大气污染防治的贡献省份（控制成本净输出），其他 17 个体现为受益省份（控制成本净输入）。在此基础上将 31 个省份识别为 4 类，其中江苏、河北、山东、辽宁等 4 个省份控制成本有效性高，且为成本净输出省份，建议

在未来区域联防联控设计中加以政策和经费倾斜；四川、安徽等 10 个省份（图 2h 中的蓝色省份）控制成本有效性高，且为暴露净输入省份，建议在未来区域联防联控设计中强化对其影响大的省份的减排投入，以达到更好的大气污染防治成本有效性。

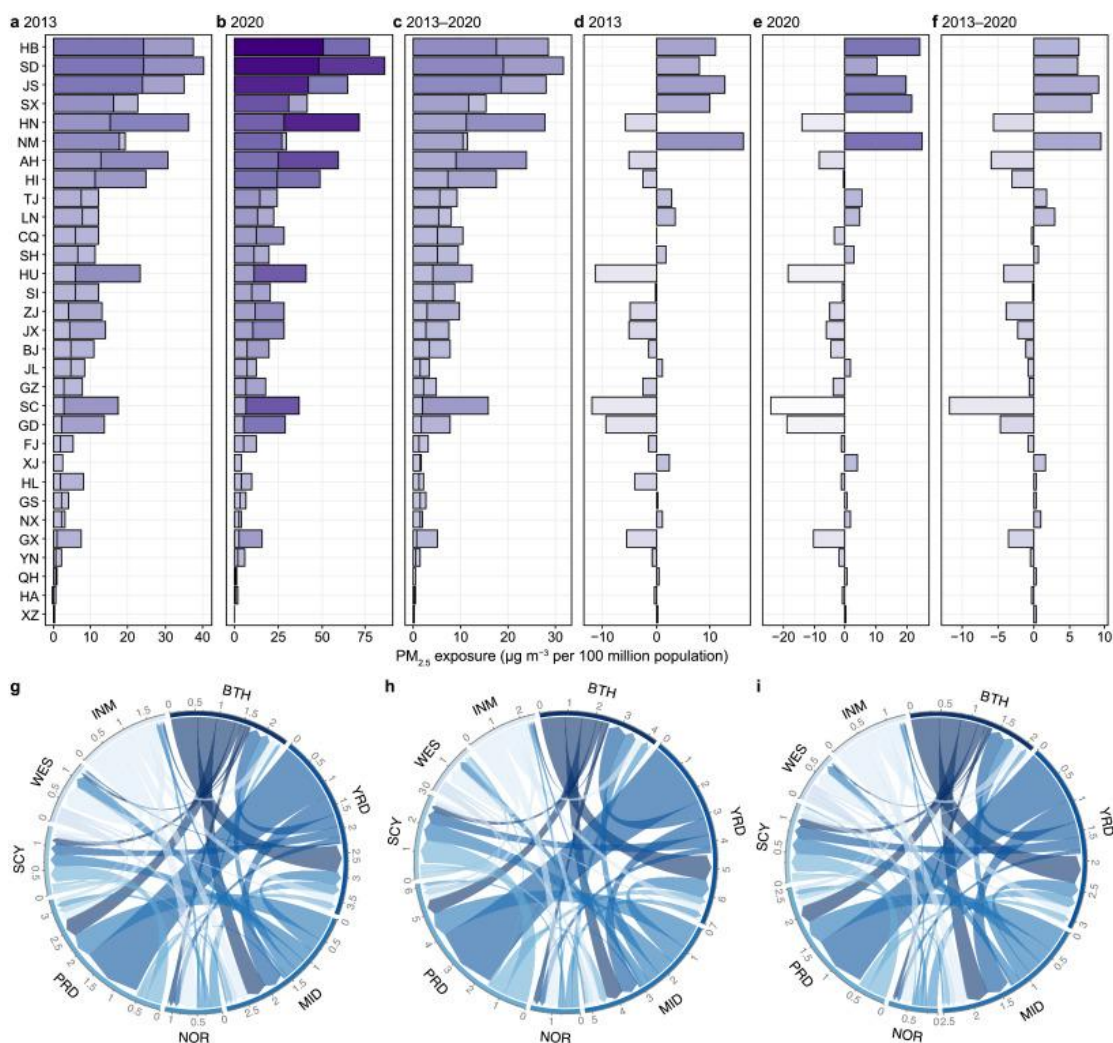


图 2.4-20 PM<sub>2.5</sub> 的传输通量

**研究结论：** 本研究发现从 2013 年到 2020 年，全国年均人口加权 PM<sub>2.5</sub> 浓度 (PPM<sub>2.5</sub>) 从 59.3 微克/立方米下降到 35.7 微克/立方米，降幅为 39.8%，这与主流国际团队的模拟结果大致一致（例如，张等人，从 61.8 微克/立方米下降到 42.0 微克/立方米；耿等人，从 60.7 微克/立方米下降到 34.5 微克/立方米）[10,31]。PM<sub>2.5</sub> 下降的主要贡

献是人为排放减少 (90.9%) [32], 而气象影响相对较小 (9.1%; 补充材料文本 S1)。此外, 2020 年 (2013 年) 中国年均 PM<sub>2.5</sub> 浓度的监测和模拟值接近 2020 年的 36.2 和 35.7 微克/立方米, 以及 2013 年的 60.6 和 59.3 微克/立方米[33]。2013 年 74 个城市的模拟结果与监测值之间的相关性达到了 0.83 (NMB=-10.9%, NME=19.2%)。2020 年模拟结果与监测值之间的相关性分别达到了 0.84 (NMB=2.8%, NME=8.1%) 和 0.60 (NMB=48.6%, NME=49.4%), 分别对应东部和西部 (共有 1736 个监测站, 337 个城市) (补充材料图 S4 和 S5)。

为了更好地地区分区域差异并支持后续分析, 我们将省份划分为八个关键区域 (图 1a), 分别指定为 BTH (北京、天津和河北), YRD (长江三角洲及其周边地区), MID (中部地区), NOR (北部地区), PRD (珠江三角洲及其周边地区), SCY (四川、重庆、云南和贵州), WES (西部地区) 和 INM (内蒙古) (补充材料文本 S2, 图 S15a)。 $\Delta$ PM<sub>2.5</sub> 代表 2013 年和 2020 年之间 PPM<sub>2.5</sub> 浓度的差异。所有八个区域模拟的 PPM<sub>2.5</sub> 值下降范围从 29.3% 到 48.6%。YRD 区域的 PPM<sub>2.5</sub> 下降幅度最大 (图 1c), 下降了 48.6% ( $\Delta$ PM<sub>2.5</sub>=34.0 微克/立方米), 其次是 BTH 和 SCY 区域 (图 1b-g), 分别下降了 48.5% ( $\Delta$ PM<sub>2.5</sub>=44.8 微克/立方米) 和 48.0% ( $\Delta$ PM<sub>2.5</sub>=33.3 微克/立方米)。

#### 2.4.8 中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组发布 2023 年“降碳 减污 扩绿 增长”主题报告

**标题:** The 2023 report of the synergetic roadmap on carbon neutrality and clean air for China: Carbon reduction, pollution mitigation, greening, and growth

**作者:** Jicheng Gong, Zhicong Yin, Yu Lei, Xi Lu, Qiang Zhang, Cilan Cai, Qimin Chai, Huopo Chen, Renjie Chen, Wenhui Chen, Jing Cheng, Xiyuan Chi, Hancheng Dai, Zhanfeng Dong, Guannan

Geng, Jianlin Hu, Shan Hu, Cunrui Huang, Tiantian Li, Wei Li,  
Kebin He

期刊: Environmental Science and Ecotechnology

链接:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S26664984240013>

15

**研究背景:** 随着近年一系列大气污染防治政策措施的落地实施,我国大气环境质量得以明显改善。然而,目前我国大气污染防治的成果尚不稳定,重污染天气仍有发生;同时随着污染治理进程的深入,末端治理的减排难度日益增大,污染物减排空间逐渐收窄。“双碳”目标提出三年以来,我国积极稳妥推进碳达峰碳中和,完成了构建碳达峰碳中和“1+N”政策体系,推动减污降碳协同增效系统谋划,以“双碳”行动进一步深化环境治理,引领我国特色生态文明建设,指明实现我国新发展阶段经济社会发展全面绿色转型方向,成为解决我国环境治理系统性、引领性、实践性问题的加速器。

党的十八大以来,我国生态环境保护发生了历史性、转折性、全局性变化。通过一系列清洁空气政策的实施,我国大气污染防治取得积极成效,碳排放强度显著降低。2013-2022 十年间,PM<sub>2.5</sub> 浓度下降了 57%,实现了十连降,单位 GDP 二氧化碳排放下降 34.4%。我国实现了在经济快速增长的同时,空气质量明显改善,人民群众的蓝天获得感和幸福感显著提升。但当前改善成效还不稳固,我国面临着气象条件相对不利,以及疫情后经济复苏带来的污染物、温室气体排放量仍将增加的双重压力,空气质量改善形势仍然严峻。立足生态文明建设新形势、新任务、新要求,党中央做出了“减污降碳协同增效”的重大战略部署,生态环境部会同相关部门,统筹大气污染防治与“双碳”目标要求,开展大气减污降碳协同增效行动。中国共产党“二十大”

报告更是强调，要推进美丽中国建设，坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理，统筹产业结构调整、污染治理、生态保护、应对气候变化，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展。

应对气候变化和治理空气污染在科学机理、目标指标、应对措施、综合效益和治理体系等方面都具有高度的协同效应。该报告以空气污染与气候变化协同治理监测指标体系为基础，以自然科学和社会科学深度交叉融合为导向，从空气污染与气候变化、治理体系与实践、结构转型与治理技术、大气成分源汇与减排路径、健康影响与协同效益等五个方面出发设定 20 项指标。较上期报告，本年度报告更新了气象条件对 AQI 的影响、气候变化及其影响、协同治理政策、建筑能源系统低碳转型四项指标，进一步完善协同治理监测指标体系。通过定期追踪各项指标的进展状况，本报告逐步建立碳中和与清洁空气协同治理理论体系，识别中国在碳中和与清洁空气协同路径上面临的挑战并提出解决思路。

### （1）空气污染与气候变化

2022 年全国 339 个地级及以上城市  $\text{PM}_{2.5}$  年平均浓度为  $29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，低于国家空气质量二级标准 ( $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )，仍高于国家空气质量一级标准 ( $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )，但相比 2015 年 ( $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 下降 35.6%。2015-2022 年全国 339 个地级及以上城市大气  $\text{PM}_{2.5}$  浓度总体呈持续下降态势。值得注意的是，2021-2022 年间，京津冀及周边和珠三角地区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度持续下降，而汾渭平原和成渝地区  $\text{PM}_{2.5}$  浓度有小幅反弹。考虑到气象条件和 2020 年开始的新冠疫情对我国空气质量年际变化的影响，基于污染物浓度的三年滑动平均值对空气质量的变化进行了评估。2015-2022 年间，全国及各个重点区域的  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度的三年滑动

平均值呈现持续下降。

2022 年全国 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度低于国家二级标准的城市数量为 253, 相比 2015 年 (106 个城市) 增长 139%。在主要区域中, 珠三角地区 2022 年所有城市均达到国家二级标准; 长三角地区 2022 年达标城市数量为 33 个, 相比 2015 年 (3 个) 增长 10 倍; 汾渭平原和成渝地区达标数量与往年基本持平。若对标 WHO 第二阶段目标值 (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 2022 年全国 339 个地级及以上城市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度低于 WHO 第二阶段目标值的城市数量为 135 个城市, 珠三角 2022 年评价值全面达到 WHO 第二阶段目标值, 京津冀及周边地区和汾渭平原低于 WHO 第二阶段目标值城市数量仅剩 3 个和 1 个, 成渝地区各城市浓度均高于 WHO 第二阶段目标值。

2022 年全国 339 个地级及以上城市 O<sub>3</sub> 日最大 8 小时平均值第 90 百分位数浓度范围为 90-194 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 年平均浓度为 145 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 相比 2021 年 (137  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 上升了 5.8%。2022 年 O<sub>3</sub> 日最大 8 小时平均值第 90 百分位数年均评价值低于国家二级标准的城市数量为 247 个, 达标占比超 72.9%。2015-2019 年全国城市大气 O<sub>3</sub> 浓度总体呈上升趋势, 2019 年后呈波动态势。2022 年成渝地区、京津冀及周边、长三角地区、汾渭平原和珠三角地区相较 2021 年大气 O<sub>3</sub> 浓度分别上升了 15.0%、6.3%、7.3%、1.2% 和 14.5%。从三年滑动平均来看, 2015-2019 年间全国及重点区域 O<sub>3</sub> 浓度持续上升, 而 2020-2022 年间全国及重点区域 O<sub>3</sub> 浓度出现持平或者小幅度下降。

2015-2021 年全国及重点区域 O<sub>3</sub>-8h 90Per 达国家二级标准 (160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 城市数呈现倒“N”型。2015-2019 年间达标城市数量从 318 个下降至 234 个, 下降 26.4%; 2019-2021 年间, 达标城市数量持续上升, 2021 年全国 O<sub>3</sub>-8h 90Per 年均浓度达标的城市数量为 289 个城

市，臭氧污染得到明显控制；2021-2022 年间，达标城市又明显减少，数量为 247 个城市。京津冀及周边和长三角地区达标城市数呈较为显著的倒“N”型，成渝和珠三角地区达标城市数变化不明显。

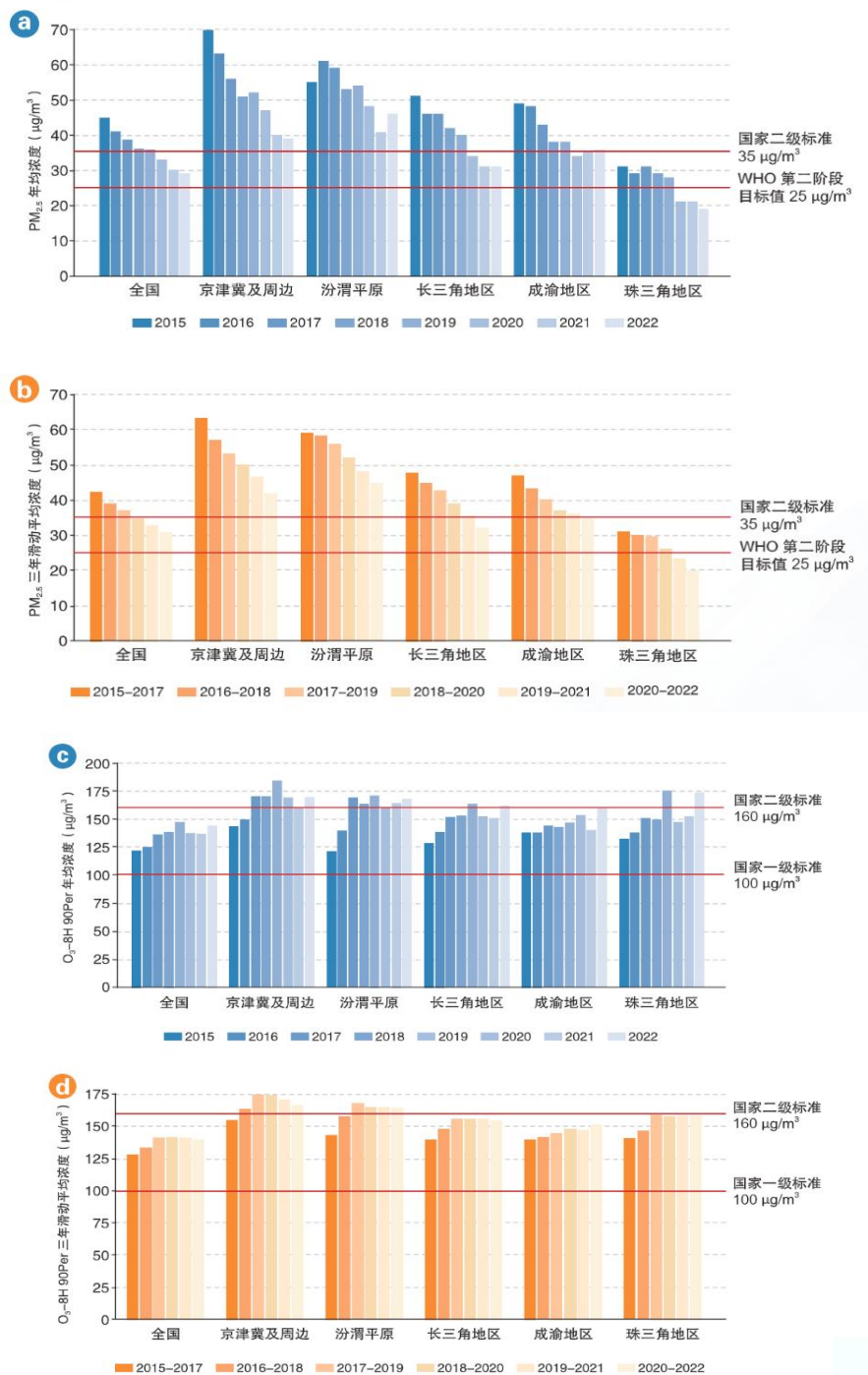


图 2.4-21 2015 -2022 年全国及重点区域  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$  日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数的 (a, c) 平均浓度变化以及 (b, d) 三年滑动平均浓度

2022 年京津冀及周边、汾渭平原、长三角、成渝地区和珠三角等重点区域各项污染物浓度同比均有所下降，其中  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  年均值全面低于国家一级标准（年均浓度： $\text{SO}_2 \leq 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ； $\text{NO}_2 \leq 40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。全国 339 个地级市年均  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  年评价价值达到国家二级标准（ $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度  $\leq 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ； $\text{O}_3$  日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数： $\text{MDA8 O}_3 \leq 160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ），但在某些重点地区二者未达标。

经过近十年的大气污染治理，我国空气质量的空间格局发生显著变化。2015 年， $\text{PM}_{2.5}$  污染最严重的城市主要分布在河北、山东和河南，例如河北省的保定市、邢台市、衡水市，山东省的德州市、聊城市、菏泽市，以及河南省的郑州市和新乡市等。经过大气污染治理行动的实施，2022 年河北各城市已退出  $\text{PM}_{2.5}$  污染最重的前 10 名，污染中心向陕西和河南转移。2022 年  $\text{PM}_{2.5}$  污染最严重的前三座城市分别为咸阳市、鹤壁市和渭南市。

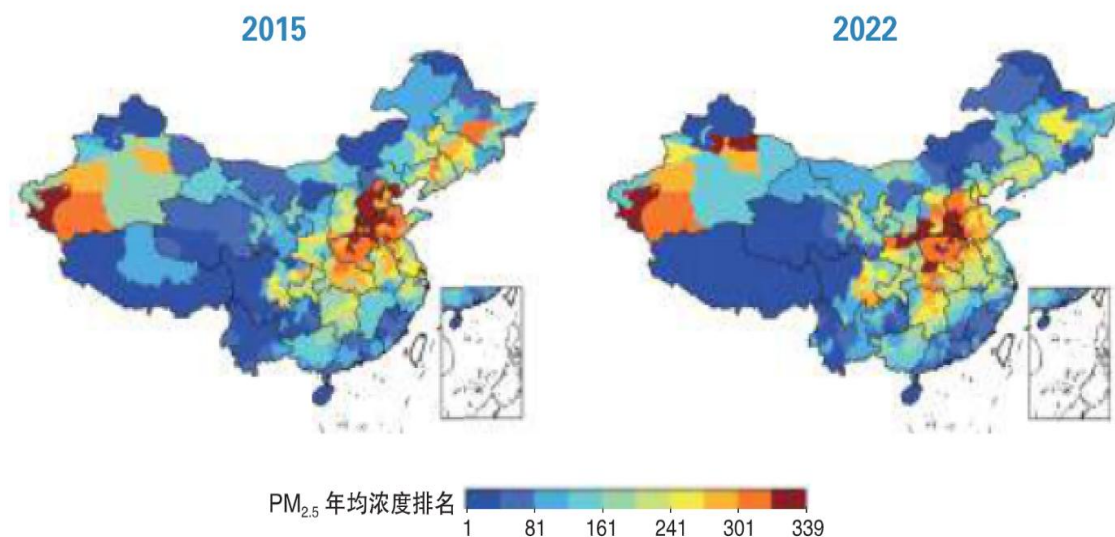


图 2.4-22 2015 和 2022 年全国 339 城市年均 PM 浓度排名

## （2）治理体系与实践

2022 年中国共产党“二十大”报告指出，要“统筹产业结构调整、

污染治理、生态保护、应对气候变化，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”，温室气体与大气污染控制协同、管理融合的基础进一步筑牢。2022 年 6 月，生态环境部等 7 部门联合印发《减污降碳协同增效实施方案》（环综合〔2022〕42 号），对污染物与温室气体控制的主动协同作为现代环境治理体系的重要组成部分，进入到实施层面。本章以 2022 年为重点，追踪近年在温室气体与大气污染协同控制方面的管理研究和政策动向，以及地方在相关实践的尝试和成效，进而反映协同治理体系的建设进程。

**一是经济社会快速转型对治理目标优化的挑战。**当前中国经济社会快速发展，产业结构和区域格局快速演进，区域发展和治理诉求高度异质，减污与降碳不同区域、不同阶段面临不同的重要性和紧迫性；此外气候环境治理可能引发收入分化、能源贫困等次生问题，需要以系统、全面的经济社会效益为基础，结合不同地区实际情况，考虑生态环境、能源安全、产业转型等多维发展诉求，统筹制定减污降碳目标，科学规划实现路径。

**二是降碳减污影响机理的差异对政策机制设计的挑战。**从时间的角度看，气候治理影响长远，关键在于技术创新的跨期优化；污染防治立竿见影，重点在于对当期环境风险的持续管控。从空间的角度看，气候变化具有全球性影响，而大气污染则具有局域性影响。从治理手段的角度看，污染物排放的。边际损害曲线较陡，而气候治理的边际减排成本曲线较陡。因此减污降碳协同需要系统考虑二者差异，耦合激励与规制手段，强化多种政策工具的互补。

**三是减污降碳工作的全局性需求对治理体系建设的挑战。**协同治理涉及环境、能源、产业、科技创新、财税金融等多个领域多种政策，需要打破条线分割，打通监管体系，促进多部门联动、推动政策与市

场融合；2026 年开始实施的欧盟碳边境调节机制（CBAM）等也倒逼中国碳市场加速建设并与国际接轨。目前中国气候变化领域立法滞后于大气环境保护，政府生态环境管理部门尤其是基层部门气候变化管理人员缺乏，其知识储备和技能基础更不足以满足全局性管理的需求，亟需完善治理体系，提升治理能力，进而促进跨部门、跨领域的综合治理。

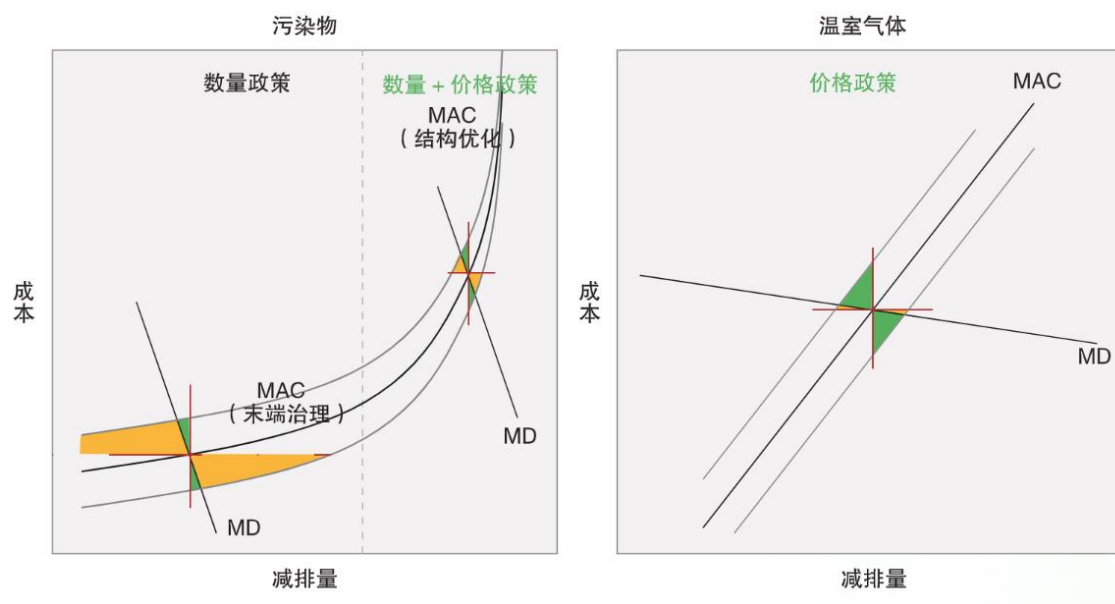


图 2.4-23 环境和气候治理政策工具选择示意

面向上述挑战，协同治理体系研究逐渐聚焦于 4 个重点。一是协调发展与减排，统筹治理目标与实施路径。系统评估减污与降碳的经济、产业、环境协同效应，以产业转型和高质量发展为导向研判排放路径，统筹优化全国及区域减排目标；跟踪评估气候和环境治理的溢出效应，强化保障机制修正收入分配效应、优化能源保障。二是平衡整体与局部，优化联防联控和区域协同。统一排放管控标准，协调区域产业布局，严格准入管理，避免由“碳泄漏”引发新的“污染避难所”；建立碳、能、污市场耦合联动机制，优化温室气体和污染物排放区域配额分配，以市场化机制实现区域间环境损害和生态服务交叉补偿。

三是兼顾短期与长远，探索政策工具与治理机制的创新模式。在加快完善碳市场、培育和联动排污权交易的同时，强化技术规制和准入监管，加快推动能耗双控向排放双控转变；优化财政、税收和金融政策，提升转型和创新的激励。四是融合政府与市场，建立开放、透明、广泛参与的治理体系。加快国家和地方跨职能协调机制建设；健全统一的排放监测、核查和协同管理体系，完善监管信息报告和披露机制，赋能市场机制更好发挥作用。

中国减污降碳一体谋划、一体部署、一体推进、一体考核的制度机制构建需要转化为具体的政策工具，才能在社会治理中发挥作用。近年来，中国政府完成了碳达峰碳中和“1+N”政策体系，大力推动产业结构、能源结构、交通运输结构转型升级，同时充分利用生态环境政策管理基础和优势，推动了传统环境管理的前端准入—过程管理—末端管控政策与降碳政策的整合。总体看，在准入管理和考核等行政手段、市场政策等经济手段、企业和社会治理等自愿手段等方面逐步推动形成减污降碳约束激励与引导机制，减污降碳协同治理成效初步显现。

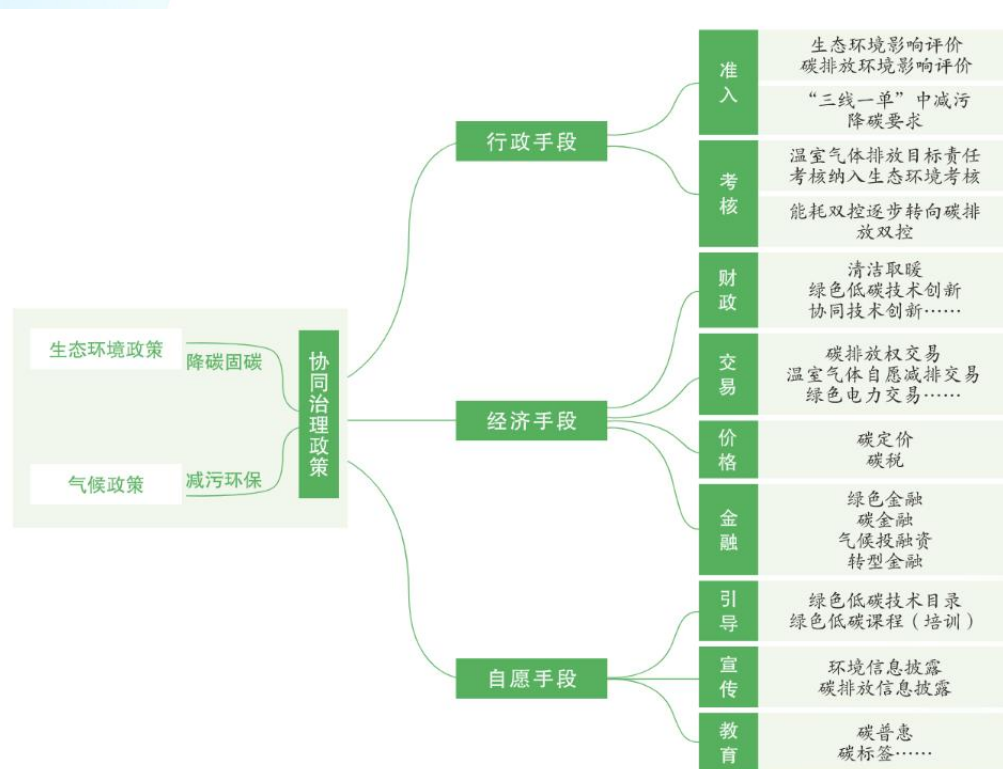


图 2.4-24 减污降碳协同治理政策框架

全社会广泛参与的减污降碳社会治理政策体系进一步健全。一是国家发布第四批重点推广的低碳技术目录，大力支持全社会应用和推广低碳技术。二是深入推进碳普惠工作，《中国应对气候变化政策与行动 2022 年度报告》和《中国落实国家自主贡献目标进展报告（2022）》均提出要探索开展碳普惠这一创新性自愿减排机制建设，激励全社会参与碳减排；截至 2023 年 5 月，共有 18 个省市在政策推动层面提出要发展碳普惠机制，在新能源、公共交通、低碳消费等领域开展了碳普惠项目试点示范。三是加强碳排放信息披露，2023 年中国纳入全国碳市场的重点排放单位均按照温室气体排放管理要求，完成了第一个履约周期（2019-2020 年度）的温室气体排放信息公开。

### （3）结构转型与治理技术

推动能源、产业、交通等高碳行业的结构转型、加大清洁低碳技术的推广与应用是中国在推进碳中和进程中实现减污降碳协同发展

的重要举措。同时，新能源、新技术等的发展也将为经济发展带来新的增长点，为中国的可持续发展提供动力。

**能源结构调整方面**，2022 年我国能源消费总量达到 54.1 亿吨标准煤，同比增长 2.9%，近十年以能源消费年均 3% 的增长支撑了国民经济年均 6.2% 的增长。2022 年煤炭消费量占比 56.2%，同比提高 0.3 个百分点，近 10 年来首次出现不降反升现象，“十四五”前两年煤炭消费累计增长约 3.9 亿吨，为“十三五”累计增量的 7 倍以上；非化石能源消费占比 17.5%，相较 2020 年提升 1.6 个百分点，较 2021 年提高 0.8 个百分点，风光水生核氢等多元化清洁能源供应的替代能力不断提升。2022 年全国发电量达到 8.7 万亿千瓦时，非化石能源发电量达到 36.2%，同比增长 8.6%，全口径并网太阳能、风电、核电、水电发电量同比分别增长 31.2%、16.2%、2.5% 和 1.0%，其中太阳能、风电发电量首次突破 1 万亿千瓦时，达到 1.19 万亿千瓦时，同比增长 21%，占全社会用电量的 13.8%，“十四五”前两年新增发电量达到“十三五”五年增量的 92%。2022 年中国可再生能源装机突破 12 亿千瓦，历史性超过煤电装机，占全国发电总装机的 47.3%，其中风电、光伏发电新增装机 1.25 亿千瓦，连续三年突破 1 亿千瓦，“十四五”前两年新增装机量达到“十三五”期间增量的 62%。截至 2023 年上半年，全国可再生能源装机突破 13 亿千瓦达到 13.22 亿千瓦，占我国总装机的 48.8%（国家能源局, 2023a）。2022 年分布式光伏新增并网容量 5111.4 万千瓦，约占全部新增光伏发电装机的 58%，是新增并网集中式光伏电站的 1.4 倍，整县（市、区）屋顶分布式光伏试点持续稳步推进。

**产业结构调整方面**，2021-2022 年，我国国内生产总值从 114.4 万亿元增长至 121.0 万亿元，其中第一产业增加值比重为 7.3%，与

上一年持平，第二产业增加值由 39.4% 增加至 39.9%，第三产业增加值由 53.3% 降低至 52.8%。高技术制造业增加值比上年增长 7.4%，占规模以上工业增加值的比重从 15.1% 提高至 15.5%。全年新能源汽车产量超过 700 万辆，比上年增长 90.5%。光伏电池产量 3.4 亿千瓦，增长 46.8%。2022 年国务院发布了《“十四五”节能减排综合工作方案》，国家发改委等部门发布了《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022 年版）》，同年工信部等六部门联合印发了《工业能效提升行动计划》，以钢铁、有色金属、建材、石化化工等行业为重点，推进节能改造和污染物深度治理。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，鼓励将高炉—转炉长流程炼钢转型为电炉短流程炼钢。到 2025 年，通过实施节能降碳行动，钢铁、电解铝、水泥、平板玻璃、炼油、乙烯、合成氨、电石等重点行业产能和数据中心达到能效标杆水平的比例超过 30%，能效基准水平以下产能基本清零。

**交通结构调整方面**，2022 年全国铁路货运总发送量达到 49.3 亿吨，同比增长 4.5%；水路货物运输量 85.5 亿吨，同比增长 3.8%；公路货物运输量 371.2 亿吨，同比降低 5.5%。全国港口集装箱铁水联运量完成 874.7 万标准箱，同比增长 16%。铁路煤炭发送量达到 26.8 亿吨，同比增长 3.9%；铁路集装箱发送量 7.36 亿吨。46 个第四批多式联运示范工程、31 个第三批城市绿色货运配送示范工程启动创建；15 个城市实施国家综合货运枢纽补链强链。全国铁路旅客发送量 16.7 亿人次，同比降低 35.9%；公路旅客运输量 35.5 亿人次，同比降低 30.3%。2022 年全国累计 117 个城市开展国家公交都市创建，46 个城市获得“国家公交都市建设示范城市”称号；全国城市公共汽电车客运量 166.2 亿人次，城市轨道交通客运量 185.9 亿人次；全国 97 个城市

绿色出行创建考核评价达标，绿色出行比例达到 70%以上，绿色出行服务满意率达到 80%以上，北京、宁波等中心城区的绿色出行比例分别达到 73.4%、76.7%左右。

建筑能效提升与用能结构转型方面，2021 年我国建筑运行过程中的碳排放总量为 22 亿 tCO<sub>2</sub>（清华大学建筑节能研究中心，2023），其中化石燃料在建筑中燃烧导致的直接碳排放维持下降趋势，占总排放的 23%。2021 年我国建筑运行用电量显著增加，超过 2.2 万亿 kWh，电力消费导致的间接 CO<sub>2</sub> 排放增长至 12.4 亿吨，占比 57%。北方城镇采暖能耗总量已于 2017 年前后达峰，近年来随着能源结构调整，热力间接碳排放已呈现逐年下降趋势，2021 年占比 20%。从建筑领域节能工作发展沿革来看，一直以来以控制增量、改善存量、调整结构为主要内容。具体来讲，控制增量主要指逐步提高建筑节能标准，并通过加强监管，确保新建建筑执行节能标准。改善存量主要是指针对量大面广的既有建筑，通过推动节能运行与改造，提高既有建筑的用能效率。调整结构主要是指在建筑领域推动太阳能、浅层地热能等可再生能源的应用。

碳捕集、利用与封存方面，新技术不断涌现，示范项目迅速增加并逐步覆盖钢铁、玻璃、水泥等难减排行业，碳捕集成本与能耗持续下降，相关政策进一步建立完善。CCUS 各环节技术实现新的突破。捕集技术正由第一代向第二代过渡，并在生物质能碳捕集（BEC）和空气直接捕集（DAC）等负排放技术领域开展有益探索，在高性能吸附剂，吸收材料制备等关键技术研发方面取得一定成果。运输技术正由传统的罐车和船舶运输向陆上和海底管道运输转变，如中石化集团的齐鲁石化 - 胜利油田项目正在建设我国首条 CO<sub>2</sub> 长距离超临界输送管道。CO<sub>2</sub> 利用领域的新技术也不断涌现，如江南大学研究团队已

实现 CO<sub>2</sub> 一步合成乙醇。在 CO<sub>2</sub> 封存方面，我国开始探索 CO<sub>2</sub> 离岸封存的可行性，如中国海油建设完成了国内首个 CO<sub>2</sub> 离岸封存示范工程设备，实现了离岸 CO<sub>2</sub> 封存关键设备的全面国产化。在技术进步的同时，我国 CCUS 示范应用发展迅速，在数量、规模、行业覆盖等方面均有显著提高，并从单一环节的技术应用向全流程多环节综合示范过渡。根据不完全统计，截至 2022 年底，我国已投运和规划建设中的 CCUS 示范项目接近百个，数量较去年增长了近一倍。其中约半数项目已经投运，捕集能力达到约 400 万吨/年，注入能力约 200 万吨/年，分别较去年提高了约 1/3 和 2/3（中国 21 世纪议程管理中心等，2023）。项目规模也明显扩大，如我国首个百万吨级 CCUS 项目——齐鲁石化-胜利油田项目已于 2022 年 8 月正式投产；华能集团、中石油等正在建设、规划的示范项目规模也均超过百万吨。在应用行业方面，目前我国已投运和规划建设中的 CCUS 示范项目已涵盖电力、油气、化工、建材、钢铁等多个行业，如我国钢铁行业首个 CCUS 示范工程在包钢开工建设，中建材世界首个玻璃熔窑 CO<sub>2</sub> 捕集示范项目已建成投产。

新型电力系统方面，电力生产平稳增长，2022 年的发电量累计数值超过 8 万亿千瓦时，同比增长 2.2%。其中，火力发电量超过 5.8 万亿千瓦时，同比增长率放缓至 0.9%。我国火力发电量占比在 70% 到 75% 之间，已徘徊数年，但在 2022 年实现了历史性的改变，占据的市场份额降至 69.77%。水力发电量为 12020 亿千瓦时，同比增长率放缓至 1%，占比降至 14.33%。风力发电量为 6867.2 亿千瓦时，2022 年的增长率为 12.3%，在全国发电量中的份额提升至 8.19%。核电发电量在 2022 年提升至 4177.8 亿千瓦时，同比增长率为 2.5%，在全国发电量中的份额为 4.98%。太阳能发电量在 2022 年为 2290 亿千

瓦时，同比上涨 14.3%，在全国发电量中的份额提升至 2.73%。新能源装机占比持续提升，截至 2022 年底，我国风电、光伏发电装机容量分别为 3.65、3.93 亿千瓦，装机规模均居世界首位。山东、江苏、浙江等省份分布式光伏装机大幅增加，内蒙古、新疆新能源装机占比迅速增长，分别高达 39%和 36%。值得一提的是，自 2021 年国家发改委提出“沙戈荒”大型风光基地建设方案以来，已有超过 200 GW 沙戈荒项目正在建设中。预计到 2030 年，我国风光总装机容量将突破 12 亿千瓦，装机占比突破 50%，发电量占比将从 2022 年的 13.8% 增长到 20%-26%，内蒙古新能源装机规模将超过 2 亿千瓦，比重超过 70%，发电量占比超过 50%；2060 年，风光装机比重将超过 75%，发电量占比预计进一步提升到约 60%。未来 40 年，大力发展风电、光伏等新能源，积极推动大容量海上风电产业发展，实现煤炭从主体能源向基础能源的重大转变，促进能源电力领域脱碳，是我国实现双碳目标的关键。新能源消纳水平不断提高，2022 年我国平均风电利用率为 96.8%，平均光伏利用率 98.3%，全年全国弃风电量 234 亿千瓦时，弃光电量 641 亿千瓦时。较 2017 年弃风率、弃光率分别下降了 8.8%和 4.3%，新能源消纳能力显著增强。为适应新型电力系统建设和大规模高比例新能源发展需要，抽水蓄能等灵活调节性电源在电力系统中的比重将显著提升，截至 2022 年底抽水蓄能累计装机容量达 4519 万千瓦，较 2021 年增长 24.18%。根据《抽水蓄能中长期发展规划（2021-2035 年）》，预计到 2030 年中国抽水蓄能装机将达到 1.2 亿千瓦。此外，先进压缩空气储能、钠离子电池储能、锂离子电池储能、液流电池储能等新型储能技术将有望进一步提升系统新能源消纳能力。

大气污染治理持续推进，自 2013 年《大气污染防治行动计划》

颁布以来，中国大气污染防治工作全面快速开展，以工业、燃煤、机动车、农业农村和扬尘等为主体的污染治理措施得到全方位实施，推动环境空气质量取得明显改善。与此同时，2020 年以来，随着碳达峰碳中和“1+N”政策体系相关文件的陆续发布，中国大气污染防治工作愈加突出以减污降碳协同增效为主基调，协同推进大气污染减排与碳排放控制。2022 年，中国大气污染防治工作在现有体系框架下稳步推进，各项重点措施取得进一步进展。

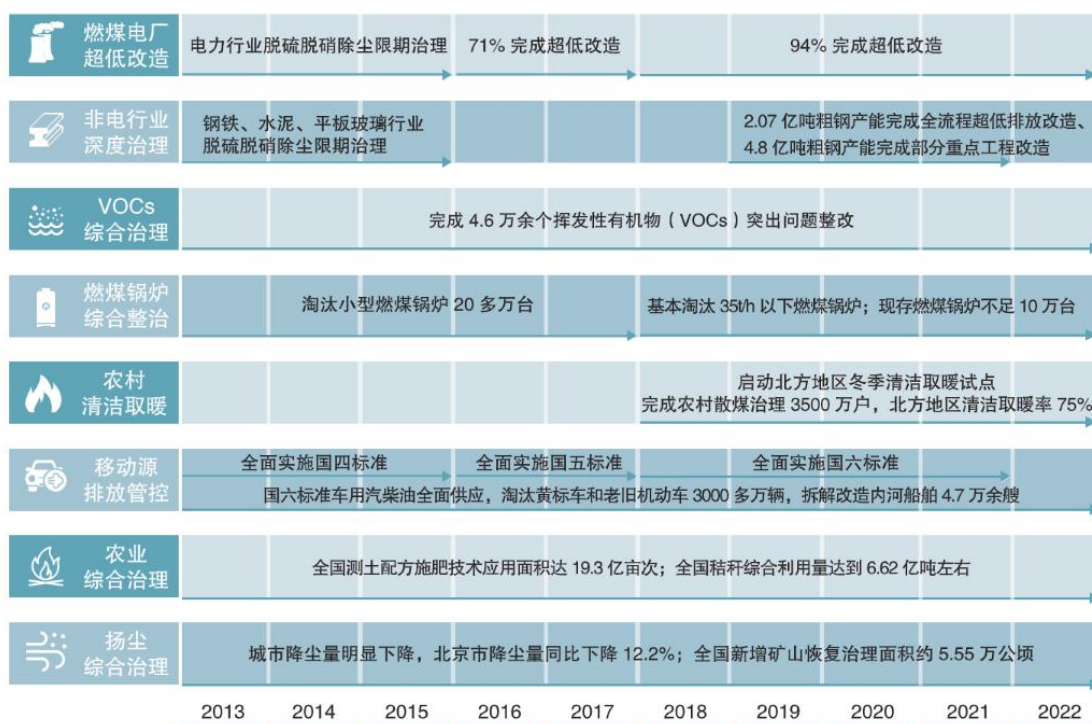


图 2.4-25 2013-2022 年污染治理指标进度

燃煤电厂超低排放改造。2015 年起，中国针对燃煤电厂实施了大规模的超低排放改造，使燃煤电厂污染物排放达到燃气电厂水平。截至 2022 年底，已有 94% 的煤电机组完成超低排放改造，实现超低排放的煤电机组超过 10.5 亿千瓦，较 2021 年水平新增近 2000 万千瓦。

非电行业深度治理。2013 年以来，制修订水泥、石化、涂料油

墨、制药等多个行业排放标准，开展工业炉窑深度治理，启动钢铁行业超低排放改造工作。截至 2022 年底，全国共 2.07 亿吨粗钢产能完成全流程超低排放改造，4.8 亿吨粗钢产能已完成烧结球团脱硫脱硝、料场封闭等重点工程改造，占全国粗钢总产能三分之二。

挥发性有机物治理。“十三五”以来，中国 VOCs 污染防治工作得到快速推进，陆续发布和完善了一系列行业和产品排放标准以及相关治理政策文件。截至 2022 年底，全国已完成 4.6 万余个挥发性有机物突出问题整改。

燃煤锅炉整治。2013-2022 年，全国燃煤锅炉从原有 52 万台减少到不 10 万台，基本淘汰每小时 35 蒸吨以下的燃煤锅炉。

农村清洁取暖。2017 年以来，中国大力实施北方地区冬季清洁取暖试点工作。截至 2022 年底，清洁取暖试点已覆盖全国 88 个城市，完成农村散煤治理 3500 万户，北方地区清洁取暖面积达到 179 亿平方米，清洁取暖率达到 75%。

移动源排放管控。逐步加严机动车排放标准，淘汰高排放车辆。2020 年 7 月 1 日起，轻型车国六标准已在全国范围实施，国六标准车用汽柴油全面供应，车用柴油、普通柴油、部分船舶用油已实现“三油并轨”。2021 年 7 月 1 日起，全国范围内全面实施重型柴油车国六排放标准。2012 年以来，累计淘汰黄标车和老旧车 3000 多万辆，拆解改造内河船舶 4.7 万余艘。全面加强柴油车环保达标监管，连续五年开展机动车检验检测机构“双随机、一公开”监督抽查，督促 6 家车企实施环保召回。

农业综合治理。自国家明确提出大力推广测土配方施肥以来，全国测土配方施肥技术应用面积已达到 19.3 亿亩次。秸秆露天焚烧得到有效控制，2022 年全国秸秆综合利用量达到 6.62 亿吨左右，同比

增长 2.3%。

扬尘综合治理。随着城乡环境管理逐步加强，扬尘治理被纳入大气污染防治重点领域，施工、道路、堆场、裸地、矿山等各类扬尘治理不断深入推进。2022 年，全国城市降尘量明显下降，北京市降尘量同比下降 12.2%；全国新增矿山恢复治理面积约 5.55 万公顷。

#### （4）大气成分源汇及减排路径

减污与降碳具有高度同源性、协同性，实施应对气候变化政策将带来可观的空气质量与健康效益。在未来，能源结构、产业结构、交通结构的转型升级将成为“减污降碳，协同增效”的主要着力点，推动经济社会全面实现绿色高质量发展。

2005-2020 年间，除了宁夏和新疆，其他省份碳排放强度均持续下降，全国大多数省份、直辖市（25 个）完成了区域碳强度目标，部分省份提前或超额完成碳强度目标。其中，青海省的碳排放强度在 2005-2020 年间下降幅度最高，达 37%。从城市来看，2005-2015 年间，我国已经有 31 个城市实现了经济增长和碳排放的强脱钩，即经济增长的同时碳排放下降；185 个城市实现了经济增长和碳排放的弱脱钩，即碳排放的增速小于经济增速。

2015-2020 年间，我国工业部门 CO<sub>2</sub> 减排与 PM<sub>2.5</sub> 污染改善呈现正协同效应，电力供热部门造成的 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降 59%，但碳排放增长 22%，呈显著负效应，交通、民用部门造成的 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降 22%，但碳排放增长 8%，同样呈现负效应。仅北京、重庆、河南、四川、吉林五个省（市）实现了 CO<sub>2</sub> 减排与 PM<sub>2.5</sub> 污染改善的正协同效应；其余省份则均呈 PM<sub>2.5</sub> 污染改善、CO<sub>2</sub> 排放上涨的趋势，其中河北、山西、内蒙古、山东等重工业省份的负协同效应尤为显著。

我国以化石燃料为主的一次能源结构决定了碳排放与大气污染

具有高度同源性。通过实施温室气体与大气污染物协同减排，有望在 2030 年实现碳达峰的基础上，使全国主要大气污染物排放量较当前水平下降 1/3 以上，推动全国  $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度和  $\text{O}_3$  浓度年评价价值分别下降至  $25\mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $130\mu\text{g}/\text{m}^3$  左右，全国空气质量达标城市比例提升至 80% 以上。到 2060 年全国实现碳中和时， $\text{PM}_{2.5}$  年均浓度和  $\text{O}_3$  浓度年评价价值将下降至  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$  左右。不同的碳中和技术路径选择将显著影响空气质量改善效果，以高可再生能源为主的碳中和路径将比以 CCS 为主的路径带来 35% 的额外空气质量改善效益。

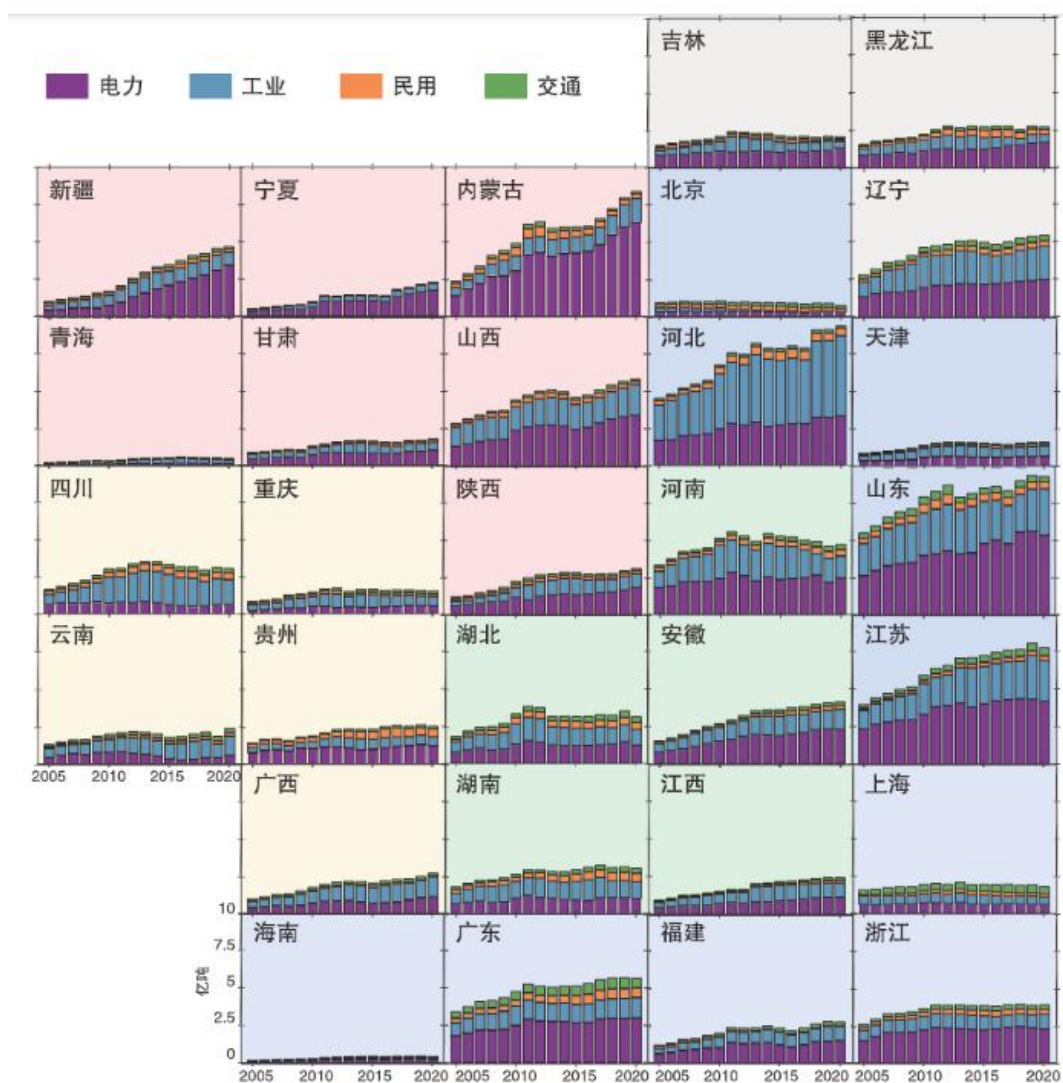


图 2.4-26 2005-2020 年全国分区域碳排放变化趋势及行业组成

### (5) 健康影响与协同效应

我国居民的空气污染暴露水平持续下降，2022 年我国人口 PM<sub>2.5</sub> 暴露水平与 2021 年持平，但比 2015 年下降了 40.8%，其中京津冀和长三角地区改善最为显著。全国有 38.3% 的人口居住在 PM<sub>2.5</sub> 超标地区，比 2015 年减少 37.5 个百分点。但 O<sub>3</sub> 长期暴露水平较 2021 年增加 6%，与此相关的过早死亡人数达 23 万。NO<sub>2</sub> 年均浓度较 2013 年下降 43.38%，但仍高于 WHO 标准。为达双碳目标，需加强 PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 的治理与严格空气质量标准。气候变化影响健康，高温和多种疾病死亡风险关联。《柳叶刀》报告称，2021 年中国高温造成约 2.5 万人死亡、GDP 损失 1.68%。到 2090 年，高温死亡率预计增长 5.5%，需要建立包括极端天气预警和个体防护的适应措施体系。2046-2050 年，大气 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧浓度预计分别增加 3%和 4%。高温和臭氧增加健康风险。需要推动碳中和政策，改善空气质量，应对气候变化，降低经济成本。

我国居民的 PM<sub>2.5</sub> 长期和短期暴露水平保持下降。基于 TAP (<http://tapdata.org.cn/>) 的数据，2022 年全国人口加权平均的 PM<sub>2.5</sub> 年均暴露浓度为 31.2 μg/m<sup>3</sup>，与 2021 年基本持平，相比于 2015 年(52.8 μg/m<sup>3</sup>) 下降 40.8%。各重点区域的 PM<sub>2.5</sub> 年均暴露水平为 19.7-44.7 μg/m<sup>3</sup>，相比 2015 年下降 31.9%-49.1%，其中，京津冀及周边地区的改善仍然最为明显，长三角次之(43.1%)。2022 年全国约有 38.3% 的人口居住在 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度超过国家二级标准限值的地方，与 2021 年基本持平，相比 2015 年(75.8%) 减少 37.5 个百分点。与 2021 年相比，京津冀及周边地区居住在年均浓度超标区域的人口占比减少最为显著，从 2021 年的 94%下降为 88%；而汾渭平原、长三角及成渝地区居住在年均浓度超标区域的人口占比相比于 2021 年有所上升。

我国居民  $\text{PM}_{2.5}$  污染短期暴露水平也有明显改善。2022 年全国人口加权平均的  $\text{PM}_{2.5}$  污染超标天数（即日均浓度  $>75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）为 24 天，相比 2015 年减少 50.5 天。

2022 年  $\text{O}_3$  长期和短期暴露水平相比于 2021 年在部分地区有所上升。2022 年全国人口加权平均的  $\text{O}_3$  长期暴露水平，即年最大 6 个月平均  $\text{O}_3$  最大 8 小时浓度相比 2021 年上升了  $6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ （6%）。2022 年各重点区域  $\text{O}_3$  长期暴露水平相比 2015 年上升 15.6%-24.3%。汾渭平原  $\text{O}_3$  长期暴露水平上升百分比最为显著（ $12.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。短期  $\text{O}_3$  暴露水平在全国及重点区域均出现上升或持平。2022 年人口加权平均的  $\text{O}_3$  污染超标天数（即日最大 8 小时  $\text{O}_3$  浓度大于  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）为 21.9 天，比 2015 年增加 14.9 天；各重点区域的人口加权平均超标天数为 14-56 天。臭氧重污染事件持续威胁我国居民健康。

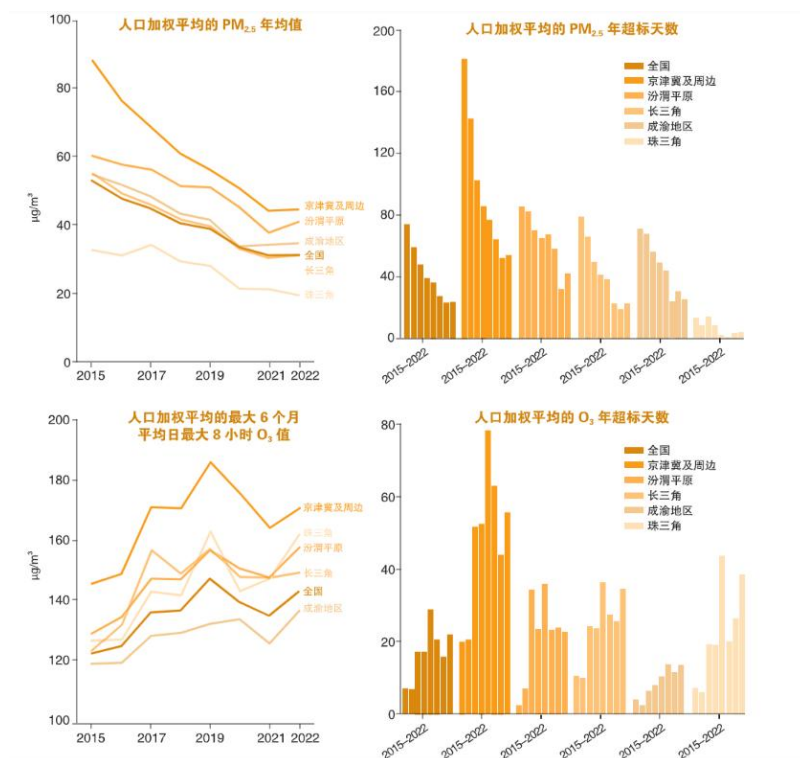


图 2.4-27 2015-2022 年我国  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  污染长期、短期暴露水平的变化

我国居民  $\text{NO}_2$  暴露水平持续降低。根据最新环境空气质量国控

监测站数据,2022 年全国 NO<sub>2</sub> 人口加权年均暴露浓度为 25.73 μg/m<sup>3</sup>, 相比 2013 年 (45.44 μg/m<sup>3</sup>) 和 2017 年 (34.65 μg/m<sup>3</sup>) 分别下降了 43.38% 和 25.77%。但我国 2022 年 NO<sub>2</sub> 年均浓度仍高于 WHO 于 2021 年发布的 AQG 年均基准值 10 μg/m<sup>3</sup>。环境空气质量国控监测站数据显示,2022 年全国人口加权日均 NO<sub>2</sub> 浓度超过 AQG 日均基准值 (25 μg/m<sup>3</sup>) 的天数为 132 天, 相比 2017 年减少 169 天, NO<sub>2</sub> 污染形势改善明显。但目前, 我国 NO<sub>2</sub> 的长期和短期暴露浓度均高于 AQG 基准值, NO<sub>2</sub> 仍是威胁我国居民生命健康的主要大气污染物之一。因此, 实施 NO<sub>2</sub>、大气颗粒物和 O<sub>3</sub> 的协同减排政策, 对于建设美丽中国、实现“双碳”目标至关重要。

碳中和目标将给能源结构和技术更迭带来深刻变革, 进而显著改善空气质量, 提高健康水平。如选择可再生能源主导路径实现 2060 年碳中和目标, 可避免过早死亡总人数为 2900-5000 万例。能源系统、生产侧和消费侧通过对低碳商品和服务的优化选择, 都将显著减少碳排放和污染物排放, 极大改善人群健康综上所述, 在社会管理层面, 我国已经开始主动构建减污降碳相互促进、协同增效的管理制度和政策体系; 在技术应用层面, 有利于能源、产业、交通等结构向低碳化绿色化调整的技术在加速得到应用。然而, 快速经济增长和城镇化带来的能源消费增长需求在目前仍然是驱动全国二氧化碳排放量持续增加的核心因素, 也是我国实现减污降碳协同增效需要应对的最大挑战。为取得更大的空气质量改善效果、收获更多的健康效益, 我国必须选择以高可再生能源为主的碳中和路径, 以碳中和目标推动能源结构和技术更迭、实现深刻变革, 进而更高质量地推动碳达峰碳中和与清洁空气目标的早日实现。

## 2.5 碳中和路径与大气污染控制政策综合影响评价

**标题：** Comprehensive Impact Assessment of Carbon Neutral Pathways and Air Pollution Control Policies in Shaanxi Province of China

**作者：** Zewei Lin, Peng Wang, Songyan Ren, Daiqing Zhao

**期刊：** Resources, Conservation & Recycling Advances

**引言：**《随着全球经济的快速发展和化石能源的广泛使用，全球气候变暖和环境污染问题日益严重。两者都对全球经济活动、粮食安全、生态系统和人类健康产生负面影响。陕西省作为中国燃煤发电大省，在减污降碳方面将面临比中国其他地区更多的挑战。

**研究内容：**本研究将可计算一般均衡（CGE）模型、温室气体与空气污染的相互作用与协同效应（GAINS）模型和健康风险评估模型相耦合，构建了一个综合评估框架，以陕西省为对象，系统地评估了在双碳目标和污染末端控制政策下能源、经济、环境和健康的影响。研究从三个方面进行：首先是研究能源转型和碳捕集与封存技术对碳中和目标的影响；其次是研究污染物排放路径对空气质量改善的贡献；最后是评估不同碳中和路径和污染控制政策的成本效益。

**研究结论：**研究结果显示，低碳政策对改善空气质量的贡献高于末端治理。采取碳中和路径可减少 5 千到 1 万人的过早死亡，并带来相当于 57 亿至 104 亿美元的环境健康效益。从成本收益的角度看，低碳政策在 2030 年之前可获得相当于 GDP 的 0.27% 的正收益。然而，到 2035 年后，碳减排成本将迅速增加，2060 年社会经济总效益将减少 3.16% 至 16.57%。要实现碳中和目标，需要进行颠覆性的技术转变，大力发展零碳和负碳技术，以降低气候治理的政策成本。

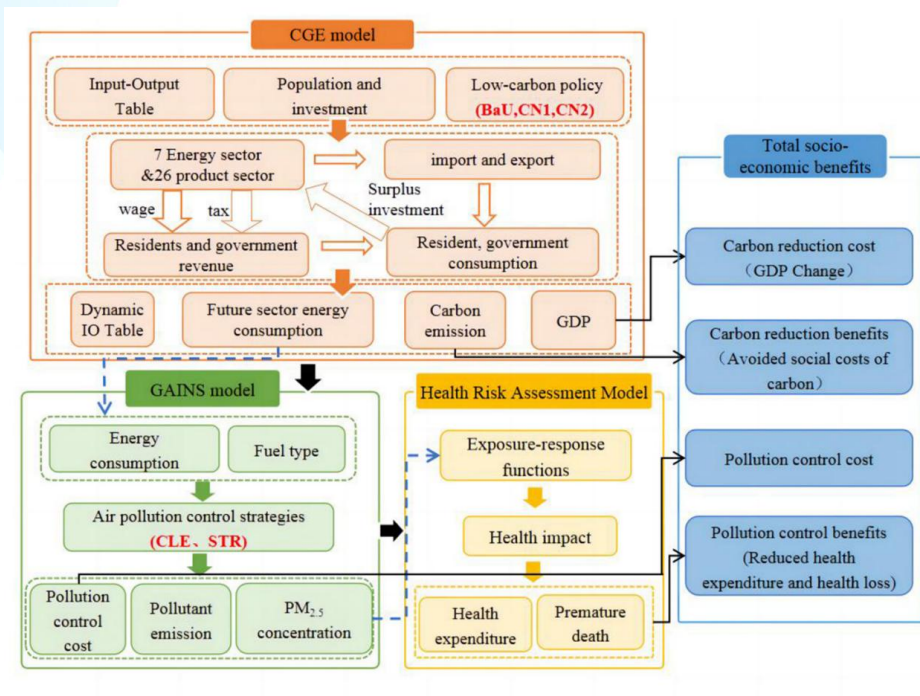


图 2.5-1 CGE 模型碳中和路径研究应用

## 2.6 碳中和转型与可持续发展协同效益和潜在权衡评估

**标题：** Targeting net-zero emissions while advancing other sustainable development goals in China

**作者：** Shu Zhang, Wenying Chen, Qiang Zhang, Volker Krey, Edward Byers, Peter Rafaj, Binh Nguyen, Muhammad Awais & Keywan Riahi

**期刊：** Nature Sustainability

**链接：** <https://www.nature.com/articles/s41893-024-01400-z>

**研究背景：** 全球应对气候变化的净零排放转型使得能—粮—水—空气质量系统的相互联系日益紧密。随着间歇性可再生能源和生物能源的大规模使用，不协调的政策可能会加剧碳减排对能源安全和粮食安全的威胁。在实现碳达峰和碳中和进程中，迫切需要采用综合方法，考虑能源供需之间的相互作用以及不同系统之间的协同，制定具有成本效益的政策转型，以实现更广泛的可持续发展目标议程，并推动决

策者和利益相关者实现迅速、协调的变革。

**研究内容：**清华大学核能与新能源技术研究院陈文颖教授课题组和合作团队建立了一套多模型集成框架，实现了国家级能源模型 China TIMES 2.0、省区级能源模型 China-TIMES-30PE 与土地利用模型 GLOBIOM-G4M、水资源管理模型 CWatM、空气质量模型 GAINS-Asia 的连接，综合考虑了气候和能源政策、可持续发展措施和气候反馈，探索和量化了中国在实现碳中和目标过程中，对环境相关可持续发展目标的协同效益和潜在权衡。研究成果为中国实现碳达峰碳中和的同时提高能源、土地、水、空气质量系统的可持续性提供了长期转型路径，为中国形成多系统协同的可持续发展方案提供支撑。

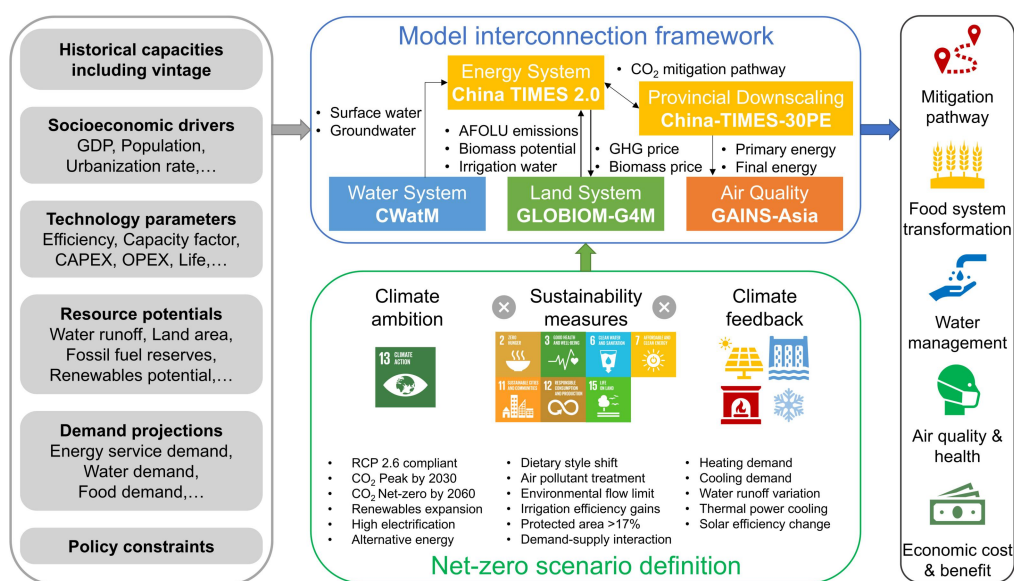


图 2.6-1 多模型连接的综合评估框架

**研究结果：**中国的净零未来转型可以在 2030 年前显著提高可再生能源、空气质量和森林覆盖率，到 2050 年更多的协同效益将来自化石燃料的快速淘汰。但仅靠协同效益不足以实现能—粮—水—空气质量系统的可持续发展，未能推进可持续发展努力可能会对稳定的能源和粮食供应构成风险。各部门需要进一步强化可持续性措施和政策，

以确保在实现净零目标的同时，在其他可持续发展政策领域取得进展。中国 2060 年可再生能源在一次能源中的比例约 66%，终端部门的燃料替代推动电力使用增加，威胁能源系统安全的风险逐渐从外部对化石燃料的依赖转向内部灵活性挑战。土地（粮食）系统的提效对于碳减排和粮食安全至关重要。2050 年以后，能源作物需要大规模种植，到 2100 年，能源作物种植面积约占全国土地面积 3%。对生物质的需求将在 2060 年后对粮食系统造成压力。研究识别到气候行动和水资源节约之间显著的协同关系，通过推行高效灌溉、减少食物浪费、调节膳食结构等措施能显著减少灌溉水需求。到 2060 年，碳中和转型带来的火电退役和空冷机组比例增加，使得冷却取水减少，从而能源系统取水量较 2019 年下降 38%，另外，净零转型预计将减少 70% 的空气污染物排放，显著改善空气质量，并带来大量的健康效益。然而，单靠气候行动的协同效益无法确保实现空气质量目标，需要进一步采取严格的空气污染控制措施。

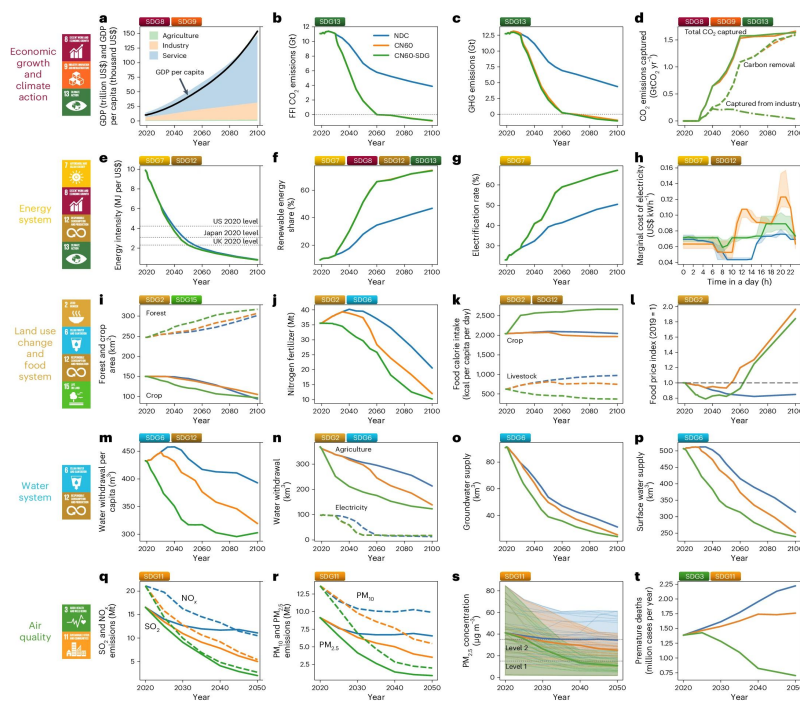


图 2.6-2 中国环境相关的可持续发展指标的演变进程

**研究结论：** 研究进一步评估了净零转型的协同效益和潜在权衡。研究发现，净零转型将带动超过 10 万亿美元的能源系统投资，电力、氢能、储能和负排放技术是投资的重点。交通、工业等部门的投资将会较参考情景有所下降。碳减排带来的空气质量改善健康效益货币化累计收益为 2.1 万亿元，进一步的空气污染控制措施 2025 年后在所有省份具有成本效益，并且累计带来 5.4 万亿元的健康效益。

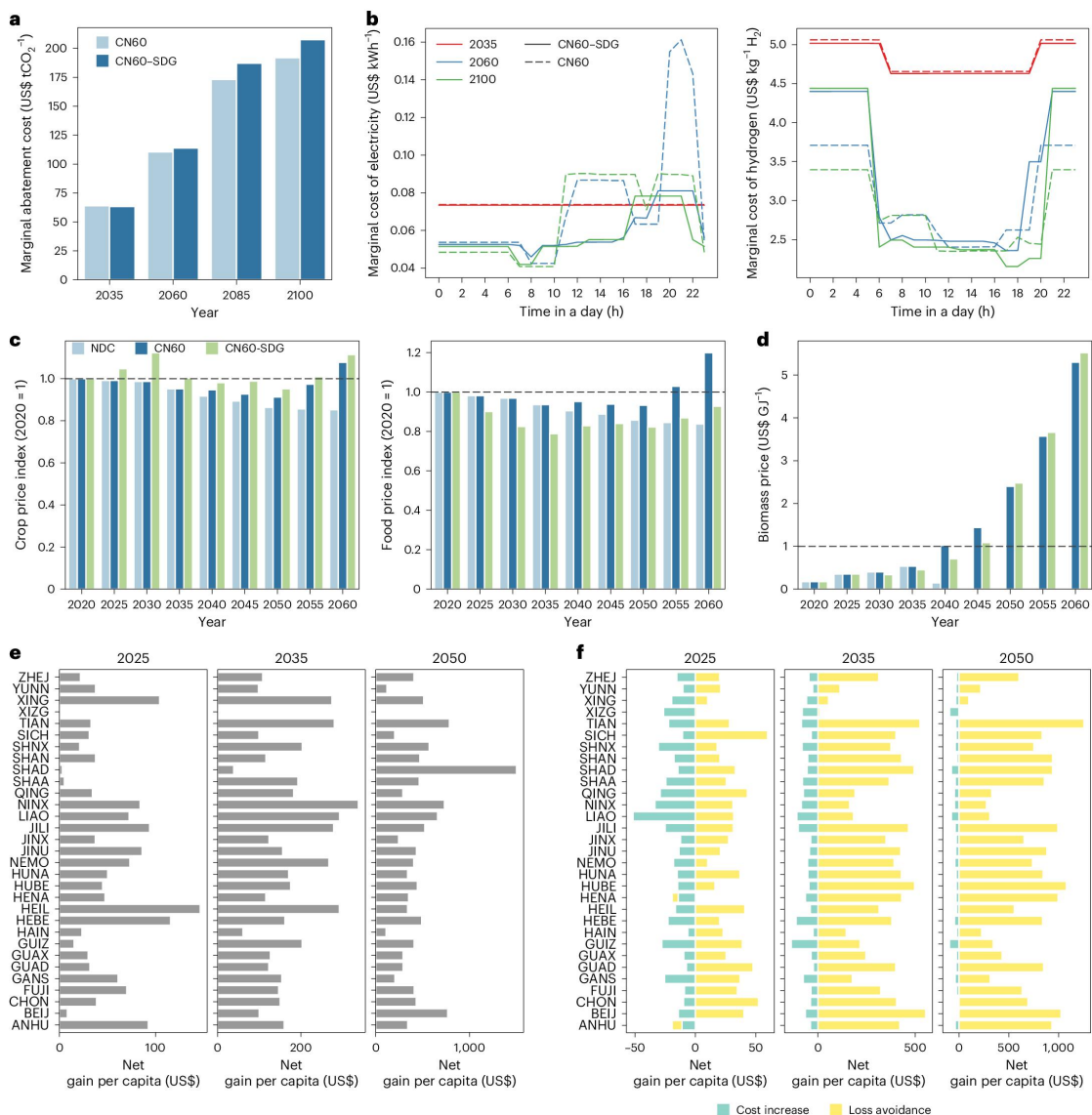


图 2.6-3 中国能粮水空气质量系统转型的经济分析

### 第三章 2024 年减污降碳协同政策梳理

随着全球气候变化的严峻挑战和环境污染的日益严重，2024 年成为了中国减污降碳协同增效的关键之年。在这一年，我国政府出台了一系列政策，旨在推动经济社会发展全面绿色转型，实现碳达峰碳中和目标。这些政策的实施，不仅体现了我国在环境治理和气候变化应对方面的决心以及对全球气候行动的承诺，也为减污降碳领域提供了明确的研究方向和实践路径。我们有责任深入研究相关政策背后的科学原理，评估其环境效益，以期对相关政策的实施提供有效支撑。

#### **3.1 2024 年 1 月 23 日至 24 日，生态环境部在京召开 2024 年全国生态环境保护工作会议。**

1 月 23 日至 24 日，生态环境部在京召开 2024 年全国生态环境保护工作会议。会议以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，全面贯彻落实党的二十大和二十届二中全会以及中央经济工作会议精神，深入学习贯彻习近平生态文明思想和全国生态环境保护大会精神，总结 2023 年生态环境保护工作，分析当前面临形势，安排部署 2024 年重点任务。生态环境部党组书记孙金龙出席会议并讲话，生态环境部部长黄润秋出席会议并作工作报告。



图 3.1-1 生态环境部在京召开 2024 年全国生态环境保护工作会议

### 3.2 新华社北京 12 月 12 日消息，中央经济工作会议 12 月 11 日至 12 日在北京举行

中央经济工作会议在北京举行，习近平发表重要讲话：协同推进降碳减污扩绿增长，加紧经济社会发展全面绿色转型。2024 年 12 月中央经济会议聚焦减污降碳，强调全面绿色转型。会议提出要深化生态文明体制改革，推动能源绿色低碳转型，加快“沙戈荒”新能源基地建设，建立零碳园区，推进全国碳市场建设，并建立产品碳足迹管理体系和碳标识认证制度。



图 3.2-1 12 月 11 日至 12 日，中央经济工作会议在北京举行。

### 3.3 2024 年 1 月 5 日，国务院第 23 次常务会议通过《碳排放权交易管理暂行条例》（中华人民共和国国务院令 第 775 号）

2021 年 7 月 16 日上午，全国碳排放权交易市场正式启动上线交易。为更好实现“双碳”目标，完善全国碳排放权交易体系顶层设计和制度框架，国务院于 2024 年 1 月 5 日第 23 次常务会议通过了《碳排放权交易管理暂行条例》，并于 2024 年 5 月 1 日起施行。该条例的出台旨在规范碳排放权交易及相关活动，加强对温室气体排放的控制，积极稳妥推进碳达峰碳中和，促进经济社会绿色低碳发展，推进生态文明建设。



图 3.3-1 相关文件公示

### 3.4 2024 年 1 月 22 日,全国温室气体自愿减排交易市场(CCER)重启

2012 年 6 月,全国温室气体自愿减排交易市场开启,为了规范市场,国家发改委在 2017 年关闭 CCER,暂缓 CCER 项目受理。2024 年 1 月 22 日,全国温室气体自愿减排交易市场重新开启,CCER 的重新启动是我国到达“双碳”目标的又一次里程碑式的进步。

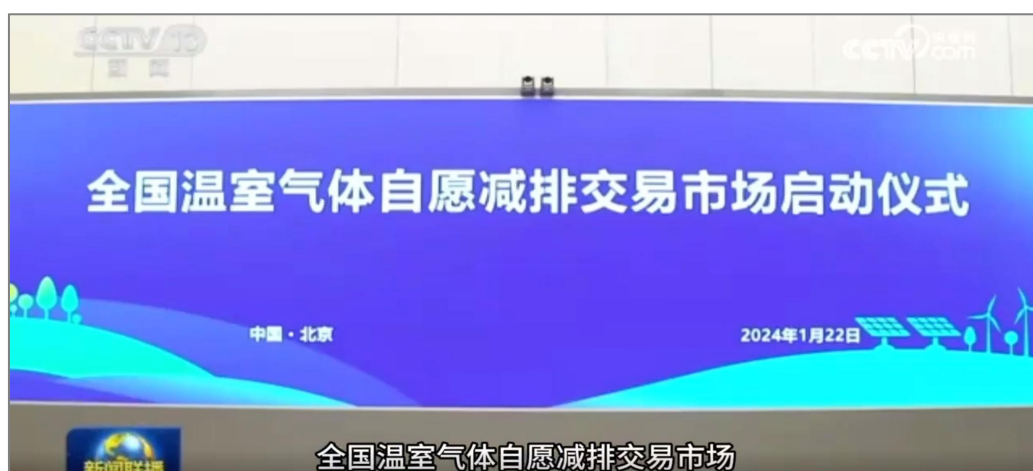


图 3.4-1 相关新闻报道

### 3.5 2024 年 5 月 29 日，国务院发布《关于印发〈2024—2025 年节能降碳行动方案〉的通知》（国发〔2024〕12 号）

国务院印发《2024—2025 年节能降碳行动方案》（以下简称《行动方案》）。《行动方案》以习近平新时代中国特色社会主义思想为指导，深入贯彻党的二十大精神，全面贯彻习近平经济思想、习近平生态文明思想，坚持稳中求进工作总基调，完整、准确、全面贯彻新发展理念，一以贯之坚持节约优先方针，完善能源消耗总量和强度调控，重点控制化石能源消费，强化碳排放强度管理，分领域分行业实施节能降碳专项行动，更高水平更高质量做好节能降碳工作，更好发挥节能降碳的经济效益、社会效益和生态效益，为实现碳达峰碳中和目标奠定坚实基础。



图 3.5-1 相关文件公示

### 3.6 2024 年 6 月 4 日，生态环境部等十五部门联合发布《关于印发〈关于建立碳足迹管理体系的实施方案〉的通知》（环气候〔2024〕30 号）

生态环境部等 15 部门近期联合印发《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》（以下简称《实施方案》），为今后一个时期我国产品碳足迹管理体系建设明确“任务书”和“施工图”。建立碳足迹管理体系，有利于引导企业开发生产低碳产品，营造低碳市场环境，也利于引导低碳产品消费，创造低碳产品需求，对推动绿色低碳高质量发展 and 助力实现碳达峰碳中和目标具有重要意义。



图 3.6-1 相关文件公示

### 3.7 2024 年 8 月 2 日，国务院办公厅发布《关于印发〈加快构建碳排放双控制度体系工作方案〉的通知》（国办发〔2024〕39 号）

2024 年 8 月 2 日，国务院办公厅发布《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》。其中提到：《方案》分 3 个阶段作出工作部署。第一阶段是当前至 2025 年，重点是夯基垒台，着力完善地方、行业、企业、产品碳排放统计核算体系，提升“双碳”相关计量、统计和监测能力，为“十五五”时期在全国范围实施碳排放双

控奠定基础。第二阶段是“十五五”时期，在全国范围内实施碳排放双控制度，以强度控制为主、总量控制为辅。建立碳达峰碳中和综合评价考核制度，健全重点用能和碳排放单位管理制度，开展项目碳排放评价，建立健全产品碳足迹管理体系和碳标识认证制度，确保如期实现碳达峰目标。第三阶段是碳达峰后，调整优化碳排放双控制度，以总量控制为主、强度控制为辅。建立碳中和目标评价考核制度，进一步强化对各地区及重点领域、行业、企业的碳排放管控要求，推动碳排放总量稳中有降。



图 3.7-1 相关文件公示

### 3.8 2024 年 8 月 11 日，中共中央 国务院《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》正式对外发布

2024 年 8 月 11 日，中共中央、国务院《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》（以下简称“意见”）文件正式公布。作为加快经济社会发展全面绿色转型的顶层设计，文件以碳达峰碳中和工作为引领，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，深化生

态文明体制改革，健全绿色低碳发展机制，加快经济社会发展全面绿色转型，旨在加快形成节约资源和保护环境的空间格局、产业结构、生产方式、生活方式。



图 3.8-1 相关文件公示

### 3.9 2024 年 9 月 9 日，生态环境部发布《关于公开征求<全国碳排放权交易市场覆盖水泥、钢铁、电解铝行业工作方案（征求意见稿）>意见的函》（环办便函〔2024〕299 号）

《方案》中表示，将分启动实施和深化完善两个阶段做好水泥、钢铁、电解铝行业纳入全国碳排放权交易市场相关工作，实现积极稳妥有序扩大全国碳排放权交易市场覆盖范围（以下简称扩围），以全国碳排放权交易市场为主体完善碳定价机制，优化碳减排资源配置，降低全社会碳减排成本，推动建成更加有效、更有活力、更具国际影响力的碳市场。



图 3.9-1 相关文件公示

### 3.10 2024 年 11 月 6 日，生态环境部发布《中国应对气候变化的政策与行动 2024 年度报告》

为全面反映我国在应对气候变化领域的政策行动和工作情况，向国内外介绍中国积极应对气候变化成效，生态环境部编制了《中国应对气候变化的政策与行动 2024 年度报告》，并在 2024 年 11 月 6 日生态环境部例行新闻发布会上正式发布。《年度报告》全面介绍了 2023 年以来各领域各部门应对气候变化政策、措施和重点工作的成效，梳理了中国应对气候变化的新部署新要求，展示了中国减缓、适应气候变化、全国碳市场建设、政策体系和支撑保障以及积极参与应对气候变化全球治理等方面的进展，并阐述了中方关于《联合国气候变化框架公约》第 29 次缔约方大会的基本立场和主张。



图 3.10-1 相关文件公示

### 3.11 2024 年 11 月 30 日，清洁空气政策伙伴关系发布《中国碳中和与清洁空气协同路径（2024）》

清洁空气政策伙伴关系（CCAPP）、清华大学、南京信息工程大学、生态环境部环境规划院、北京大学共同发起，在能源基金会支持下，清洁空气政策伙伴关系邀请国内 50 余位一线学者共同编制并发布了《中国碳中和与清洁空气协同路径（2024）》。报告在前期研究基础上，进一步完善协同治理监测指标体系，在空气污染与气候变化、治理体系与实践、结构转型与治理技术、大气成分源汇及减排路径、健康影响与协同效益等五方面设计了 20 项指标，通过追踪各项指标的进展，分析中国在碳中和与清洁空气协同道路上面临的挑战并提出解决思路。



图 3.11-1 相关文件公示

## 第四章 减污降碳协同治理地方实践案例

城市是减污降碳协同创新的重要主体。一些城市根据自身实际情况，结合美丽城市、无废城市、低碳试点城市、气候投融资试点城市等示范工作中，更加突出减污降碳协同增效理念和行动，积极探索不同类型城市开展减污降碳协同创新试点。京津冀及周边地区、长三角和珠三角等重点区域，围绕创新减污降碳协同政策体系、创新减污降碳协同减排路径、创新减污降碳协同管理机制，深入开展工业、交通运输、农业、城乡建设等重点领域协同创新，形成了许多行之有效、各具特色的实践案例。

### 4.1 京津冀及周边地区

天津市积极推进绿色低碳高质量和企业数字化转型协同发展，以创新为引领，在钢铁行业先行先试，多措并举，持续推动减污降碳协同增效，提升企业绿色低碳高质量发展水平。一是“长改短”促进结构优化升级。天津某钢铁集团加快推进长流程工序（矿石—烧结—高炉炼铁—转炉炼钢）改造成短流程（废钢—电炉冶炼）。在炼钢总产能不变的前提下，将一座炼钢转炉替换成两座现代化节能智慧型电炉，同时淘汰两座 588 立方米高炉和一台 200 平米烧结机。经初步测算，短流程与原长流程相比，吨钢综合能耗降低 50%，水耗降低 40%，碳减排 48%，颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等主要污染物排放量减少 70%。按照电炉钢年产量 130 万吨计算，每年可降低碳排放 106 万吨，各类污染物排放量降低 112.32 吨。二是超低改造推动持续减污。该钢铁集团 2018 年以来持续开展有组织、无组织、清洁运输等超低排放改造治理工程，提升污染物排放管理水平，用于超低排放治理、绿色低碳项目建设。通过深度治理，各类污染物排放达到国内一流标准，远低于国家排放限值，达到国家环保绩效 A 类企业水平。经初步评

估，2022 年该钢铁集团颗粒物、二氧化硫、氮氧化物等主要污染物排放总量比超低排放改造实施前降低 49% 以上。三是清洁运输提升绿色低碳水平。2021 年 8 月天津氢能运输示范应用场景项目落成投用以来，截至 2022 年 12 月底，相继建成 1000 公斤/12 小时自用加氢站 1 座、500 公斤/12 小时撬装式加氢站 2 座，累计投入氢能源重型营运货车 112 辆、运输量达 176.87 万吨、行驶 206.16 万公里，减排二氧化碳 1898 吨。此外，还打造了“天津港—河北定州—天津津南”单程 300 公里的氢能高速示范运营线路。该钢铁集团建设两条铁路运输专用线和铁路集装箱卸车专用线，成为天津市唯一具有多条铁路专用线直接进厂的钢铁企业。专用线投用以来，该钢铁集团单日铁路最大接卸能力提升至 8 列，年焦炭集装箱发运量达到 60 万吨，全口径清洁运输比例超过 80%。每年减少重卡运输近 13 万车次，折合降碳约 13650 吨。四是新能源增添减污降碳新动力。该钢铁集团积极开发太阳能，利用厂房屋顶、水处理 600 亩水面建设了 9.5MW·h 屋顶分布式光伏发电、全国冶金企业首家水面渔光互补式 40MW·h 光伏发电，预计每年发电量可达 4600 万度，年可减排二氧化碳 4.1 万吨。此外，55MW 富余煤气综合利用发电项目已并网发电，预计可发电 2 亿度/年，自发电比例（余热、余压、余气、光伏新能源）达 60%。该钢铁集团还建设了生产余热城市供暖工程，现已具备对外 300 多万平方米城市居民供暖能力。总体上，年预计可减排二氧化碳 27 万吨以上。该钢铁集团联合科研机构共同进行技术攻关，加快高炉富氢冶炼项目开发，下一步将实施氢冶金项目实验。按照每吨铁喷吹天然气 100 立方米测算，吨铁可降低煤炭焦炭消耗约 10 公斤，预计每年减少碳排放近 45 万吨。

河北省唐山市加快推动绿色新能源重卡更新替代。唐山市以重点

行业“创 A”工作为契机，引导企业开展新能源重卡更新替代，提高清洁运输水平。不断完善政策支撑体系，先后制定出台《唐山市新能源汽车换电模式应用试点实施方案》《唐山市绿色能源体系发展实施方案》等一系列政策文件，有力推进新能源重卡的推广应用。逐步完善充电桩、换电站、加氢站布局，构建“南北三纵、东西一横”的核心运输场景，搭建城市级干线换电网络。截至目前，唐山市新能源重卡保有量为 11857 辆（其中电动 10555 辆，氢能 1302 辆），数量位居全国地级市第一，累计年可减排 NO<sub>x</sub> 4198.3 吨、VOCs 114.7 吨、PM<sub>2.5</sub> 23.9 吨、SO<sub>2</sub> 125.8 吨、碳减排 24.3 万吨。

**河南省郑州市特种车辆驶入减污降碳新赛道。**“3+2”特种车辆，即渣土车、混凝土搅拌车、重型柴油货车（含环卫车）等 3 类重型车辆，出租车（含网约车）、轻型城市配送物流车等 2 类轻型车辆，均是对郑州市中心城区空气质量影响较大的高频行驶车辆。河南省郑州市以“3+2”特种车辆新能源替代为契机，大力发展新能源车产业，研究出台鼓励老旧车辆提前淘汰更新为新能源汽车财政奖励政策，鼓励省市重点项目优先使用新能源车辆，并开放新能源特种车辆路权。截止 2022 年底，郑州市新能源混凝土运输车达到 1713 台，保有量位于全国第一位；新能源渣土车达到 1400 台，保有量位于全国前列；新能源出租车达到 3.35 万辆，新能源占比 76%，其中巡游出租车 1.18 万辆全部新能源化；公交车达到 6717 辆，全部实现新能源替代；新能源物流车达到 2.39 万辆。

## 4.2 长三角地区

**浙江省杭州市**落实绿色亚运办赛理念，将减污降碳协同创新试点融入亚运会建设全过程，打造绿色亚运标志性成果。一是实施亚运会绿色行动。在打造绿色健康场馆、改善生态环境质量、绿色电力赋能、

公众绿色出行等方面，取得了一系列全国领先、国内首创的实践成果。运河亚运公园体育馆等 5 个项目取得三星级绿色建筑设计标识证书，12 个项目取得二星级绿色建筑设计标识证书，杭州亚运村成为浙江首个正式获得国家二星级绿色生态城区设计阶段评价标识的示范项目，杭州奥体中心体育场、游泳体育馆、综合训练馆获得全国建筑业绿色施工示范工程；打造全省首个重大活动环境质量保障指挥平台，已在国际论坛、进口博览会、互联网大会保障中进行实战应用，首次实现线上线下并行保障，为亚运会提供有力支撑；省内首个大型赛事活动绿色低碳运营指南地方标准已在省市场监管局正式立项；开展绿色电力交易，亚运场馆、亚运村等常规电力使用绿电；首创首用楼宇数智低碳运行策略，构筑大莲花场馆降碳提效智能绿网，实现亚运首个场馆的边缘能效提升、减污降碳分析“双策协同”。二是开展绿色亚运活动，提升绿色减碳意识。发动 183 万人次参加“我为亚运种棵树”活动，累计植树 540 余万株，居全省前列。开展“人人 1 千克、助力亚运碳中和”活动，助力亚运会碳中和，普及绿色低碳知识，鼓励践行绿色生活方式，首次把绿色生活、互联网参与、减污降碳等工作有机结合。建设公共自行车服务点 5622 处，共享单车 25 万辆，每年实现碳减排约 7 万吨。三是坚持为民服务理念，提升群众获得感。加强环境污染防治，完成水泥超低排放改造项目 9 个、低挥发性有机物（VOCs）原辅材料源头替代项目 30 个、VOCs 治理项目 100 个、省控断面走航排查 17 个、县级以上集中式饮用水源地勘界 9 个。打造全国首创的“三枢一轴”综合交通枢纽群，城市绿色出行比例达到 76.6%，绿色出行服务满意度达到 90.3%。推行公园+亚运场馆和公园+体育设施建设，建成 4000 平方米以上公园绿地超 90 处、城市小公园 53 个，为广大市民营造绿色便捷的全民健身体育空间。余杭区建

设上线“余杭碳眼”减污降碳协同管理应用。余杭区具有第三产业占比高、高新企业数量多、生态环境基础较好等特点。针对排放家底不明确、减污降碳管理协同性不足、企业降碳路径不清晰三个问题，以生态环境数字化改革为抓手，集成 252 项数据，建立 36 项评价指标，构建 1 个全景驾驶舱、2 个用户端（企业端及政府端）、4 个子场景的“1+2+4”架构。“余杭碳眼”通过搭建“碳普查”“碳分析”“碳管理”“碳服务”四个子场景，实现污染物及碳排放情况动态监测、科学评估、协同管理。碳普查子场景归集能源数据仓库（一体化平台）、企业上报、在线监测等多数据来源，集成电力消耗、水资源消耗、大气污染物排放、固体废弃物产量等 252 项数据。通过数据交叉验证模型校验数据准确性，建立真实可靠的企业排放账户，摸清区域、行业、企业碳排放家底。碳分析子场景包括碳排放综合分析、减污降碳协同分析、碳达峰推演等主要功能，识别碳排放与大气污染物排放协同管理潜在突破点，提升减污降碳协同政策的精准度和有效性。碳管理子场景包括碳排放目标责任分配、减污降碳协同增效指数、排放权有偿使用与转让等功能，其中协同增效指数集成企业单位产值污染物排放、单位产值碳排放、非化石能源占比、工业固废综合利用率、亩均税收等数据信息，按照企业减污、降碳、协同、增效 4 个维度量化赋分，并根据指数评分结果将企业分为“红黄绿”三类。碳服务子场景通过企业碳账户数字化管理，帮助企业掌握自身及同行业排放情况；探索碳普惠减排交易机制，汇集区内林业碳汇、企业减排量等碳普惠资源；打造碳服务商城，根据企业指数测算分项得分，针对性推荐减污降碳咨询服务、技术服务、金融服务、绿色认证服务等，打破绿色资源获取壁垒，降低企业转型成本。

### 4.3 珠三角地区

深圳市积极探索电镀、文旅等特色行业减污降碳协同路径。深圳龙岗区立足工业大区现状，坚持从实际出发，成立“减污降碳”先锋服务队，组织环保行业专家、学者探索企业减污降碳协同增效落地路径，综合梳理辖区近 50 家电镀企业基本情况，筛选出试点企业进行试验，全周期、全链条、全要素、全方位诊断分析企业生产运营全过程的产污治污、碳排放情况，指导帮扶企业优化生产工艺与流程，创新污染治理路径，最终实现污染物、碳排放量“双降”，产品质量、价格“双升”。基于此，龙岗区出台《龙岗区电镀行业减污降碳协同增效指引（试行）》，为企业送上操作指南，开辟出深圳市首条重点行业企业低消耗、少排放、能循环、可持续的减污降碳协同增效新路径，推广减污降碳“龙岗经验”。深圳大鹏新区发布全省首个减污降碳协同指数，出台文旅企业减污降碳指引。2022 年发布大鹏新区减污降碳协同指数，旨在通过全面核算评估减污降碳指数，反映新区相关工作推进情况和工作成效，为新区系统推进减污降碳工作提供指引。2023 年，大鹏新区率先出台《大鹏新区文旅企业减污降碳指引》，从文旅行业全环节和全生命周期出发，全面识别采购、运输、仓储、销售、处置等不同环节中碳排放、污染物排放典型行为，提出了针对性强、实用性强、实操性高的 59 类、305 项减污降碳技术，以指引众层次、各类型的文旅企业落实减污降碳协同工作要求。

广东省佛山市探索纺织印染行业减污降碳协同创新技术路径。佛山市高明区立足传统制造业高质量发展，谋划构建“双循环+多联供”体系，实施“集聚发展、集中治污、中水回用、统一供能、监管提升”五项工程，着力探索纺织印染行业减污降碳协同创新技术路径，推动实现碳排放量削减 34%，化学需氧量削减 74%，氨氮削减 71%，二

二氧化硫削减 20%，氮氧化物削减 17%。一是集约节约利用资源。高明区摒弃对传统制造业“一关了之”的做法，将大明路片区 9 家印染企业整合进驻到秋盈纺织生态科技产业园，占地面积由 950 亩缩减为 99 亩，缩减用地 89.6%，实现产业空间立体扩容，腾出优质城市更新空间，并与西安片区 5 家印染企业实现传统制造业聚集化发展。园区升级使用低浴比染色机等先进设备，结合余压余热回收和变频调节用电等手段减少水、电、热使用量，节约电能约 436 万千瓦时/年，节约蒸汽消耗 11 万吨/年。高明区通过纺织印染产业减污降碳协同提升，有效减少二氧化硫排放量 25 吨/年、氮氧化物排放量 123 吨/年、污水产生量 165 万吨/年。二是共建共享环保设施。建设处理能力 3 万立方米/天的绿源水质净化中心，集中处理秋盈纺织生态科技产业园区工业废水，实现化学需氧量 $\leq 40$  毫克/升，氨氮 $\leq 8$  毫克/升，中水回用率 $\geq 70\%$ ，推动园区工业污水集中高标准处理和中水高比例回用，提高整体污染治理效能，同时降低企业治污压力。依托大唐热电冷联产项目，谋划实施水、电、冷、热“多联供”体系，统一供给秋盈纺织生态科技产业园、润泽（佛山）国际信息港等园区内用能企业。通过实施热电冷联产集中供热，减少在用工业锅炉 23 个，实现二氧化硫、氮氧化物分别削减 44 吨/年、197 吨/年，可节约蒸汽使用成本约 4200 万元/年。三是智慧监管减污减碳。建设水环境大数据监管系统，覆盖园区主要涉水单位和重点河流，实时监控企业产污、治污、排污情况及水质水情。立足减少荷城街道中心城区第三污水处理厂（以下简称“三污”）尾水和园区内印染企业工业废水排放，探索构建大、小水循环“双循环”新体系，每天可减少取用新鲜水约 2.3 万吨，相比大、小循环前减少比例约 50%；集中污水、零散污水、化学需氧量、氨氮分别减排 767 万吨/年、255 万吨/年、365 吨/年、64 吨/年。“双循环+

多联供”体系的成功构建，合计可减少园区碳排放 11 万吨/年。

#### 4.4 其它地区

福建省厦门市开展企业减污降碳试点，探索长效机制，降低企业生产过程造成的污染物排放和碳排放。强化服务，打造绿色低碳发展新动力。建立“一企一档”，摸清企业排放家底。对生产工艺、排污环节、用能设备、化石燃料使用、原辅材料等方面进行逐一梳理，分析企业的能源消费、主要污染物排放因子和温室气体排放种类等状况，摸清底数，为分析减污降碳提供数据支撑。实施“一企一策”，深挖企业减排空间。对标国内、国际先进的生产技术标准、行业先进值，分析企业生产过程的减污潜力和降碳空间的协同作用机制，编制减污降碳协同增效的技术和管理改善工作方案，探索减排潜力。算清“一企一账”，激发企业参与动力。为企业量身定制减污降碳协同增效技术路线，指导企业预估节能、降耗、污染物减排等效益，形成一方案一对策，核算环境账、经济账、社会账，从实际利益和绿色发展需求推动企业主动参与“减污降碳”试点行动，形成内生动力机制。压实责任，构建绿色低碳发展新机制。建立“组与组”联动机制，强化组织保障落实。设立技术工作组，与试点单位进行良好互动，推动企业建立以主要负责人为第一责任人，各部门主管参与的“减污降碳长效机制”工作小组，统筹推进减污降碳工作。鼓励企业根据自身条件设定减污降碳专项资金，健全温室气体管理体系、环境管理体系建设与运行，压实企业绿色低碳发展主体责任。建立“面对面”互动机制，推动全员参与促提升。将绿色低碳相关政策、技术内容等引入企业，实现横向到边、纵向到底全方位互动，推动全员参与减污降碳行动。试点工作以来，累计收到员工改善方案 148 条，涉及节材降耗减排提案 55 条，有效提升企业员工参与的积极性，形成绿色低碳发展的良好氛围。建立“手

把手”带动机制，优化指导帮扶解难题。技术工作组每月进行现场走访，获取企业创建工作基础数据，跟踪重点项目执行情况，并根据企业需求增加现场指导频次，交流试点工作的成果与不足，及时为企业协调解决实施过程中遇到的痛点和难点，保障减污降碳长效机制取得成效。

## 第五章 减污降碳协同治理研究展望

### 5.1 减污降碳协同理论与机制研究

以多污染物协同控制理论、减污降碳同源性与异质性理论为基础，研究揭示减污降碳协同关键驱动要素与传导机制，建立减污降碳协同分区理论与技术方法，突破多要素减污降碳系统优化理论与技术方法，提出有利于减污降碳协同增效的空间分区方案，为推动减污降碳协同工作提供理论基础。

#### (1) 多污染物-温室气体跨介质转移转化与协同控制理论

研究污染物和温室气体在多介质环境间的物理化学传输及形态变化规律，揭示由关键物质在不同介质间迁移转化而产生的环境效应及其影响机理；研究多源多污染物与温室气体排放的源汇关系，建立不同介质中关键污染物和温室气体产排阻控机制，发展典型场景的多介质碳污协同减排与风险控制新原理、新方法和新技术；实施污染物、温室气体、生态建设等多目标管理，强调源头治理，生态环境保护和温室气体减排真正实现协同增效的有机融合，大气、水、固废、土壤等环境要素以及生态建设与温室气体减排的多范畴的协同治理。以协同减排成本效益最优为导向，研究温室气体与多污染物协同控制新原理与新理论。

#### (2) 减污降碳同源性与异质性理论

环境污染与碳排放具有高度同根同源性，实施减污降碳协同治理，是一体实现“美丽中国”建设与“双碳”战略目标的有效途径。研究建立碳污同源性与异质性理论，特别是针对减污降碳的异质性理论开展深入研究。重点包括：污染物与碳排放特征的异质性，污染物与碳排放的环境气候影响的异质性，重点行业、领域、环节减污降碳技术的异质性。完善减污降碳理论体系，研究减污降碳内涵与外延，研究目标

协同、区域协同、领域协同、任务协同、政策协同、监管协同等六维协同的理论基础，支撑减污降碳协同治理工作。减污降碳协同增效以同根同源性为理论基础，以排放特征、环境影响、减排技术、减排效益、管理模式等异质性为突破口，实现环境、气候、经济、社会效益多赢。

### **(3) 减污降碳协同多维驱动机制研究**

以精细化碳污融合排放清单为基础，开发多元综合评价模型，开展协同驱动要素多维解析。耦合排放清单模型、经济与排放脱钩评估模型、指数分解模型，构建适用于减污降碳协同驱动要素识别的技术方法，评估经济发展与多介质污染物、温室气体排放之间的耦合关系、脱钩程度及演变趋势，从经济-能源-产业-交通结构、重点排放行业等多层次、多角度识别减污降碳协同的关键驱动因素，研究污染物与温室气体排放变化的内在驱动要素及传导机制。通过识别大气、水、固废等多环境要素污染物与温室气体协同治理的关键环节，针对重点领域重点行业重点环节，从经济-能源-产业-交通结构、重点排放行业等多层次、多角度解构减污降碳协同的关键驱动因素，从碳污产排的全生命周期、全链条量化碳污协同治理的拮抗效应，揭示碳污协同交互作用机制。从治理技术、调控优化、管理政策等多视角、跨领域、跨部门协同开展减污降碳协同治理。以碳-气协同为例，可通过节能升级改造、可再生能源发展等能源技术，以及重点行业大气污染深度治理与节能降碳等关键技术，实现减污降碳协同；碳-水协同领域，通过研发水污染物低碳消除技术、水载能源高效回收、存储、转化、利用等关键技术，实现碳污协同治理。

### **(4) 多因素耦合的减污降碳协同控制分区理论研究**

污染物和温室气体排在空间分布上具有高度一致性，在行业部

门上表现出集聚效应。从空间上看，排放热点主要分布在经济发达、人口稠密、能源消费量大的重点区域或城市群，从行业部门看，电力、工业、交通运输、民用等均是污染物和碳排放的主要来源，其中工业排放贡献最大。基于多介质污染物与温室气体融合排放清单、减污降碳协同驱动要素与传导机制，耦合地理信息系统(GIS)、机器学习、大数据分析和 K-means 聚类统计等多模型多算法构建协同分区理论与技术方法。利用所构建的协同分区技术方法，深入剖析全国及不同区域多介质污染物与温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub>等)排放的空间分布特征、减污降碳协同驱动力及其形成机制，进而研究减污降碳协同治理的重点区域区划方案。

#### (5) 多要素减污降碳系统优化理论

“碳污协同”包括“降碳带动减污”和“减污带动降碳”两个方向，一方面，降碳对生态环境质量改善起着源头牵引作用，另一方面，大气污染防治政策倒逼能源结构调整和产业结构转型升级，以结构调整为主的源头治理，将有力推动碳减排工作，也即，两者具有交互作用与效应传导机制。综上，减污是根本，降碳是牵引，协同是路径方向，增效是目标，以同根源性（横向）和传导机制（纵向）为理论基础，以异质性为关键突破点，遵循减污降碳内在联系和客观规律，通过倒逼能源结构、产业结构、交通运输结构等转型升级，降低能源和原材料消耗，改变“大量生产、大量消耗、大量排放”的生产模式和消费模式，推动减污降碳协同增效，探索放大正协同效应、减小负协同效应的最佳协同路径，以达到最优的减污降碳协同效益。基于“次生效益”（Secondary Benefits）和“协同效应”（Co-benefits）的概念，统筹经济-能源-产业-环境等多领域、大气-水-固废-土壤-生态等多介质、污染物-温室气体等多指标，考虑国家战略目标、区域协同目标、行业

协同目标三个维度的相互影响机制，针对协同减排综合成本效益最优、气候与环境效益最大化、社会公平性等多种决策偏好，研究建立减污降碳协同优化理论与方法，完善减污降碳协同增效理论体系。

## 5.2 减污降碳协同治理技术适用性评价研究

识别大气污染物、水污染物、固体废物等多环境要素与温室气体协同治理的关键环节，研究建立协同治理技术、措施与成本效益库，突破多环境要素与温室气体协同治理、固碳增汇等技术的综合评价方法，研究提出不同环境要素减污降碳协同最佳可行技术，引领重点行业/领域减污降碳协同发展方向。

### (1) 减污降碳协同治理技术适用性研究

**大气污染物与温室气体协同治理技术：**识别电力、钢铁、水泥、交通等重点行业领域的减污降碳的关键环节，研究建立不同行业/领域/环节减污、降碳以及协同治理的技术与措施库，研究不同部门不同技术的协同减排效果、边际减排成本，构建不同行业的减污降碳成本函数曲线。开发不同减排措施减排效果与减排成本动态评估模型，实现减排措施与减排效果、减排成本参数之间的联动，量化评估不同技术措施的协同减排效果及其经济成本差异，并分析减污降碳协同治理技术适用性，研究提出大气环境领域减污降碳协同最佳可行技术。

**水污染物与温室气体协同治理技术：**综合考虑水污染物削减与温室气体排放规律的异质性，基于水生态环境质量改善与水领域减污降碳措施互馈关系和表征规律，评估先进水污染治理技术、工艺、模式的温室气体排放风险及水生态环境改善收益。在水生态环境质量达标的前提下，以最小增碳风险、最大减排收益为前提，识别水领域减排增汇核心技术与路径，开发评估、表征、确证方法和模型，研究提出水环境领域减污降碳协同最佳可行技术。

**固体废物与温室气体协同治理技术：**以尾矿、煤矸石、农作物秸秆、建筑垃圾等固体废物为重点，系统梳理可行技术路线，量化不同技术措施协同减污降碳效果，建立减污降碳协同减排技术库。结合绿色、低碳、循环发展趋势，建立针对典型产品的全过程绿色设计、绿色制造的减污降碳效果评估及技术库；建立针对园区或特定区域的强链补链、资源能源梯级利用的减污降碳效果评估模型，量化相关举措的减污降碳成效，并且选取相应对象进行适用性验证，**研究提出固废领域减污降碳协同最佳可行技术。**

## **(2) 固碳增汇技术适用性研究**

**深入研究不同情景下生态系统类型固碳机理及响应机制，构建多尺度、多类型、精准化生态系统固碳评估技术体系：**基于陆地、江湖及海洋碳循环过程，研究不同生态系统管理情景下陆地和海洋生态系统的固碳机理，以及生态系统固碳功能对气候变化、生态系统管理、人类干扰的响应反馈机制，提炼影响不同生态系统类型固碳能力的关键因素。系统梳理当前不同生态系统固碳模型方法，研究设计气候变化背景下，国家-流域-省域-城市-县域等不同空间尺度，不同气候地理分区、不同生态系统类型的精准化固碳评估技术模型和方法体系。面向生态系统保护管理需求，构建气候变化背景下的不同生态系统碳汇评估指标体系，研发区域生态系统碳汇能力快速精准核算技术。

**研发基于生态系统管理的增汇潜力模拟评估预测技术，研究不同尺度下生态系统固碳增汇关键技术路径：**综合运用遥感、模型、通量观测、资源清查和野外调查等多种技术和手段，研发建立不同气候变化情景、不同管理情景下，多尺度、多类型生态系统增汇潜力模拟预测模型，增强对未来生态系统管理、气候变化影响下生态系统增汇潜力的精准评估与预测能力。基于生态系统固碳机理和响应机制，研究

构建森林、草原、湿地、荒漠、海洋等不同生态系统的增汇关键技术。优先在碳汇潜力较大区域进行增汇关键技术示范应用，并对相关保护、修复、管理技术进行完善优化。

### **(3) 基于自然的解决方案 (NbS) 技术适用性研究**

**研发基于自然的解决方案 (NbS) 用于提升生态系统碳汇功能的关键技术和应用场景：**基于 NbS 全球技术规则，重点围绕我国森林、农田、草地、湿地、湖泊、城市等陆地生态系统的碳汇功能保护和提升，挖掘不同领域行之有效的 NbS 减排增汇技术措施（包括生态系统保护、修复/构建和可持续管理三种类型），整合集成为适用于场地、景观、区域（或流域）等不同空间尺度的系统化技术模式，开发不同技术模式在山水林田湖草沙冰系统治理、城乡基础设施建设、流域生态保护和修复等领域的应用场景。

**研究 NbS 效益量化评估方法，并在典型地区开展应用示范，基于示范效果反馈形成技术规范：**针对不同时间尺度、空间尺度和应用场景下效益评估需求，构建一套能涵盖多时空尺度下的多层级 NbS 效益评估指标体系，研发相应的量化评估技术体系。构建 NbS 成本效益分析模型，解析 NbS 效益影响因素与影响机制，从生态、社会与经济、短期与长期等维度开展成本效益权衡分析，制定 NbS 在利益相关方内部及之间公平分配策略和路径。筛选双碳目标下低成本高效益的中国 NbS 技术清单并开展应用示范，运用上述技术方法开展效益评估和成本效益分析。基于应用示范优化完善 NbS 效益评估技术方法，编制形成相关技术规范，有效精准指导 NbS 设计、实施、验收和适应性管理等全过程效益评估。

## **5.3 减污降碳决策模型与调控技术研究**

建立稳定、高效的政策引导机制和科技服务机制，创新产学研政

策机制，设计社会各个主体在股权分配和成果转让等形式下的共赢机制，加快科技创新成果转化，充分发挥全社会对低碳技术的自主创新能力。加强减污降碳协同增效基础科学和机理研究，加快关键核心技术攻关。持续推动能源、工业、农业等重点领域非二氧化碳温室气体控排、工艺替代、回收利用等技术研发与创新。充分利用国家生态环境科技成果转化综合服务平台，实施百城千县万名专家生态环境科技帮扶行动。加快重点领域绿色低碳共性技术示范、制造、系统集成和产业化。构建多环境介质污染物与温室气体融合排放清单以及相应的方法学体系，突破多目标减污降碳协同增效综合决策模型构建、面向高质量发展的减污降碳协同增效路径优化等关键技术，研发智慧化减污降碳协同增效管理与调控平台，显著提升减污降碳协同决策管理能力。

### **(1) 多介质精细化减污降碳融合排放表征技术**

**大气污染物与温室气体融合表征技术：**突破现有温室气体和大气污染物各自独立的排放清单编制方法，建立一致的多污染物和温室气体排放源分级分类体系，构建涵盖排放源、子部门、原料/燃料/产品类型、工艺技术类型、末端治理技术等多层次信息的温室气体和大气污染物统一源排放核算体系；开展大气环境领域温室气体本地化排放因子研究；针对重点行业/领域，建立基于多层物质流和能源流的逐工序污染物与温室气体排放精细化定量表征技术；基于多源大数据和机器学习，建立污染物和温室气体动态实时精准表征模型，开发动态融合排放清单表征技术；建立集成污染物立体监测技术、卫星遥感等多种技术的融合排放清单校验和反演技术，研究融合排放清单的不确定分析方法；开发高分辨率融合排放清单数据产品与数据集。

**水污染物与温室气体融合表征技术：**围绕水生态环境质量改善、

水污染治理能力提升、水领域碳排放控制的内在互馈机制，构建涵盖污水产生、收集、处理、排放（或回用）全过程的工业、生活、农业水污染防治领域温室气体表征技术，突破城镇生活污水收集、工业废水纳管处理等领域温室气体排放因子测算技术；开展污水处理、畜禽养殖领域温室气体排放因子本地化研究；开发高分辨率融合排放清单数据产品与数据集。

**固体废物与温室气体融合表征技术：**以尾矿、煤矸石、冶炼废渣、农作物秸秆、建筑垃圾、生活垃圾等固体废物为重点，结合原料燃料、生产工艺、利用方式、处置方式及固体废物成分、形态等特性，识别典型固体废物源头产生-循环利用-末端处置过程污染物及二氧化碳和甲烷等温室气体协同减排的关键节点；基于国内外已开展的固体废物碳排放核算研究，针对关键环节建立涵盖主要固体废物类别的碳排放表征方法；开展固体废物领域温室气体本地化排放因子研究；开发高分辨率融合排放清单数据产品与数据集。

## （2）多目标减污降碳协同增效综合决策模型

以减污降碳协同效益最大化为目标，基于经济-能源-排放响应传导机制，建立多元减排措施-污染物排放-温室气体排放动态映射关系，研发碳污排放变化对不同措施的实时响应技术；基于机理模型引导的机器学习建模方法，实现环境质量与污染物排放的近实时响应，突破近实时溯源技术，显著提升模型时空分辨率；基于多区域投入产出模型，解析隐含碳污排放在不同区域和行业间的流动转移，实现对典型行业产业链追踪模拟；研发基于成本效益的多维高精度减污降碳协同优化模型，实现协同路径的近实时模拟、反馈与优化功能。优先研究建立“区域-行业-技术”多维本地化的能源-工艺技术与污染控制技术信息，研究开发综合评估模型的能源技术模块，在模块中纳入省级本

地化的能源-工艺技术与污染控制技术信息，研究更新“碳-污染物”排放响应关系，进而开发耦合“经济-能源-排放-环境”的多目标减污降碳协同增效综合决策模型，实现经济-产品-技术-能源-排放”全链条成本效益优化。结合国家减污降碳协同的管理需求，将优先研发以下两个模块：

**“国家-区域”双向耦合的减污降碳目标优化模块：**利用环境质量模型、投入产出模型等，研究环境污染的物理传输和碳排放虚拟传输特征，厘清国家-区域减污降碳双向反馈机制。基于多尺度减污降碳双向反馈机制，以全国实现 2035 年“美丽中国”建设目标与“双碳”战略目标为约束，研究全国与区域尺度双向耦合的减污降碳协同目标优化模型，并开发碳排放目标对大气污染、水污染、固体废物等多环境要素驱动效应的量化评估工具，实现不同空间尺度减污降碳目标的统筹优化。

**“区域-行业”双向耦合的减污降碳路径优化模块：**耦合机器学习、环境质量模型、成本评估模型、环境健康效益评价等模型，研究各行业污染物排放与碳排放、协同减排技术与减排成本、污染物排放与环境质量、环境质量与环境健康效益之间的量化关系，进而开发不同行业污染物排放-碳排放-减排成本-环境质量-环境健康之间的快速响应曲面，进而研发“区域-行业”双向耦合的减污降碳路径优化模块，用于优化区域内重点行业领域减污降碳协同路径。

### **(3) 面向高质量发展的减污降碳协同增效路径研究**

构建以环境目标为导向的减污降碳协同目标空间分配理论与方法；研究能源结构、产业结构、交通结构调整、污染物末端治理、碳捕集利用与储存（CCUS）、森林碳汇等典型低排放技术路径下碳污排放交互响应关系；以全国及分区减污降碳目标为约束，针对重点区域、

重点行业/领域，量化模拟不同减污降碳路径及其组合的减排成本、减排效果以及环境效益；考虑减污降碳异质性、区域协同发展与博弈以及未来社会经济发展情景等因素，以推动社会经济高质量发展和生态环境高水平保护为目标，考虑经济技术可行性，针对协同减排成本效益最优、气候与环境效益最大化、社会公平性等多种决策偏好，研究时间-空间-行业多维差异化的协同治理路径，提出 2025-2060 年全国及重点区域污染防治与气候变化应对协同减排技术路线图，建立、公布不同政策倾向的减污降碳协同路径与情景库。

#### （4）智慧化减污降碳协同增效管理与调控平台

重点开发“污染物与碳排放管理”、“减污降碳协同技术措施”、“减污降碳情景分析”、“减污降碳协同增效综合决策”4 个子模块全面支撑面向未来的减排降碳管理与调控，并实现在线运行。**污染物与碳排放管理子模块：**主要是基于统一的源分类分级体系、排放因子数据库、排放源表征方法等，开发多尺度高分辨率污染物与碳排放源动态测算、分析与表征技术，通过云计算平台向科学界共享数据产品，为减污降碳相关研究、政策评估等提供基础数据支持。**减污降碳协同技术措施子模块：**主要是开发涵盖能源、产业、交通和末端治理的政策措施与技术措施库，基于“能源-工艺-治理-排放”全生命周期过程，建立重点工序原料、能源投入、生产工艺及产品产出、废弃物排放等各环节与减污降碳技术措施的嵌套匹配机制。**减污降碳情景分析子模块：**主要是通过耦合污染物与碳排放管理子模块和减污降碳协同技术措施子模块，开发分阶段、分区域、分部门污染物与温室气体排放情景动态分析技术及工具包。**减污降碳协同增效综合决策子模块：**主要是开发减污降碳协同度、措施和路径可行性及环境影响、环境健康效益、经济成本等综合评估功能，实现动态化和可视化管理。

## 5.4 减污降碳协同政策仿真与体系构建

构建减污降碳协同政策体系，聚焦减污降碳协同治理的相关法规标准制度、空间分区与管控政策、市场化价格调控机制、评估考核方法及监管对策等，研究提出减污降碳协同增效融合管理工具包。

### (1) 减污降碳协同分区管控方法与政策应用研究

开展减污降碳协同治理分区管控方法学、碳排放影响评价和生态环境空间评价协同耦合方法研究，分析碳排放和污染物协同的时空演变规律，识别减污降碳内在机理和传导机制的空间异质性，研究建立温室气体排放特征与管控需求在生态环境管控单元的映射机制。研究将减污降碳协同管控目标融入到生态环境空间管控的方法与路径。研究构建以“三线一单”为生态环境空间管控基础，以规划环评和项目环评为环境准入关口，以排污许可为企业经营守法依据，以执法督察为环境监管兜底的全过程环境管理体系。综合全国各地环境质量改善需求与碳达峰行动方案，从总量控制、能源消费、排放标准、准入清单等方面构建我国减污降碳协同管控措施库，研发基于减污降碳协同的生态环境准入清单编制技术。

### (2) 碳排放总量分配方法与碳排放交易机制研究

研究能耗“双控”向碳排放“双控”的转轨路径，建立集成目标设定、指标分配、控制模式、监测统计、监管考核及配套政策于一体的碳排放“双控”技术路线图。研究建立包括控制范围、控制模式、目标指标、分配模式、核算统计和监管考核等的碳排放总量控制技术体系和制度体系，开展碳排放总量指标分配方法学研究，确定国家、各省份和各城市碳排放总量目标和分配思路，提出不同时期、不同产业、不同地区之间的碳总量指标分配以及碳排放目标的实现途径与机制设计。开展碳排放总量的评价考核与协作政策机制研究，提出与减污降碳成效

挂钩的财政资金分配方法与政策。研究建立基于碳排放总量控制的碳市场，开展碳排放权分配对碳市场成本有效性的影响研究，建立碳市场公平性和实施效果的评价机制，研究碳中和目标下我国碳市场定价机制。

### （3）多元市场交互协同运行机理与机制优化研究

开展碳排放权交易、用能权交易、污染物排污权交易、绿证交易、绿电交易等多元市场交互协同的运行机理研究，构建微观交易市场和宏观经济社会系统耦合的多尺度综合评估模型，模拟碳-能-污市场作用下全国及各区域协同减排综合成本效益，评估多元市场交互协同对重点区域的减污降碳效应。研究绿色电力市场对碳市场和排污权市场的协同耦合效应，及其对碳、污市场协同减排效果的影响。针对碳市场扩大行业范围、排污权市场拓展跨区域交易以及优化配额分配、强化碳-能-污市场的联动等机制，设计提出多元市场交互协同运行下的政策优化路径。

### （4）减污降碳协同增效评估技术方法与管理体制研究

耦合排放清单模型、经济与排放脱钩评估模型及脱钩指数分解模型，构建适用于减污降碳协同驱动要素识别的技术方法，评估经济发展与多介质污染物、温室气体排放之间的耦合关系、脱钩程度及演变趋势。建立大气、水、固废、土壤等多环境要素污染防治及碳排放管理的影响因素识别方法，构建反映区域、城市、园区、行业等多维度特征和需求的减污降碳协同效益评价指标体系，研究提出减污降碳协同评价指标体系与评估技术，对全国、重点地区、重点城市、重点园区开展减污降碳评价。开展统筹排污许可和碳排放管理研究，衔接减污降碳管理要求，研究将温室气体管控纳入现行排污许可制度的框架体系。研究建立集成规划环评宏观引领、建设项目环评微观落地、排

污许可过程管理的固定源减污降碳管理方法与管理机制。

### **(5) 国际贸易的环境与碳泄漏评价方法及应对机制研究**

耦合全球多区域投入产出模型 (MRIO) 和可计算一般均衡模型 (CGE), 构建国际贸易的环境与碳泄漏评价方法, 研究碳边境调节机制对国际贸易和重点行业的影响, 开展生产端和消费端国际贸易中的隐含污染物和碳排放测算, 分析进出口产品带来的环境和碳泄漏问题, 提出应对欧盟碳边境调节机制的对策建议。创新减污降碳协同多边合作思路, 开展“一带一路”沿线国家的绿色低碳评价指数研究, 分析我国“一带一路”绿色发展合作对相关国家的绿色低碳贡献, 提出促进“一带一路”沿线国家低碳发展技术效率提升对策建议。开展国际贸易的全生命周期碳足迹基础数据库构建及标准化核算方法学研究, 建立外贸产品全生命周期碳足迹追踪体系和供应链的全生命周期碳标签关键技术体系, 搭建国际碳足迹、碳标签标准化评估平台, 提出完善绿色贸易标准和认证体系的措施建议, 推动国内国际绿色低碳贸易规则与机制对接。

### **(6) 减污降碳协同法规标准研究**

研究在现有生态环境基本法中补充应对气候变化的规定, 推动将协同控制温室气体排放纳入生态环境相关法律法规, 构建涉及生态环境保护、应对气候变化、资源能源利用、循环经济等多领域相交叉的法律法规网络。研究将碳排放总量控制纳入国家应对气候变化法制体系, 推进生态环境与气候变化法治建设深度融合。开展减污降碳协调标准体系建设的思路与重点任务研究, 研究温室气体、污染物及生态保护协同管理的相关标准技术方法, 构建排放、监测、管理等领域的减污降碳协同标准体系, 推动减污降碳协同标准落地。

## 參考文獻

[1] Ayres, R. U. & Walter, J. r. The greenhouse effect: Damages, costs and abatement. *Environmental & Resource Economics* 1, 237-270, doi:10.1007/BF00367920

[2] Bonsch, M. et al. Trade-offs between land and water requirements for large-scale bioenergy production. *Global Change Biology Bioenergy* 8, 11-24, doi:10.1111/gcbb.12226 (2016).

[3] Cai, W. et al. Comparison of CO<sub>2</sub> emission scenarios and mitigation opportunities in China's five sectors in 2020. *Energy Policy* 36, 1181-1194 (2008).

[4] Cai, B. F. et al. A new model for China's CO<sub>2</sub> emission pathway using the top-down and bottom-up approaches. *Chinese Journal of Population Resources and Environment* 19, 291-294, doi:10.1016/j.cjpre.2022.01.001 (2021).

[5] Castro, J. et al. A review of agent-based modeling of climate-energy policy. *WIREs Climate Change* 11, doi:10.1002/wcc.647 (2020).

[6] Cheng, J. et al. Pathways of China's PM<sub>2.5</sub> air quality 2015-2060 in the context of carbon neutrality. *Natl. Sci. Rev.* 8, 11, doi:10.1093/nsr/nwab078 (2021).

[7] Dellink, R., Chateau, J., Lanzi, E. & Magne, B. Long-term economic growth projections in the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 42, 200-214, doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.06.004 (2017).

[8] Dong, H., Xue, M., Xiao, Y. & Liu, Y. Do carbon emissions impact the health of residents? Considering China's industrialization and urbanization. *Sci. Total Environ.* 758, 143688, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143688 (2021).

[9] Du, H., Yan, M., Liu, X., Zhong, Y., Ban, J., Lu, K., & Li, T. Exposure to Concurrent Heatwaves and Ozone Pollution and Associations with Mortality Risk: A Nationwide Study in China. *Environmental Health Perspectives*[J], 2024 132(4), 047012. <https://doi.org/10.1289/EHP13790>

[10] Duan, H. B. et al. Assessing China's efforts to pursue the 1.5 degrees C warming limit. *Science*[J] 372, 378, doi:10.1126/science.aba8767 (2021).

[11] Fricko, O. et al. Energy sector water use implications of a 2 degrees C

climate policy. *Environ. Res. Lett*[J]. 11, doi:10.1088/1748-9326/11/3/034011 (2016).

[12] Gao, Y. N., Zhang, M. C. & Zheng, J. H. Accounting and determinants analysis of China's provincial total factor productivity considering carbon emissions. *China Econ. Rev*[J]. 65, 24, doi:10.1016/j.chieco.2020.101576 (2021).

[13] Geng, G. N. et al. Drivers of PM<sub>2.5</sub> air pollution deaths in China 2002-2017. *Nat. Geosci*[J]. 14, 645, doi:10.1038/s41561-021-00792-3 (2021).

[14] Gu, A., Teng, F. & Feng, X. Z. Effects of pollution control measures on carbon emission reduction in China: evidence from the 11th and 12th Five-Year Plans. *Clim. Policy*[J] 18, 198-209, doi:10.1080/14693062.2016.12586

[15] Guan, D. B. et al. Structural decline in China's CO<sub>2</sub> emissions through transitions in industry and energy systems. *Nat. Geosci*[J]. 11, 551, doi:10.1038/s41561-018-0161-1 (2018).

[16] Guan, D. B. et al. The socioeconomic drivers of China's primary PM<sub>2.5</sub> emissions. *Environ. Res. Lett*[J]. 9, doi:10.1088/1748-9326/9/2/024010 (2014).

[17] Hasan, M. A. et al. Climate Change Mitigation Pathways for the Aviation Sector. *Sustainability*[J] 13, doi:10.3390/su13073656 (2021).

[18] Hemes, K. S. et al. Assessing the carbon and climate benefit of restoring degraded agricultural peat soils to managed wetlands. *Agricultural and Forest Meteorology*[J] 268, 202-214, doi:10.1016/j.agrformet.2019.01.017 (2019).

[19] Hu, Z.Y. et al., A Quick Joule-Heating Coupled with Solid-Phase Synthesis for Carbon-Supported Pd–Se Nanoparticles Toward High-Efficiency Electrocatalysis. *Advanced Functional Materials*[J], 2024, Volume34, Issue42, October 15, 2405945

[20] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change: Contribution of Working Group III to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

[21] IPCC. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. (2018).

[22] IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: Working

Group III Contribution to the IPCC sixth Assessment Report.

[23] Jiang, K., He, C., Dai, H., Liu, J. & Xu, X. Emission scenario analysis for China under the global 1.5 °C target. *Carbon Management*[J] 9, 481-491, doi:10.1080/17583004.2018.1477835 (2018).

[24] Jiang, L. W. & O'Neill, B. C. Global urbanization projections for the Shared Socioeconomic Pathways. *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 42, 193-199, doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.03.008 (2017).

[25] Jiang, H.-D., Purohit, P., Liang, Q.-M., Dong, K. & Liu, L.-J. The cost-benefit comparisons of China's and India's NDCs based on carbon marginal abatement cost curves. *Energy Economics*[J] 109, 105946, doi:10.1016/j.eneco.2022.105946 (2022).

[26] J, M. & J, G. The science and politics of co-benefits in climate policy. *Environmental Science & Policy*[J] 57, 22-30 (2016).

[27] Liang, X. Y. et al. Air quality and health benefits from fleet electrification in China. *Nat. Sustain*[J]. 2, 962, doi:10.1038/s41893-019-0398-8 (2019).

[28] Li, M. et al. Air quality co-benefits of carbon pricing in China. *Nature Climate Change*[J] 8, 398-403, doi:10.1038/s41558-018-0139-4 (2018).

[29] Li, N. et al. Air quality improvement co-benefits of low-carbon pathways toward well below the 2 °C climate target in China. *Environ. Sci. Technol*[J]. 53, 5576-5584 (2019).

[30] Li, S. Y. et al., Integrated Benefits of Synergistically Reducing Air Pollutants and Carbon Dioxide in China. *Environ. Sci. Technol*[J], 10.1021/acs.est.4c00599, 2024.

[31] Lin, B. Q. & Long, H. Y. Emissions reduction in China's chemical industry - Based on LMDI. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*[J] 53, 1348-1355, doi:10.1016/j.rser.2015.09.045 (2016).

[32] Liu K , Ren G , Dong S ,et al.The synergy between pollution reduction and carbon reduction in Chinese cities and its influencing factors.*Sustainable Cities and Society*[J], 2024, 106.DOI:10.1016/j.scs.2024.105348.

[33] Lyu, W. et al. Driving forces of Chinese primary air pollution emissions: an index decomposition analysis. *Journal of Cleaner Production*[J] 133, 136-144, doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.093 (2016).

[34] Ma, D., Chen, W., Yin, X. & Wang, L. Quantifying the co-benefits of decarbonisation in China's steel sector: An integrated assessment approach. *Applied Energy*[J] 162, 1225-1237, doi:10.1016/j.apenergy.2015.08.005 (2016).

[35] Mao, X. Q. et al. Co-control of local air pollutants and CO<sub>2</sub> from the Chinese coal-fired power industry. *Journal of Cleaner Production*[J] 67, 220-227, doi:10.1016/j.jclepro.2013.12.017 (2014).

[36] Meng, W. J. et al. Energy and air pollution benefits of household fuel policies in northern China. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*[J]. 116, 16773-16780, doi:10.1073/pnas.1904182116 (2019).

[37] Mischke, P. & Karlsson, K. B. Modelling tools to evaluate China's future energy system—A review of the Chinese perspective. *Energy*[J] 69, 132-143, doi:10.1016/j.energy.2014.03.019 (2014).

[38] Ouyang, D.W. et al., Strategic approach to reduce environmental damage by CO<sub>2</sub> and air pollution based on Energy-Material-Emission Nexus: Insights from Beijing. *Resources, Conservation and Recycling*[J], Volume 215, 2025, 108078, ISSN 0921-3449

[39] Ou, Y. et al. Estimating environmental co-benefits of US low-carbon pathways using an integrated assessment model with state-level resolution. *Applied Energy*[J], 216, 482-493, doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.122 (2018).

[40] Peng, W., Yang, J. N., Lu, X. & Mauzerall, D. L. Potential co-benefits of electrification for air quality, health, and CO<sub>2</sub> mitigation in 2030 China. *Applied Energy*[J], 218, 511-519, doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.048 (2018).

[41] Peng, W., Yang, J., Lu, X. & Mauzerall, D. L. Potential co-benefits of electrification for air quality, health, and CO<sub>2</sub> mitigation in 2030 China. *Applied Energy*[J], 218, 511-519, doi:10.1016/j.apenergy.2018.02.048 (2018).

[42] Qian, H. Q. et al. Air pollution reduction and climate co-benefits in China's industries. *Nat. Sustain*[J]. 4, 417, doi:10.1038/s41893-020-00669-0 (2021).

[43] Shi, Q.R. et al., Co-benefits of CO<sub>2</sub> Emission Reduction from China's Clean Air Actions Between 2013-2020. *Nature Communications*[J], 2024, 13, 5061 <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32656-8>

[44] Shi, X. R. et al. Air quality benefits of achieving carbon neutrality in China. *Sci. Total Environ*[J]. 795, 9, doi:10.1016/j.scitotenv.2021.148784 (2021).

[45] Shi, Q. R. et al. Co-benefits of CO<sub>2</sub> emission reduction from China's clean air actions between 2013-2020. *Nature Communications*[J]. 13, 8, doi:10.1038/s41467-022-32656-8 (2022).

[46] Tang, R. et al. Air quality and health co-benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030. *Nature Communications* [J]. 13, doi:10.1038/s41467-022-28672-3 (2022).

[47] Tong, D. et al. Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015-2050 emission pathways under a range of socio-economic, climate policy, and pollution control scenarios. *Atmos. Chem. Phys*[J]. 20, 5729-5757, doi:10.5194/acp-20-5729-2020 (2020).

[48] Wang, H. et al. Design and demonstration of a next-generation air quality attainment assessment system for PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub>. *Journal of Environmental Sciences*[J] 29,178-188, doi:10.1016/j.jes.2014.08.023 (2015).

[49] Wang, H. et al. Co-benefit of carbon mitigation on resource use in China. *Journal of Cleaner Production*[J] 174, 1096-1113, doi:10.1016/j.jclepro.2017.11.070 (2018).

[50] Wang, H. & Chen, W. Modelling deep decarbonization of industrial energy consumption under 2-degree target: Comparing China, India and Western Europe. *Applied Energy*[J], 238, 1563-1572, doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.131 (2019).

[51] Wang, T. Y. et al. Health co-benefits of achieving sustainable net-zero greenhouse gas emissions in California. *Nat. Sustain*[J]. 3, 597, doi:10.1038/s41893-020-0520-y (2020).

[52] Wang, B., Wang, Y. & Zhao, Y. Collaborative Governance Mechanism of Climate Change and Air Pollution: Evidence from China. *Sustainability*[J] 13, 6785, doi:10.3390/su13126785 (2021).

[53] Walsh, B. et al. Pathways for balancing CO<sub>2</sub> emissions and sinks. *Nature Communications* [J]. 8, doi:10.1038/ncomms14856 (2017).

[54] Wu, K. et al. Mutual effects of CO<sub>2</sub> emission reduction and air pollution control policies in beijing-tianjin-hebei region. *Frontiers in Environmental Science*[J] 10, doi:10.3389/fenvs.2022.1006142 (2022).

[55] Wu, P. C. et al. Co-benefits of peaking carbon dioxide emissions on air quality and health, a case of Guangzhou, China. *Journal of Environmental Management*[J] 282, doi:10.1016/j.jenvman.2020.111796 (2021).

[56] Wu, Y.S. et al., Reversed Charge Transfer Enables Dual Active Sites on Ir/hBN for Synergistic N<sub>2</sub>O Valorization and Propane Selective Oxidation. *ACS Catalysis*[J], 2024, 14 (17), 13520-13530. DOI: 10.1021/acscatal.4c03697

[57] Wu, X.H. et al., Progress and challenges in nitrous oxide decomposition and valorization. *Chemical Society Reviews*[J]. 2024, 16(530), 8379-8423

[58] Xing, J. et al. Quantification of the enhanced effectiveness of NO<sub>x</sub> control from simultaneous reductions of VOCs and NH<sub>3</sub> for reducing air pollution in the Beijing–Tianjin–Hebei region, China. *Atmos. Chem. Phys*[J]. 18, 7799-7814, doi:10.5194/acp-18-7799-2018 (2018).

[59] Xing, J. et al. The quest for improved air quality may push China to continue its CO<sub>2</sub> reduction beyond the Paris Commitment. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A*[J]. 117, 29535-29542, doi:10.1073/pnas.2013297117 (2020).

[60] Xu, M., Qin, Z. F. & Zhang, S. H. Carbon dioxide mitigation co-effect analysis of clean air policies: lessons and perspectives in China's Beijing-Tianjin-Hebei region. *Environ. Res. Lett*[J]. 16, 11, doi:10.1088/1748-9326/abd215 (2021).

[61] Xu, R.C. et al., MEIC-global-CO<sub>2</sub>: A new global CO<sub>2</sub> emission inventory with highly-resolved source category and sub-country information. *Science China Earth Sciences*[J], 2024, 67, 450-465. <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1230-3>

[62] Xu, S. C. et al. Decomposition Analysis of the Factors that Influence Energy Related Air Pollutant Emission Changes in China Using the SDA Method. *Sustainability*[J], 9, 18, doi:10.3390/su9101742 (2017).

[63] Yang, J., Li, X., Peng, W., Wagner, F. & Mauzerall, D. L. Climate, air quality and human health benefits of various solar photovoltaic deployment scenarios in China in 2030. *Environ. Res. Lett*[J]. 13, 064002, doi:10.1088/1748-9326/aabe99 (2018).

[64] Yao, F. et al., Nitrogen-doped porous biochar via *Azotobacter chroococcum*-based nitrogen fixation for improved VOCs adsorption. *ACS EST*

Engineering[J], 2024, doi: 10.1021/acsestengg.4c00541

[65] Yu, B.Y. et al., Approaching national climate targets in China considering the challenge of regional inequality. *Nature Communications*[J],14: 8342 (2023) <https://www.nature.com/articles/s41467-023-44122-0>

[66] Zhang, S. et al., Targeting net-zero emissions while advancing other sustainable development goals in China. *Nature Sustainability*[J]. 7, 1107–1119 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01400-z>

[67] Zhang, S. H. et al. Incorporating health co-benefits into technology pathways to achieve China's 2060 carbon neutrality goal: a modelling study. *Lancet Planetary Health*[J], 5, 808-817, doi:10.1016/s2542-5196(21)00252-7 (2021).

[68] Zhang, S. L. et al. Co-benefits of deep carbon reduction on air quality and health improvement in Sichuan Province of China. *Environ. Res. Lett*[J]. 16, 18, doi:10.1088/1748-9326/ac1133 (2021).

[69] Zhang, S., Bauer, N., Luderer, G. & Kriegler, E. Role of technologies in energy-related CO<sub>2</sub> mitigation in China within a climate-protection world: A scenarios analysis using REMIND. *Applied Energy*[J] 115, 445-455, doi:10.1016/j.apenergy.2013.10.039 (2014).

[70] Zhang, S., Worrell, E. & Crijns-Graus, W. Evaluating co-benefits of energy efficiency and air pollution abatement in China's cement industry. *Applied Energy*[J] 147, 192-213 (2015).

[71] Zhang, S. H., Xie, Y., Sander, R., Yue, H. & Shu, Y. Potentials of energy efficiency improvement and energy-emission-health nexus in Jing-Jin-Ji's cement industry. *Journal of Cleaner Production*[J], 278, doi:10.1016/j.jclepro. 2020.123335 (2021).

[72] Zhang, C. Y. et al. Carbon neutrality prediction of municipal solid waste treatment sector under the shared socioeconomic pathways. *Resources Conservation and Recycling*[J], 186, doi:10.1016/j.resconrec. 2022.106528 (2022).

[73] Zhang, Z. et al., Expanding carbon neutrality strategies: Incorporating out-of-boundary emissions in city-level frameworks. *Environmental Science and Ecotechnology*[J], 2024, 20: 100354. ISSN 2666-4984. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100354>.

[74] Zhao, F. et al. Exploring pathways to deep de-carbonization and the associated environmental impact in China's ammonia industry. *Environ. Res. Lett*[J]. **17**, doi:10.1088/1748-9326/ac614a (2022).

[75] Zhao, N., Wang, G., Li, G. H., Lang, J. L. & Zhang, H. Y. Air pollution episodes during the COVID-19 outbreak in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China: An insight into the transport pathways and source distribution. *Environmental Pollution*[J], **267**, doi:10.1016/j.jenvman.2021.112721 (2021).

[76] Zheng, B. Y., Huang, G. H., Liu, L. R., Zhai, M. Y. & Li, Y. Two-pathway perspective for heavy metal emission mitigation: A case study of Guangdong Province, China. *Sci. Total Environ*[J]. **735**, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139583 (2020).

[77] 冯相昭等. 中国交通部门污染物与温室气体协同控制模拟研究. *气候变化研究进展*[J] **17**, 279 (2021).

[78] 傅京燕 & 原宗琳. 中国电力行业协同减排的效应评价与扩张机制分析. *中国工业经济*[J], 43-59 (2017).

[79] 高吉喜. 减污降碳需以统筹经济高质量发展为目标. *环境与可持续发展*[J] **46 (707)**, 13-14 (2021).

[80] 姜克隽, 胡秀莲, 庄幸, 刘强, 朱松丽. 中国2050年的能源需求与CO<sub>2</sub>排放情景. *气候变化研究进展*[J] **4**, 7 (2008).

[81] 王金南, 宁森, 严刚等. 实施气候友好的大气污染防治战略. *中国软科学*[J] **10**, 28-36 (2010).

[82] 王雅楠, 李冰迅, 张艺芯, 赵滢, 苗程凯, 安嘉琪. 中国减污降碳协同效应时空特征与影响因素. *环境科学*[J]. **2024**, **45(9)**, 4993-5002.

[83] 王灿, 邓红梅, 郭凯迪, 刘源等. 温室气体和空气污染物协同治理研究展望. *中国环境管理*[J] **12(4)**, 5-12 (2020).

[84] 张旭. 中国分区综合评估模型 (REACH) 开发与应用, 清华大学, (2016).

[85] 郑逸璇, 宋晓晖, 严刚等. 减污降碳协同增效的关键路径与政策研究. *中国环境管理*[J] **13 (77)**, 45-51 (2021).

[86] 周宏春. 以碳中和指标为抓手,协同推进减污降碳工作. *中国发展观察* [J] No.253, 22-26 (2021).中国气象局.《2023 年中国气候公报》.

[87] 中国气象局气候变化中心.《中国气候变化蓝皮书(2024)》.科学出版社生态环境部.《2023 年中国生态环境状况公报》.

[88] 生态环境部.生态环境部部长黄润秋在2024年全国生态环境保护工作会议上的工作报告.  
[http://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202401/t20240127\\_1064954.shtml](http://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202401/t20240127_1064954.shtml)

[89] 国家能源局.2023年我国可再生能源发电总装机突破13亿千瓦.  
[http://www.nea.gov.cn/2023-07/19/c\\_1310733273.htm](http://www.nea.gov.cn/2023-07/19/c_1310733273.htm).

[90] 国家统计局.中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报.  
[https://www.stats.gov.cn/xgk/sjfb/tjgb2020/202402/t20240229\\_1947923.html](https://www.stats.gov.cn/xgk/sjfb/tjgb2020/202402/t20240229_1947923.html)

[91] 国家统计局.中国统计年鉴2003-2022.北京:中国统计出版社.

[92] 国务院发展研究中心.《中国能源革命进展报告(能源消费革命 2023)》交通运输部.(2024).2023年交通运输行业发展统计公报.  
[https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614\\_4142419.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html)

[93] 清华大学建筑节能研究中心.(2023).中国建筑节能年度发展研究报告.中国建筑工业出版社.QX/T 479-2019.PM<sub>2.5</sub>气象条件评估指数(EMI).  
<https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/flfgbz/bz/202209/>

[94] P020220921704593946820.pdf