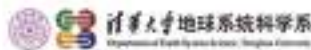
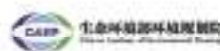
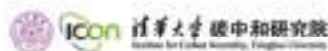


中国碳中和与清洁空气 协同路径 2023

—— 降碳 减污 扩绿 增长 ——

中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组



支持单位

清华大学碳中和研究院
生态环境部环境规划院
北京大学环境科学与工程学院
南京信息工程大学大气科学学院
清华大学地球系统科学系
能源基金会
中国清洁空气政策伙伴关系

引用方式

中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组（2023），“中国碳中和与清洁空气协同路径2023——降碳 减污 扩绿 增长”，清华大学碳中和研究院，北京，中国

插图来源：www.pexels.com；www.unsplash.com 及网络

中国碳中和与清洁空气协同路径 年度报告（2023）

降碳 减污 扩绿 增长

工作组成员列表

联合主席

贺克斌 中国工程院院士 清华大学碳中和研究院院长
王金南 中国工程院院士 生态环境部环境规划院原院长
王会军 中国科学院院士 南京信息工程大学学术委员会主任
朱 彤 中国科学院院士 北京大学环境科学与工程学院教授

摘要

官继成 北京大学环境科学与工程学院研究员（2023 年度报告总召集人）
尹志聪 南京信息工程大学大气科学学院教授
雷 宇 生态环境部环境规划院大气环境规划研究所所长
碳达峰碳中和研究中心主任 研究员
鲁 玺 清华大学碳中和研究院院长助理、环境学院教授
张 强 清华大学地球系统科学系副主任 教授
刘 欣 能源基金会环境管理项目主任
蔡慈澜 清华大学地球系统科学系博士后
中国清洁空气政策伙伴关系秘书处负责人

第一工作组

尹志聪 南京信息工程大学大气科学学院教授（召集人）
王丽娟 中国气象局公共气象服务中心正研级高级工程师
王 茜 上海市环境监测中心高级工程师
胡建林 南京信息工程大学环境科学与工程学院教授
耿冠楠 清华大学环境学院副研究员
马井会 上海市气象局正研级高级工程师
迟茜元 国家气象中心高级工程师
陈活泼 中国科学院大气物理研究所研究员
于海鹏 中国科学院西北生态环境资源研究院研究员

第二工作组

雷 宇 生态环境部环境规划院大气环境规划研究所所长
碳达峰碳中和研究中心主任 研究员（召集人）
董战峰 生态环境部环境规划院生态环境政策与管理研究所副所长 研究员
林永生 北京师范大学经济与资源管理研究院副院长 教授
汤维祺 复旦大学发展研究院副研究员
吴力波 复旦大学经济学院、大数据学院教授
张 立 清华大学地球系统科学系博士后
郑逸璇 生态环境部环境规划院大气环境研究室主任 副研究员

第三工作组


鲁 玺 清华大学碳中和研究院院长助理、环境学院教授（召集人）
柴麒敏 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心战略规划部主任
李晓梅 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心战略规划研究部
气候战略理论和模型研究室主任
张 达 清华大学能源环境经济研究所副教授
刘 俊 北京科技大学能源与环境工程学院副教授
吴 睿 交通运输部规划研究院环境资源所主任 高级工程师
张少君 清华大学环境学院副教授
胥小龙 中国建筑节能协会副总工 政策规划专委会主任
胡 姗 清华大学建筑节能研究中心助理研究员
张 贤 中国 21 世纪议程管理中心处长 研究员
陈文会 北京化工大学讲师
郑 博 清华大学深圳国际研究生院副教授
汪旭颖 生态环境部环境规划院副研究员
张 宁 清华大学电机工程与应用电子技术系长聘副教授
王家兴 清华大学环境学院在读博士

第四工作组

张 强 清华大学地球系统科学系副主任 教授（召集人）
张增凯 厦门大学环境与生态学院教授
王旭辉 北京大学城市与环境学院研究员
李 伟 清华大学地球系统科学系副教授
张少辉 北京航空航天大学经济管理学院副教授 IIASA 研究员
程 静 加州大学尔湾分校地球系统科学系博士后
同 丹 清华大学地球系统科学系助理教授
覃 栋 北京大学环境科学与工程学院研究员
赵红艳 北京师范大学环境学院讲师

第五工作组

宫继成 北京大学环境科学与工程学院研究员（召集人）
陈仁杰 复旦大学公共卫生学院教授
戴瀚程 北京大学环境科学与工程学院研究员
黄存瑞 清华大学万科公共卫生与健康学院教授
李湉湉 中国 CDC 环境所研究员 环境健康风险评估室主任
肖清扬 清华大学环境学院助理研究员
谢 杨 北京航空航天大学经济管理学院副教授
薛 涛 北京大学公共卫生学院研究员



本报告为《中国碳中和与清洁空气协同路径》年度报告第三期，以“降碳 减污 扩绿 增长”为主题。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。



CONTENTS

目录

摘要	6
第一章 引言	17
第二章 空气污染与气候变化	21
2.1 空气质量变化	22
2.2 气象条件对 AQI 的影响	29
2.3 气候变化及其影响	32
第三章 治理体系与实践	37
3.1 协同治理体系建设	38
3.2 协同治理政策	40
3.3 地方实践	42
第四章 结构转型与治理技术	47
4.1 能源结构转型	48
4.2 产业结构转型	51
4.3 交通结构转型	55
4.4 建筑能源系统低碳转型	57
4.5 碳捕集、利用与封存技术	60
4.6 新型电力系统	63
4.7 污染治理进程	65
第五章 大气成分源汇及减排路径	69
5.1 人为源碳排放	70
5.2 土地利用变化与陆地碳汇	73
5.3 污染物排放及协同减排进展	75
5.4 协同减排路径	78
第六章 健康影响与协同效益	81
6.1 空气污染与健康影响	82
6.2 气候变化与健康影响	86
6.3 协同治理的健康收益	91
参考文献	93

2023



摘要

在当前生态文明建设的新形势下，我国同时面临“碳达峰、碳中和”与“美丽中国建设”两大战略任务，统筹推进降碳、减污已成为我国社会经济发展全面绿色转型的必然选择，是从根本上解决生态环境问题的有效路径。中国共产党“二十大”报告强调，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，实现人与自然和谐共生。如何通过优化技术路径、设计政策组合，推动清洁空气与碳达峰碳中和措施协同发力，已成为社会各领域关注与探索的重点。

温室气体与大气污染物排放同根同源，气候变化与大气污染之间均对生态环境与人群健康具有显著负面影响，且两者之间存在明确的相互作用关系。因此，气候变化应对和大气污染治理在科学机理、目标体系、治理方案、应对措施和综合效益等方面都体现出高度的协同效应。《减污降碳协同增效实

施方案》的出台实施标志着我国减污降碳协同治理工作迈向新阶段。以降碳、减污、扩绿、增长为总抓手，生态环境部提出将减污和降碳工作有机衔接、统筹部署、一体推进，推动当前协同治理工作取得积极进展，减污降碳协同增效工作格局初步形成，政策机制逐步完善，试点成效日益显现，支撑保障不断强化，助力经济社会全面绿色转型。

为全面、客观地跟踪评述我国在气候变化与大气污染协同治理方面的工作进展，在能源基金会和中国清洁空气政策伙伴关系支持下，清华大学、生态环境部环境规划院、北京大学和南京信息工程大学等单位在 2021 年联合发起了《中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告》的编写工作。以此为平台，一批大气科学、环

境工程、能源工程、公共卫生、管理科学等领域的国内学者开展跨学科交流合作，共同跟踪、梳理、总结与分析我国空气污染与气候变化协同治理进程，助力形成政策制定、评价与优化的闭环，推动协同治理政策的落地实施。

本报告为《中国碳中和与清洁空气协同路径》年度报告第三期，以“降碳 减污 扩绿 增长”为主题。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。

中国碳中和与清洁空气协同路径评价指标体系

空气污染与气候变化 2

- 空气质量变化
- 气象条件对 AQI 的影响
- 气候变化及其影响

治理体系与实践 3

- 协同治理体系建设
- 协同治理政策
- 地方实践

结构转型与治理技术 4

- 能源结构转型
- 产业结构转型
- 交通结构转型
- 建筑能源系统低碳转型
- 碳捕集、利用与封存技术
- 新型电力系统
- 污染治理进程

大气成分源汇及减排路径 5

- 人为源碳排放
- 土地利用变化与陆地碳汇
- 污染物排放及协同减排进展
- 协同减排路径

健康影响与协同效益 6

- 空气污染与健康影响
- 气候变化与健康影响
- 协同治理的健康收益

1 空气污染与气候变化

2022年，全国及重点区域的大气污染物浓度相比2021年均有所下降。全国339个地级及以上城市PM_{2.5}年均浓度为29 μg/m³，相比2015年下降35.6%；PM_{2.5}年均浓度低于国家二级标准的城市数量上升到253个，相比2015年增长139%。2015年至2022年，全国及各个重点区域的PM_{2.5}年均浓度的三年滑动平均值呈现持续下降。全国339个地级及以上城市O₃日最大8小时平均第90百分位年平均浓度为145 μg/m³，相比2021年上升了5.8%。2022年O₃浓度年评价价值达到国家二级标准的城市数量为247个，占比72.9%；全国城市O₃超标天数占比为6.5%。从三年滑动平均值来看，2015–2019年间全国及重点区域O₃浓度持续上升，而2020–2022年间则出现持平或者小幅度下降。2022年全国城市PM_{2.5}重度及以上污染天数占比为0.7%，相比2015年下降75%。与此同时，重污染期间PM_{2.5}浓度峰值也大幅下降。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。2022年河北省各城市已退出PM_{2.5}污染最重的前10名，污染中心向陕西和河南转移。

2022年全国平均PM_{2.5}污染气象条件与2021年相比略偏不利。其中长三角和珠三角地区气象条件有利于PM_{2.5}浓度下降，PM_{2.5}污染气象条件指数较2021年分别下降约6.1%和1.7%，较近5年平均分别下降5.4%和6.9%。而京津冀及周边、成渝地区和汾渭平原的大气污染扩散条件较近5年平均和2021年均偏差，有利于PM_{2.5}浓度上升。O₃气象条件评估指数分析结果显示2022年5–9月全国平均

O₃气象条件较为不利，有利于臭氧浓度增加。转差的气象条件使京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原、成渝地区2022年5–9月O₃浓度同比分别上升8.5%、8.1%、3.0%、11.0%，较近5年均值分别上升2.7%、6.4%、2.1%、10.7%。2022年我国共出现了10次沙尘天气过程，较2021年偏少3次，较近5年平均偏少2.2次，气象条件整体有利于2022年春季沙尘天气偏少偏弱。

2022年全球三种主要温室气体(CO₂, CH₄, N₂O)浓度达到观测历史新高，加剧气候变化。全国平均气温较常年(1991–2020)偏高0.62℃，平均降水量较常年偏少5.0%。长江中下游及川渝等地出现大范围破纪录的高温热浪，南方遭遇严重的夏秋连旱，华南东北暴雨过程频发，呈现出时间长、强度大、极端性强的特点。随着全球变暖加剧，极端气候变化相比平均气候变化更为剧烈。中国区域极端暖事件将明显增加，冷事件显著减少，极端降水事件整体呈现显著增多、增强趋势。2022年我国风能资源为正常略偏小年景，10米高度年平均风速较近10年平均偏小0.82%；太阳能资源为偏大年景，年平均水平面总辐照量为近30年最高，并且两者都呈现出较大的地区性差异。在“碳中和”减排情景下，2040–2049年，我国东部风能太阳能资源趋于增多，其时间变率均呈减小趋势，太阳能和风能发电稳定性将增强，但对于风光资源未来变化预估，不同区域、不同排放情景模拟结果存在明显差异及不确定性。

2 治理体系与实践

2022年，中国大气污染治理和碳排放管理协同进一步深入。中国共产党“二十大”报告进一步强调“协同推进降碳、减污、扩绿、增长”，7部门联合印发《减污降碳协同增效实施方案》，生态环境部等15部门发布《深入打好重污染天气消除、臭氧污染防治和柴油货车污染治理攻坚战行动方案》，明确提出“开展大气减污降碳协同增效行动”。全社会在推进协同治理的必要性方面进一步加深共识，并围绕协同治理体系建设的理论和实践逐步形成4个重点研究方向。主要包括协调发展与减排，统筹治理目标与实施路径；平衡整体与局部，优化联防联控和区域协同；兼顾短期与长远，探索政策工具与治理机制的创新模式；融合政府与市场，建立开放、透明、广泛参与的治理体系。

在减污降碳一体谋划、一体部署、一体推进、一体考核的总体要求下，中国协同治理政策在实践中不断发展。以准入与考核等为导向的协同治理行政管制手段效能逐步发挥，重点行业建设项目和产业园区规划碳排放环境影响评价试点、碳监测评估试点等工作稳步推进，温室气体排放控制相关内容纳入“十四五”污染防治攻坚战成效考核，能源消费总量控制要求进一步优化。以碳市场为主体的市场经济激励政策在应用中持续完善和创新，建成全球覆盖排放量规模最大的碳市场，气候投融资试点涉及资金达2万亿元左右。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，低碳技术目录、碳普惠、企业碳排放信息披露等工作取得新进展。

各地积极推进减污降碳工作落地实施。截至2022年底，吉林、黑龙江、浙江、安徽、福建、江西、陕西、宁夏等省（区）正式印发了地方减污降碳协同增效落实文件，推动地方实践工作。然而总体而言，中国城市碳达峰状态与经济水平、碳排放总量、PM_{2.5}浓度达标情况等方面尚未表现出明显的相关性特征。2015–2021年间，全国335个地级及以上城市中，仅有105个城市实现了PM_{2.5}年均浓度和CO₂排放量协同下降，与2015–2020年间数量持平；有9个城市的PM_{2.5}年均浓度和CO₂排放量均呈现升高态势，比2015–2020年间减少8个。大多数城市PM_{2.5}浓度和CO₂排放量未能实现协同下降，减污降碳协同增效工作亟需在城市层面进一步推进。



3 结构转型与治理技术

能源结构转型方面，结构调整态势出现新变化。在能源安全和能源转型“双重”刺激下，煤炭和新能源“双向”增长。2022年煤炭消费量占比56.2%，同比提高0.3个百分点，非化石能源消费占比17.5%，较2021年提高0.8个百分点。可再生能源发电量创新高，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%，太阳能、风力发电量首次突破1万亿千瓦时（1.19万亿千瓦时），可再生能源装机突破12亿千瓦，历史性超过煤电装机。作为能源转型进程中的“压舱石”，煤电建设出现新热潮。积极稳妥推进碳达峰碳中和，坚持先立后破的战略为我国持续推进能源绿色低碳转型提出了能源发展新方略。

产业结构转型方面，新产业新业态新模式较快成长。2022年，第二产业增加值由39.4%提高至39.9%，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%；新能源汽车产量700.3万辆，比上年增长90.5%。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）》等重点文件，大力提升重点领域能效，以重点行业达峰为突破，加快制造业的绿色转型与高质量发展。地方政府积极响应国家“双碳”战略制定省级“双碳”工作实施意见，进一步完善落后产能市场退出机制，推动传统产业绿色低碳转型和发展战略新兴和高技术产业。

交通结构调整方面，运输结构进一步优化。2022年，全国铁路货运总发送量同比增长4.5%，水路货物运输量增长3.8%，公路货物运输量降低5.5%。居民绿色出行持续推进，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，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。交通能效与清洁能源替代稳步提升，乘用车行业平均油耗降低至4.10L/百公里，铁路单位运输工作量综合能耗降低至3.91吨标准煤/百万换算吨公里；新能源汽车产销量分别增长96.9%和93.4%，全国充电基础设施保有量达到520万台。

建筑能源系统低碳转型方面，建筑用能效率进一步提升。2021年中国建筑运行过程中的碳排放总量为22亿吨CO₂，其中直接碳排放呈下降趋势，占总排放的23%；建筑运行用电量显著增加，超过2.2万亿千瓦时，电力消费导致的间接CO₂排放增长至12.4亿吨，占比57%。北方城镇采暖的热力间接碳排放已呈现逐年下降趋势，2021年占比20%。建筑领域逐步从“建筑节能”转向“建筑减碳”，从消除直接和间接排放两方面全面推动建筑领域的减污降碳进程。在对建筑用能总量和强度两个维度管理的基础上，增加建筑用能结构优化和用能柔性管理两个新的维度，在持续提高建筑节能标准、推进建筑能效提升工作的基础上，大力推进建筑用能结构调整，大力发展太阳能等可再生能源，推动建筑电气化进程。

碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术稳步发展, 示范项目迅速增加, 成本能耗持续下降, 相关政策进一步完善。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; 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。捕集成本较国外具备一定的优势, 化工行业一体化驱油成本可低至 105 元 / 吨 CO₂, 电力和水泥行业捕集成本仍然较高, 分别为 200–600 元 / 吨 CO₂ 和 305–730 元 / 吨 CO₂。CCUS 技术标准不断完善, 有关政策逐渐增多, 同时, 逐步提出 CCUS 在难减排工业领域的应用目标。

新型电力系统构建方面, 大力推进新能源安全可靠替代。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。“沙戈荒”电站建设稳步推进, 已有超过 200 GW 沙戈荒项目正在建设中。新能源消纳水平不断提高, 2022 年风电平均利用率达到 96.8%, 光伏平均利用率达到 98.3%。电力系统结构形态逐步优化, “西电东送、北电南送”的电力流分布持续强化, 新增投运的 220 千伏及以上输电线路回路长度 3.51 万公里, 新增投运的 220 千伏及以上变电设备容量 15531 万千伏安。未

来新型电力系统中, 预计风光电量占比将达到 70%, 各类型火电承担调峰调频和提供惯量的重要任务。

大气污染治理持续稳步推进。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; 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; 挥发性有机物污染防治工作得到快速推进, 全国已完成 4.6 万余个挥发性有机物突出问题整改; 燃煤锅炉减少至不足 10 万台, 并已基本淘汰每小时 35 蒸吨以下的燃煤锅炉; 清洁取暖试点覆盖全国 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%; 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; 全国测土配方施肥技术应用面积已达到 19.3 亿亩次, 秸秆综合利用量达到 6.62 亿吨左右; 施工、道路、堆场、裸地、矿山等各类扬尘治理不断深入推进, 全国城市降尘量明显下降, 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

2005–2020 年全国大多数省份 CO₂ 排放呈波动上升趋势，能源大省和工业大省主导了中国 CO₂ 排放变化趋势。其中，电力部门是多数省份排放变化的主导因素，尤其是新疆、内蒙古、宁夏和山西等能源大省；工业部门是河北、河南、四川等省份排放变化的主要贡献因素；北京、上海和广东等东部发达地区民用和交通排放贡献相对突出。在此期间，全国绝大部分省份（除宁夏和新疆外）碳排放强度持续下降，其中 25 个省份完成了“十三五”区域碳强度目标。2005–2015 年我国已经有 31 个城市实现了经济增长和碳排放的强脱钩，185 个城市实现了经济增长和碳排放的弱脱钩。

中国自 80 年代开始实施的一系列生态保护与修复工程（如退耕还林）使得森林面积显著提升，森林面积的扩张等土地利用变化过程贡献了约 44% 的中国陆地生态系统碳汇。1980–2019 年间中国陆地生态系统累积固定了约 8.9 ± 0.8 PgC，并呈现增加的趋势。我国现有森林中龄林和幼龄林占据着主导地位，处于生长阶段早期的森林一般具有更强的碳汇能力。2000–2040 年间，随着中国森林林龄增长，中国森林植被碳储量将增加 6.69 PgC。陆地碳汇是生态系统对外界干扰过程响应的结果，因此，将陆地碳汇长时间维持在较高水平，需要通过科学的森林经营管理措施来优化林龄结构，以便为“碳中和”战略目标中的工业减排赢得时间窗口。

2015–2021 年间，我国工业和民用部门 CO₂ 减排与 PM_{2.5} 污染改善呈现正协同效应，

尤其是燃煤过程，显示“十三五”期间结构调整和散煤整治措施成效显著。道路交通 PM_{2.5} 浓度进一步下降 46%，但碳排放仍呈现较明显的增长态势（上升 17%）。电力供热部门 CO₂ 减排与 PM_{2.5} 改善呈显著负效应，这是由于近年来煤电规模持续增长以及气电的发展导致碳排放增加，而电力超低排放改造推动了 PM_{2.5} 浓度下降。燃煤方面，超过三分之一的省份实现了 CO₂ 排放与 PM_{2.5} 污染改善正协同效益。各省份燃油导致的 PM_{2.5} 污染普遍下降，而绝大部分省份的 CO₂ 排放则呈上涨趋势。燃气导致的 CO₂ 普遍增加，但其作为清洁能源，对 PM_{2.5} 污染的贡献增加不显著。

实施因地制宜及突出重点的降碳减污协同路径，可为我国深度改善空气质量起到关键作用。研究表明，京津冀及周边地区由于钢铁和水泥行业比重较大且难以脱碳，2060 年碳中和目标下其化石能源比重仍高达 43.6%，PM_{2.5} 暴露水平为 14.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；珠三角地区碳减排潜力主要来自电力和交通运输部门，化石能源比重可下降至 15.9%（PM_{2.5} 暴露水平 4.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）；长三角碳减排潜力主要来自电力和工业部门，PM_{2.5} 暴露水平可下降至 7.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。电力行业能源结构转型和靶向治理是协同减排的关键举措，将显著提高可再生能源发电占比（>70%），大幅改善人口密集区域的空气质量，而高污染机组提前淘汰的靶向治理能够最大化协同改善效益。终端用能电气化是电力以外其他行业实现碳及污染物协同减排的重要途径，以钢铁行业为例，绿电系统中大幅部署电炉短流程炼钢工艺，能够在 2060 年减少主要大气污染物排放量 80% 以上。

5 健康影响与协同效益

2022 年我国人口 $PM_{2.5}$ 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污染暴露改善最为显著。全国有 38.3% 的人口居住在 $PM_{2.5}$ 超标地区，比 2015 年减少 37.5 个百分点。但 2022 年 O_3 暴露水平在部分地区上升，与 2021 年相比， O_3 长期暴露水平上升 6%。长期和短期 O_3 暴露相关的过早死亡人数分别增加 11.1% 和 9.7%，显示其对公共健康的威胁日益严重。 NO_2 暴露水平下降，2022 年全国 NO_2 年均浓度较 2013 年下降了 43.4%。为实现“双碳”目标和保护公共健康，我国需加强 $PM_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 的协同治理，并实施更为严格的空气质量标准和策略。

气候变化导致的高温对人群健康影响严重。有报告指出，2021 年中国气温创新高，热浪暴露与约 2 万的超额死亡有关，经济损失达国内生产总值的 1.68%。研究发现，长期高温暴露对死亡风险影响在低收入、低教育程度地区更为明显。除此，寒潮和台风也提升死亡风险，沙尘暴天气可能增加心脏病死亡风险。尽管气温升高导致野火增多，但相关的健康风险研究仍存在空白。适应气候变化的健康风险应对措施包括加强极端天气预警、提高个体防护和改进公共设施等。研究显示适应措施如绿色屋顶和高反照率材料可以抵消高温带来的经济损失。我国正建立基于风险的预警系统，并在洪水早期预警中取得显著效果。全球多国已建立高温热浪健康预警系统，取得良好健康收益。我国也正在试运行热浪健康风险预警系统，

并在实践中获得了积极成效。

气候变化引发极端高温和热浪，导致臭氧浓度增加，进而影响人群健康。我国 13 个城市的研究表明，夏季高温增加了高血压患者的死亡风险。华东地区研究发现高温和臭氧共同提高了慢性阻塞性肺病的死亡率。气候减缓政策有助于改善空气质量，但人口老龄化可能削弱健康效益。中国政府推出绿色交通政策，降低碳和污染物排放，提升民众健康。电动车普及和电力清洁化可进一步改善空气质量和增加健康效益。全球变暖加剧健康和经济压力，适应性策略可以降低劳动力损失和经济成本。

综上所述，在治理机制层面，以“双碳”为契机与驱动，我国初步构建了空气污染和气候变化协同治理的顶层管理制度和政策体系；在科技支撑层面，通过推动绿色低碳技术在能源、产业、交通等领域的加速实践与应用，推进碳达峰碳中和、空气质量持续改善双重目标的实现，实现人民健康、绿色发展的效益最大化。然而，我国 $PM_{2.5}$ 污染水平仍超过世界卫生组织推荐标准 6 倍以上，碳排放仍呈现缓慢增长态势，污碳协同改善局面尚未形成。空气污染对人群健康造成严重威胁，气候变化导致极端天气气候事件频发，人群面临气候污染与空气污染导致的复合健康危害风险。同时，支撑降碳减污协同的技术体系尚未形成，源头治理技术在空气质量改善中的作用亟待加强，在持续推进温室气体与大气污染物协同减排方面依然面临巨大挑战。



目前，我国仍处于碳污协同整体谋划系统治理的初期，应持续以降碳、减污、扩绿、增长为总抓手，加快完善减污降碳一体推进的任务体系，统筹目标路径，创新政策机制，突出空间协同、强化领域联动；应以源头治理为核心手段，配合行政、经济及自愿手段，积极发挥和提升结构转型在碳污协同治理中的作用，加快能源产业交通结构低碳绿色转型；针对科

学、精准、靶向治理的需求，制定因地制宜及突出重点行业、区域及城市的降碳减污协同路径，指导我国降碳减污工作分行业、分区域有序配合；以人群健康保护为导向，适时加严空气质量标准并逐步与 WHO 等相关标准接轨，牵引空气质量根本性改善。

(相关参考文献未逐一列出，详见第 93 页)



引言



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_{2.5} 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。

在能源基金会支持下，由清华大学、北京大学、生态环境部环境规划院和南京信息工程大学联合发起，中国清洁空气政策伙伴关系组织国内一线学者，通过构建我国空气污染与气候变化协同治理监测指标体系，编制《中国碳中和与清洁空气协同路径》年度报告，跟踪、梳理、总结与分析我国空气污染与气候变化协同治理进程，识别面临的挑战并提出解决思路，助力形成政策制定、评价与优化的闭环，推动协同治理政策的落地实施。同时，CCAPP 希望通过组织报告编制工作建立长效合作机制，与有志于投身这一领域研究的青年科学家创造交流平台，推动科学家之间的交流合作以及与决



策者和公众之间的沟通，为推动气候变化与空气污染协同治理贡献集体智慧。

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。本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。

01

引言

第一章介绍了《中国碳中和与清洁空气协同路径》系列报告的背景、宗旨、意义及本年度报告的框架和主要内容。

02

空气污染与气候变化

第二章聚焦空气污染与气候变化，通过空气质量变化、气象条件对AQI的影响与气候变化及其影响共三项指标，分析气候变化与大气污染之间的相互作用。

03

治理体系与实践

第三章关注治理体系与实践，包括协同治理体系建设、协同治理政策及地方实践三项指标，跟踪国家和地方层面协同治理体系建设进展，总结协同治理实践经验。

04

结构转型与治理技术

第四章针对结构转型与治理技术，梳理出能源结构转型、产业结构转型、交通结构转型、建筑能源系统低碳转型、碳捕集利用与封存技术、新型电力系统及污染治理进程七项指标，追踪我国在结构转型及减排治理技术方面的进展状况，总结经验并识别面临的障碍和挑战。

05

大气成分源汇及减排路径

第五章介绍大气成分源汇及减排路径，包括人为源碳排放、土地利用变化与陆地碳汇、污染物排放及协同减排进展和协同减排路径四项指标，解析了中国主要大气成分历史排放变化及驱动因素，提出了我国未来温室气体减排与空气污染治理的协同路径。

06

健康影响与协同效益

第六章在健康影响与协同效益方面设定了空气污染与健康影响、气候变化与健康影响以及协同治理的健康收益共三项指标，探讨空气污染和气候变化影响健康的机制，分析协同治理的健康效益。

CCAPP自2019年起每年编写报告，总结梳理我国在气候变化与空气污染协同治理方面的进展，收获了积极反响。2023年编写过程中共组织了5次学术沙龙，建立了合作平台与机制，上百位专家参与了研讨和报告评审工作，得到了专家们的大力支持。未来希望能继续集思广益，不断完善监测指标体系，将年度报告打造成为有影响力的品牌，为推动我国降碳、减污、扩绿、增长贡献绵薄之力。



空气污染与气候变化



空气污染是衡量国家和城市“减污降碳”协同治理效果的直接反映，气候变化与其存在着显著的相互作用。人类活动引发的全球变暖背景下，极端天气气候事件频繁发生，呈现出持续时间长、强度高和极端性强的特点。另一方面，气溶胶可以通过改变大气辐射收支来影响气候系统，以及风光等气候资源。因此，实时追踪全国及区域的大气污染和气候变化状况，将有助于更加科学、精准制定“双碳”和“清洁空气”协同路径，加强国家和城市改善空气质量、应对气候变化的驱动力。

2.1 空气质量变化

2022年,全国339个地级及以上城市和京津冀及周边、汾渭平原、长三角、成渝地区和珠三角五个重点区域的污染物浓度相比2021年均有所下降,其中SO₂和NO₂的区域年平均值全面低于国家一级标准(年均浓度:SO₂ ≤ 20 μg/m³; NO₂ ≤ 40 μg/m³)。全国339个地级市年均PM_{2.5}和O₃年评价价值达到国家二级标准(PM_{2.5}年均浓度 ≤ 35 μg/m³; O₃日8小时滑动平均最大值第90百分位数:MDA8 O₃ ≤ 160 μg/m³),但二者在某些重点地区未达标。

2022年全国339个地级及以上城市PM_{2.5}年平均浓度为29 μg/m³,低于国家空气质量二级标准(35 μg/m³),仍高于国家空气质量一级标准(15 μg/m³),但相比2015年(45 μg/m³)下降35.6%(图2-1a)。2015年至2022年,全国339个地级及以上城市大气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PM_{2.5}浓度持续下降,而汾渭平原和成渝地区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。如图2-1b所示,2015-2022年间,全国及各个重点区域的PM_{2.5}年均浓度的三年滑动平均值呈现持续下降。

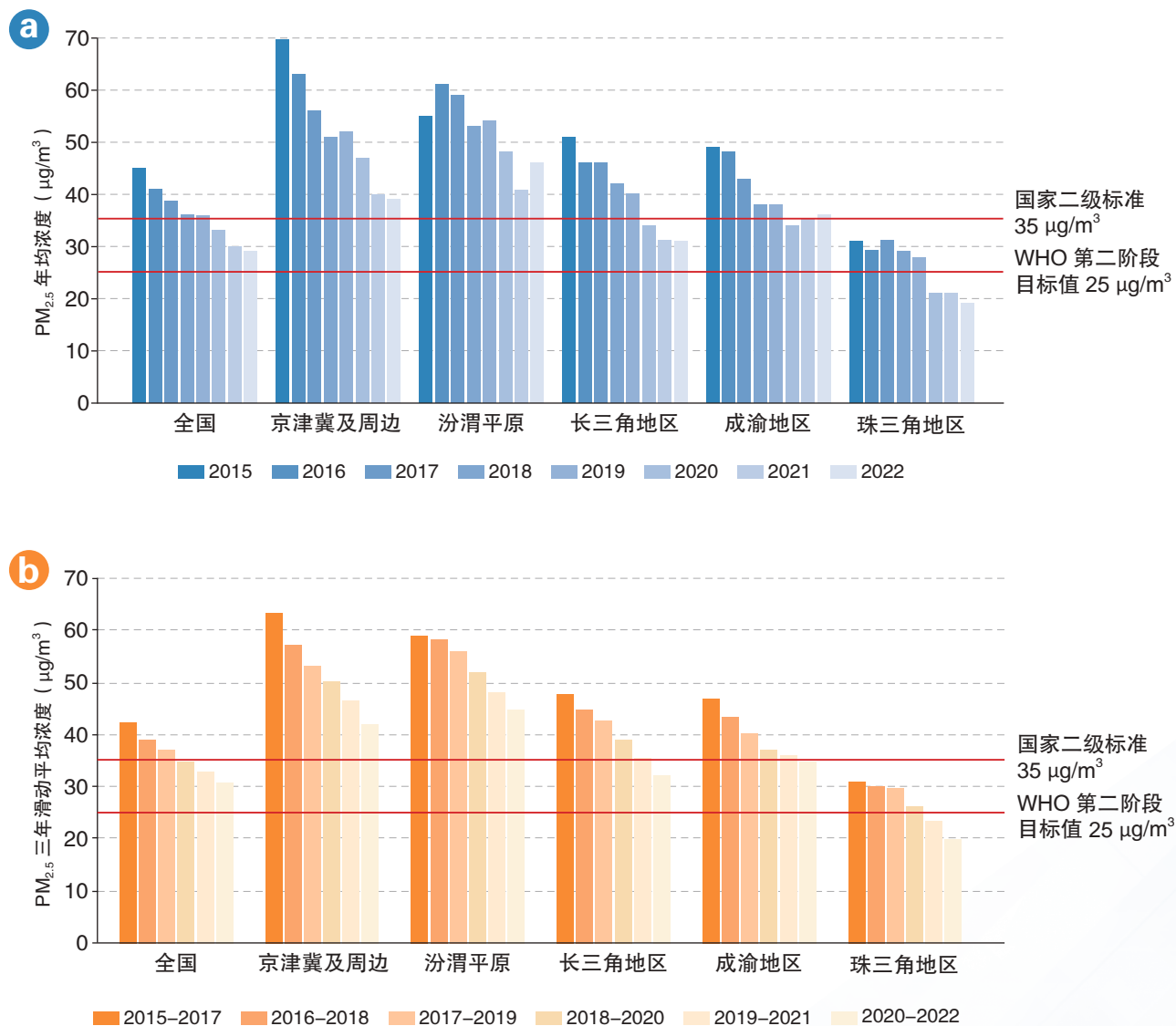
2022年全国339个地级及以上城市O₃日最大8小时平均值第90百分位数浓度范围为

90-194 μg/m³,年平均浓度为145 μg/m³,相比2021年(137 μg/m³)上升了5.8%(图2-1c)。2022年O₃日最大8小时平均值第90百分位数年均评价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年至2019年全国城市大气O₃浓度总体呈上升趋势,2019年后呈波动态势(图2-1c)。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O₃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(图2-1d),2015-2019年间全国及重点区域O₃浓度持续上升,而2020-2022年间全国及重点区域O₃浓度出现持平或者小幅度下降。

2022年全国PM_{2.5}年均浓度低于国家二级标准(35 μg/m³)的城市数量为253,相

比 2015 年（106 个城市）增长 139%（图 2-2a）。在重点区域中，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 $\text{PM}_{2.5}$ 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（图 2-2b）。



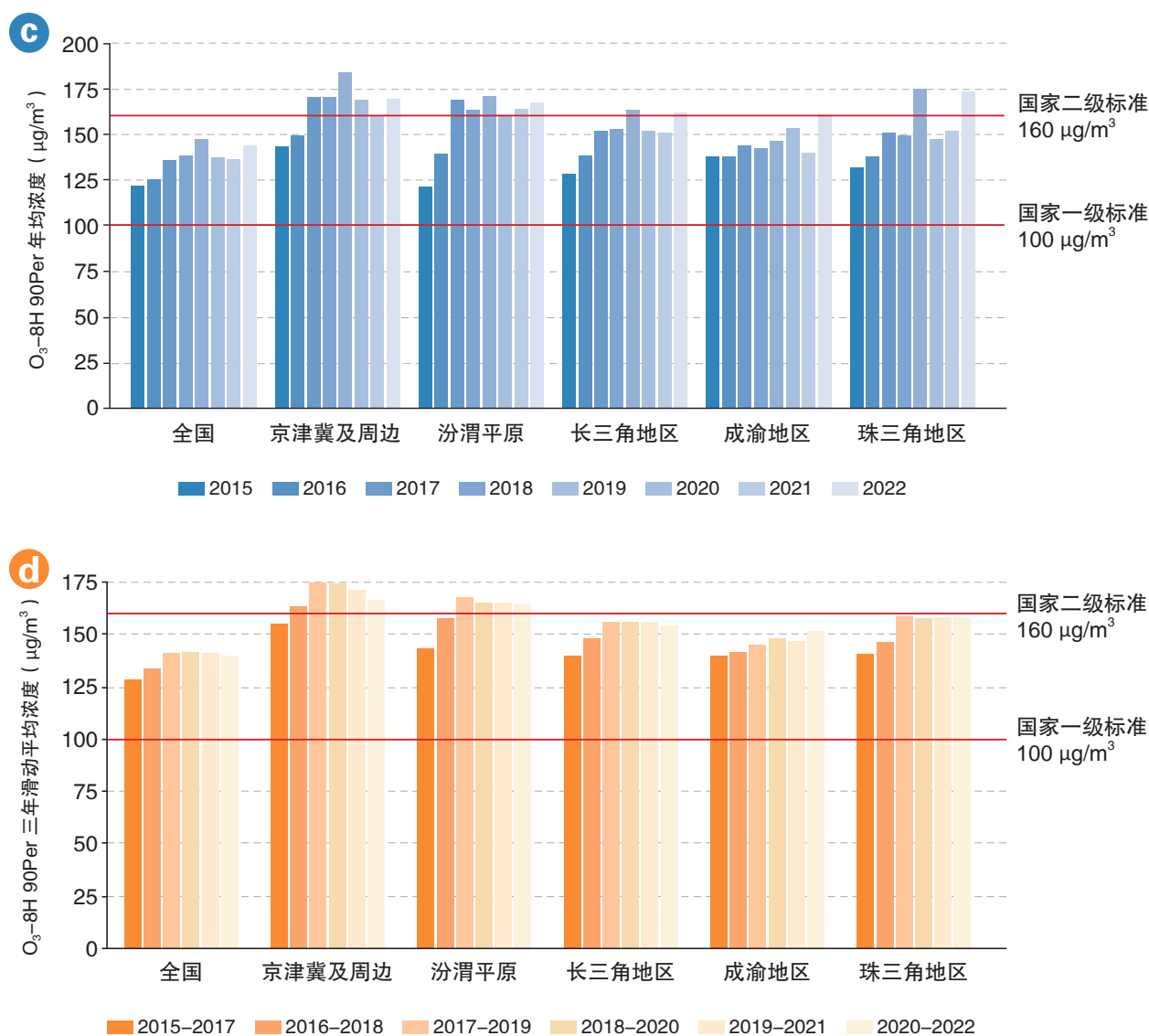


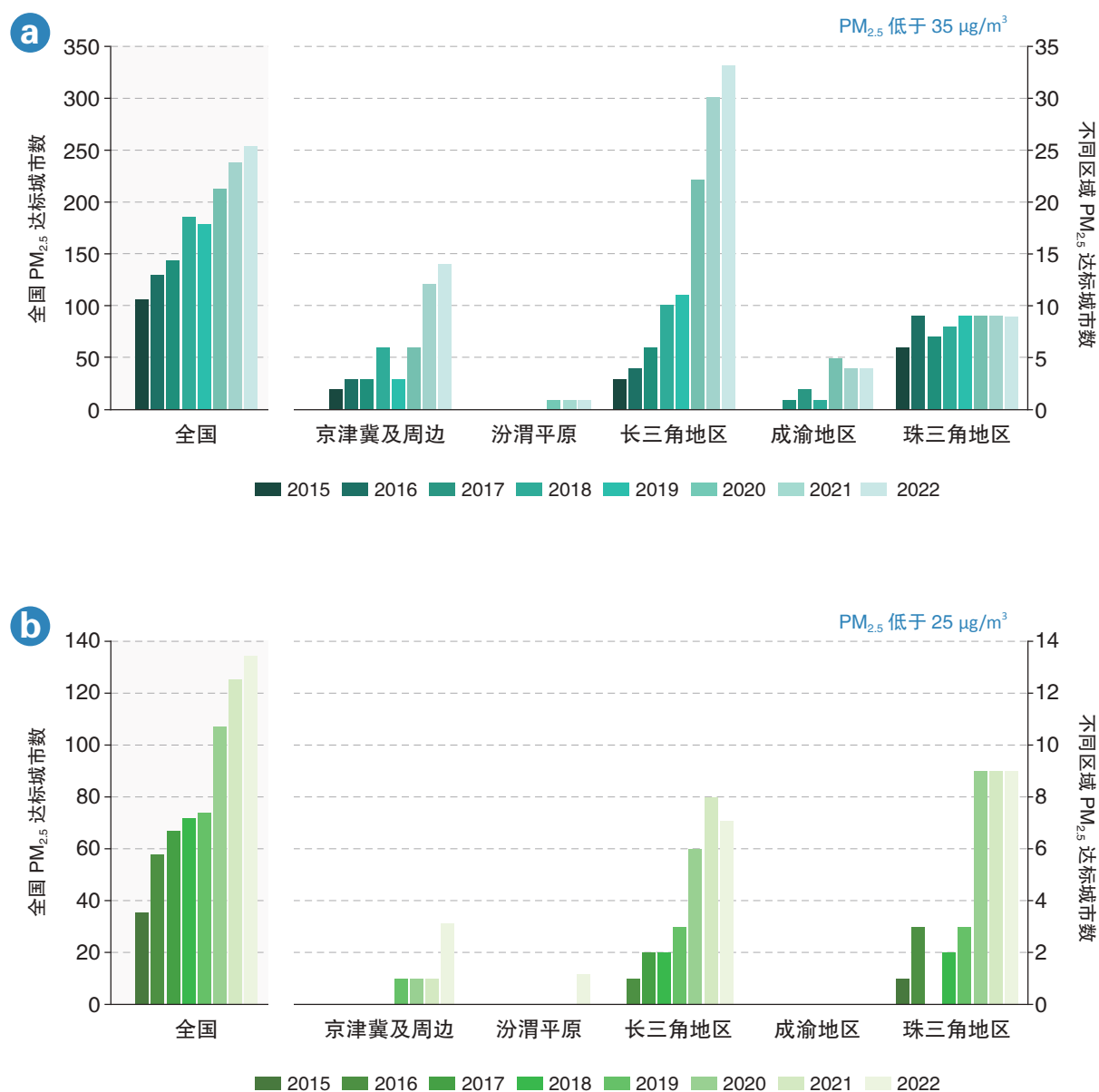
图 2-1 2015 年至 2022 年全国及重点区域 PM_{2.5}、O₃ 日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数的 (a, c) 平均浓度变化以及 (b, d) 三年滑动平均浓度^[1]

[1] 图中京津冀及周边地区包含北京市, 天津市, 河北省石家庄、唐山、秦皇岛、邯郸、邢台、保定、张家口、承德、沧州、廊坊、衡水, 山西省太原、大同、朔州、忻州、阳泉、长治、晋城, 山东省济南、青岛、淄博、枣庄、东营、潍坊、济宁、泰安、日照、临沂、德州、聊城、滨州、菏泽, 河南省郑州、开封、平顶山、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、许昌、漯河、南阳、商丘、信阳、周口、驻马店, 内蒙古自治区呼和浩特、包头, 辽宁省朝阳、锦州、葫芦岛, 共 54 个城市。长三角地区包含上海市, 江苏省南京、无锡、徐州、常州、苏州、南通、连云港、淮安、盐城、扬州、镇江、泰州、宿迁, 浙江省杭州、宁波、温州、绍兴、湖州、嘉兴、金华、衢州、台州、丽水、舟山, 安徽省合肥、芜湖、蚌埠、淮南、马鞍山、淮北、铜陵、安庆、黄山、阜阳、宿州、滁州、六安、宣城、池州、亳州, 共 41 个城市。汾渭平原包含山西省吕梁、晋中、临汾、运城, 河南省洛阳、三门峡, 陕西省西安、咸阳、宝鸡、铜川、渭南, 共 11 个城市。成渝地区包含重庆市, 四川省成都市、德阳市、绵阳市、乐山市、眉山市、资阳市, 共 7 个城市。珠三角地区包含广东省广州、深圳、珠海、佛山、江门、肇庆、惠州、东莞、中山, 共 9 个城市。

2015–2021 全国及重点区域 O₃-8H 90Per 达国家二级标准(160 μg/m³)城市数呈现倒“N”型(图 2-2c, d)。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 O₃-8H 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。

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。图 2-3 所示为 2015 和 2022 年全国 339 城市 PM_{2.5} 年均浓度排名的空间分布。2015 年, PM_{2.5} 污染最严重



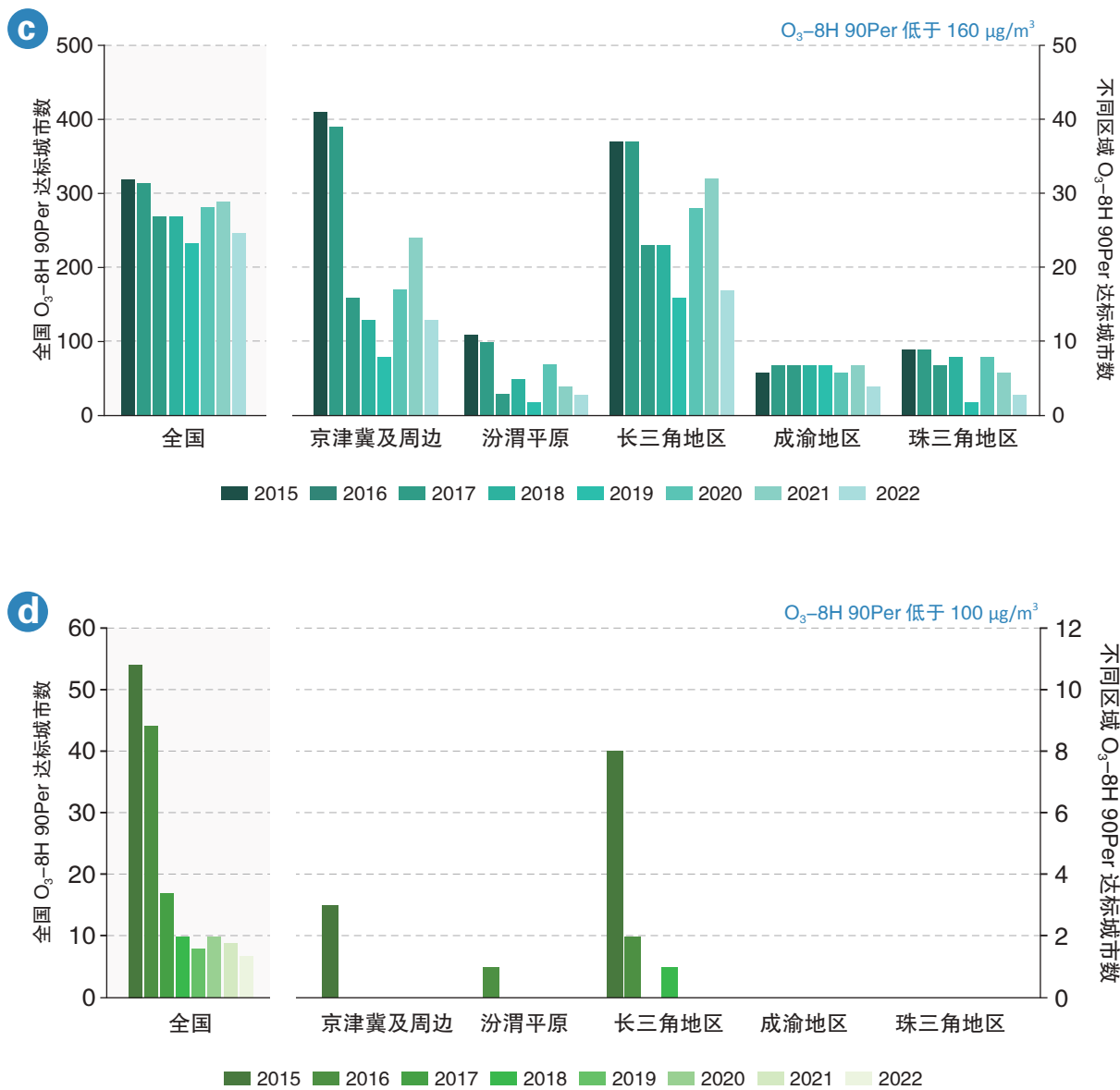


图 2-2 2015 年至 2022 年全国及重点区域 (a, b) PM_{2.5} 年均浓度达标城市数 (PM_{2.5} 年均浓度分别低于 35 µg/m³ 和 25 µg/m³ 的城市数量) , 以及 (c, d) O₃ 日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数的年平均浓度达标城市数 (O₃-8H 90Per 年均浓度分别低于 160 µg/m³ 和 100 µg/m³ 的城市数量)

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 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，PM_{2.5} 污染最严重的前三名城市分别为咸阳市、鹤壁市和渭南市。

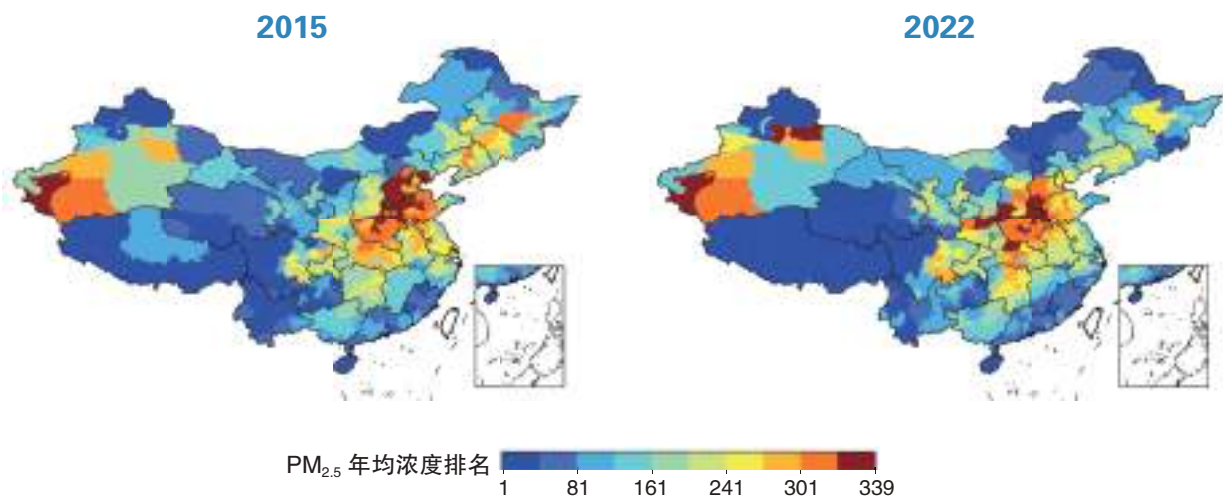


图 2-3 2015 和 2022 年全国 339 城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度排名

2022 年全国 339 个地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 重度及以上污染天数占比为 0.7%，与 2021 年基本持平（0.7%），相比 2015 年（2.8%）下降 75%，说明在我国大气污染治理过程中，对 $PM_{2.5}$ 重度及以上污染天的控制取得了显著成效。与此同时，重污染期间 $PM_{2.5}$ 浓度峰值也大幅下降。例如，2015 年 12 月北京市的雾霾事件中，日均 $PM_{2.5}$ 浓度峰值高达 $486 \mu g/m^3$ ；尽管 2022 年 3 月北京市也发生了 $PM_{2.5}$ 重污染过程，但浓度峰值为 $155 \mu g/m^3$ ，相比 2015 年明显下降。在重点区域中，2022 年京津冀及周边地区和汾渭平原仍存在 1.7% 和 1.6% 的 $PM_{2.5}$

重度及以上污染天数，但相比于 2015 年分别下降 83% 和 68%，污染治理效果明显；长三角地区和成渝地区的 $PM_{2.5}$ 重度及以上污染天数分别仅占比 0.2% 和 0.1%；珠三角地区已经连续四年无 $PM_{2.5}$ 重度及以上污染（图 2-4）。

2022 年全国 339 个地级及以上城市 O_3 超标天数占比为 6.5%，2015 年至 2022 年 O_3 污染变化的整体趋势为先上升后下降。2022 年相比 2018 年的峰值（8.4%）下降了 22.6%，说明在 2018 年提出《打赢蓝天保卫战三年行动计划》后，对 O_3 污染的控制取得了一定成效。与



此同时，O₃ 浓度峰值也出现下降。例如，2017 年 7 月北京市 O₃ 日最大 8 小时平均浓度最高可达 308 μg/m³，而 2022 年 6 月 O₃ 日最大 8 小时平均浓度的峰值为 287 μg/m³。在重点区域中，2022 年京津冀及周边地区、汾渭平原和长三角

地区仍存在 17.7%、13.6% 和 10.8% 的 O₃ 超标天数，但相比于各自峰值年份分别下降 27.5%、24.4% 和 18.8%，污染治理效果明显；珠三角地区和成渝地区污染水平相对较轻，2022 年超标天数占比分别为 8.4% 和 6.6%（图 2-5）。

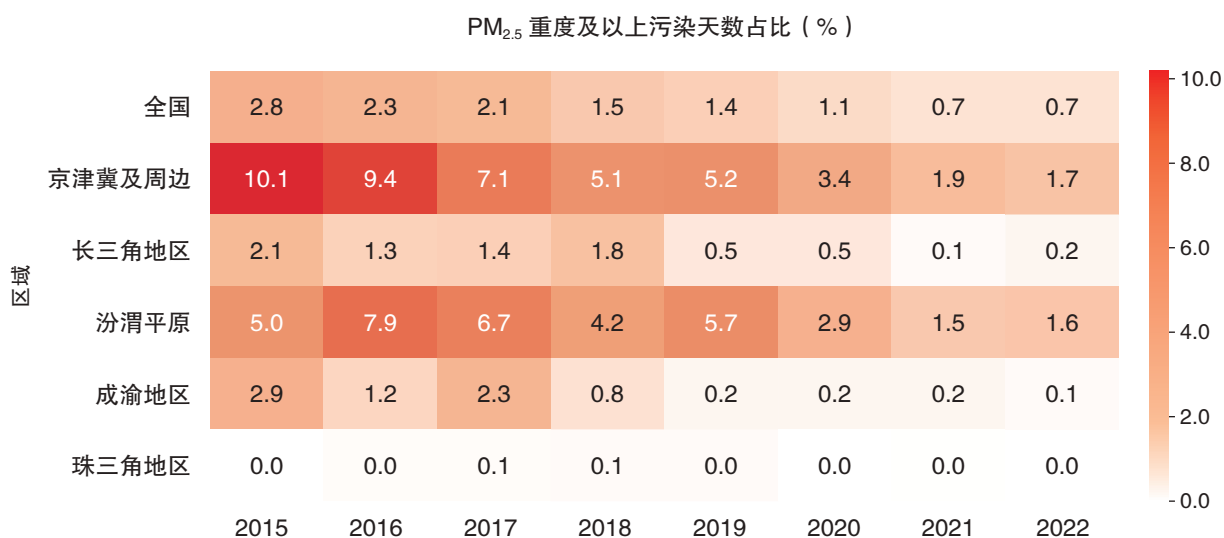


图 2-4 2015 年至 2022 年全国及重点区域重度及以上污染天数占比情况

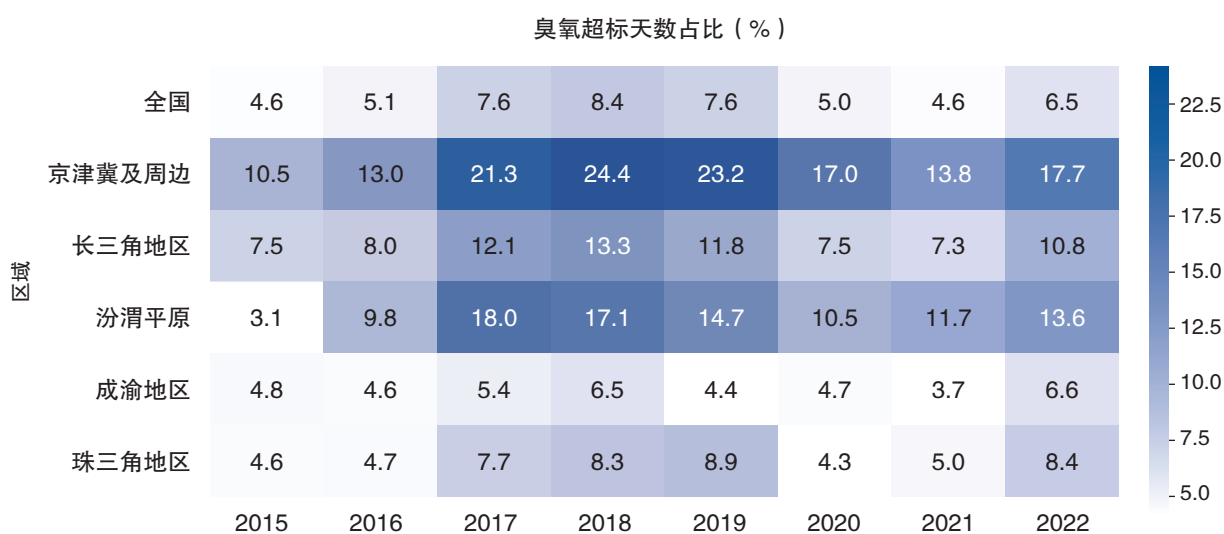


图 2-5 2015 年至 2022 年全国及重点区域 O₃ 超标天数占比情况

2.2 气象条件对 AQI 的影响

PM_{2.5} 气象条件评估指数 (EMI) 是利用气象观测资料, 采用数值解法计算出表征气象条件变化对 PM_{2.5} 浓度影响的气象指数 (QX/T 479-2019)。EMI 是指在排放不变的条件下, 由于传输、扩散和沉降的气象条件变化所导致 PM_{2.5} 浓度变化的指数, EMI 可用来表征气象条件的定量贡献, EMI 指数值越小代表气象条件越有利于 PM_{2.5} 浓度降低。

从 2017-2022 年全国及重点区域 EMI 指数逐年变化来看, 2022 年全国平均 PM_{2.5} 污染气象条件与 2021 年相比略有上升 (上升 1.3%), 长三角和珠三角地区气象条件有利于 PM_{2.5} 浓度下降, 京津冀及周边、成渝地区和

汾渭平原气象条件有利于 PM_{2.5} 浓度上升 (图 2-6)。值得注意的是, 2022 年京津冀及周边、成渝地区和汾渭平原的大气污染扩散条件较近 5 年平均和 2021 年均偏差。就京津冀而言, 2022 年气象条件可使 PM_{2.5} 较 2021 年上

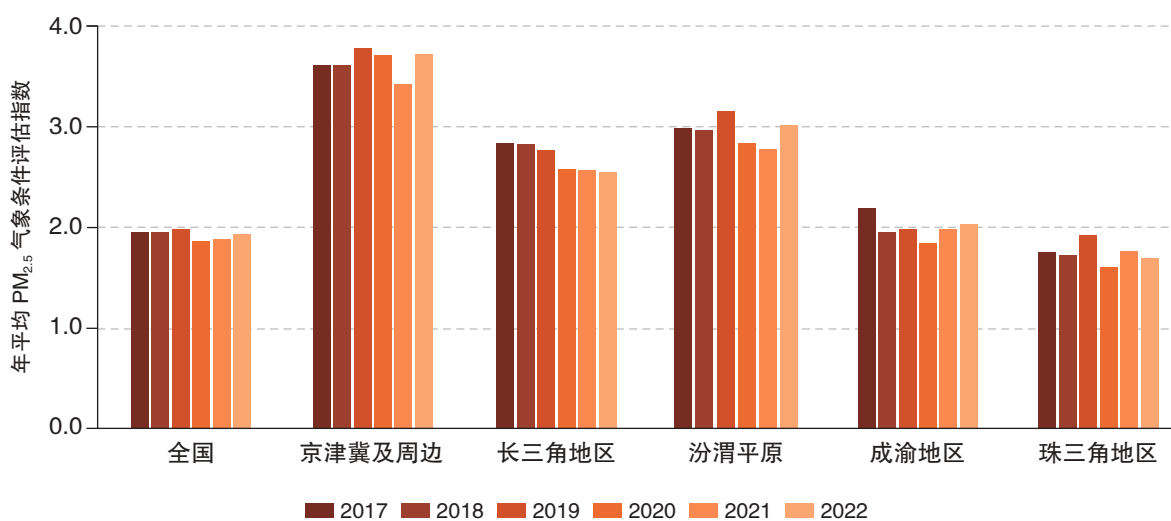


图 2-6 2017 年至 2022 年全国及重点区域 PM_{2.5} 气象条件评估指数变化 (中国气象局, 2023a)

升约 8.3%，较近 5 年平均上升 2.2%；就汾渭平原而言，气象条件可使 PM_{2.5} 较 2021 年上升约 7.9%，较近 5 年平均上升 1.9%；就成渝地区而言，气象条件可使 PM_{2.5} 较 2021 年上升 0.9%，较近 5 年平均上升 0.8%。气象条件使 2022 年珠三角地区和长三角地区 PM_{2.5} 浓度较 2021 年分别下降 6.1% 和 1.7%，较近 5 年平均分别下降 5.4% 和 6.9%。

臭氧气象条件评估指数是基于实况观测资料，通过统计建模方法构建的定量表征太阳辐射、气温、湿度、风等气象要素对臭氧综合影响的无量纲指标，其值越大表征气象条件越有利于 O₃ 浓度升高（中国气象局，2023a）。目前，各级气象部门均以该指数为核心，开展气象条件对臭氧浓度变化影响评估相关工作（气减函〔2022〕79 号，气象条件对臭氧浓度变化影响评估服务规范，2022 年）。

从 2017 年至 2022 年 5-9 月全国及重点区域臭氧气象条件评估指数的变化来看，2022 年 5-9 月全国平均臭氧气象条件较 2021 年同期上

升 5.0%，较近 5 年同期平均上升 3.6%。全国大部受降水偏少、气温偏高、辐射偏强、日照偏长等影响，气象条件有利于臭氧浓度增加，臭氧气象条件评估指数达到 2017 年以来的最大值（图 2-7）。具体来说，京津冀及周边地区 2022 年 5-9 月气象条件使 O₃ 浓度较 2021 年同期上升 8.5%、较近 5 年同期平均上升 2.7%，其 O₃ 浓度连续下降三年后显著抬升，二者变化趋势一致。类似地，长三角地区臭氧气象条件自连续两年转好后大幅转差，气象条件可使 2022 年 5-9 月 O₃ 较 2020 年上升 8.1%，较近 5 年同期平均上升 6.4%。在汾渭平原，2022 年 5-9 月臭氧气象条件较 2021 年同期上升 3.0%、较近 5 年同期平均上升 2.1%。成渝地区臭氧气象条件在 2021 年偏好后转差，气象条件使得 2022 年 5-9 月 O₃ 较 2021 年同期上升 11.0%，较近 5 年同期平均上升 10.7%，指数变化率远高于其他区域，与该区域 O₃ 浓度变化趋势一致。2022 年，珠三角地区 O₃ 浓度较 2021 年小幅增加，5-9 月臭氧气象条件评估指数较 2021 年同期上升 1.3%，较近 5 年平均上升 4.7%，气象条件转差对臭氧浓度升高有所贡献。

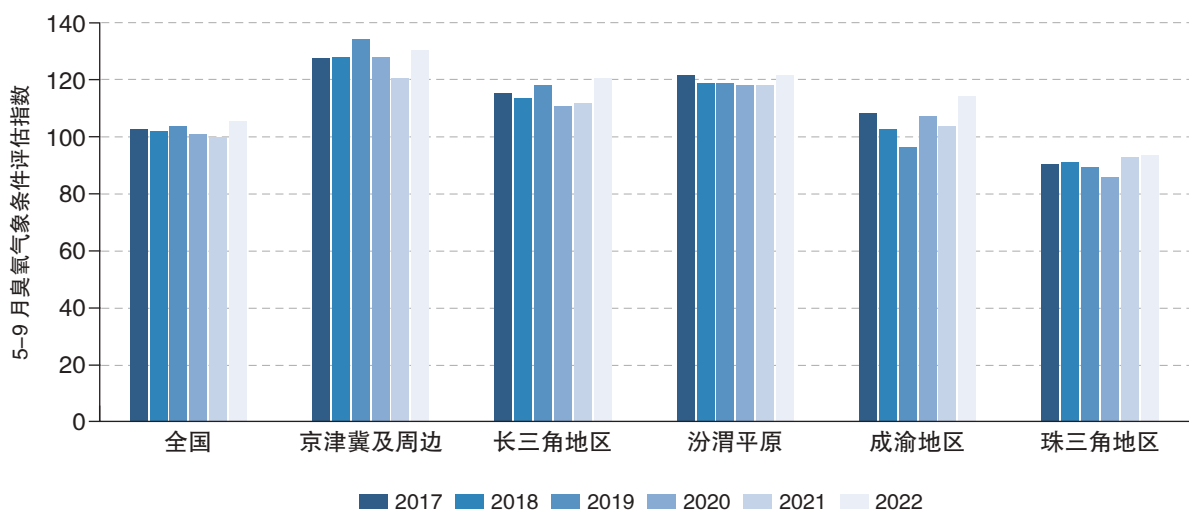


图 2-7 2017 年至 2022 年 5-9 月全国及重点区域臭氧气象条件评估指数变化（中国气象局，2023a）

气温对臭氧的影响主要体现为臭氧前体物排放、臭氧存留时间、以及臭氧光化学反应速度等均存在温度依赖机制 (Lu et al., 2019b; Porter et al., 2019)。例如, 生物源 VOCs 排放会随着气温升高而增加 (Guenthe et al., 1991)。2022 年夏季, 中国出现创纪录高温, 日最高气温异常偏高 $0.86 \pm 1.02^\circ\text{C}$, 臭氧日最大 8 小时滑动平均 (MDA8 O₃) 浓度上升了 $6.46 \pm 13 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 两者的空间分布呈明显正相关, 日最高气温每增加 1°C , MDA8 O₃ 增加 $7.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。日最高气温异常偏高的区域 ($>2^\circ\text{C}$) 主要发生在长江流域, 该流域 MDA8 O₃ 浓度也呈异常偏高特征, 四川盆地异常最高 ($24.7 \pm 9.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 其次是长三角地区 ($20.8 \pm 7.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$)、汾渭平原 ($17.5 \pm 9.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 和双湖地区 ($8.76 \pm 9.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。往年臭氧污染较重的京津冀及周边地区和臭氧污染较轻的珠三角地区, 2022 年夏季 MDA8 O₃ 增幅相对较小, 分

别为 $1.92 \pm 9.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.33 \pm 6.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这与其日最高气温异常变化较小的特征基本吻合 (图 2-8)。

2022 年我国共出现了 10 次沙尘天气过程 (中国气象局, 2023b), 较 2021 年 (13 次) 偏少 3 次, 较近 5 年平均 (12.2 次) 偏少 2.2 次。一般而言, 当监测到上游沙源地发生起沙, 并导致沙尘传输路径中下游城市 PM₁₀ 小时浓度急剧上升、PM_{2.5} 与 PM₁₀ 比值急剧下降时, 即认定为受到沙尘天气影响。2022 年沙尘过程具有首发时间晚、强度弱、影响范围小等特点 (中国气象局, 2023b)。2022 年春季, 影响我国的主要沙源地的气象条件总体不利于沙尘天气发生。冷空气和大风日数较往年同期偏少; 沙源地积雪覆盖面积偏多; 2021 年秋季主要沙源地降水量较往年明显偏多。气象条件整体有利于 2022 年春季沙尘天气偏少偏弱。

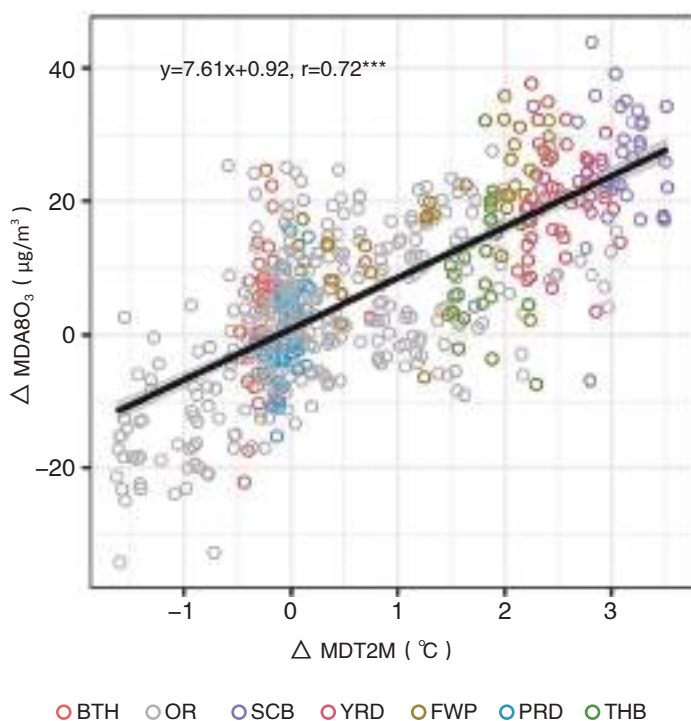


图 2-8 长江流域重点区域 2022 年相对于 2014–2021 年平均的日最高气温异常和 MDA8 O₃ 异常散点图 (Zheng et al., 2023)

2.3 气候变化及其影响

2022 年全球三种主要温室气体 (CO₂, CH₄, N₂O) 的浓度达到观测到的历史新高, 加剧了气候变化及其影响。全球平均气温比工业化前 (1850–1900 年) 升高约 1.15°C。虽然连续 3 年的“拉尼娜”事件有一定全球降温作用, 但 2015–2022 年依然是历史上最暖的 8 年。大量温室气体及其产生的能量进入海洋, 导致 2022 年海洋热量创新高, 海洋吸收二氧化碳和调节气候的能力受限。同时, 海洋 pH 值正在以 2.6 万年以来未有的速度下降, 对海洋生态系统构成了风险。2022 年, 海平面高度再创新高, 上升速率翻了一番 (WMO, 2023a)。世界气象组织最新发布的报告认为在 21 世纪气候升温可能会超过 1.5°C, 并且 2023 年至 2027 年之间至少一年内超过 1.5°C 阈值的可能性为 66% (WMO, 2023b)。

2022 年, 我国气候状况整体偏差, 暖干气候特征明显, 旱涝灾害严重突出。全国平均气温较常年 (1991–2020) 偏高 0.62°C。然而, 全国平均降水量较常年偏少 5.0%, 并表现出明显的阶段性和区域性变化 (中国气象局, 2023b)。2022 年极端事件频繁, 中东部夏季出现 1961 年以来最强高温, 南方遭遇严重的夏秋连旱, 华南东北暴雨过程频发。自五月以来, 我国珠江流域、东三省、四川等地均遭遇了不同程度的强降水过程。龙舟水强袭珠江流域, 部分地区降水量达 600–900 mm (中国气象局, 2023b)。2022 年夏季我国高温日数为 14.3 天, 为历史同期最多 (中国气象局, 2023b)。长江中下游及川渝等地出现大范围破纪录的高温热浪, 呈现出高温持续时

间长、强度大、极端性强的特点 (Yin et al., 2023)。同时长江中下游“汛期反枯”, 极端干旱造成鄱阳湖夏季水量损失超过 75%。上述高温干旱气候对农业生产、能源供应以及生态系统等造成了严重的不利影响。径流减少使四川省的蓄水形势严峻以及水力发电量大幅减少, 而高温干旱导致用电用水量激增, 进一步加剧了电力短缺 (孙博等, 2023; Yin et al., 2023)。此外, 过高的温度使得风速下降, 减弱风能 (Sherman et al., 2017); 还会造成光伏发电板输出功率折损等问题, 从而降低太阳能发电效率 (穆志君等, 2009)。

2022 年, 我国风能资源为正常略偏小年景。10 米高度年平均风速较近 10 年 (2012–2021

年，下同)平均值偏小 0.82%，较 2021 年偏低 0.96%。70 米高度年平均风速约 5.4 m/s，年平均风功率密度约 193.1 W/m²，较 2021 年偏低 2.6 W/m² (图 2-9a)。风能资源呈现出较大的地区差异 (图 2-9c)，分别有 11 个和 4 个省 (区、市) 70 米高度年平均风速偏小和偏大，其余省份接近常年平均值。多数省 (区、

市) 70 米高度年平均风功率密度接近平均。2022 年，全国太阳能资源为偏大年景。年平均水平面总辐照量约 1563.4 kWh/m²，为近 30 年 (1992-2021 年，下同) 最高，较近 30 年平均值偏大 45.3 kWh/m² (图 2-9b)，较近 10 年平均值偏大 54.0 kWh/m²，较 2021 年偏大 70.0 kWh/m²。我国太阳能资源地区性差异较大，呈

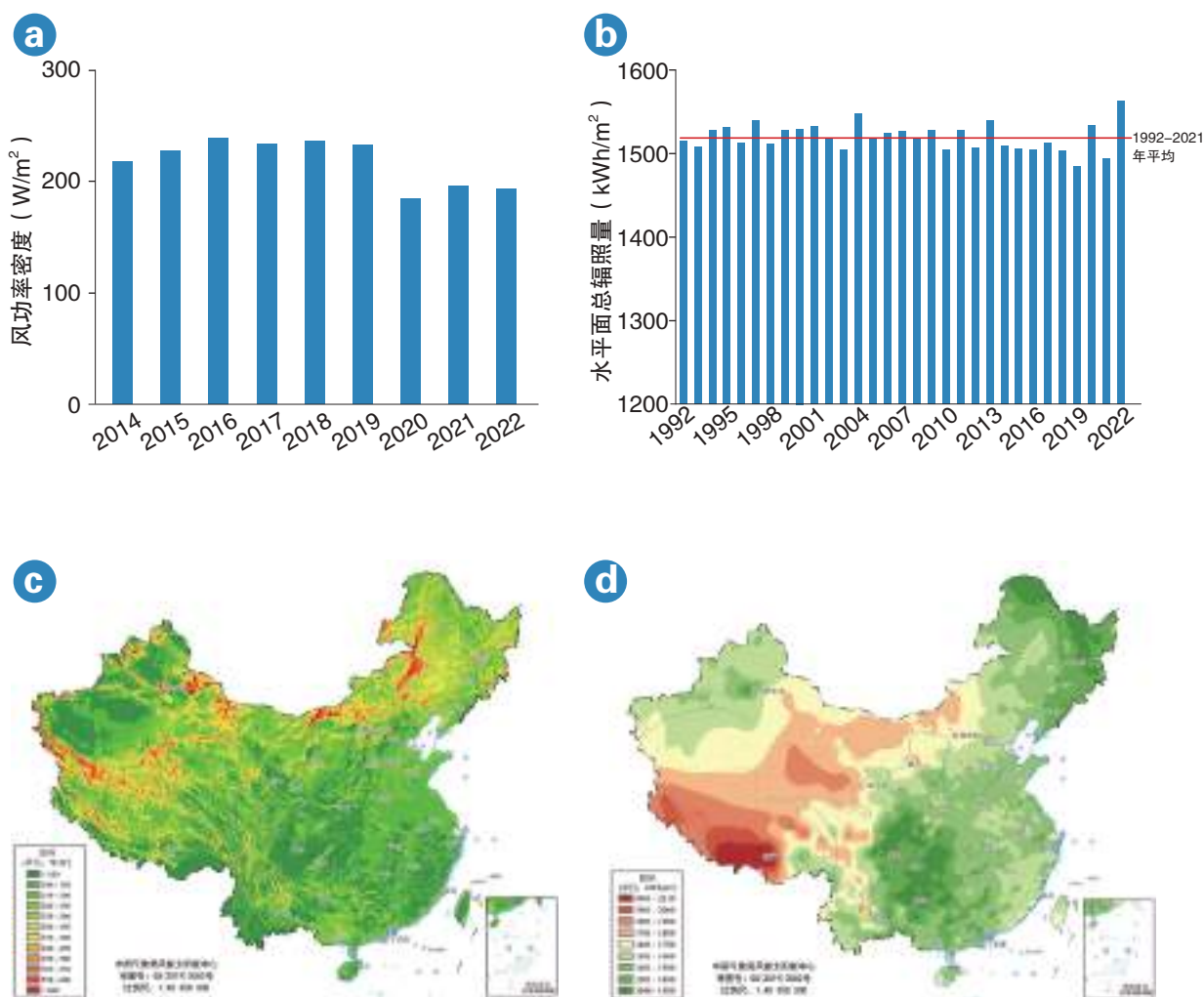


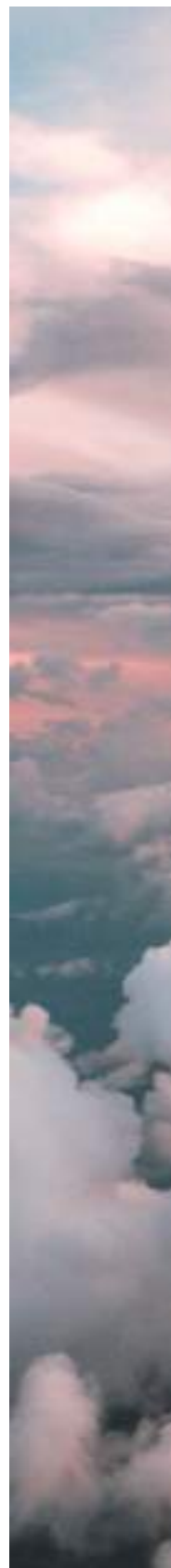
图 2-9 (a) 2014 年至 2022 年全国 70 米高度层年平均风功率密度 (单位: W/m²) (中国气象局公共气象服务中心); (b) 1992 年至 2022 年全国平均年水平总辐照量年际变化 (单位: kWh/m²); 2022 年全国 (c) 70 米高度层年平均风功率密度分布 (单位: W/m²) 和 (d) 水平面总辐照量分布图 (单位: kWh/m²)

现西部地区大于中东部地区，高原、少雨干燥地区大，平原、多雨高湿地区小的特点。2022年，西藏大部、青海中部及北部局地年水平面总辐照量超过1750 kWh/m²，为太阳能资源最丰富区。总体来看，西部地区水平面总辐照量较常年偏小，东部地区较常年偏大（图2-9d）。

中国力争在2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和。相比当前气候，到2030年左右中国年平均气温将增加约1.3℃，到2060年左右将增加约2.1℃（You et al., 2021）。对于年平均降水，到2030年将增加约8%，到2060年将增加约10%（邓荔等，2022；Wang et al., 2022；徐北瑶等，2022）。极端气候变化相比平均气候变化更为剧烈。随着变暖加剧，中国区域极端暖事件明显增加，冷事件显著减少（Li et al., 2022a）。到2030年，日最高气温极大值将增加约1.0℃，日最低气温极小值将增加约1.2℃（Chen et al., 2017）；到2060年，中国东部地区热浪发生日数将增加8-29天/年，强度将增加0.6-1.2℃（Xu et al., 2022），热浪持续时间将增加约2.6倍（Rao et al., 2019）。极端降水事件整体呈现显著增多、增强趋势，但区域差异较大，增加大值区主要在华北、东北等北方地

区（Dong et al., 2020；Xu et al., 2021）；到2060年，中国区域最大5日连续降水量将增加约10%，50年一遇事件的再现期将缩短至10年以下（Li et al., 2018；Xu et al., 2018）。

全球和区域气候模式对未来我国风能太阳能资源预估研究表明，到21世纪末，我国年平均地表风速有所下降；我国东部和南部地区太阳辐射呈增加趋势，而在青藏高原和西北地区则呈下降趋势；2030-2050年，在我国总体的风能和太阳能资源趋于减少，年平均风功率密度和光伏发电量的变化百分率分别在12%-9%和1.1%-1.3%之间。对于风光资源未来变化的预估，不同排放情景模拟结论存在明显差异。在“碳中和”减排情景下，2040-2049年我国东部高风速日增多、向下短波辐射增强，风能太阳能资源趋于增多，变化百分率分别在3-5%和6%-7%之间。此外，风能和太阳能的时间变率均呈减小趋势，这表明假定的全球碳中和政策将减小风能和太阳能在不同时间尺度的波动性，增强太阳能和风能发电稳定性（Lei et al., 2023）。对于风光资源未来变化预估，不同区域、不同排放情景模拟结果存在明显不确定性，而且风能资源不确定性明显大于太阳能资源（Gernaat et al., 2021）。









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。

3. | 协同治理体系建设

“减污降碳协同增效”概念提出后，对于协同治理的理论和实践研究开始涌现。一方面，学术界从温室气体与大气污染物“同根同源性”的角度，对各类减排行动的协同效应开展系统性的评估，推动社会共识逐步形成；另一方面，产业界从实践出发，提出在污染物超低排放背景下，深化结构调整和绿色转型是减污与降碳协同的根本途径。也有大量研究指出了中国协同治理体系建设需要面对的几方面重大挑战。

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（Wu et al., 2022），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。

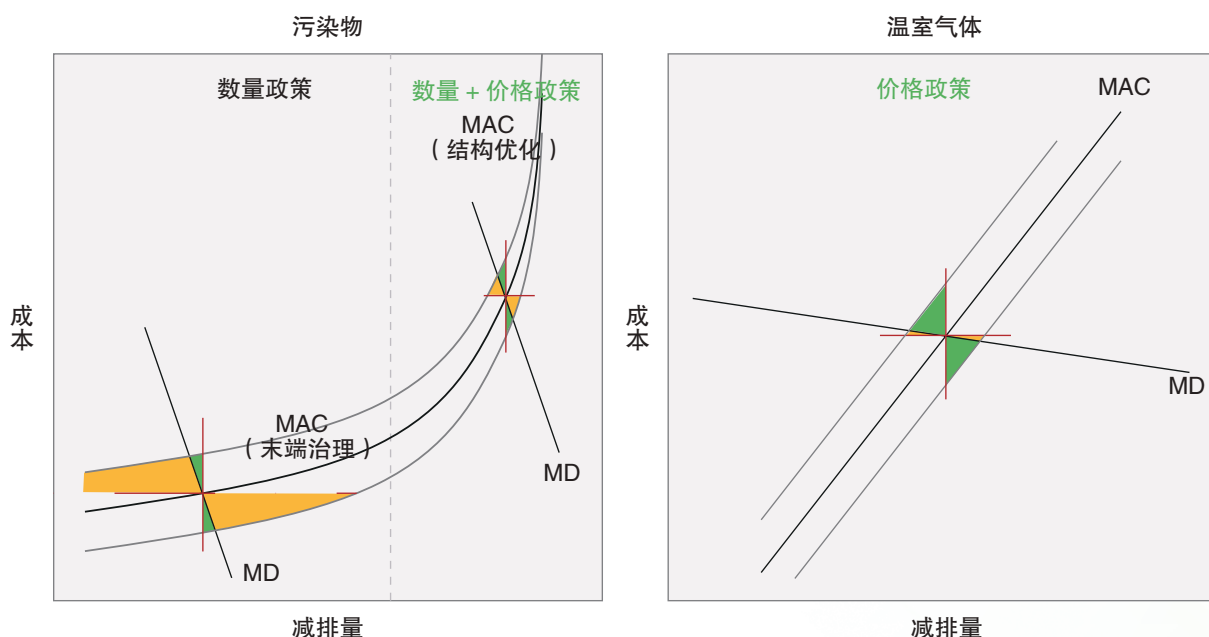


图 3-1 环境和气候治理政策工具选择示意 (Weitzman, 1974)

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” (De Beule et al., 2022)；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 (Qian et al., 2022)。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碳排放双控转变；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。

3.2 协同治理政策

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。

以准入与考核等为导向的协同治理行政管制手段效能逐步发挥。一是充分利用生态环境政策工具，以持续推进蓝天保卫战为主战场，稳步推进9个省（区、市）重点行业建设项目碳排放环境影响评价试点和碳监测评估试点，选取重点产业园区开展规划环评碳排放环境影响评价试点，探索在“三线一单”中开展减污降碳协同管控，从源头把关推动提升减污降碳政策成效。二是强化考核“指挥棒”作用，统筹减污降碳工作要求，中国将控制温室气体排放目标责任考核相关内容纳入“十四五”污染防治攻坚战成效考核，进一步推动落实新发展阶段碳排放强度下降目标。三是在推动能耗双控逐步转向碳排放双控的同时，做好新增可再生能源消费不纳入能源消费总量控制有关工作，激励能源清洁低碳转型。

以碳市场为主体的市场经济激励政策在应用中持续完善和创新。一是碳市场交易政策促进企业减排温室气体和加快绿色低碳转型的作用初步显现。中国碳市场已成为全球覆盖排放量规模最大的碳市场，截至2022年年底，碳排放配额累计成交量2.3亿吨、成交额104.75亿元，分别较2021年提高28.5%、36.7%。二是创新气候投融资政策解决绿色低碳转型阶段的资金需求。2022年，国家组织23个地方开展气候投融资试点，发布气候投融资试点地方气候投融资项目入库参考标准，引导试点地区搭建“政银企”信息对接平台，推动形成中央和地方协同发力的良好局面。截至2022年底，23个试点地区共征集或储备项目超1500个，涉及资金达2万亿元左右。

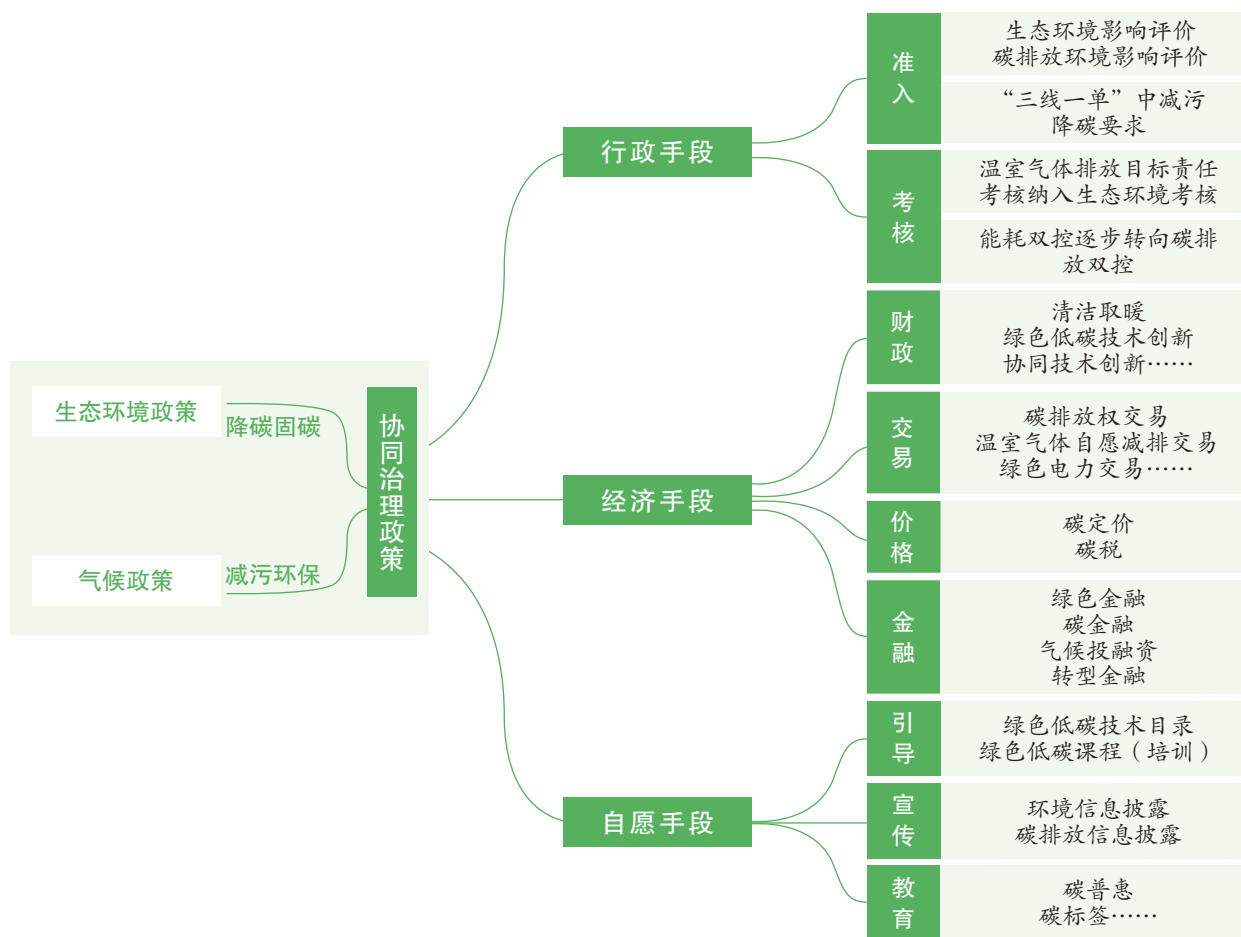


图 3-2 减污降碳协同治理政策框架

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。

3.3 地方实践

《减污降碳协同增效实施方案》印发后，各地结合自身特点，根据方案提出的要求，积极组织对方案的细化和落实。截至 2022 年 12 月，吉林、黑龙江、浙江、安徽、福建、江西、陕西、宁夏等省（自治区）正式印发了地方减污降碳协同增效落实文件，推动地方实践工作。

结合中国城市环境空气质量监测数据（中国环境监测总站发布）和二氧化碳排放数据（Cai et al., 2018a, 2019a, 2019b; 中国城市温室气体工作组, 2021）的分析表明，中国高碳排放城市呈现 PM_{2.5} 污染更为严重的态势：2021 年 PM_{2.5} 浓度年均值未达国家二级标准的 99 个城市平均 CO₂ 排放量（5679 万吨）比 236 个 PM_{2.5} 浓度达标城市平均 CO₂ 排放总量（3665 万吨）高出约 55%；在 CO₂ 排放总量高于 5000 万吨的 91 城市中，PM_{2.5} 浓度达标的城市比例（59%）明显低于 CO₂ 排放总量低于 5000 万吨的城市（约占 75%）。结合历年城市二氧化碳排放数据的分析结果显示，截至 2021 年，约 12% 的城市处于碳排放达峰状态（利用 Mann-Kendall 趋势检验方法对城市直接排放和总排放进行综合评价；图中绿色散点）（Zhang et al., 2022; 蒋含颖等, 2021; 张立等, 2021），其中约 59% 的城市实现了 PM_{2.5} 浓度达标；约 16% 的城市处于碳排放平台期（图中黄色），其中约 58% 的城市实现了 PM_{2.5} 浓度达标；剩余约 72% 的城市处于未达峰状态（图



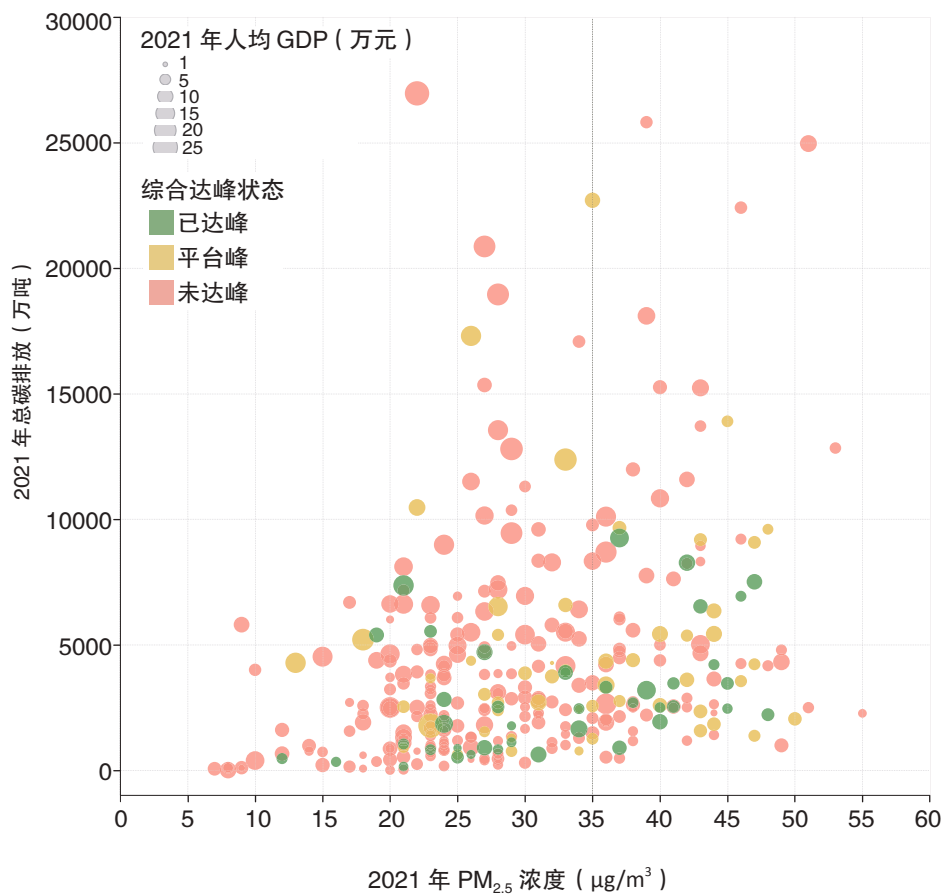


图 3-3 2021 年城市 PM_{2.5} 年均浓度和 CO₂ 排放特征比较

注：点的颜色代表城市碳达峰状态，点的大小代表城市 2021 年人均 GDP

中红色)。虽然新冠疫情可能对城市达峰状态造成一定影响，但整体而言，城市碳达峰状态与其碳排放总量、PM_{2.5} 浓度达标情况等因素未表现出明显的相关性特征。

此外，协同变化趋势结果显示，2015–2021 年间仅有 105 个城市实现了 PM_{2.5} 年均浓度和 CO₂ 排放量协同下降，占城市总数的 31.3%，与 2015–2020 年协同下降的城市数量持平；有 9 个城市的 PM_{2.5} 年均浓度和 CO₂ 排放量同步升高，占城市总数的 2.7%，相比 2015–2020 年减少 8 个。

研究团队进一步使用对数平均迪氏指数法

(LMDI) 分析来解析“十三五”期间各城市碳排放变化(能源活动碳排放)的主要驱动力，涵盖人口、人口平均 GDP、能源强度和能源结构等驱动因素，同时利用聚类分析将全国地级及以上城市按照发展水平进行分类，其中 1 类为最发达城市(如北京、上海、广州等)，4–5 类为欠发达城市。分析结果显示，“十三五”期间，能源强度降低是碳减排的最重要驱动因素，该效应在 1 类(最发达)城市最为明显(平均排放贡献约 -31%)，其次是 2–3 类城市和 4–5 类城市。能源结构改善对碳减排有影响，在 1 类(最发达)城市最为明显(平均排放贡献约 -5%)。另一方面，人均 GDP 上升是碳排放增加的主要驱动力，并且影响程

度在 4-5 类城市较为明显（平均排放贡献约 25%-30%），整体高于对发达城市的影响。人口效应对各城市的影响不一，其中发达城市

由于人口迁入，呈现对排放的增加效应；相比之下，欠发达城市由于人口流失，整体呈现减排效应。

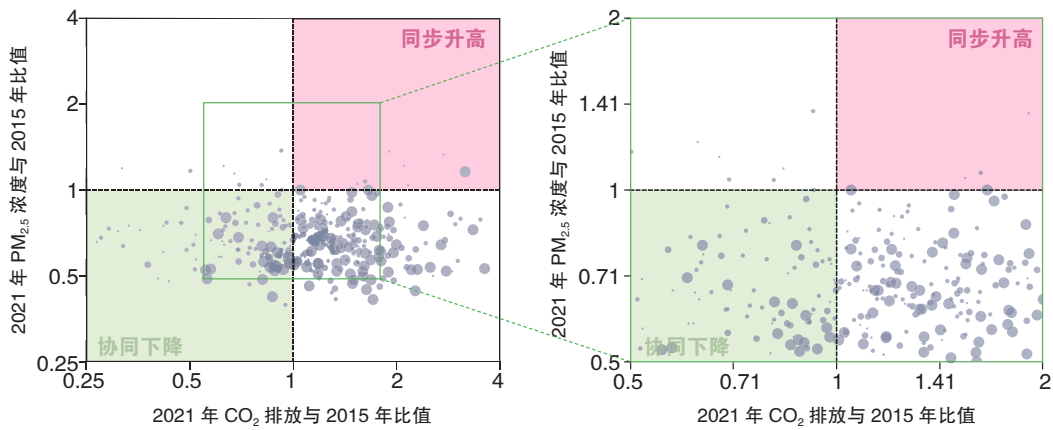


图 3-4 2015-2021 年城市 PM_{2.5} 年均浓度和 CO₂ 排放量变化情况比较

注：散点大小表示 2021 年 CO₂ 排放

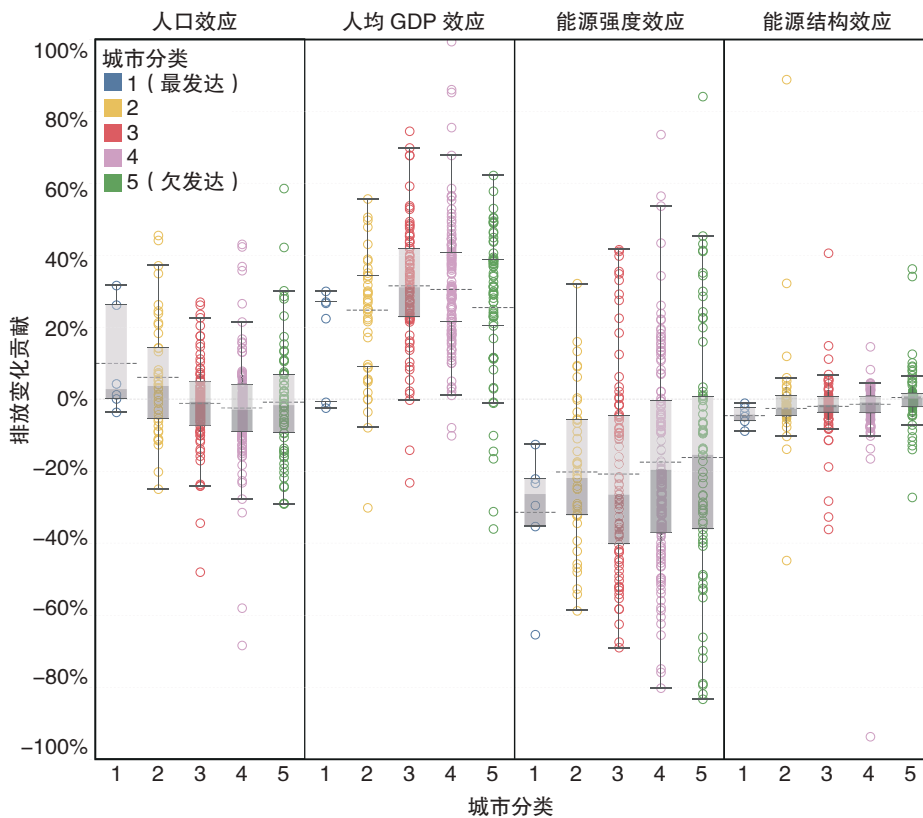


图 3-5 “十三五”期间中国分城市类型碳排放变化驱动分解结果

注：城市类别 1-5 由聚类分析确定（从最发达到欠发达城市），灰线虚线表示均值，箱体表示 25%-75% 分位数





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。本章详细梳理了中国在结构转型进程与治理技术发展的新进展，分析识别中国在推进清洁空气协同路径中的潜在问题，以期为中国开展进一步的碳污协同治理工作提供参考。

4. | 能源结构转型

中国共产党“二十大”报告提出要积极稳妥推进碳达峰碳中和，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，立足我国能源资源禀赋，坚持先立后破，有计划分步骤实施碳达峰行动，深入推进能源革命，加强煤炭清洁高效利用，加快规划建设新型能源体系，为我国持续推进能源绿色低碳转型提出了能源发展新方略。

能源结构调整出现“新”变化。中国共产党“二十大”报告提出“深入推进能源革命，加快规划建设新型能源体系，确保能源安全”，加快构建新型能源体系过程中推动能源低碳转型，在能源安全和能源转型“双重”刺激下，煤炭和新能源“双向”增长。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（国务院发展研究中心，2023）。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%，相较于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。

可再生能源发展屡创新高。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、风力发电量首次突破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。

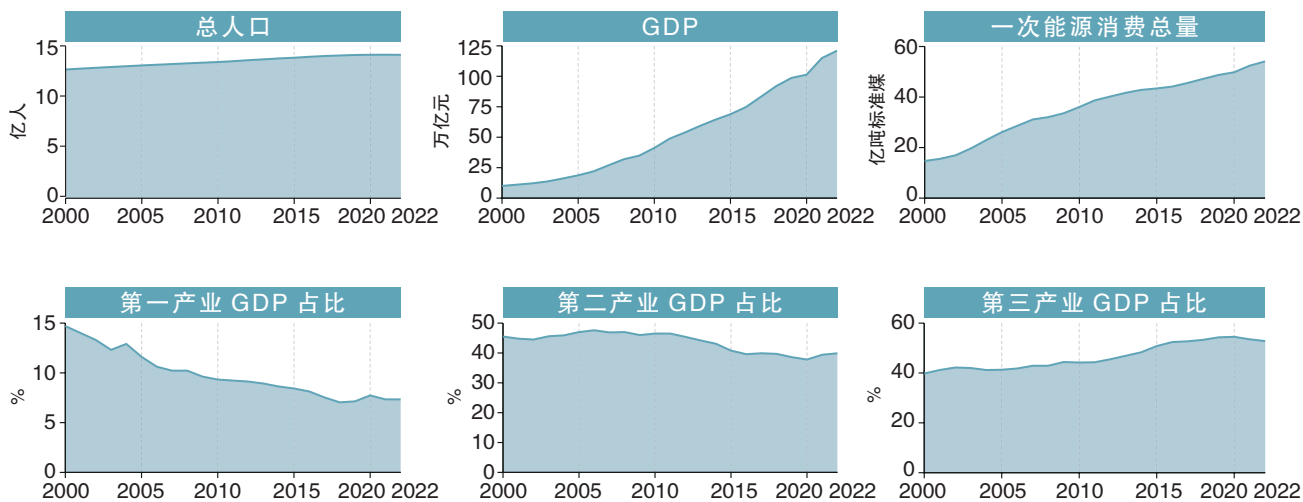
煤电项目建设出现新的热潮。煤电作为保障能源安全的“压舱石”和电力保供的“顶梁柱”，其建设出现新的热潮，2023年上半年新核准了52 GW的煤电装机（CREA, 2023），已超过2022年核准煤电装机的一半，约为2021年全年的2.7倍左右，新核准煤电装机主要来自于河北、江苏、山东、广东、湖北等省份，合计占比达65%以上，其中72%左右是百万千瓦的大型机组（绿色和平，2023）。

石油和天然气消费持续波动。中国共产党“二十大”报告指出，“加大油气资源勘探开发和增储上产力度”，《“十四五”现代能源体系规划》明确提出了“石油产量力争2022年回升到2亿吨水平并较长时期稳产，天然气力争2025年达到2300亿立方米以上”。2022年，原油产量20467万吨，较上年增长2.9%，但对外依存度仍高达71.2%。天然气产量2178亿立方米，较上年增长6.4%，对外依存度41.2%。2022年石油、天然气占比分别为17.9%和8.4%，同比分别下降了0.7和0.5个百分点。随着疫后经济发展，我国原油、成品油消费预计出现短期补偿式反弹（田磊，2023），天然

气受交通需求增长、发电用气增长等因素影响，其需求呈增长趋势但波动仍较大（中国石油国家高端智库研究中心，2023）。

支撑能源结构调整的产能出现阶段性过剩。作为构建新型电力系统的基础装备，促进可再生能源大规模开发消纳，新型储能快速增长。2022年，全国已投运新型储能项目装机规模达870万千瓦，平均储能时长约2.1小时，比2021年底增长110%以上（国家能源局，2023b）。锂离子电池储能技术是目前的主导方向。大量企业资本进入储能行业，但却面临着需求不振、产能远高于出货量、低价竞争的难题，储能行业产能利用率从2022年83.4%下降到2023年上半年的60.5%（EVTank, 2023），储能电池产能出现阶段性过剩，同时缺乏统一安全标准也导致安全事故的多发。

中国共产党“二十大”报告和2022年中央经济工作会议重点强调要加快规划建设新型能源体系，应统筹能源安全供应和能源高质量发展，持续深入推进能源结构转型，稳步提高质量效率，以增强能源供应链的弹性和韧性。



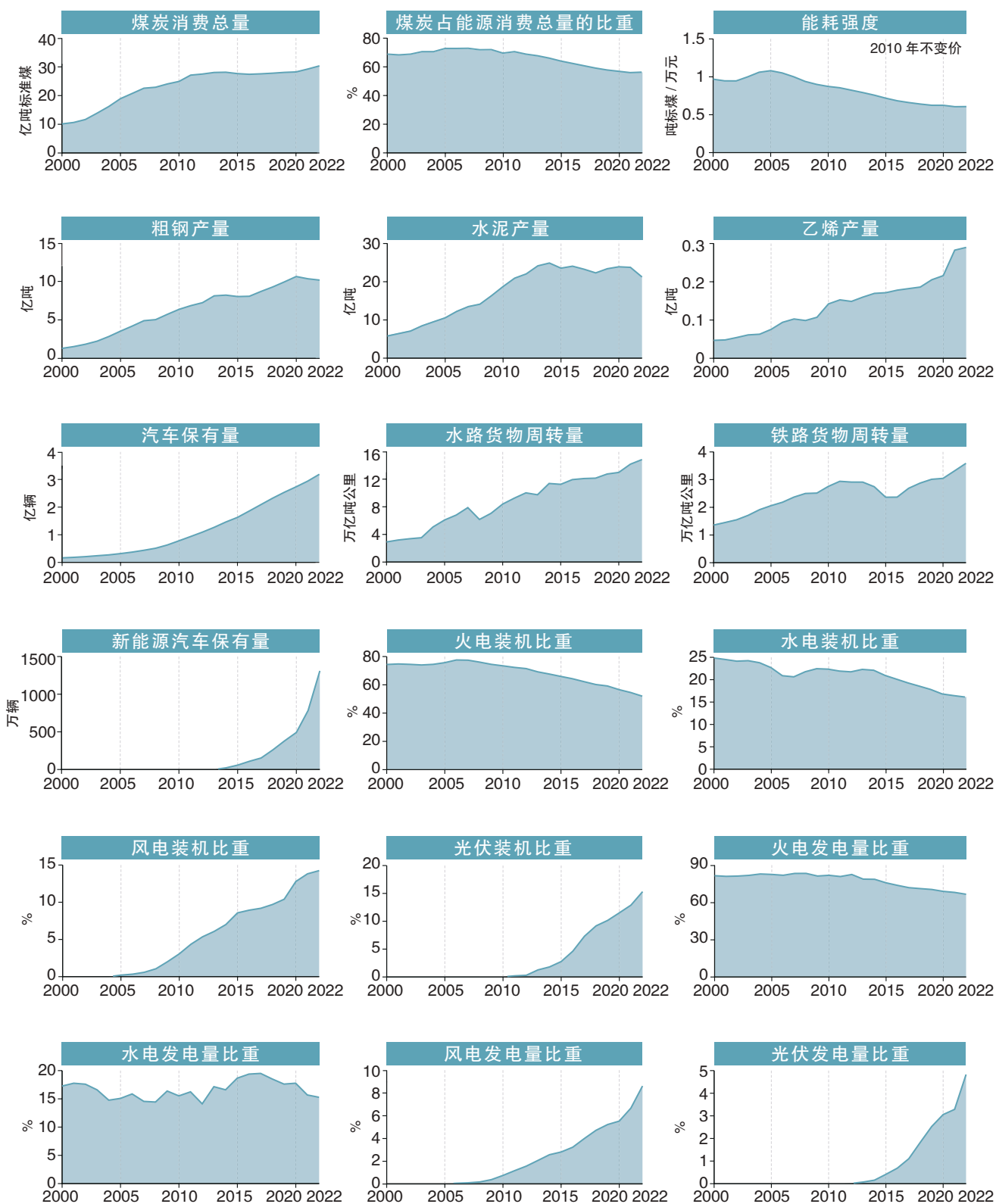


图 4-1 2000-2022 年结构转型进展

4.2 产业结构转型

中国产业结构持续稳步调整优化，在多方面、多领域取得了阶段性进展。近年来，为切实响应“双碳”战略目标需求，立足新发展阶段，中国不断推动产业结构的升级和优化，积极推进新能源、绿色低碳、数字化转型等新兴产业的发展，为实现高质量经济发展注入新的动力。

行业进展

新产业新业态新模式较快成长。2021至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%（国家统计局，2023，2022）。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%。

大力提升重点领域能效，实现产业的提质升级。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。

以重点行业达峰为突破，加快制造业的绿色转型与高质量发展。2022年，工信部、国家发改委和生态环境部印发了《工业领域碳达峰实施方案》，要求“十四五”期间，产业结构与用能结构优化取得积极进展，到2025年，规模以上工业单位增加值能耗较2020年下降13.5%，单位工业增加值CO₂排放下降幅度大于全社会下降幅度，重点行业CO₂排放强度明显下降。“十五五”期间，工业能耗强度、CO₂排放强度持续下降，努力达峰削峰，在实现工业领域碳达峰的基础上强化碳中和能力，确保工业领域CO₂排放在2030年前达峰。同时，多部门联合印发了钢铁、石化化工行业高质量发展的指导意见，以及建材与有色金属行业碳

达峰实施方案，重点行业的碳达峰路线更为清晰。意见要求“十四五”期间，建材行业水泥、玻璃、陶瓷等产品单位能耗、碳排放强度不断下降，水泥熟料单位产品综合能耗水平降低3%以上；有色金属产业结构、用能结构明显优化，再生金属供应占比达到24%以上；钢铁产业工艺结构明显优化，电炉钢产量占粗钢总产量比例提升至15%以上，吨钢综合能耗降低2%以上；石化行业大宗产品单位产品能耗和碳排放明显下降，挥发性有机物排放总量比“十三五”降低10%以上。

目前，尽管国家各部门印发的政策文件给出了较明确的节能降碳实施方案与具体行业转型发展路径。然而，由于我国大规模体量的工业产品生产带来的资源消耗，工业行业在转型过程中仍存在难点与挑战。例如，大量重工业的绿色低碳发展面临着产业结构和能源结构调整、生产方式变革等现实问题，而转换用能结构，需要多方合力推进，共同完善清洁能源供应体系建设。钢铁行业实现以高炉—转炉长流程为主的炼钢工艺到电炉炼钢工艺的转型，则需要以充足的废钢资源供应为基础，但目前废钢资源的可用量仍处在较低水平，需要进一步提升废钢资源的供应量。

地方进展

2022年至2023年，各省（区、市）根据国家“双碳”相关政策要求陆续出台了省级文件，包括统领性的“双碳”工作实施意见，生态环境保护规划、可再生能源发展规划等专项规划，以及工业领域碳达峰实施方案、节能减排实施方案等特色产业政策等，部分代表性政策如表4-1所示。产业结构转型是地方政府推动减污降碳协同增效的重要措施，主要包含完善落后

产能市场退出机制、推动传统产业绿色低碳转型、发展战略新兴和高技术产业三个方面。

完善落后产能市场退出机制方面，具体措施包括加快“两高”生产制造企业退出及高耗能设备淘汰，严格落实产业转移指导目录，严把“两高”项目环境准入关，对不符合规定的项目坚决停批停建等。推动传统产业绿色低碳转型方面，具体措施包括推动传统产业与5G、物联网、云计算、大数据、区块链、人工智能等新一代信息技术的深度融合，以“两高”行业为重点推广节能设备技术工艺，开展产品绿色设计促进减少产品全生命周期碳排放等。发展战略新兴和高技术产业方面，具体措施包括提升新一代信息技术、高端装备、新材料、生物医药、节能环保等战略性新兴产业发展能级，统筹构建光伏、风电等新能源技术研发、装备制造、资源开发、应用服务和基础设施建设的完整产业链等。

以吉林省为例，为更好引领和支撑新能源产业高质量发展，培育打造“六新产业”新动能，吉林发布《吉林省新能源产业高质量发展战略规划（2022-2030年）》（以下简称《规划》），立足自身优势对新能源产业高质量发展进行系统布局，涵盖风能、太阳能、氢能、新能源汽车、生物质能、地热能、新型储能等重点领域。《规划》提出打造三个战略定位，即国家级清洁能源基地、新能源高比例消纳示范省、新能源全产业链发展示范区。《规划》还勾勒了“三区多园一高地”的新能源产业发展总体格局，即构建吉林中部新能源科技装备和示范应用核心区、西部生产供应和装备制造基地地区、东部调峰调频和应急保障拓展区，建设一批新能源装备制造特色产业园区和有效消纳新能源的“绿电”示范园区，打造长春新能源科技装备特色产业高地。

表 4-1 双碳目标下代表性省（区、市）产业结构调整相关政策与措施

2022

1 月 - 河北

《河北省生态环境保护“十四五”规划》

促进传统产业绿色转型升级，在电力、钢铁、建材等重点行业实施减污降碳行动，实施全产业链和产品全生命周期降碳减污，打造多维度、全覆盖的绿色低碳产业体系。推动生态环保产业与 5G、物联网、云计算、大数据、区块链、人工智能等新一代信息技术深度融合，提高产业信息化、智能化水平。

2 月 - 浙江、河南

浙江省委省政府《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》

大力发展低碳高效行业。打造新一代信息技术、汽车及零部件、绿色化工、现代纺织和服装等世界级先进制造业集群。推进生物医药、集成电路等十大标志性产业链的基础再造和提升。加快发展生命健康、新材料、高端装备等战略性新兴产业，培育发展绿色低碳未来产业。

《河南省“十四五”生态环境保护和生态经济发展规划》

加快推进工业产品生态设计和绿色制造研发应用，在重点行业推广先进、适用的绿色生产技术和装备。加快建立以资源节约、环境友好为导向的采购、生产、销售、回收和物流体系，发挥汽车、电子电器、通信、大型成套装备等行业龙头企业、大型零售商及网络平台的示范带头作用，积极应用物联网、大数据和云计算等信息技术，加快构建绿色产业链供应链。

6 月 - 内蒙古、湖南

《内蒙古自治区“十四五”节能减排综合工作实施方案》

坚决遏制高耗能高排放低水平项目盲目发展。建立“两高”项目管理台账，全面梳理在建、拟建、存量“两高”项目，实行清单管理、分类处置、动态监控。围绕电力、钢铁、化工、有色、建筑等重点行业，推进余热回收、能源梯级利用等技术开发和应用。

《湖南省“十四五”可再生能源发展规划》

进一步优化可再生能源装备制造产业链，提升省内可再生能源技术水平。构建以企业为主体、市场为导向、产学研深度融合的技术创新体系，实现共性技术共研共享。围绕可再生能源装备制造、储能电池材料、新能源并网适应性、运行维护、安装调试等方面布局标准体系建设。

7 月 - 江苏、四川

《江苏省“十四五”可再生能源发展专项规划》

推进单晶行业转型，深入研究更高效率、更低成本的新型组件产业化关键技术，推动废旧光伏组件回收处理技术及新产业链发展，提升我省光伏企业竞争力。全力打造盐城、南通海上风电装备制造产业集群，加快海上风电装备研发、设计制造基地建设，加快提升港口能级，加强海上风电运维平台及港口码头等配套设施建设，逐步形成自主可控的海上风电产业体系。

《四川省“十四五”节能减排综合工作方案》

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，引导企业实施原料、燃料清洁替代，提高可再生能源应用比例。推进新型基础设施能效提升，加快绿色数据中心建设。深入开展能效、水效和污染物排放领跑者行动，全面推动重点行业能效提升，培育一批省级能效、水效标杆企业。

2022

8月 - 北京

《北京市“十四五”时期应对气候变化和节能规划》积极发展科技含量高、资源消耗低、碳排放少的高精尖产业，加快高耗能高排放生产制造业及生产环节的退出及高耗能设备的淘汰。以绿色技术创新引领高精尖产业发展，持续推进绿色制造体系建设。建设新能源产业集聚中心和产业化示范基地，提升产业链、供应链现代化水平，积极创建国家绿色产业基地。

12月 - 天津、吉林

《天津市工业领域碳达峰实施方案》

严格落实产业转移指导目录。围绕京津冀协同发展重大国家战略，优化区域产业链布局、强化区域产业协同。围绕新一代信息技术、高端装备、生物医药、新能源、新材料等重点领域，全面提升工业战略性新兴产业发展能级，壮大新动能底盘，加快新旧动能转换，着力提高产业发展质量效益和核心竞争力。

《吉林省新能源产业高质量发展战略规划（2022—2030年）》

坚持全产业链集群集聚发展策略，统筹构建新能源技术研发、装备制造、资源开发、应用服务和基础设施建设等完整产业链，打造风电完整分链、光伏专精分链、储能多元分链、氢能自主分链，努力实现新能源产业“吉装吉产”本地化布局，培育互联共生、集约高效的产业生态，着力形成产学研用协同联动、大中小企业合理分工、上下游产业配套衔接的产业格局。

2023

1月 - 重庆

《重庆市工业领域碳达峰实施方案》

依托产业本底优势和转型需求，立足能源禀赋实际，严把项目准入关，合理配置产业布局，推动绿色产业发展，实现产业结构绿色低碳转型。围绕智能网联新能源汽车、新型电子产品、先进材料、专业软件开发、节能环保装备、清洁能源及储能等绿色新兴产业不断引优培强，培育一批具有较强竞争力的大型绿色低碳企业。

3月 - 宁夏

《宁夏回族自治区能源领域碳达峰实施方案》

认真落实国家绿色制造标准体系，推动绿色工厂、绿色产品设计、绿色工业园区、绿色供应链管理企业建设。加强工业领域节能和能效提升，组织实施工业企业能效“领跑者”和能效水平对标达标行动，开展重点用能企业节能诊断，积极推动企业节能低碳环保技术改造项目建设，推广应用先进节能技术、工艺、装备。引导钢铁、有色、建材、石化等行业提高绿色能源使用比例。

4.3 交通结构转型

交通运输是国民经济的支柱产业之一，具有基础性、先导性和战略性等重要特征，同时也是服务性行业的重要组成部分。它不仅对国家经济发展起到重要作用，还是生态环境保护、节能减排和应对气候变化的关键领域之一。交通运输绿色低碳转型涵盖了诸多领域，如运输装备、运输组织、交通基础设施等，其转型进展直接影响到交通运输减污降碳工作的推动和交通运输高质量发展的进程，同时也有助于加快建设交通强国。近年来中国交通结构持续改善，在运输装备动力低碳替代、货物运输结构优化、绿色出行引导等结构和模式等方面取得了一定成效，交通运输能效、运输组织效率、政策管理等均得到提升和强化。

运输结构逐步优化。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%（交通运输部，2023；国家铁路局，2023）。

绿色出行持续推进。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。

交通行业能效持续提升。2022年，《载客汽车运行燃料消耗量》（GB/T 4353-2022）、《载货汽车运行燃料消耗量》（GB/T 4352-2022）两项国家标准发布，乘用车行业平均油耗降低至4.10 L/百公里，同比下降19.6%，提前实现2025年4.60 L/百公里目标；国家铁路单位运输工作量综合能耗降低至3.91吨标准煤/百万

换算吨公里，同比下降 4.2%（国家铁路局，2023）；民航吨公里油耗 0.302 公斤，较 2005 年下降 11.4%（中国民用航空局，2023）。

清洁能源替代稳步推进。2022 年，全国新能源汽车保有量达 1310 万辆，其中纯电动汽车占 79.78%；新能源汽车产销量分别完成 705.8 万辆和 688.7 万辆，同比分别增长 96.9% 和 93.4%，市场占有率达到 25.6%；在电力结构更加清洁、电动汽车行驶电耗更加优化、关键车用材料碳足迹更加低碳、电池能量密度更加提高的驱动下，2020 年纯电动汽车全生命周期碳排放相比于传统汽油车降低 40%，预计到 2030 年将提升至 53%；全国充电基础设施保有量达 520 万台，同比增长近 100%，并已有 4145 个高速公路服务区建成充电桩 17581 个；全国铁路电气化率 73.8%，铁路电力机车 1.42 万台，占比 64.2%（交通运输部，2023）；全国机场场内电动车辆设备 1.2 万台，充电设施 5200 个，电动车辆占比 24%，机场电力、天然气、外购热力占比达到 82.8%，年旅客吞吐量超过 500 万人次，机场飞机 APU 替代设备实现“应装尽装、应用尽用”（中国民用航空局，2023）；近 5200 艘船舶完成受电设施改造，岸电使用电量明显提高；内河电池动力船舶、远洋甲醇动力船舶等试点示范不断涌现。

双碳管理不断强化。2022 年，中国交通政策管理体系进一步完善，涉及政策、标准和监测等方面。如《交通运输部 国家铁路局 中国民用航空局 国家邮政局贯彻落实〈中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见〉的实施意见》、《“十四五”邮政业绿色发展计划》等政策文件印发；《绿色交通标准体系（2022 年）》印发，《天然气营运客车燃料消耗量限值及测量方法》、《公路机电设施用电设备能效等级及评定方法》等标准发布；《船舶能耗数据和碳强度管理办法》、《民用航空飞行活动二氧化碳排放监测、报告和核查管理暂行办法》等统计制度出台。

未来一段时间，应继续致力于推动交通运输的高质量发展和绿色低碳转型，进一步优化交通运输用能结构，不断提高运输装备的能效、优化运输结构、提升运输组织效率，并加强基础设施的有效供给，加快形成绿色低碳的运输方式。进一步落实综合立体交通网建设、大宗货物和中长途货物运输的“公转铁”与“公转水”、新能源和清洁能源应用、燃油运输装备能效标准的提高、公交都市建设与绿色出行方式引导，以及电气化交通的基础设施体系的建设与适应。

4.4 建筑能源系统低碳转型

随着住房和城乡建设部、国家发改委《城乡建设领域碳达峰实施方案》的发布，全国及各省面向 2030 年城乡建设领域碳达峰这一目标，逐步明确建筑领域碳达峰的工作重点，即继续推进建筑节能和能效提升工作，在此基础上开展城乡能源系统绿色低碳转型，建设符合新型能源系统特点的“产消调蓄”低碳用电基础设施，低碳余热作为热源的“产调储输”零碳供热系统，和打造以分布式光伏为基础的低碳县城和乡村，实现直接碳排放的降低和间接碳排放的达峰。

2021 年我国建筑运行过程中的碳排放总量为 22 亿 tCO₂（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 CO₂ 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。

从建筑领域实现碳达峰碳中和目标角度看，当前以及今后一段时期的工作重点安排不应仅将目光聚焦于建筑能效提升工作，而应顺应工作形势的变化，逐步从“建筑节能”转向“建筑减碳”，相应的工作重点将发生重大变化。从党中央、国务院《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》、《2030 年前碳达峰行动方案》，以及住房和城乡建设部、发展改革委《城乡建设领域碳达峰实施方案》等文件明确提出的城乡建设领域碳减排目标任务看，总体分为消除直接排放与减少间接排放两大部分。

在消除建筑直接排放方面，一是在新建建筑中推进全电气化设计。按照先公建后居建，

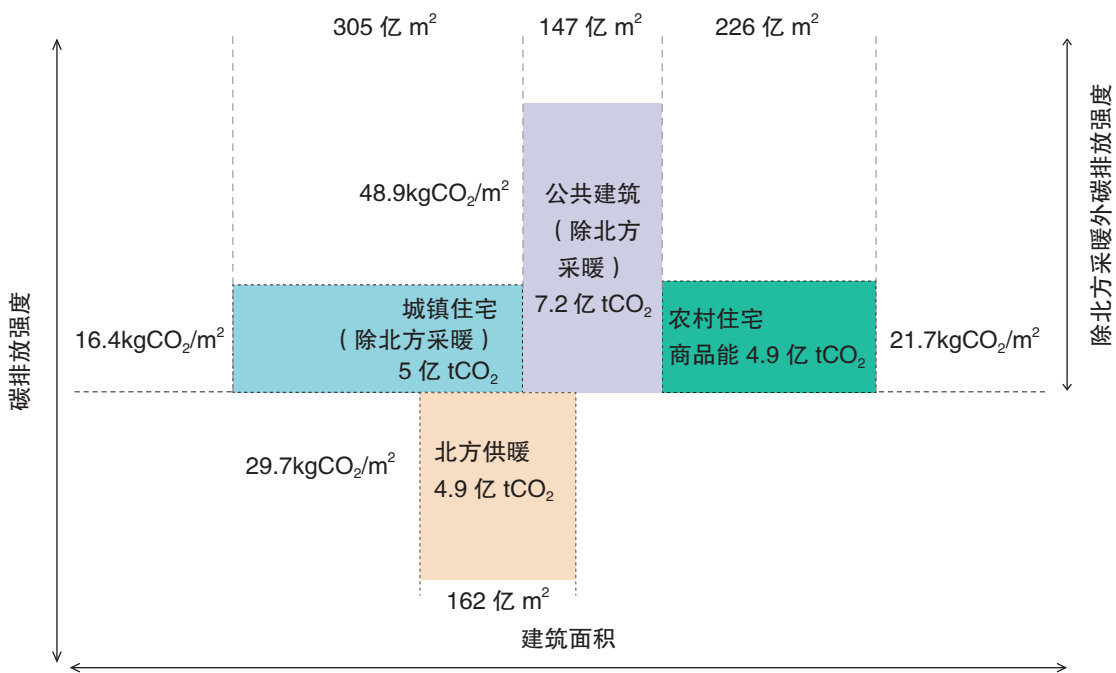


图 4-2 中国建筑运行四个分项的碳排放 (2021 年) (清华大学建筑节能研究中心, 2023)

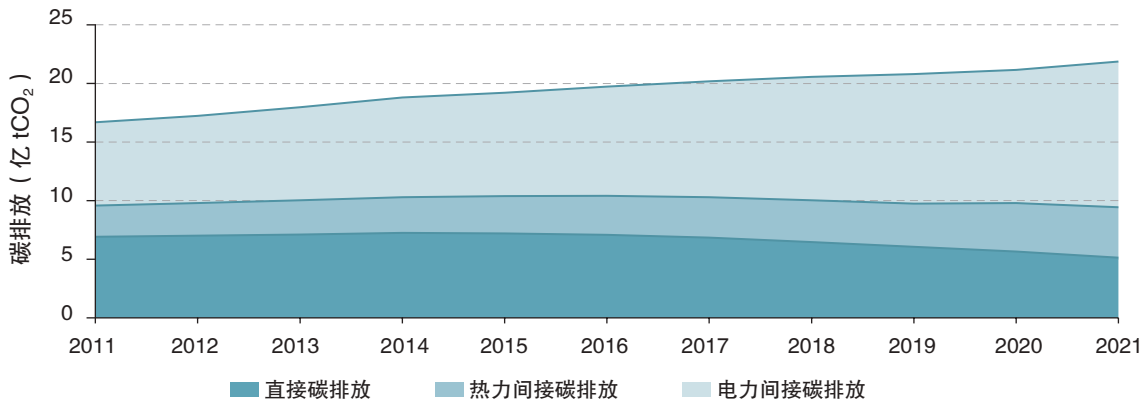


图 4-3 中国建筑运行逐年碳排放 (2011-2021 年) (清华大学建筑节能研究中心, 2023)

先城市后农村的顺序, 实现建筑用能的全面电气化, 从源头消除直接排放。到 2030 年, 实现城镇新建公共建筑全电设计比例达到 20% 的目标。二是在既有建筑用能中推动电能替代, 包括采暖、生活热水、炊事等建筑用能。对于建筑生活热水用能, 采用分散式电热水器、高

效电热泵等替代燃气热水器、蒸汽供热系统。对于城乡供暖用能, 北方地区现有集中供热热源比电采暖更加高效和经济, 应作为城镇集中供暖的优选热源。可逐步构建低品位余热作为热源的低碳供热系统, 通过大规模跨季节蓄热工程和跨区域输热网络来储存和利用

余热热源，实现北方城镇地区的零碳供热。针对集中供热未覆盖的北方地区城乡结合部、农村地区等建筑分散的热需求，应采用高效、自然源热泵，实现分散、灵活、高效的低碳热力供应。三是炊事电能替代。以公共建筑为突破口，积极研发推广高效的电炊具，并通过积极引导，让广大居民用户能够逐步转变炊事习惯，了解、接受并使用电炊具。通过引导建筑供暖、生活热水、炊事等向电气化发展，到 2030 年实现建筑用电占建筑能耗比例超过 65%。

在减少建筑间接排放方面，一是效率提升，通过尽可能少的能耗和碳排放来满足建筑功能需求和居住品质；二是结构优化，建筑领域能源结构优化的主要方向是实现低碳用电和低碳用热。发展以风电光伏为主体的新型电力系统，主要制约是空间资源、调蓄和灵活用能资源，因此要全面挖掘建筑领域的空间资源用以开发利用分布式光伏；三是方式转变，要充分认识到建筑在低碳能源系转型中的重要作用，发挥

建筑在新型电力系统中的“产、调、储、消”的功能，从“源网荷储用”全链条思考问题。

通过以上对宏观发展形势和建筑行业绿色、节能、低碳发展趋势的判断，对建筑能源系统低碳转型的策略应该有新的认识和做法。在工作理念的转变上，应打破传统的“单点”的用户思维方式，树立系统性思维方式，推进建筑节能“走出去”，从“源网荷储用”全链条思考问题。在工作场景的认识上，应打破传统的“单体”建筑的认识，树立区域意识，不仅要做好“单体”建筑的节能降碳，还要将视角从单体建筑扩展到园区、城区、城市以及乡村。在工作重点的调整上，推动从“建筑节能”向“建筑减碳”转变，在对建筑用能总量和强度两个维度管理的基础上，增加建筑用能结构优化和用能柔性管理两个新的维度，并纳入重点工作，在持续提高建筑节能标准，推进建筑能效提升工作的基础上，大力推进建筑用能结构调整，大力发展太阳能等可再生能源，推动建筑电气化进程。



4.5 碳捕集、利用与封存技术

碳中和目标下，随着技术发展需求日益迫切、公众认知逐渐深入，我国碳捕集利用与封存（CCUS）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 CO₂ 长距离超临界输送管道。CO₂ 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 CO₂ 一步合成乙醇（Chen et al., 2023）。在 CO₂ 封存方面，我国开始探索 CO₂ 离岸封存的可行性，如中国海油建设完成了国内首个 CO₂ 离岸封存示范工程设备，实现了离岸 CO₂ 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 CO₂ 捕集示范项目已建成投产。

从已投运示范项目来看，虽然我国 CCUS 技术成本仍然较高，但与国外相比具备一定成本优势，并在“干中学”过程中逐年下降。我国煤化工和石油化工领域的一体化驱油示范项目捕集成本相对较低，最低可达到 105 元 / 吨 CO₂。电力、水泥仍是我国捕集成本较高的行业，捕集成本分别为 200–600 元 / 吨 CO₂ 和 305–730 元 / 吨 CO₂（中国 21 世纪议程管理中心等，2023），但整体均低于国外平均水平。随着技术水平的不断提高，CO₂ 捕集成本有望进一步降低，如国家能源集团锦界电厂“15 万吨 / 年燃烧后 CO₂ 捕集示范工程”项目实现了捕集全成本 300 元 / 吨以内，综合捕集能耗 2.35GJ / 吨，并有望在接下来的国能泰州电厂 50 万吨 / 年规模煤电 CCUS 项目中进一步降低成本和能耗。

随着碳达峰碳中和“1+N”政策体系的建

立，CCUS 技术在其中得到了广泛关注（Ma et al., 2023a）。除支持 CCUS 技术研发与示范以外，涉及技术标准等方面的政策逐渐增多，如《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》等提出完善和推动 CCUS 技术标准体系和相关研究工作。同时 CCUS 技术在难减排工业领域的应用受到更多重视，如《工业领域碳达峰实施方案》《减污降碳协同增效实施方案》等对钢铁、水泥等难减排工业行业提出了 CCUS 技术应用目标。

尽管我国 CCUS 技术、示范、相关政策等发展迅速，但当前阶段仍面临应用成本高昂、有效商业模式欠缺、源汇匹配困难等多方面挑战，距离大规模商业化运行仍有差距，未来规划部署亟需从技术、政策、市场等多方面综合考虑。

中国海油海上 CO₂ 封存

- 位于南海珠江口盆地的恩平 15-1 平台；
- 2023 年 3 月正式开启 CO₂ 回注井钻井作业，6 月正式投用；
- 注入封存到 800 米以下的咸水层；
- 预计封存规模 30 万吨 / 年，累计封存有望达到 146 万吨。



恩平 15-1 平台及回注井（图片来源：新华社）

文件	相关内容
《国家标准化发展纲要》	完善可再生能源标准，研究制定生态碳汇、碳捕集利用与封存标准。
《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》	(十)开展方法学研究。……推动对非二氧化碳温室气体排放、碳捕集封存与利用、碳汇等领域的核算研究，进一步夯实方法学基础。
《能源碳达峰碳中和标准化提升行动计划》	(六)健全完善能源产业链碳减排标准……围绕能源领域二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)有关技术研发和项目建设需求，加快推进相关标准管理体系和标准体系完善，推进二氧化碳捕集、输送、封存监测、泄漏预警、驱油等关键环节标准制修订。
《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》	(三)主要目标。到2025年……碳排放技术和管理标准基本健全，主要行业碳核算核查标准实现全覆盖，重点行业和产品能效标准指标稳步提升，碳捕集利用与封存(CCUS)等关键技术标准与科技研发、示范推广协同推进。
贯彻实施《国家标准化发展纲要》行动计划	九、实施碳达峰碳中和标准化提升工程。……研究制定生态碳汇、碳捕集利用与封存标准……
《碳达峰碳中和标准体系建设指南》	(三)碳清除标准子体系……2.碳捕集利用与封存标准。重点制修订碳捕集利用与封存(CCUS)相关术语、评估等基础标准，燃烧碳排放捕集标准，完善二氧化碳管道输送等标准。推动制定二氧化碳驱油(EOR)、化工利用、生物利用、燃料利用等碳利用标准，以及陆上封存、海上封存等碳封存标准。
《工业领域碳达峰碳中和标准体系建设指南(2023版)(征求意见稿)》	(3)末端治理标准。主要是指温室气体捕集、利用与封存相关的技术与装备，包括碳捕集利用与封存(CCUS)、直接空气碳捕集(DACS)等方面。重点制定工业领域二氧化碳捕集、分离、资源化利用、封存等技术与装备标准。
高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)	加快研发……水泥窑炉烟气二氧化碳捕集与纯化催化转化利用关键技术等重大关键性节能低碳技术。
工业领域碳达峰实施方案	三、重大行动(十)重点行业达峰行动。 1.钢铁。……到2030年，富氢碳循环高炉冶炼、氢基竖炉直接还原铁、碳捕集利用封存等技术取得突破应用，短流程炼钢占比达20%以上。 2.建材。到2030年，……实现窑炉碳捕集利用封存技术产业化示范。
2030年前碳达峰行动方案	2.推动钢铁行业碳达峰。……探索开展氢冶金、二氧化碳捕集利用一体化等试点示范，推动低品位余热供暖发展。

4.6 新型电力系统

新型电力系统是推动新能源发展的重要支撑，对于提高新能源利用效率和可靠性、实现绿色发展具有十分重要的意义。在新能源安全可靠的替代基础上，传统能源逐步退出，建设智能、绿色、可持续发展的新型电力系统，加快电力脱碳，增加可再生能源发电容量，推动能源清洁转型，是实现碳达峰、碳中和目标的必由之路。近年来中国电力系统低碳转型方面得到稳步推进，在构建新型电力系统方面取得积极成效。

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200GW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%；到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%，平均光伏利用率为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。

电力系统结构形态逐步优化。立足我国国情与资源禀赋，“西电东送、北电南送”的电力流分布持续强化，新能源开发将呈现集中式与分布式并举的态势。在电网建设方面，2022 年全国新增投运的发电装机 10117 万千瓦，其中水电 971 万千瓦，火电 9048 万千瓦，风电 92 万千瓦；新增投运的 220 千伏及以上输电线路回路长度 3.51 万公里，新增投运的 220 千伏及以上变电设备容量 15531 万千瓦安，实现了我国能源资源大范围优化配置。

新型电力系统是以新能源为供给主体、以确保能源电力安全为基本前提、绿电消费为主要目标，以坚强智能电网为枢纽平台，以源网荷储互动及多能互补为支撑，具有绿色低碳、安全可控、智慧灵活、开放互动、数字赋能、经济高效基本特征的电力系统。未来新型电力系统中，风光电量占比将达到 70%，各类型火电承担调峰调频和提供惯量的重要任务，因此，相较于火电立刻退出的方案，先建后退反而是更优的减排路径。此外，为了实现源荷互动，未来系统中将纳入更高比例的灵活性资源，包括储能、气电、生物质、CSP（光热发电）以及需求侧灵活性资源。

在未来的 5-15 年，构建新型电力系统需要突破煤炭清洁高效灵活智能发电技术、生物质能技术、氢能技术、新型柔性交流输电技术、柔性智能配电网技术、新型储能技术、二氧化碳捕集、利用与封存技术、电力市场交易和碳排放监测技术等针对源网荷储各个环节的支撑性技术。其中，生物质能作为全球公认的具有零碳属性的可再生能源被认为是保障电力系统转型的重要灵活性资源（Lu et al., 2019a; Zhuo et al., 2022），到 2022 年底，我国生物质能发电装机容量累计达 4132 万千瓦，已连续四年位居世界第一，未来生物质能将作为重要的灵活性资源为电力系统转型提供保障。此外，光热发电技术、核能技术、电力系统安全稳定控制与仿真技术也将成为关键突破技术。伴随着全球新一轮科技革命和产业革命的加速兴起，云计算、大数据、物联网、人工智能、5G 通信等数字化技术将更快地融入电力系统，加速传统电力行业业务的数字化转型。加快新型电力系统相关技术的研究与应用，更将带动从材料制备、器件研发、装备研制到系统集成的全产业链发展，成为提升能源科技产业发展水平、推动经济社会发展的新动能。



4.7 污染治理进程

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 4-4）。



图 4-4 2013-2022 年污染治理指标进度

1. 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（人民日报海外版，2023），较2021年水平新增近2000万千瓦。

2. 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（中国冶金报，2023）。

3. 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（生态环境部，2023a）。

4. 燃煤锅炉整治。2013年至2022年，全国燃煤锅炉从原有52万台减少到不足10万台（生态环境部，2023b），基本淘汰每小时35蒸吨以下的燃煤锅炉（中国环境报，2022）。

5. 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（生态环境部，2023b），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%（农村清洁取暖，2023）。

6. 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（新华社，2023）。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”监督检查，督促6家车企实施环保召回（生态环境部，2023c）。

7. 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（禾苗植保，2023）。秸秆露天焚烧得到有效控制，2022年全国秸秆综合利用率达到6.62亿吨左右，同比增长2.3%（智研咨询，2023）。

8. 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。

近几年来，中国大气环境逐渐进入PM_{2.5}污染依然严峻和O₃污染日益突出的新阶段，“十四五”时期需进一步补齐短板，加强PM_{2.5}与O₃协同控制。另一方面，从大气污染治理的角度来看，当前中国在传统工业行业和污染排放部门的末端治理减排潜力已基本挖掘殆尽，挥发性有机物治理、非电行业深度治理、移动源排放管控以及农村清洁取暖等措施将有

望继续发挥较为重要的作用，尤其是对于挥发性有机物和氨气等排放量尚未进入明显下降区间的污染物，应进一步采取有效的减排治理措施，以进一步推动大气污染减排、促进环境空气质量持续改善。与此同时，在碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局的大背景下，在上述领域的污染治理实施路径中应同步考虑碳排放控制，统筹大气污染防治与“双碳”目标要求，推动大气污染物减排与碳排放控制一体谋划、一体部署、一体推进，切实促进减污降碳协同增效。

《减污降碳协同增效实施方案》（以下简称“《实施方案》”），为生态环境质量改善和实现碳达峰碳中和战略任务的深度协同作出了顶层设计要求，明确了“十四五”时期乃至到2030年中国减污降碳协同增效工作的主要目标和重点任务（图4-5）。作为我国碳达峰碳中和“1+N”政策体系中的重要支撑保障文件之一，《实施方案》的出台，有望推动中国大气污染治理与降碳工作的进一步深度耦合和同频共振，从源头和过程协同减少大气污染物和碳排放，促进实现以绿色低碳转型升级为引领的大气污染治理进程的提质增效。

2022年，生态环境部等七部门印发《减

面临形势	<ul style="list-style-type: none"> • 新发展阶段面临实现改善生态环境和碳达峰碳中和两大战略任务 • 污染物与温室气体排放同根同源，必须协同推进减污降碳
总体要求	<ul style="list-style-type: none"> • 指导思想 • 基本原则 • 主要目标
加强源头防控	<ul style="list-style-type: none"> • 强化生态环境分区管控 • 推动能源绿色低碳转型 • 加强生态环境准入管理 • 加快形成绿色生活方式
突出重点领域	<ul style="list-style-type: none"> • 推进工业领域协同增效 • 推进城乡建设协同增效 • 推进生态建设协同增效 • 推进交通领域协同增效 • 推进农业领域协同增效
优化环境治理	<ul style="list-style-type: none"> • 推进大气污染防治协同控制 • 推进土壤污染治理协同控制 • 推进水环境治理协同控制 • 推进固体废物污染防治协同控制
开展协同试点	<ul style="list-style-type: none"> • 开展区域减污降碳协同试点 • 开展产业园区减污降碳协同试点 • 开展城市减污降碳协同试点 • 开展企业减污降碳协同试点
强化支撑保障	<ul style="list-style-type: none"> • 加强协同技术研发应用 • 健全减污降碳协同管理 • 提升减污降碳基础能力 • 完善减污降碳法规标准 • 强化减污降碳经济政策
加强组织实施	<ul style="list-style-type: none"> • 加强组织领导 • 加强国际合作 • 加强宣传教育 • 加强考核督察

图 4-5 《减污降碳协同增效实施方案》主要内容



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。本章主要追踪当前我国各区域、各行业二氧化碳和大气污染物的协同减排进展，根据现有研究评估陆地生态系统碳收支情况及陆地碳汇对实现碳中和目标的潜在贡献，并通过解析协同减排潜力的区域及行业异质性，强调因地制宜且突出重点行业的协同治理路径。

5.1 人为源碳排放

碳排放变化是反映区域低碳发展进程的基础指标之一。本指标旨在跟踪中国二氧化碳排放的动态变化及驱动因素，分析中国碳减排进展及面临挑战。本指标中，2005–2020 年分省份碳排放数据来源于中国碳核算数据库（CEADs, 2023; Guan et al., 2021; Shan et al., 2018; Shan et al., 2020），基于《中国能源统计年鉴》分省统计年鉴数据和 IPCC 温室气体清单指南方法核算；社会经济数据基于《中国统计年鉴》分省份国内生产总值和指数获取；“十三五”期间分省份碳强度达标情况根据区域官方文件获取。

人为源碳排放核算是实现“双碳”目标的基础，是推动温室气体和大气污染物协同治理的重要依据。近年来，由于区域资源禀赋、产业结构以及发展程度的差异，我国碳排放呈现明显的区域异质性特征，图 5-1 展示了 2005–2020 年中国大陆 30 省份（不包括西藏）二氧化碳排放变化趋势及行业组成。从排放总量来看，全国大多数省份二氧化碳排放呈波动上升趋势，能源大省和工业大省主导了中国二氧化碳排放变化趋势。从行业贡献来看，电力部门排放变化是大多数省份排放变化的主导因素，尤其是新疆、内蒙古、宁夏和山西等西北省份；工业部门是河北、河南、四川等中部省份排放变化的主要贡献因素；北京、上海和广东等东部发达省份民用和交通排放贡献相对突出。

实现碳排放与经济增长的脱钩是我国实现碳中和目标的重要挑战（Liu et al.,

2022c），我国碳排放强度的下降在一定程度上反映了碳排放与经济增长的脱钩趋势。图 5-2 展示了 2005–2020 年中国 30 省份碳排放强度变化趋势。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，达到了 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（Shan et al., 2020）。

人为源碳排放的统一规范化核算是分析碳排放区域异质性特征的基础。近年来，我国人

为源碳排放核算标准体系取得了快速发展，国家发展改革委已经陆续发布 24 个行业企业温室气体排放核算方法与报告指南，以及电力、建筑、工业生产、交通运输和农业等相关重点

行业温室气体排放核算与报告要求的国家标准。进一步加快建立统一规范的碳排放统计核算体系并在全国范围内推广应用，将是我国人为源碳排放核算工作的重中之重。

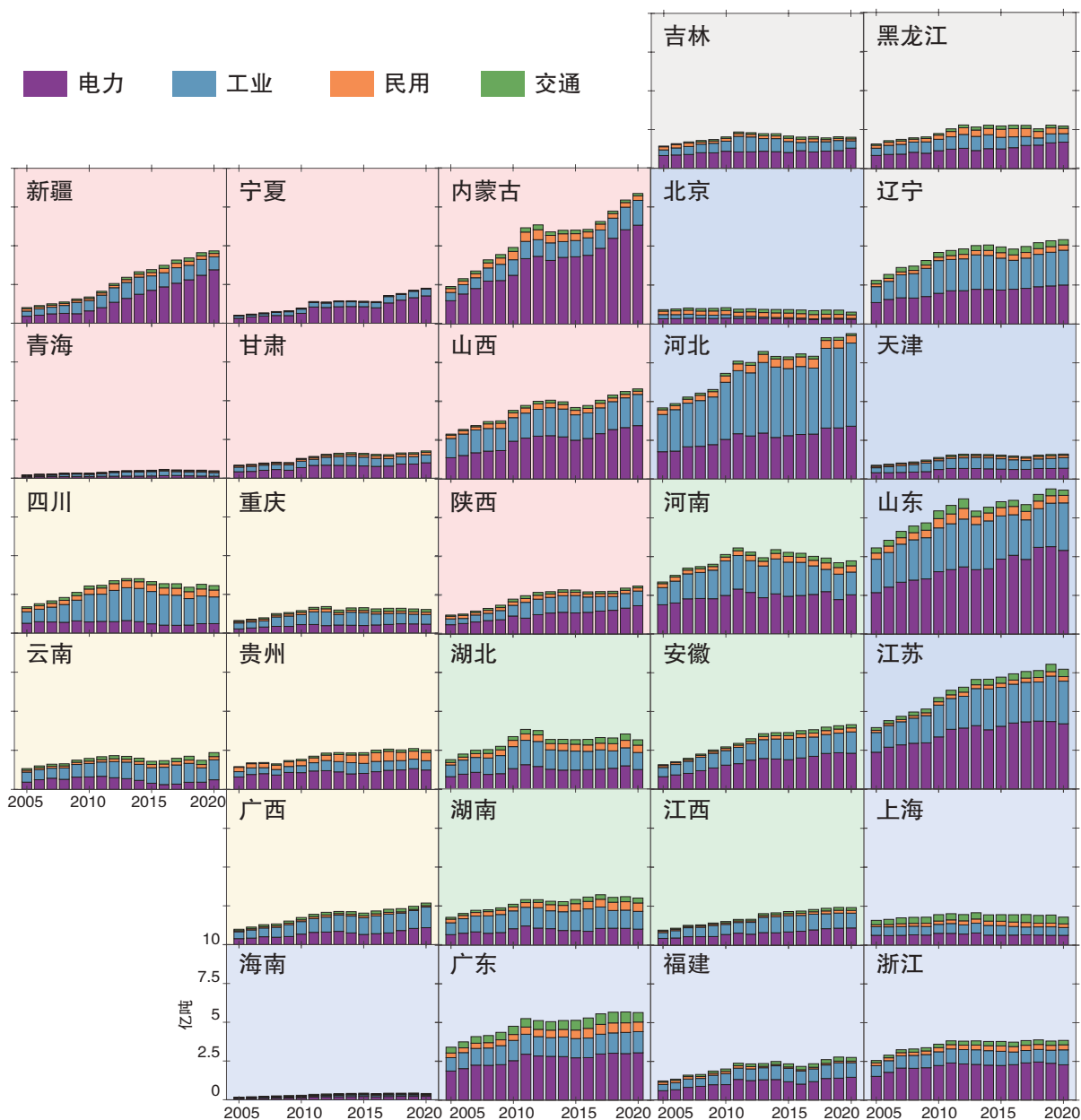


图 5-1 2005–2020 年全国分区域碳排放变化趋势及行业组成

(CEADs, 2023; Guan et al., 2021; Shan et al., 2018; Shan et al., 2020)

注：图中省份所在位置主要根据其所在中国地理区位分为西北、东北、华中、西南和东部沿海区域，并以不同底色标识

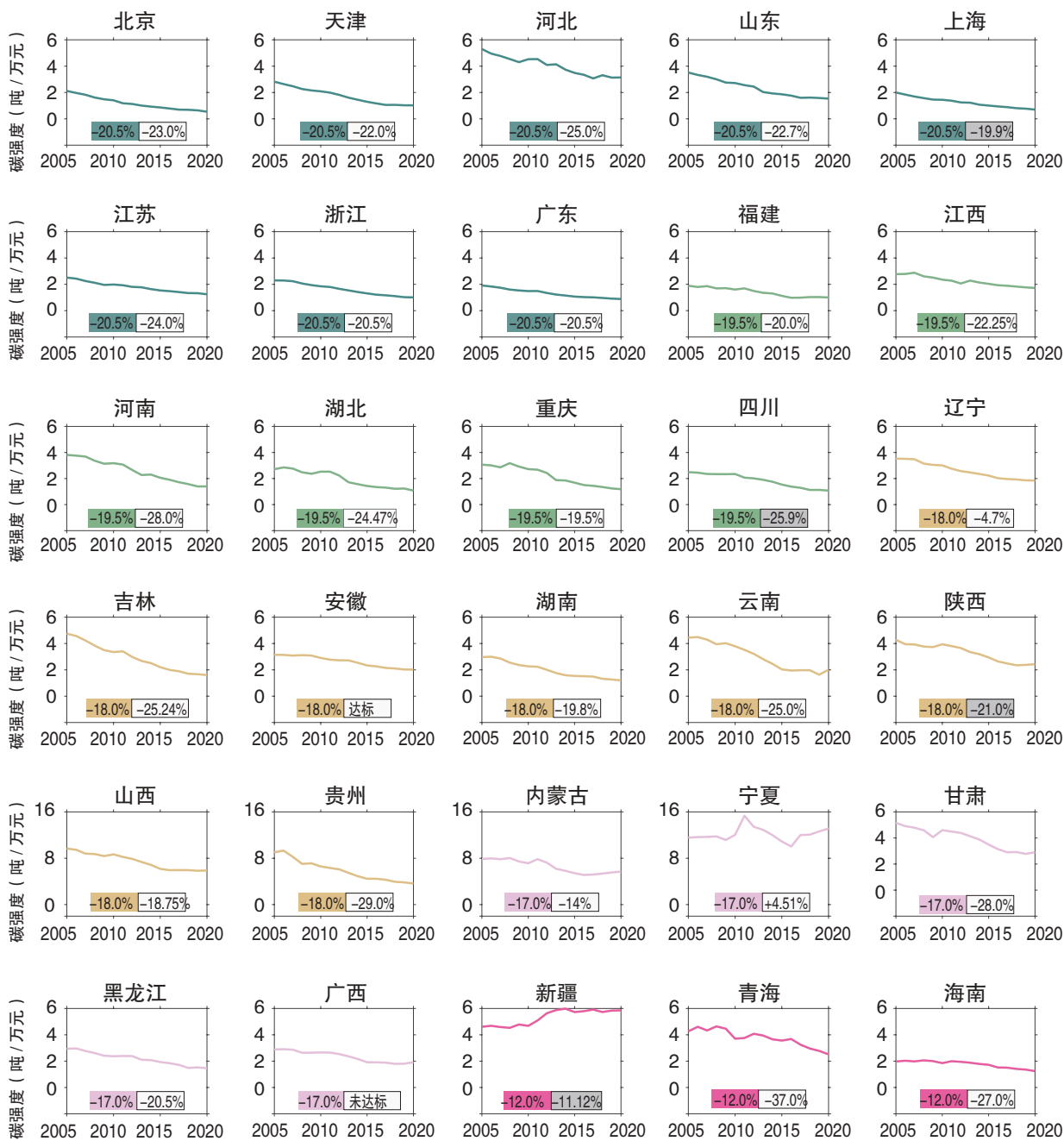


图 5-2 2005–2020 年全国分省份碳排放强度变化和“十三五”分配目标及达成情况
(国家统计局, 2003–2022; Liu et al., 2022c)

注：图中 30 个省份按照“十三五”控制温室气体排放工作方案区域分解目标从高到低排列
各子图中左侧数字标注为“十三五”期间碳强度约束目标，右数字标注为各省份实际完成情况
，主要根据各省市市政府文件获取；右侧数字底色为灰色表明该数值为 2019 年报告完成情况

5.2 土地利用变化与陆地碳汇

根据全球碳计划的估算，超过 30% 的人为碳排放可以被陆地碳汇所抵消（Friedlinstein et al., 2022）。因此，提升陆地生态系统碳汇能力被认为是降低大气二氧化碳浓度、缓解气候变化的有效措施。因此，碳汇能力巩固提升行动，具体行动包括巩固生态系统固碳作用，提升生态系统碳汇能力，加强生态系统碳汇基础支撑，被列入我国政府提出的碳达峰十大行动之一。本指标总结了过去四十年中国土地利用变化对陆地生态系统碳收支的影响，并分析了陆地碳汇的局限性及未来的固碳潜力。

中国的土地利用格局在近百年间发生了剧烈转变。20 世纪前中期由于大面积的毁林造田，中国土地利用变化特征表现为森林面积的大幅度减少以及农田面积的快速上升。80 年代以来，中国实施了一系列生态保护与修复工程，例如退耕还林工程、三北及长江流域的防护林建设工程等，使得森林面积显著提升（国家林业和草原局，2019）。然而，中国森林面积的转变在大多数国际通用的全球土地利用变化数据集中并没有得到准确的体现（图 5-3），进而导致了基于这些数据集估算的中国陆地碳汇存在巨大误差。最新的研究校正了中国土地利用变化数据（Yu et al., 2022; Xia et al., 2023），并依据校正后的数据集重新估算了中国陆地生态系统碳汇，结果显示森林面积的扩张等土地利用变化过程贡献了约 44% 的中国陆地生态系统碳汇（Yu et al., 2022）。这一估算结果纠正了国际陆地生物圈模型比较

项目（例如 MsTMIP、TRENDY 等）、每年更新的全球碳收支报告以及其他国际研究中关于中国陆地碳汇的估算（Huntzinger et al., 2021; Friedlinstein et al., 2022; IPCC, 2022）。综合考虑气候变化、二氧化碳施肥效应、氮沉降以及森林管理和土地利用变化等人为干扰对陆地碳汇的影响，1980–2019 年间中国陆地生态系

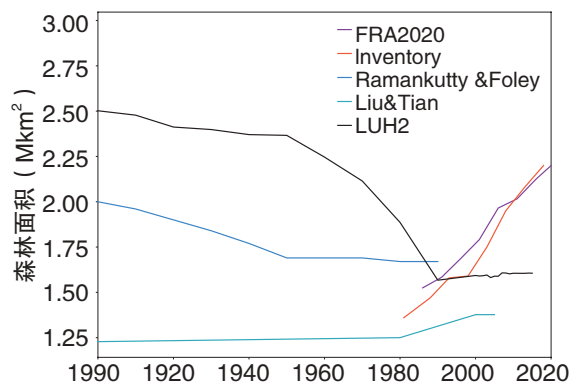


图 5-3 中国森林面积变化（Yu et al., 2022）

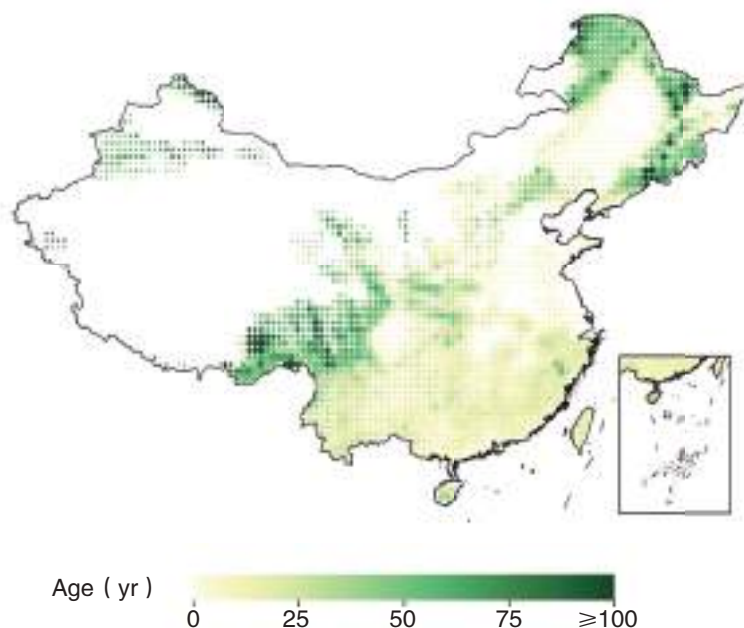


图 5-4 2010 年中国林龄地图 (Zhang et al., 2017)

统累计固定了约 8.9 ± 0.8 PgC，并呈现增加的趋势 (Yuan et al., under review)。

森林面积的不断变化使中国现有森林形成了复杂的林龄结构，其中中龄林和幼龄林占据着主导地位 (Zhang et al., 2017, 图 5-4)。处于生长阶段早期的森林一般具有更强的碳汇能力 (Leng et al., under review; Ciais et al., under review)，因此是我国现有森林的未来固碳潜力的主要贡献者。有研究表明，2000–2040 年间，随着中国森林林龄增长，中国森林植被碳储量将增加 6.69 PgC (Yao et al., 2018)。但需要注意的是，陆地碳汇是生态系统对外界干扰过程响应的结果，而非陆地生态系统的固有属性，长远来看陆地生态系统的固碳潜力是有限的 (Piao et al., 2022)。比如当前和近期的生态系统碳汇主要是由于过去的植树造林和大气二氧化碳浓度升高导致的，未来如果新造林面积减少以及二氧化碳浓度上升趋势逐渐平缓，陆地生态系统趋于成熟和稳定，碳储量也将饱和，陆地碳汇能力将持

续下降。因此，将陆地碳汇长时间地维持在较高水平，需要通过科学的森林经营管理措施来优化林龄结构，以便为“碳中和”战略目标中的工业减排赢得时间窗口。

近期研究表明，未来中国陆地碳汇在 2020–2030 年间的最大潜力约为 0.16 (0.08–0.27) PgC/yr，在 2020–2060 年间的最大潜力约为 0.27 (0.16–0.38) PgC/yr (Lu et al., 2022)。为实现未来中国陆地碳汇的最大潜力，需基于准确的土地调查数据开展土地利用总体规划，并基于科学认知优化生态工程整体布局。其中，可用于恢复的土地面积、技术和实践水平以及地类转换的风险控制是决定生态系统恢复、管理和保护成效的主要因素 (Griscom et al., 2017; Anderson et al., 2019)。因此，应进一步加强陆地生态系统及其碳汇的监测，提升碳循环模型对生态系统管理的表征能力，推动遥感与模型数据融合体系建设，为增汇减排政策的制定提供科技支撑。

5.3 污染物排放及协同减排进展

CO₂ 排放与大气污染具有同源性和协同效应。本指标利用中国多尺度排放清单模型 (MEIC)、人为源碳排放数据 (指标 5.1)、温室气体与污染物协同控制模型 (GAINS)，分析了 2015 至 2021 年间全国及各个省份的碳减排与 PM_{2.5} 污染协同改善成效。

从全国尺度看 (图 5-5)，2015–2021 年间，工业和民用是实现了 CO₂ 排放与 PM_{2.5} 污染正向协同改善的行业，正协同效应尤以燃煤过程最为显著；但部分“煤改气”政策的实施也使得燃气过程的 CO₂ 排放 (51%–79%；0.8–1.5 亿吨) 与 PM_{2.5} 污染 (86%–142%；~0.01 μg/m³) 有所上涨。交通行业中，非道路机械得益于能效提升措施，初步实现了正向协同改善；而道路交通的 PM_{2.5} 浓度进一步降低，但 CO₂ 排放仍呈现较明显的上涨态势 (~17%)。电力供热行业 CO₂ 减排与 PM_{2.5} 改善呈显著负效应：煤电的深度末端控制政策使 PM_{2.5} 浓度降低 60% 以上，但煤电规模的持续增长，以及近年来气电设施的明显增加，导致电力供热的 CO₂ 排放大幅上涨 30% 以上 (~13 亿吨)。

进一步从省级尺度和不同化石燃料消费过程看 (图 5-6，图中圆形标记的大小和颜色分别代表 2021 年各行业的 CO₂ 排放量和单位 CO₂ 排放导致的 PM_{2.5} 浓度)，燃煤方面，超



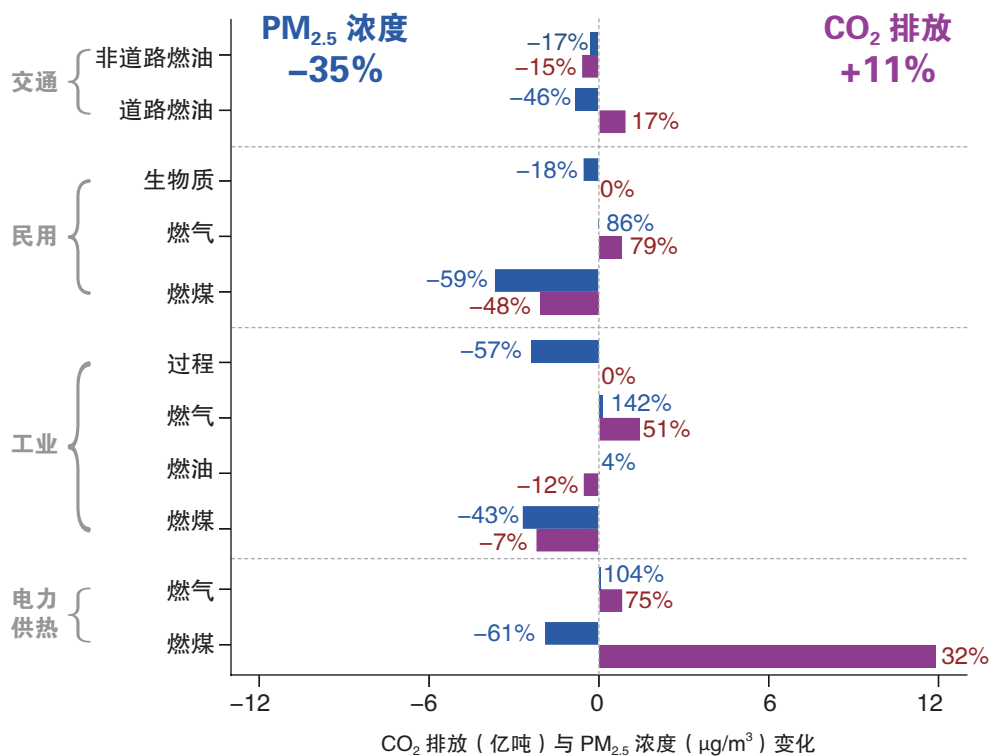


图 5-5 2015-2021 年中国 CO₂ 排放与 PM_{2.5} 污染协同控制情况

过三分之一的省份实现了 CO₂ 排放与 PM_{2.5} 污染改善正协同效益。其中，民用行业最为显著，除江苏、江西和新疆外其余各省（直辖市）均实现了正协同效应，得益于民用散煤替代的有效实施。相反在电力供热行业，除北京外，其他省份（直辖市）均呈现负协同效益，CO₂ 排放大幅上涨，尤以内蒙古、新疆、山东、山西等省份最为明显。超过三分之二的省份（直辖市）实现了工业燃煤的正向协同改善；但对于内蒙古、河北、辽宁等重工业省份，工业 CO₂ 排放仍平均上涨 ~15%，体现出较大的协同减排空间与潜力。

燃油消费方面，各省（直辖市）交通行业燃油消费导致的 PM_{2.5} 污染普遍下降。除上海

外，其他省份非道路机械的 CO₂ 排放同时下降，体现出正向协同减排效益；而绝大部分省份道路交通运输的 CO₂ 排放则呈上涨趋势，尤以山东、广东、河北、江苏最为显著。不同于燃煤和燃油消费过程，各省（直辖市）燃气过程呈现普遍的 CO₂ 排放与 PM_{2.5} 污染“双增长”趋势。近年来随着燃气消费规模的不断扩大，90% 以上省份的电力供热、工业、民用行业燃气过程的 CO₂ 排放全面上涨；燃气产生的 PM_{2.5} 污染也小幅增加（~0.01 μg/m³）。作为相对高效、清洁的化石能源，燃气逐步成为了碳达峰、空气质量达标过程中燃煤的过渡替代优化选择；但从长期的碳中和目标看，由于燃气过程仍然会产生碳排放，未来也将逐步成为碳减排的对象。

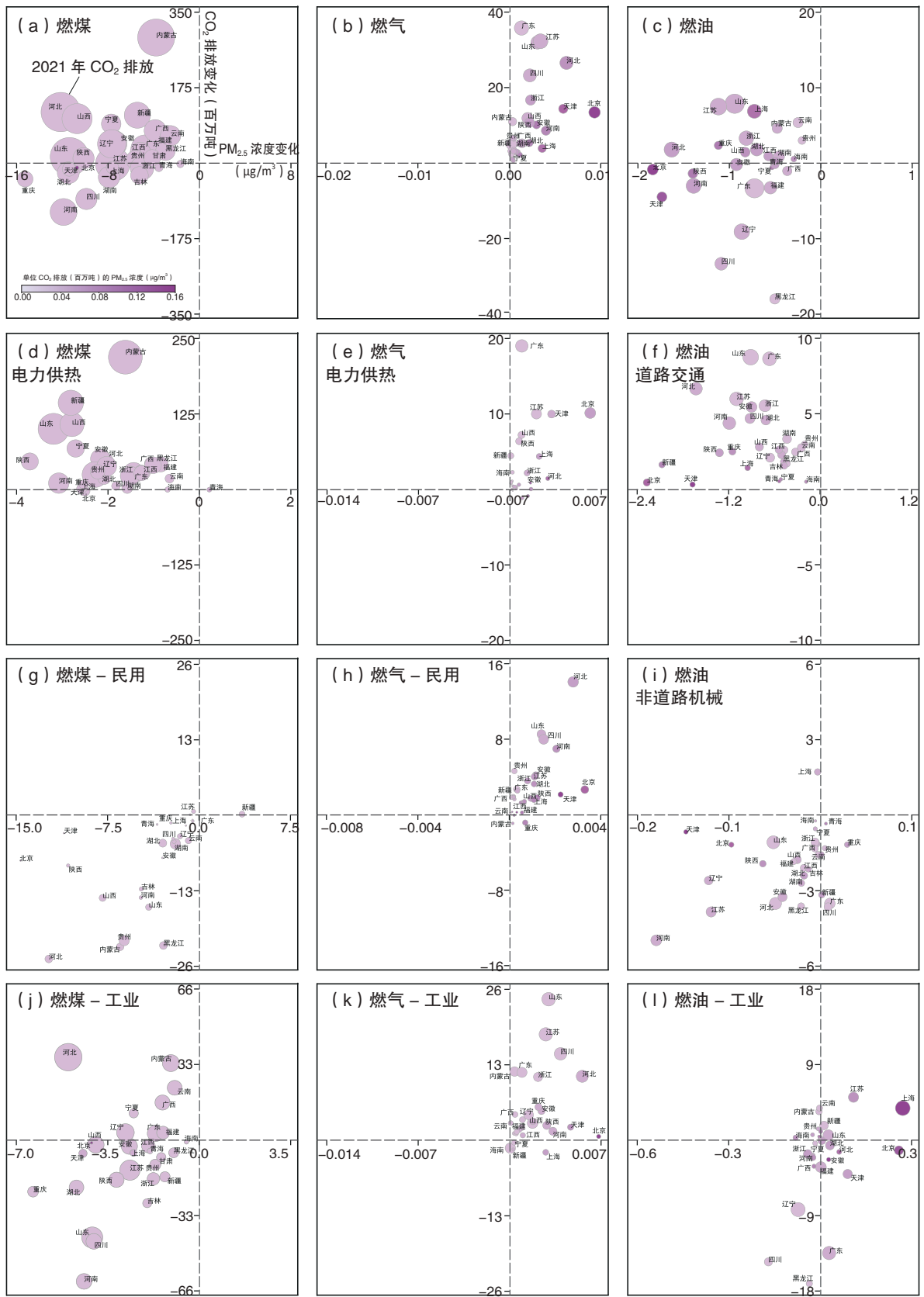


图 5-6 2015–2021 年各省 CO₂ 排放与 PM_{2.5} 污染协同控制情况

5.4 协同减排路径

我国不同区域和不同行业的能源结构及碳减排潜力存在显著差异。因此碳中和目标下，其协同减排路径也呈现出明显的区域及行业异质性。本指标在总结分析现有研究基础上，评估了双碳目标下，我国主要经济区和关键行业的大气污染减排及空气质量改善的协同效益的差异，强调了因地制宜及突出重点行业的降碳减污协同路径，为指导我国分行业、分区域有序配合，推动双碳目标实现的同时，深度改善我国空气质量起到关键作用。

由于我国各区域能源结构及产业结构的不同，碳中和目标下我国各区域的空气污染物协同减排效果差异显著（Mi et al., 2021）。如图 5-7，京津冀及周边地区由于钢铁和水泥行业比重较大且难以脱碳，导致化石能源占比及碳排放强度最高，且向非化石能源转换缓慢，抑制了该区域的协同减排效果。2030 年碳达峰和 2060 年碳中和目标实现时，其化石能源比重仍高达 75.2% 和 43.6%，同时 PM_{2.5} 的暴露水平分别高达 35.0 和 14.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （Cheng et al., 2021）。珠三角地区重点发展金融保险等高端服务业和现代轻工纺织等先进制造业，资本技术密集，化石能源占比低，当前具有最低的碳排放强度；珠三角碳减排潜力主要来自电力和交通运输部门（Liu et al., 2022a），碳达峰及碳中和时化石能源比重将达到 43.9% 和 15.9%，PM_{2.5} 的暴露水平降低至 11.3 和 4.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。长三角地区重点发展装备制造等先进制造业和现代金融等高端服务业，化石能源占比和碳排放强度居中；其碳减

排潜力主要来自电力行业和工业部门，对 NO_x 和 PM_{2.5} 减排具有较高的协同作用（Zheng et al., 2016），PM_{2.5} 的暴露水平在实现碳达峰及碳中和时达到 21.6 和 7.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。由此可见，碳中和路径结合清洁空气行动可使 2060 年碳中和目标实现时珠三角地区 PM_{2.5} 暴露水平达世界卫生组织最新指导值 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ；但是，京津冀及周边地区及长三角地区 PM_{2.5} 仍超标高达 188% 和 48%。这表明碳中和目标下，由于各地区经济发展程度不同，相应的区域能源结构、产业结构和能效水平各有差异，因而必须因地制宜制定降碳减污协同路径，以期在实现双碳目标的同时，最大效能地发挥降碳减污的协同效应。

同样，行业间协同减排潜力也存在较大差别。随着污染治理进程的持续深入，中国电力行业末端治理的碳及污染物协同减排潜力日渐收窄，能源结构转型和靶向治理策略将成为充分释放电力行业协同减排潜力的关键举措。在

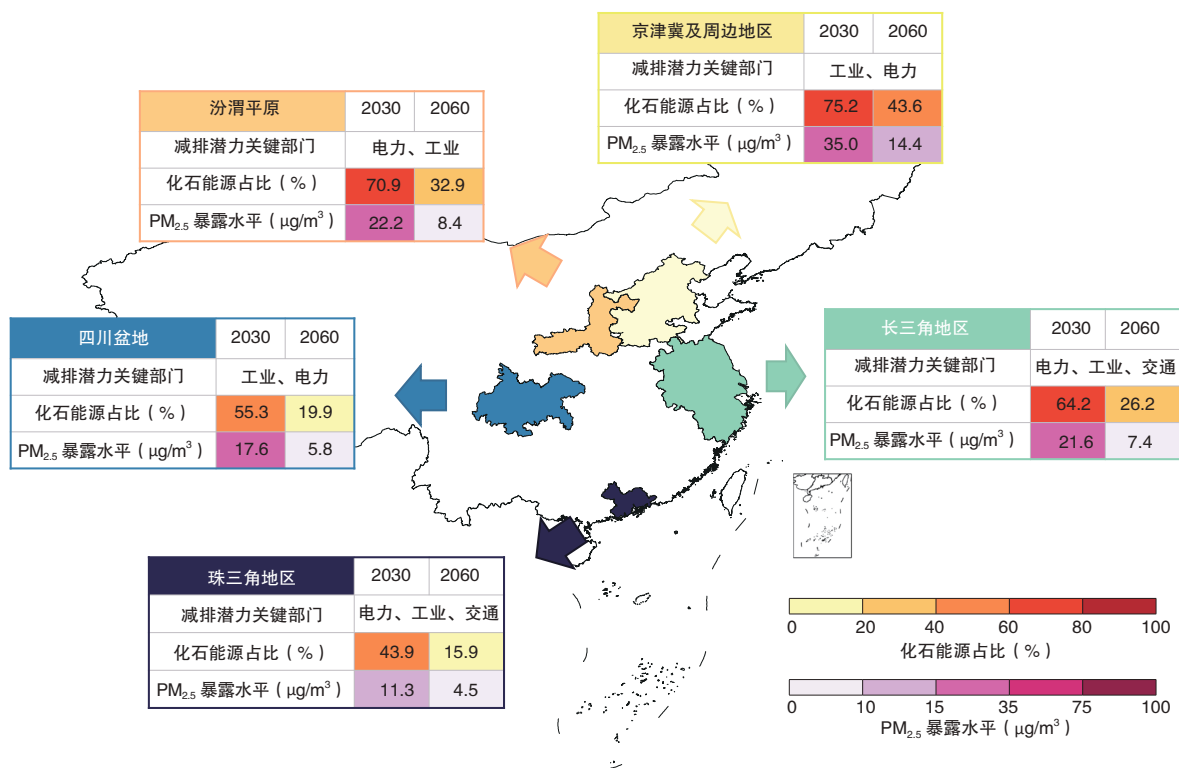


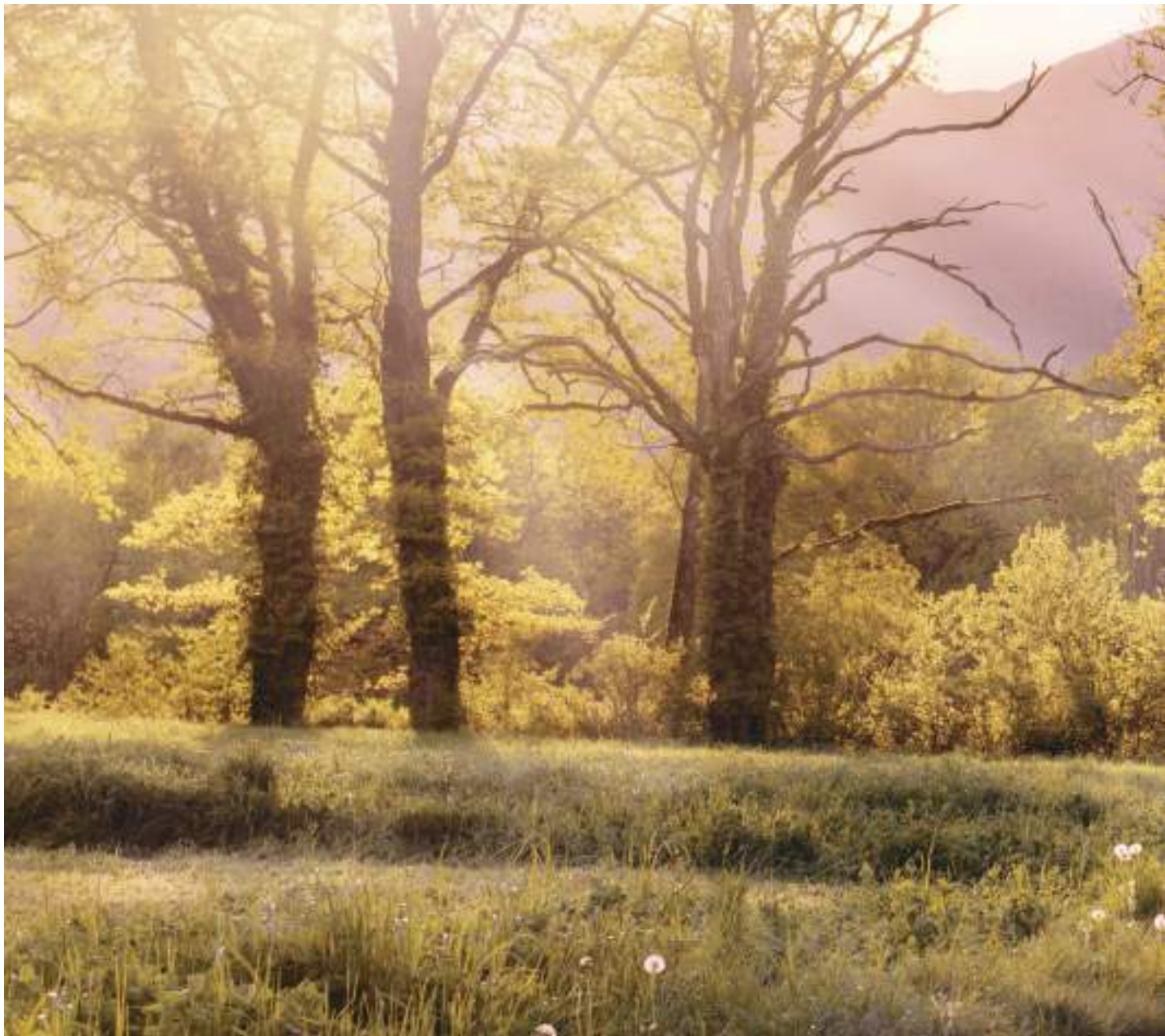
图 5-7 我国五大经济圈关键碳减排潜力及潜在协同减排效果

碳达峰减排路径中，中国电力行业可再生能源和核能电量渗透比将在 2050 年提高到 80%，东部及南部地区火电厂 SO₂、NO_x 排放量将降低 50% 以上，大幅提升我国人口密集区域的空气质量 (Cai et al., 2018b)。在此基础上，通过实施与碳减排路径协同的高污染机组提前淘汰和逐步加严污染控制水平等靶向治理策略，大力释放碳减排路径的协同减排潜力，能够实现空气质量协同改善效益的最大化 (Tong et al., 2021)。在全球 1.5°C 温控目标导向的碳减排路径中，通过推动高污染机组提前淘汰能够进一步削减中国人均 PM_{2.5} 暴露浓度并避免超过 20 万人因火力发电空气污染而导致的过早死亡。

终端用能电气化是电力以外其他行业实现碳及污染物协同减排的重要途径，能够实现不同程度的正向协同减排。对于交通行业，电动汽车的推广能够显著降低 CO₂ 及关键前体污染物 VOCs 和 NO_x 排放，为城市人口密集区域带来可观的环境效益。实现乘用车 27% 的电

动化比例及其他公共车队更高比例的电动化，能够有效削减京津冀、长三角、珠三角地区年均 PM_{2.5} 人口加权浓度 0.5 μg/m³，同时改善各地 O₃ 污染，其中北京、广州等地 O₃ 日均 8 小时最高浓度削减量可达 3ppb (Liang et al., 2019)。以钢铁行业为例，在绿电系统中大幅部署电炉短流程炼钢工艺，能够显著提升钢铁行业能效，并在 2060 年减少主要大气污染物 (NO_x、SO₂ 和 PM_{2.5}) 排放量 80% 以上 (Li et al., 2022b)。在电气化进程稳步推进的背景下，电力行业要承担其他行业电气化带来的转移，打造清洁、低碳、安全、高效的电力系统也成为充分释放各行业碳减排协同潜力的必由之路。

综上，区域及行业的能源结构及产业结构差异导致其碳减排路径及其污染物协同减排潜力呈现明显的异质性。识别关键产业、制定因地制宜的降碳减污协同路径将更高效地推动我国双碳目标的实现，以及空气质量和人群健康的改善。



健康影响与协同效益



2022年我国人口 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ 超标地区，比2015年减少37.5个百分点。但 O_3 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_2 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 $PM_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 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存在关联。《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 $PM_{2.5}$ 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实施，改善空气质量，应对气候变化，降低经济成本。

6. | 空气污染与健康影响

大气细颗粒物 (PM_{2.5})、臭氧 (O₃) 和二氧化氮 (NO₂) 的长期和短期暴露均会带来不利健康效应，威胁人群健康。本指标基于 TAP 及地面监测的污染浓度数据进行人群暴露评估，量化了我国居民空气污染暴露水平的变化并估算了相关的成人过早死亡人数。2022 年我国整体的 PM_{2.5} 及 NO₂ 暴露水平及相关过早死亡人数保持下降，但 O₃ 暴露水平及相关过早死亡人数相比 2021 年有所上升，O₃ 重污染事件对我国人群健康带来了潜在风险。

我国居民的 PM_{2.5} 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_{2.5} 年均暴露浓度为 31.2 μg/m³，与 2021 年基本持平，相比于 2015 年 (52.8 μg/m³) 下降 40.8%。各重点区域的 PM_{2.5} 年均暴露水平为 19.7–44.7 μg/m³，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_{2.5} 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%) 减少了 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 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 PM_{2.5} 污染超标天数 (即日均 PM_{2.5} 浓度大于 75 μg/m³)

为 24 天，相比 2015 年减少 50.5 天。

2022 年 O₃ 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 O₃ 长期暴露水平，即年最大 6 个月平均 O₃ 最大 8 小时浓度，相比于 2021 年上升了 6.2 μg/m³ (6%)。2022 年各重点区域的 O₃ 长期暴露水平相比 2015 年上升 15.6%–24.3%。汾渭平原的 O₃ 长期暴露水平上升百分比最为显著 (12.3 μg/m³)，O₃ 污染形势严峻。短期 O₃ 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 O₃ 污染超标天数 (即日最大 8 小时 O₃ 浓度大于 160 μg/m³) 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。

我国居民 NO₂ 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

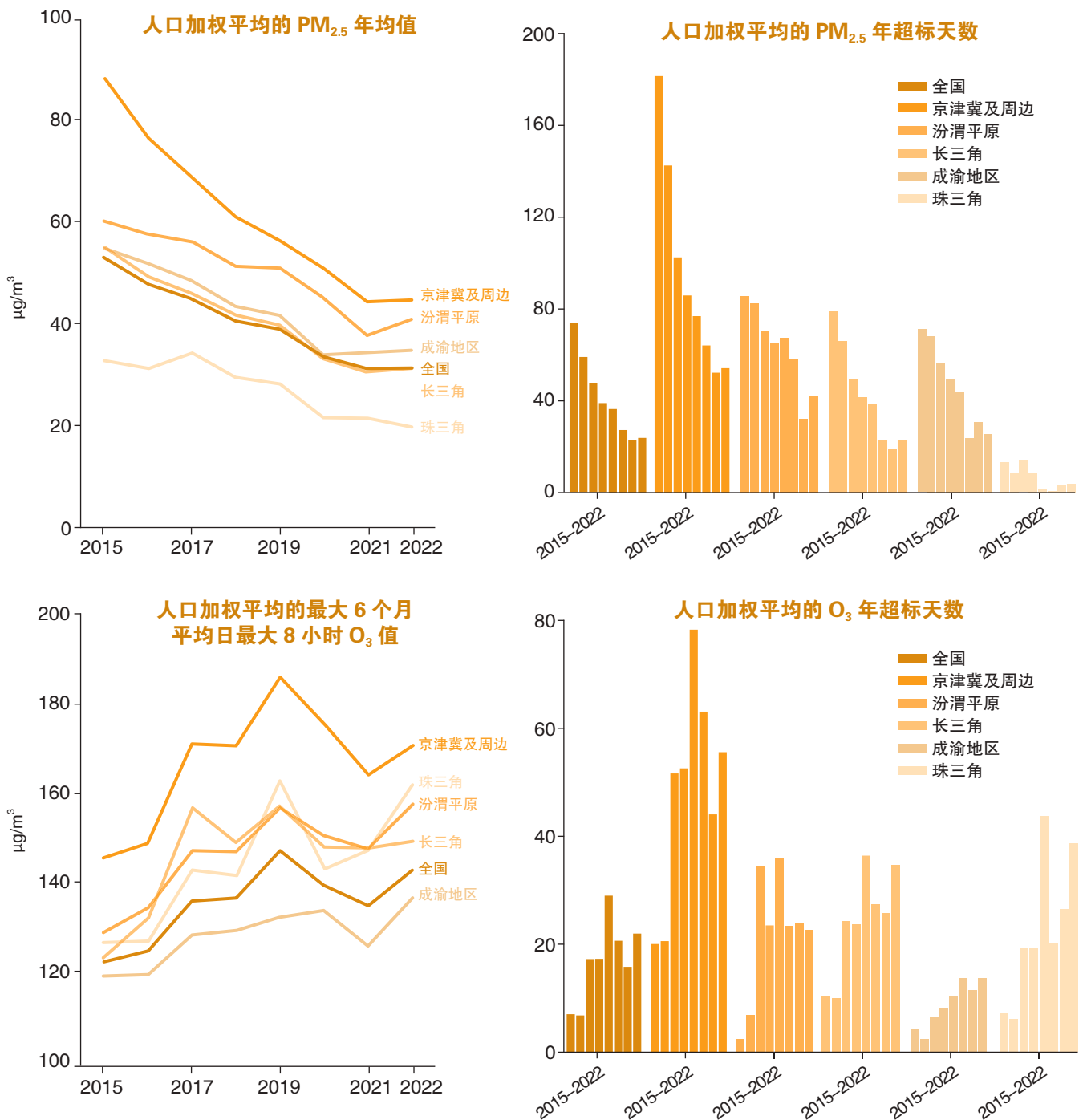


图 6-1 2015–2022 年我国 PM_{2.5} 和 O₃ 污染长期、短期暴露水平的变化

NO₂ 人口加权年均暴露浓度为 25.73 μg/m³，相比 2013 年（45.44 μg/m³）和 2017 年（34.65 μg/m³）分别下降了 43.38% 和 25.77%。但我国 2022 年 NO₂ 年均浓度仍高于 WHO 于 2021 年发布的 AQG 年均基准值 10 μg/m³。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 NO₂ 浓度超过 AQG 日均基准值（25 μg/m³）的天数为 132 天，相比 2017 年减少 169 天，NO₂ 污染形势改善明显。但目前，我国 NO₂ 的长期和短期暴露浓度均高于 AQG 基准值，NO₂ 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 NO₂、大气颗粒物和 O₃ 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。

PM_{2.5} 暴露是危害公共健康的重要因素，根据全球疾病负担评估研究 (Murray et al., 2020)，PM_{2.5} 污染暴露可升高脑卒中、缺血性心脏病、慢性阻塞性肺病、肺癌、二型糖尿病、下呼吸道感染等疾病风险，进而增加成人的过早死亡风险。得益于我国 PM_{2.5} 暴露水平的持续下降，相关的成人过早死亡人数显著降低。沿用 Xiao et al. (2022) 研究中的数据来源和方法进行测算，2022 年我国 PM_{2.5} 长期和短期暴露相关的成人过早死亡人数分别为 120 万 (95%CI: 107–134 万) 和 6 万 (95%CI: 4–8 万)，相比

于 2021 年略有下降或基本持平。2015–2022 六年间下降幅度分别为 17.5% 和 35.6%。

部分研究表明，O₃ 暴露是独立于 PM_{2.5} 暴露的健康危害，由于 O₃ 暴露水平的增加，导致其成为危害我国公共健康的主要大气污染物之一。2022 年 O₃ 长期和短期暴露相关的成人过早死亡人数分别为 15 万 (95%CI: 7–23 万) 和 8 万 (95%CI: 5–12 万)。虽然 O₃ 暴露相关过早死亡的总数远小于 PM_{2.5} 暴露相关的过早死亡，但相比于 2021 年，O₃ 暴露相关过早死亡呈上升趋势，其长期和短期暴露相关过早死亡分别增加 11.1% 和 9.7%，且 O₃ 短期暴露相关过早死亡人数较 PM_{2.5} 更高，考虑到不确定性，也至少与 PM_{2.5} 处于同等水平。PM_{2.5} 和 O₃ 污染的协同治理对于保护人群健康至关重要。

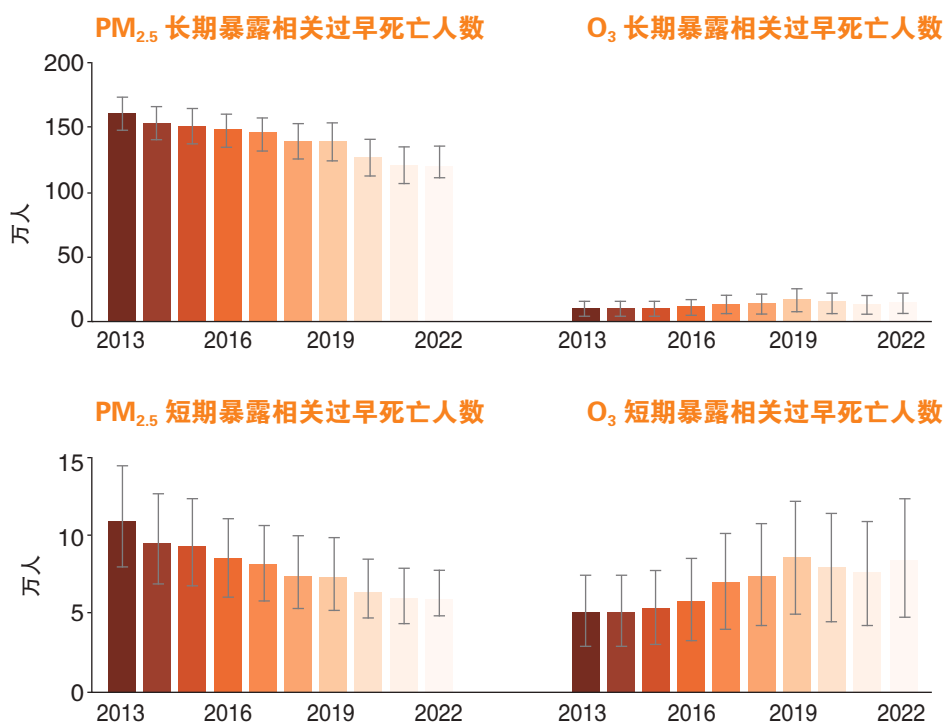


图 6-2 2013–2022 年我国归因于 PM_{2.5} 和 O₃ 短期与长期暴露的成人过早死亡人数

NO₂ 被 WHO 确定为诱发急性呼吸系统疾病和哮喘的风险因素之一。大量队列研究一致发现，NO₂ 长期暴露可增加人群全因死亡和呼吸系统死亡风险。部分研究也提示，长期 NO₂ 暴露可能增加心脑血管疾病、糖尿病等疾病的死亡风险，可增加多种慢性病的发病风险，但结果并不一致。Meta 分析和全球多中心研究显示，NO₂ 短期暴露与每日全因死亡率和心肺疾病死亡率升高有关（Meng et al., 2021; Orellano et al., 2020），且 NO₂ 的短期暴露对居民具有独立的急性健康危害（Meng et al., 2021）。因此，我国应该采取有效大气污染防控措施，降低 NO₂ 对人群健康的影响。基于我国 272 个主要城市的

暴露反应关系研究结果（Chen et al., 2018a）和 2022 年我国年均 NO₂ 浓度水平，计算可得 2022 年的非意外死亡人数、心血管疾病死亡人数和呼吸系统疾病死亡人数分别为 5.04 万（95%CI: 3.92–6.16 万）、2.48 万（95%CI: 1.93–3.31 万）、0.57 万（95%CI: 0.43–0.72 万）。相较于 2013–2020 年，2022 年 NO₂ 短期暴露相关死亡人数呈现下降趋势（图 6-3）。为进一步降低 NO₂ 污染对我国人群健康的危害，我国有必要收紧 NO₂ 浓度限值标准、降低大气 NO₂ 的污染水平。在气候变化的背景下，采取积极的生态环境保护政策，实现大气污染与气候变化的协同治理，切实保护人群健康。

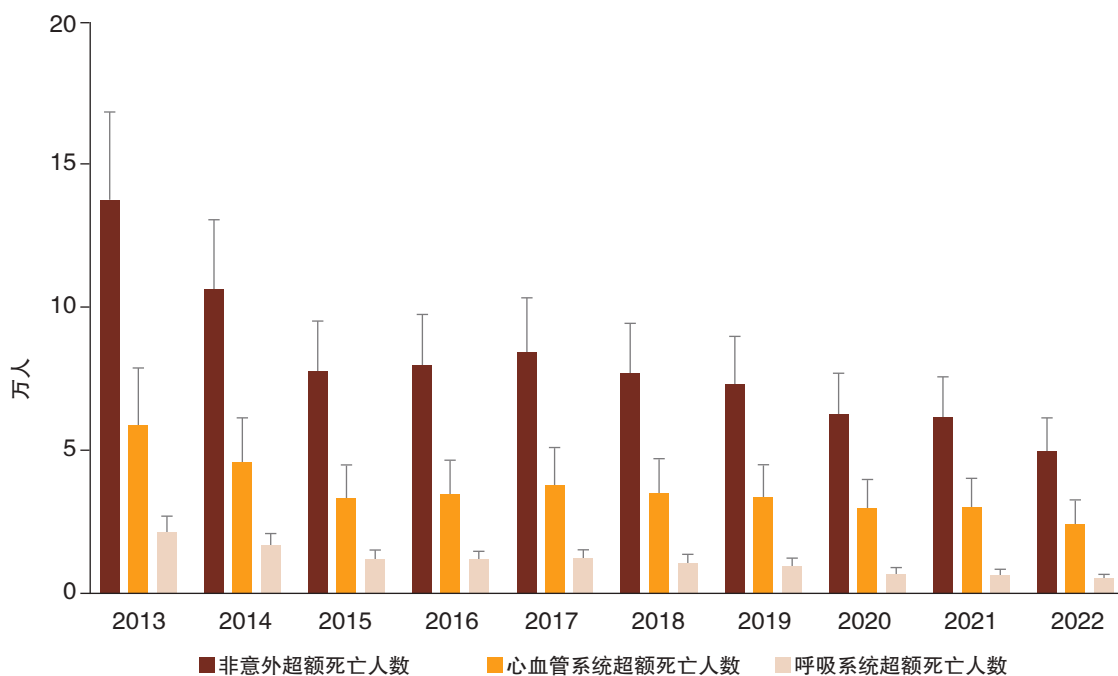


图 6-3 2013–2022 年我国归因于 NO₂ 短期暴露的超额死亡人数

6.2 气候变化与健康影响

极端天气气候事件发生频率和强度增加是气候变化影响的直接表现之一。在全球气候变化的影响下，高温热浪暴露增加产生对人群生命健康的持续威胁。2017年7月发生的全国性大规模热浪天气暴露导致全因死亡风险增加23%（95%CI: 14%，32%）。此外，研究表明寒潮、台风、沙尘等极端天气气候事件也会提升人群死亡风险。系统性气候变化适应性政策能显著降低人群风险。随着气候变化加剧，极端天气事件与大气污染复合事件暴露风险增加。

气象因素健康风险

热暴露对死亡风险的贡献。伴随气候变化，高温暴露对人群健康的不良影响凸显。2022年中国版《柳叶刀人群健康与气候变化倒计时报告》提出，2021年，中国平均气温创下新高，与历史（1986–2005年）平均值相比，2021年中国人均热浪暴露增加了7.85天，相关的死亡人数增加了13185人，大约共导致了24966人的死亡，相关的经济损失达到国内生产总值的1.68%（Cai et al., 2022）。全国多城市研究表明，短期热暴露下，我国人群非意外与意外死亡风险均显著增加。2013–2015年间高温暴露相关的非意外死亡数占总非意外死亡的2.71%（Chen et al., 2018b）；2013–2019年间，温度每上升1℃，暴露相关的意外死亡风险可增加0.50%（95%CI: 0.13%，0.88%）（Hu et al., 2023）。基于中国人群的荟萃分

析研究显示，持续高温所形成的热浪事件具有更强的死亡促发效应，相关非意外总死亡、心血管系统疾病、呼吸系统疾病的死亡风险增加18%–25%（Pan et al., 2023）。近期研究显示，大规模热浪事件会带来严重健康损害，2017年7月发生的全国性大规模热浪天气暴露导致心血管疾病、脑血管疾病、缺血性心脏病、急性缺血性心脏病、慢性缺血性心脏病和心肌梗死死亡风险分别增加27.8%、26.7%、30.1%、27.3%、32.2%、25.2%（Yan et al., 2023）；总体上，此次热浪事件导致全因死亡风险增加23%（95%CI: 14%，32%），归因死亡人数高达1.6万余人，相关的生命价值损失高达613亿元（Yan et al., 2022）。

气候变化会长期影响温度变化，从公共卫生的角度来看，了解长期热暴露的健康影响更为重要。然而，关于长期热暴露对死亡

风险健康影响的流行病学证据很少。一项基于双重差分方法的全国性研究表明 (Hu et al., 2022), 年平均温度每降低 1°C, 死亡风险增加 2.93% (95% CI: 2.68%, 3.18%), 呼吸系统疾病和心血管疾病死亡风险分别增加 5.16% 和 3.43%, 长期温度暴露对总死亡风险的影响在城市化水平较低、教育程度低、人均 GDP 低的区县更为明显。具有弱势特征和社会经济地位的人群更容易长期暴露在高温下, 未来应制定针对性政策, 加强对长期热暴露健康威胁的应对。

其他气候事件的健康效应。气候变化下, 我国寒潮、台风等极端天气事件频发, 最新全国多中心研究表明此类极端天气事件亦可提升人群死亡风险: 与非寒潮日相比, 寒潮日暴露相关的非意外总死亡风险增加 15.5%, 而南方地区可增加 17.4%, 高于北方地区增幅 (13.0%), 据此估计的全国归因超额死亡人数为 57783 人, 相关生命价值损失为 2291 亿元 (Sun et al., 2022)。而台风事件暴露相关的全因死亡风险增加 7%, 其中, 在台风发生当日即可引发心血管系统和呼吸系统疾病死亡风险增加 12% (Liu et al., 2023)。同时, 全球变暖加剧引发的荒漠化和沙尘暴对人群死亡风险增加, 基于甘肃省河西走廊沙尘暴天气和缺血性心脏病死亡率的研究发现缺血性心脏病死亡风险随着沙尘暴天气天数增加而增加 (Li et al., 2020): 1 级沙尘暴 (0-5 天) 的缺血性心脏病死亡相对风险为 1.105 (95% CI: 0.889, 1.320), 6 级沙尘暴 (26-30 天) 的缺血性心脏病死亡相对风险为 1.183 (95% CI: 1.017, 1.348)。2022 年中国版《柳叶刀人群健康与气候变化倒计时报告》指出气温上升导致 2017-2021 年野火的年平均暴露量比 2001-2005 年的平均值增加 60.0%, 但我

国野火导致的死亡风险相关研究证据仍存在空白。

臭氧浓度增加的健康和生态效应。地表臭氧作为一种大气二次污染物, 直接导致全球气候变暖, 同时对陆地生态系统带来威胁。臭氧污染是一个全球性环境问题, 从全球来看, 目前近地层臭氧浓度不断升高, 浓度最高的区域是东亚。2019 年 GBD 研究报告提示, 臭氧污染暴露引起中国近 9 万余人超额死亡。臭氧不仅对人群健康产生危害, 还会对粮食安全构成威胁。高浓度臭氧通过气孔进入作物叶片内产生氧化胁迫, 对粮食生产带来负面影响, 威胁全球粮食安全。研究指出, 在当前的田间耕作技术条件下, 臭氧的增加可能引起中国的小麦、杂交稻、常规稻和玉米减产, 幅度分别为 32.6%、29.3%、12.9% 和 8.6% (Feng et al., 2022)。臭氧浓度降低会增加作物供应, 有助于在降低中国环境成本的情况下, 确保粮食供应。此外, 还有助于保护自然植被, 减少对人类健康的损害。

气候变化适应性措施的作用

气候变化适应性政策对健康的影响。适应气候变化健康风险的措施包括加强极端天气监测预警、提升人群个体防护水平、改善公共设施与居住条件等 (Ebi, 2022)。

在气候监测预警方面, 我国正逐步构建基于风险的预警系统 (Risk-Based Early Warning System) (WMO, 2015), “地空天”一体化监测网络日渐完善, 对极端天气事件的分析预警水平不断提高加强 (生态环境部, 2022)。世界气象组织 (WMO) 评价我国建立的洪水风险早期预警服务取得了健康收益, 在 2013 年 7 月 5

日至 8 日安徽省洪灾中及时预警，确保 2500 人及时转移，洪水导致 7.27 亿元经济损失，但无人员伤亡（生态环境部，2022）。

在人群个体防护行动方面，由中国疾病预防控制中心联合济南市历城区疾控中心在济南市历城区不同街道逾 4000 居民中展开了热浪干预项目（Heat Wave Intervention Program, HWIP），该干预项目包含三级卫生保健、高温预警信息关注、24 小时咨询热线、医护人员高温健康培训等四种措施。据此开展的政策评估研究显示，乡级受干预组的热相关疾病患病率显著低于对照组（OR=0.495， $P<0.01$ ）（Jing et al., 2016）；干预组人群比对照组有显著更高的高温风险知识（ $b=0.387$ ， $p<0.001$ ）、行动意愿（ $b=0.166$ ， $p<0.01$ ）和行动水平（0.037， $p>0.05$ ）。此外，对于农村老年人脆弱群体，

我国学者探析高温健康风险教育、电费补贴、公共场地喷雾纳凉等应对高温热浪个体适应措施的有效性，研究发现高温健康风险教育可有效降低高温暴露，教育干预组在热浪期间的室内和室外温度暴露水平相比于对照组显著下降 1.95°C （ 1.00°C ， 2.89°C ）和 2.63°C （ 1.55°C ， 3.70°C ）（Lou et al., 2021）。

在改善公共设施与居住条件方面，气候变化不同适应情景下全国多城市热相关劳动力损失预估研究表明（He et al., 2022），未来 2050 年相比于 2010 基线年，城市高温导致的年均劳动力损失可能超过总 GDP 的 0.20%，但是未来城市如果采取特定适应措施（绿色屋顶、高反照率墙面以及高反照率路面），则可抵消 10% 的高温相关年均经济损失，并且进一步减缓低收入行业人群遭受的热相关健康损害。



热浪健康预警措施和预警机制的作用。为应对气候变暖，全球多个国家率先建立了高温热浪健康预警系统，通过构建高温预警指标与本土人群不良健康终点的暴露—反应关系，量化高温归因超额死亡风险，并根据健康风险识别预警阈值，形成适宜于本国人群的健康风险分级预警系统，面向公众发布预警并提供健康行动指引（WMO & WHO, 2015）。有研究表明，欧洲国家的高温健康风险预警已初见成效，取得了较好的健康收益（Casanueva et al., 2019）。法国热健康预警系统在 2006 年 7 月严重热浪期间，预计 18 天内有效保护了 4388 人生命（Fouillet et al., 2008）；英国国家高温热浪行动计划在 2013 年夏季热浪期间，预计 20 天内有效保护了 1189 人生命，降低了近 5 倍的超额死亡人数（Green et al., 2016）。美国费城热健康预警系统在 1995–1998 年系统运行期间成本约 21 万美元，但因有效避免健康损害而获得了 4.68 亿美元的健康收益，收益倍率达到了近 2300 倍（Ebi et al., 2004）。未来高温热浪事件发生风险仍会增加，因此需要人群健康风险研究为预警模型的构建提供科学依据。

我国已初步建立热浪健康风险预警系统（Heat wave and health risk early warning systems in China）（WHO & WMO, 2018），南京、哈尔滨、深圳等城市运行结果显示分级预警指数对儿童呼吸系统疾病就诊风险的指示程度较好，但对其他健康风险指示的灵敏度与准确率还需提高（汪庆庆等，2014；方道奎等，2019；兰莉等，2016）。近期我国学者研究发现，热浪对死亡风险的影响因热浪强度、持续时间、热浪发生顺序等关键特征而异，夏季第一次发生的高温热浪天气导致较大的死亡风险，其相关死亡效应几乎是

第二次高温热浪的两倍，而高温热浪第 2 至 3 天可能是产生死亡效应的高峰期（Sun et al., 2020）。因此，基于广泛人群研究提供的证据可为热浪健康风险预警的优化提供支撑。目前，我国最新的包括监测、警示、预警三阶段的热浪健康风险预警预报产品正在城市试运行阶段，在 2022 年夏季济南市 7 个城区识别并发布高温健康风险红色预警 53 次，预期可避免的健康损失达 1.06 亿元（Zhang et al., 2023）。

绿地对环境改善和健康的影响。绿地是生态系统的重要组成部分，是城市环境基础设施建设的重要一环，与公共健康密切相关，对改善居民健康，提升居民整体幸福感，推进城市生态环境改善，最终实现“健康中国”的战略目标具有重要意义。绿地可通过降低空气污染水平、减少热暴露、降低环境危险因素效应、增加生态环境中生物多样性、降低心理压力、增加体力活动等多种途径对环境质量改善和人群健康产生促进作用。

城市绿地与居民健康高度相关，可以归纳为生理、心理和社会健康 3 个维度。城市绿地在改善居民心血管疾病、肥胖症等慢性疾病与心理疾病方面影响显著。同时，城市绿地可以有效降低空气污染水平，改善城市空气质量，而减少空气污染正是绿地改善居民健康的重要间接途径（Janhall., 2015）。城市绿地对居民健康的正向调节作用不仅来源于居民与绿地的短时交互活动，还归因于绿地对城市环境的长期调节作用。

未来气候变化情景的风险预估

未来气候变化加剧，我国高温暴露导致

的死亡负担将会增加。我国多城市预估研究报道，与 1960–2005 历史阶段相比，在不采取气候变化应对政策情景下（RCP8.5），未来 2030、2050、2090 年归因于高温暴露的死亡风险将分别增加至 2.4%（95%CI: 0.4%，4.1%）、3.2%（95%CI: 0.6%，5.6%）和 5.5%（95%CI: 0.5%，9.9%）；风险分布有显著的地区不均衡特征，南部、东部和中部地区的风险增速更快（Yang et al., 2021）。与此同时，未来的热浪相关死亡风险将会大幅上升，相比于 1986–2005 阶段，2090 年代全国因热浪暴露的死亡人数在低排放（RCP2.6）、中高排放（RCP4.5）和高排放情景（RCP8.5）下分别将达到 2.03 万、3.5 万和 7.2 万人，其中 47.4%–51.7% 的死亡负担集中在我国的东部与中部地区；热浪死亡风险趋势严峻，即便在可将温升控制在 1.5℃ 的低排放情景下，热浪相关死亡人数仍是历史阶段的 1.6 倍（Chen et al., 2022）。而在不同 RCP 情景下，人口老龄化、城市热岛效应还会加重热相关死亡负担（Zhu et al., 2021）。

未来气候变化相关的极端气候条件还可能加剧空气污染。在 RCP4.5 情景下，2046–2050 年代相比于 2006–2010 年基线，我国大气 PM_{2.5} 与臭氧的人口加权浓度水平会增加

3% 和 4%，年均死亡负担分别增加 1.21 万和 0.89 万人，大气停滞与热浪等天气事件可分别贡献以上总死亡负担的 39% 和 6%（Hong et al., 2019）。

在此基础上，高温热浪和空气污染，特别是与臭氧污染的复合发生可能性提高，人群面临的复合事件暴露风险增加。近期发表的全球未来高温热浪与大气臭氧污染复合事件的发生及暴露水平预估研究发现（Ban et al., 2022），与 1995–2014 年基线期相比，在高排放情景 SSP3–7.0 下，到本世纪末期 2071–2090 年代，由于热浪日和臭氧污染日持续上升，全球年均复合天数将平均增加 34.6 天，平均每网格单元内人口暴露天将增加 9350 万人日，分别是基线期的 14 倍和 26 倍；中国作为全球气候变化的敏感区，同时也是全球臭氧污染较重的国家之一，全国年均复合天数将平均增加 36.7 天，比全球平均水平高出 6%，平均每网格单元内人口暴露天将增加 1.13 亿人日，比全球平均水平高出 21%；结合全国人口分布，胡焕庸线以东地区暴露增幅超过 2.45 亿人日。

综上，未来气候变化下极端天气呈现增加趋势，人群暴露及健康风险增加，建立气候变化下极端天气事件的健康防护措施迫在眉睫。

6.3 协同治理的健康收益

碳中和目标从多角度对“温室气体与空气污染物的协同治理”产生深刻的影响，气候变化导致长期温升的同时也会引发极端高温等极端事件，但是健康改善效益及经济影响的不确定性如何衡量？本指标以碳中和导向的能源政策为切入点，识别消费侧减排潜力、预测人群健康改善效益，为碳减排与空气污染协同治理提供重要的科学建议。

全球气候变化导致极端高温和热浪频率上升的同时伴随着臭氧浓度的增加，均会增加人群死亡率。通过调查江苏省 13 个城市 2016–2017 年夏季期间因高血压死亡的 9727 名个体，发现夏季高温暴露使高血压患者的月寿命损失共缩短 1474 年，其中 77.9% 被归因于高血压性心脏病 (Pan et al., 2022)。考虑到高温和臭氧对死亡率的交互作用，有研究分析了 2008–2017 年上海浦东地区每日慢性阻塞性肺病 (Chronic Obstructive Pulmonary Disease, COPD) 死亡数据，发现夏季两者间的交互作用更加显著，每增加 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的臭氧浓度，COPD 死亡的风险增加，其风险比为 1.02 (95%CI: 1.00–1.03) (Fu et al., 2022)。

气候减缓政策在降低碳排放的同时显著减少大气污染物的排放和改善空气质量，但由于人口老龄化，健康协同效益的幅度有所减弱。沿着当前减缓政策力度，到 2030 年我国人口加权 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度将达到 $27.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，当采用更严格污

染控制技术和气候缓解政策时，2030 年和 2050 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度将额外减少 $10.2\text{--}16.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $12.5\text{--}25.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Liu et al., 2022b)。与当前政策力度相比，实施更强的减缓政策将显著降低疾病负担，2030 年和 2050 年可避免过早死亡人数高达 21 万例和 53.7–88.0 万例 (Conibear et al., 2022; Liu et al., 2022b; Lyu et al., 2023)，其中急性心肌梗死 (Acute Myocardial Infarction, AMI) 的发病率下降 10.6%–46.2%，降至 5880–9760 例 (Ma et al., 2023b)。同时考虑到 $\text{PM}_{2.5}$ 的短期暴露和长期暴露，我国每年分别有 23 万和 223 万例过早死亡，其中在 SSP1–RCP2.6 未来情景中，尽管 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度降低导致过早死亡人数减少 49%，但人口老龄化使得过早死亡人数增加了 125% (169 万例)，主要是由于 70 岁以上的人口比例从目前的 10% 上升到本世纪中叶的 30% (Xiang et al., 2023)。

消费侧尤其是汽车保有量在未来将持续增加，将消费更多化石燃料和增加污染物排放。

中国政府发布一系列促进绿色交通的政策，包括电动汽车、燃油经济性法规、排放标准更新、交通结构调整等，以显著减少碳和污染物排放，极大改善人群健康。研究显示如果实施禁止或限制销售内燃机新车的措施，到 2050 年避免 6400–18500 例过早死亡，进一步结合碳中和目标倒逼的电力部门清洁化，将额外避免 100 例过早死亡（Shen et al., 2023）。清洁车辆政策的单独实施将使 2035 年 PM_{2.5} 和 O₃ 暴露浓度相较 2019 年降低 9.4% 和 4.4%，累计避免约 6.8 万例和 3.3 万例过早死亡，其中排放标准升级的减排贡献最大，其次是汽车电动化（Shi et al., 2023）。更高的电动车普及率与电力清洁化相结合，将显著改善空气质量和提

高健康效益，到 2030 年将避免 15500 例过早死亡（95%CI: 14500–16600），健康效益高达 700–1700 亿元（Hsieh et al., 2022）。

全球变暖引致的健康影响和经济负担逐渐凸显，而积极的适应性策略可以降低劳动力损失，有效缓解经济压力。随着高温暴露和工作强度迅速增加，2050 年长江三角洲的劳动力损失高于 7%，进而导致 2050–2100 年间的市场成本每年达到当年 GDP 的 0.20%–0.25%（He et al., 2022）。采取恰当的适应性措施将缓解未来城市变暖造成的部分劳动力损失，尤其是长三角和珠三角，并进一步抵消每年额外经济成本的 10%（He et al., 2022）。



参考文献

- Anderson, C., Defries, R., Litterman, R., et al. (2019). Natural climate solutions are not enough. *Science*, 363(6430), 933–934. <https://doi.org/10.1126/science.aaw2741>
- Ban, J., Lu, K., Wang, Q., et al. (2022). Climate change will amplify the inequitable exposure to compound heatwave and ozone pollution. *One Earth*, 5(6), 677–686. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.05.007>
- Cai, B., Liang, S., Zhou, J., et al. (2018a). China high resolution emission database (CHRED) with point emission sources, gridded emission data, and supplementary socioeconomic data. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.036>
- Cai, B., Cui, C., Zhang, D., et al. (2019a). China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015 and uncertainty analysis. *Applied Energy*, 253, 113579. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113579>
- Cai, B., Guo, H., Ma, Z., et al. (2019b). Benchmarking carbon emissions efficiency in Chinese cities: A comparative study based on high-resolution gridded data. *Applied Energy*, 242, 994–1009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.146>
- Cai, W., Hui, J., Wang, C., et al. (2018b). The Lancet Countdown on PM_{2.5} pollution-related health impacts of China's projected carbon dioxide mitigation in the electric power generation sector under the Paris Agreement: a modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 2(4), e151–e161. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30050-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30050-0)
- Cai, W., Zhang, C., Zhang, S., et al. (2022). The 2022 China report of the Lancet Countdown on health and climate change: leveraging climate actions for healthy ageing. *The Lancet Public Health*, 7(12), e1073–e1090. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(22\)00224-9](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(22)00224-9)
- Casanueva, A., Burgstall, A., Kotlarski, S., et al. (2019). Overview of Existing Heat-Health Warning Systems in Europe. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16, 2657. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152657>
- CEADs. (2023). China Emission Accounts & Datasets. <https://www.ceads.net>
- Chen, H., Sun, J. & Li, H. (2017). Future changes in precipitation extremes over China using the

- NEX–GDDP high–resolution daily downscaled data–set. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 10(6), 403–410. <https://doi.org/10.1080/16742834.2017.1367625>
- Chen, H., Zhao, L., Cheng, L., et al. (2022). Projections of heatwave–attributable mortality under climate change and future population scenarios in China. *The Lancet Regional Health – Western Pacific*, 28, 100582. <https://doi.org/10.1016/j.lanwpc.2022.100582>
- Chen, J., Zha, Y., Liu, B., et al. (2023). Rationally designed water enriched nano reactor for stable CO₂ hydrogenation with near 100% ethanol selectivity over diatomic palladium active sites. *ACS Catalysis*, 13(10), 7110–7121. <https://doi.org/10.1021/acscatal.3c00586>
- Chen, R., Yin, P., Meng, X., et al. (2018a). Associations between ambient nitrogen dioxide and daily cause–specific mortality: Evidence from 272 chinese cities. *Epidemiology*, 29, 482–489. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000829>
- Chen, R., Yin, P., Wang, L., et al. (2018b). Association between ambient temperature and mortality risk and burden: time series study in 272 main Chinese cities. *BMJ*, 363, k4306. <https://doi.org/10.1136/bmj.k4306>
- Cheng, J., Tong, D., Zhang, Q., et al. (2021). Pathways of China's PM_{2.5} air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality. *National Science Review*, 8(12), nwab078. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab078>
- Conibear, L., Reddington, C., Silver, B., et al. (2022). The contribution of emission sources to the future air pollution disease burden in China. *Environmental Research Letters*, 17(6), 064027. <https://doi.org/10.1088/1748–9326/ac6f6f>
- CREA. (2023). China's new coal power spree continues as more provinces jump on the bandwagon. https://energyandcleanair.org/wp/wp–content/uploads/2023/08/CREA_GEM_China–coal–power–briefing–2023H1_08.2023.pdf
- De Beule, F., Schoubben, F. & Struyfs, K. (2022). The pollution haven effect and investment leakage: The case of the EU–ETS. *Economics Letters*, 215, 110536. <https://doi.org/10.1016/j.econlet.2022.110536>
- Dong, G., Jiang, Z., Tian, Z., et al. (2020). Projecting changes in mean and extreme precipitation over eastern China during 2041–2060. *Earth and Space Science*, 7(9), e2019EA001024. <https://doi.org/10.1029/2019EA001024>
- Ebi, K., Teisberg, T., Kalkstein, L., et al. (2004). Heat watch/warning systems save lives: Estimated costs and benefits for Philadelphia 1995–98. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(8), 1067–1074. <https://doi.org/10.1175/BAMS–85–8–1067>
- Ebi, K. (2022). Methods for quantifying, projecting, and managing the health risks of climate

- change. *NEJM Evidence*, 1(8), 1–8. <https://doi.org/10.1056/EVIDra2200002>
- Feng, Z., Xu, Y., Kobayashi, K., et al. (2022). Ozone pollution threatens the production of major staple crops in East Asia. *Nature Food*, 3, 47–56. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00422-6>
- Fouillet, A., Rey, G., Wagner, V., et al. (2008). Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave. *International Journal of Epidemiology*, 37(2), 309–317. <https://doi.org/10.1093/ije/dym253>
- Friedlingstein, P., Sullivan, M., Jones, M., et al. (2022). Global Carbon Budget 2022. *Earth System Science Data*, 14(11), 4811–4900. <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- Fu, S., Zhou, Y., Peng, L., et al. (2022). Interactive effects of high temperature and ozone on COPD deaths in Shanghai. *Atmospheric Environment*, 278, 119092. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119092>
- Gernaat, D., de Boer, H., Daioglou, V., et al. (2021). Climate change impacts on renewable energy supply. *Nature Climate Change*, 11, 119–125. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00949-9>
- Green, H., Andrews, N., Armstrong, B., et al. (2016). Mortality during the 2013 heatwave in England – How did it compare to previous heatwaves? A retrospective observational study. *Environmental Research*, 147, 343–349. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.02.028>
- Griscom, B., Adams, J., Ellis, P., et al. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Guan, Y., Shan, Y., Huang, Q., et al. (2021). Assessment to China's recent emission pattern shifts. *Earth's Future*, 9(11), e2021EF002241. <https://doi.org/10.1029/2021ef002241>
- Guenthe, A., Monson, R. & Fall, R. (1991). Isoprene and monoterpene emission rate variability: observations with eucalyptus and emission rate algorithm development. *Journal of Geophysical Research–Atmospheres*, 96, 10799–10808. <https://doi.org/10.1029/91JD00960>
- He, C., Zhang, Y., Schneider, A., et al. (2022). The inequality labor loss risk from future urban warming and adaptation strategies. *Nature Communications*, 13, 3847. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31145-2>
- Hong, C., Zhang, Q., Zhang, Y., et al. (2019). Impacts of climate change on future air quality and human health in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(35), 17193–

17200. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812881116>

- Hsieh, I., Chossière, G., Gençer, E., et al. (2022). An integrated assessment of emissions, air quality, and public health impacts of China's transition to electric vehicles. *Environmental Science & Technology*, 56(11), 6836–6846. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c06148>
- Hu, J., Zhou, M., Qin, M., et al. (2022). Long-term exposure to ambient temperature and mortality risk in China: A nationwide study using the difference-in-differences design. *Environmental Pollution*, 292, 18392. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118392>
- Hu, J., He, G., Meng, R., et al. (2023). Temperature-related mortality in China from specific injury. *Nature Communications*, 14, 37. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-35462-4>
- Huntzinger, D., Schwalm, C., Wei, Y., et al. (2021). NACP MsTMIP: Global 0.5-degree Model Outputs in Standard Format, Version 2.0. ORNL DAAC, Oak Ridge, Tennessee, USA. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1599>
- IPCC. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner., D.C. Roberts., M. Tignor., E.S. Poloczanska., K. Mintenbeck., A. Alegría., M. Craig., S. Langsdorf., S. Löschke., V. Möller., A. Okem. & B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Janhäll, S. (2015). Review on urban vegetation and particle air pollution – Deposition and dispersion. *Atmospheric Environment*, 105, 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.052>
- Jing, L., Xin, X., Yun, Z., et al. (2016). Analysis of a community-based intervention to reduce heat-related illness during heat waves in Licheng, China: a quasi-experimental study. *Biomedical and Environmental Sciences*, 29(11), 802–813. <https://doi.org/10.3967/bes2016.107>
- Lei, Y., Wang, Z., Wang, D., et al. (2023). Co-benefits of carbon neutrality in enhancing and stabilizing solar and wind energy. *Nature Climate Change*, 13, 693–700. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01692-7>
- Li, D., Zou, L. & Zhou, T. (2018). Extreme climate event changes in China in the 1.5 and 2°C warmer climates: Results from statistical and dynamical downscaling. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 123(18), 10215–10230. <https://doi.org/10.1029/2018JD028835>
- Li, X., Cai, H., Ren, X., et al. (2020). Sandstorm weather is a risk factor for mortality in ischemic heart disease patients in the Hexi Corridor, northwestern China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 34099–34106. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09616-0>

- Li, X., Chen, Z., Wang, L., et al. (2022a). Future projections of extreme temperature events in Southwest China using nine models in CMIP6. *Frontiers in Earth Science*, 10, 942781. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.942781>
- Li, Z. & Hanaoka, T. (2022b). Plant-level mitigation strategies could enable carbon neutrality by 2060 and reduce non-CO₂ emissions in China's iron and steel sector. *One Earth*, 5(8), 932–943. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2022.07.006>
- Liang, X., Zhang, S., Wu, Y., et al. (2019). Air quality and health benefits from fleet electrification in China. *Nature Sustainability*, 2(10), 962–971. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0398-8>
- Liu, X., Guo, C., Ma, X., et al. (2022a). Uncovering the key mechanisms of how deep decarbonization benefits air pollution alleviation in China. *Environmental Research Letters*, 17(11), 115002. <https://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/ac9746>
- Liu, Y., Tong, D., Cheng, J., et al. (2022b). Role of climate goals and clean-air policies on reducing future air pollution deaths in China: a modelling study. *The Lancet Planetary Health*, 6(2), e92–e99. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00326-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00326-0)
- Liu, Y., Yan, M., Du, H., et al. (2023). Increased mortality risks from a spectrum of causes of tropical cyclone exposure—China, 2013–2018. *China CDC Weekly*, 5(6), 119–124. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.022>
- Liu, Z., Deng, Z., He, G., et al. (2022c). Challenges and opportunities for carbon neutrality in China. *Nature Reviews Earth & Environment*, 3, 141–155. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00244-x>
- Lou, J., Ban, J., Zhang, T., et al. (2021). An intervention study of the rural elderly for improving exposure, risk perception and behavioral responses under high temperature. *Environmental Research Letters*, 16, 055029. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfa4f>
- Lu, N., Tian, H., Fu, B., et al. (2022). Biophysical and economic constraints on China's natural climate solutions. *Nature Climate Change*, 12, 847–853. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01432-3>
- Lu, X., Cao, L., Wang, H., et al. (2019a). Gasification of coal and biomass as a net carbon-negative power source for environment-friendly electricity generation in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 116(17), 8206–8213. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812239116>
- Lu, X., Zhang, L. & Shen, L. (2019b). Meteorology and climate influences on tropospheric Ozone: a review of natural sources, chemistry, and transport patterns. *Current Pollution Reports*, 5, 238–260. <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00118-3>

- Lyu, Y., Wu, Z., Wu, H., et al. (2023). Tracking long-term population exposure risks to PM_{2.5} and ozone in urban agglomerations of China 2015–2021. *Science of The Total Environment*, 854, 158599. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158599>
- Ma, Q., Wang, S., Fu, Y., et al. (2023a). China's policy framework for carbon capture, utilization and storage: Review, analysis, and outlook. *Frontiers in Energy*, 17(3): 400–411. <https://doi.org/10.1007/s11708-023-0862-z>
- Ma, X., Zhang, B., Duan, H., et al. (2023b). Estimating future PM_{2.5} attributed acute myocardial infarction incident cases under climate mitigation and population change scenarios in Shandong Province, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 256, 114893. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114893>
- Meng, X., Liu, C., Chen, R., et al. (2021). Short term associations of ambient nitrogen dioxide with daily total, cardiovascular, and respiratory mortality: Multilocation analysis in 398 cities. *BMJ*, 372, n534. <https://doi.org/10.1136/bmj.n534>
- Mi, Z. & Sun, X. (2021). Provinces with transitions in industrial structure and energy mix performed best in climate change mitigation in China. *Communications Earth & Environment*, 2, 182. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00258-9>
- Murray, C., Aravkin, A., Zheng, P., et al. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990–2019: A systematic analysis for the global burden of disease study 2019. *The Lancet*, 396, 1223–1249. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
- Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., et al. (2020). Short-term exposure to particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}), nitrogen dioxide (NO₂), and ozone (O₃) and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 142, 105876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>
- Pan, R., Zheng, H., Ding, Z., et al. (2022). Attributing hypertensive life expectancy loss to ambient heat exposure: A multicenter study in eastern China. *Environmental Research*, 208:112726. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112726>
- Pan, R., Xie, M., Chen, M., et al. (2023). The impact of heat waves on the mortality of Chinese population: A systematic review and meta-analysis. *Medicine*, 102(13), e33345. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000033345>
- Piao, S., Yue, C., Ding, J., et al. (2022). Perspectives on the role of terrestrial ecosystems in the 'carbon neutrality' strategy. *Science China Earth Sciences*, 65, 1178–1186. <https://doi.org/10.1007/s11430-022-9926-6>

- Porter, W. & Heald, C. (2019). The mechanisms and meteorological drivers of the summertime ozone–temperature relationship. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(21), 13367–13381. <https://doi.org/10.5194/acp-19-13367-2019>
- Qian, H., Ma, R. & Wu, L. (2022). Market–based solution in China to Finance the clean from the dirty. *Fundamental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.03.020>
- Shan, Y., Guan, D., Zheng, H., et al. (2018). China CO₂ emission accounts 1997–2015. *Scientific Data*, 5, 170201. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.201>
- Shan, Y., Huang, Q., Guan, D., et al. (2020). China CO₂ emission accounts 2016–2017. *Scientific Data*, 7, 54. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0393-y>
- Shen, J., Chen, X., Li, H., et al. (2023). Incorporating health cobenefits into province–driven climate policy: A case of banning new internal combustion engine vehicle sales in China. *Environmental Science & Technology*, 57(3), 1214–1224. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c08450>
- Sherman, P., Chen, X. & McElroy, M. (2017). Wind–generated electricity in China: Decreasing potential, inter–annual variability and association with changing climate. *Scientific Report*, 7, 16294. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16073-2>
- Shi, X., Lei, Y., Xue, W., et al. (2023). Drivers in carbon dioxide, air pollutants emissions and health benefits of China's clean vehicle fleet 2019–2035. *Journal of Cleaner Production*, 391, 136167. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136167>
- Sun, Q., Sun, Z., Chen, C., et al. (2022). Health risks and economic losses from cold spells in China. *Science of The Total Environment*, 821, 153478. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153478>
- Sun, Z., Chen, C., Yan, M., et al. (2020). Heat wave characteristics, mortality and effect modification by temperature zones: a time–series study in 130 counties of China. *International Journal of Epidemiology*, 49(6), 1813–1822. <https://doi.org/10.1093/ije/dyaa104>
- Tong, D., Geng, G., Zhang, Q., et al. (2021). Health co–benefits of climate change mitigation depend on strategic power plant retirements and pollution controls. *Nature Climate Change*, 11, 1077–1083. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01216-1>
- Wang, Q. & Zhai, P. (2022). CMIP6 projections of the “warming–wetting” trend in Northwest China and related extreme events based on observational constraints. *Journal of Meteorological Research*, 36, 239–250. <https://doi.org/10.1007/s13351-022-1157-8>
- Weitzman, ML. (1974). Prices vs. quantities. *The review of economic studies*, 41(4), 477–491. <https://dx.doi.org/10.2307/2296698>

- WMO. (2015). China's Implementation of Impact and Risk-based Early Warning. <https://public.wmo.int/en/resources/bulletin/chinas-implementation-of-impact-and-risk-based-early-warning>
- WMO. (2023a). State of the Global Climate in 2022. <https://library.wmo.int/records/item/66214-state-of-the-global-climate-2022?offset=1>
- WMO. (2023b). WMO global annual to decadal climate update (Target years: 2023–2027). <https://reliefweb.int/report/world/wmo-global-annual-decadal-climate-update-target-years-2023-2027>
- WMO & WHO. (2015). Heatwaves and health: Guidance on warning-system development. https://ghhin.org/wp-content/uploads/WMO_WHO_Heat_Health_Guidance_2015.pdf
- WHO & WMO. (2018). Heat Wave and Health Risk Early Warning Systems in China. <https://ghhin.org/resources/heat-wave-and-health-risk-early-warning-systems-in-china/>
- Wu, L., Zhang, S. & Qian, H. (2022). Distributional effects of China's national emissions trading scheme with an emphasis on sectoral coverage and revenue recycling. *Energy Economics*, 105, 105770. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105770>
- Xia, X., Xia, J., Chen, X., et al. (2023). Reconstructing long-term forest cover in China by fusing national forest inventory and 20 land use and land cover data sets. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 128(4), e2022JG007101. <https://doi.org/10.1029/2022JG007101>
- Xiang, S., Guo, X., Kou, W., et al. (2023). Substantial short-and long-term health effect due to PM_{2.5} and the constituents even under future emission reductions in China. *Science of The Total Environment*, 874, 162433. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162433>
- Xiao, Q., Geng, G., Xue, T., et al. (2022). Tracking PM_{2.5} and O₃ pollution and the related health burden in china 2013–2020. *Environmental Science & Technology*, 56(11), 6922–6932. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04548>
- Xu, H., Chen, H. & Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes across China based on CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 42(1), 635–651. <https://doi.org/10.1002/joc.7264>
- Xu, H. & Zhang, G. (2022). Comparison of relative and absolute heatwaves in Eastern China: Observations, simulations and future projections. *Atmosphere*, 13(5), 649. <https://doi.org/10.3390/atmos13050649>
- Xu, Y., Gao, X., Giorgi, F., et al. (2018). Projected changes in temperature and precipitation extremes over China as measured by 50-yr return values and periods based on a CMIP5

- ensemble. *Advances in Atmospheric Sciences*, 35, 376–388. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6269-1>
- Yan, M., Xie, Y., Zhu, H., et al. (2022). The exceptional heatwaves of 2017 and all-cause mortality: An assessment of nationwide health and economic impacts in China. *Science of The Total Environment*, 812, 152371. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152371>
- Yan, M., Xie, Y., Zhu, H., et al. (2023). Cardiovascular mortality risks during the 2017 exceptional heatwaves in China. *Environment International*, 172, 107767. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.107767>
- Yang, J., Zhou, M., Ren, Z., et al. (2021). Projecting heat-related excess mortality under climate change scenarios in China. *Nature Communications*, 12, 1039. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21305-1>
- Yao, Y., Piao, S. & Wang, T. (2018). Future biomass carbon sequestration capacity of Chinese forests. *Science Bulletin*, 63(17), 1108–1117. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.07.015>
- Yin, Z., Zhou B., Duan M., et al. (2023). Climate extremes become increasingly fierce in China. *The Innovation*, 4(2), 100406. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2023.100406>
- You, Q., Cai, Z., Wu, F., et al. (2021). Temperature dataset of CMIP6 models over China: evaluation, trend and uncertainty. *Climate Dynamical*, 57, 17–35. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05691-2>
- Yu, Z., Ciais, P., Piao, S., et al. (2022). Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 13, 5374. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32961-2>
- Zhang, B., Chen, H. & Lu, B. (2023). An early warning system for heatwave-induced health risks in China: A sub-seasonal to seasonal perspective – China, 2022. *China CDC Weekly*, 5(29), 647–650. <https://doi.org/10.46234/ccdcw2023.124>
- Zhang, L., Wu, P., Niu, M., et al. (2022). A systematic assessment of city-level climate change mitigation and air quality improvement in China. *Science of The Total Environment*, 839, 156274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156274>
- Zhang, Y., Yao, Y., Wang, X., et al. (2017). Mapping spatial distribution of forest age in China. *Earth and Space Science*. 4(3), 108–116. <https://doi.org/10.1002/2016EA000177>
- Zheng, J., Jiang, P., Qiao, W., et al. (2016). Analysis of air pollution reduction and climate change mitigation in the industry sector of Yangtze River Delta in China. *Journal of Cleaner Production*, 114, 314–322. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.011>

- Zhu, D., Zhou, Q., Liu, M., et al. (2021). Non-optimum temperature-related mortality burden in China: Addressing the dual influences of climate change and urban heat islands. *Science of The Total Environment*, 782, 146760. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146760>
- Zhuo, Z., Du, E., Zhang, N., et al. (2022). Cost increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China. *Nature Communications*, 13, 3172. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30747-0>
- 邓荔, 朱欢欢 & 江志红. (2022). 不同情景达到碳中和下中国区域气候变化的预估. *大气科学学报*, 45(03), 364–375. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220323015>
- EVTank. (2023). 《中国锂离子电池行业发展白皮书（2023年）》.
- 方道奎, 周国宏, 冯锦姝, 等. (2019). 深圳市高温热浪健康风险指数的建立和应用评估. *环境卫生学杂志*, 9(01), 14–18. <https://doi.org/10.13421/j.cnki.hjwsxzz.2019.01.003>
- 国家林业和草原局. (2019). 中国森林资源报告 (2014–2018). 北京: 中国林业出版社.
- 国家能源局. (2023a). 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
- 国家能源局. (2023b). 2022 年我国新型储能发展有关情况. https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzy/jnhnx/202302/t20230215_1348800.html
- 国家铁路局. (2023). 2022 年铁道统计公报. <https://www.nra.gov.cn/xwzx/zlxz/hytj/202305/P020230529389284995397.pdf>
- 国家统计局. (2022). 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报. http://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901393.html
- 国家统计局. (2023). 中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报. http://www.stats.gov.cn/xgk/sjfb/zxfb2020/202302/t20230228_1919001.html
- 国家统计局. (2003–2022). 中国统计年鉴 2003–2022. 北京: 中国统计出版社.
- 国务院发展研究中心. (2023). 《中国能源革命进展报告（能源消费革命 2023）》.
- 禾苗植保. (2023). 测土配方施肥技术全国耕地应用面积超 19 亿亩次, 未来广阔发展愿景十分可期. https://www.sohu.com/a/666920813_121235671
- 蒋含颖, 段祎然, 张哲, 等. (2021). 基于统计学的中国典型大城市二氧化碳排放达峰研究. *气候变化研究进展*, 17 (2), 131–139. <https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2020.223>
- 交通运输部. (2023). 2022 年交通运输行业发展统计公报. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html
- 兰莉, 林琳, 杨超, 等. (2016). 哈尔滨市高温热浪健康风险早期预警系统运行效果评估. *中国公共*

- 卫生管理, 32(04), 441–443. <https://doi.org/10.19568/j.cnki.23-1318.2016.04.005>
- 绿色和平. (2023). 上半年煤电核准热潮持续. <https://www.greenpeace.org.cn/2023/08/03/2023h1coalbriefng/>
- 穆志君, 关欣 & 刘鹏. (2009). 太阳能光伏光热一体化系统运行实验研究. 节能技术, 27(5), 447–448. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6339.2009.05.016>
- 农村清洁取暖. (2023). 论坛热议农村清洁取暖新风向. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1766108308463332576&wfr=spider&for=pc>
- 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_{2.5} 气象条件评估指数 (EMI). <https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/flfgbz/bz/202209/P020220921704593946820.pdf>
- 人民日报海外版. (2023). 煤电达峰须加强需求侧管理. <http://www.xinhuanet.com/energy/20230418/4aa6ff55c94b4a688428e2b9cf609784/c.html>
- 生态环境部, 国家发展和改革委员会, 科学技术部等. (2022). 国家适应气候变化战略 2035. <http://big5.mee.gov.cn/gate/big5/www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk03/202206/W020220613636562919192.pdf>
- 生态环境部. (2023a). 生态环境部部长黄润秋作《国务院关于 2022 年度环境状况和环境保护目标完成情况的报告》. https://www.mee.gov.cn/xxgk/hjyw/202305/t20230506_1029130.shtml
- 生态环境部. (2023b). 生态环境部举行 3 月例行新闻发布会. http://www.scio.gov.cn/xwfb/bwxwfb/gbwfbh/sthjb/202305/t20230517_714061.html
- 生态环境部. (2023c). 生态环境部部长黄润秋在 2023 年全国生态环境保护工作会议上的工作报告. https://www.mee.gov.cn/xxgk/hjyw/202302/t20230223_1017248.shtml
- 孙博, 王会军, 黄艳艳, 等. (2023). 2022 年夏季中国高温干旱气候特征及成因探讨. 大气科学学报, 46(1), 1–8. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20220916003>
- 田磊. (2023). 乌克兰危机下, 国内外石油市场发展新动向——2022 年石油市场发展形势及 2023 年展望. 中国能源, 45(3), 25–33.
- 汪庆庆, 李永红, 丁震, 等. (2014). 南京市高温热浪与健康风险早期预警系统试运行效果评估. 环境与健康杂志, 31(05), 382–384. <https://doi.org/10.16241/j.cnki.1001-5914.2014.05.002>
- 新华社. (2023). 瞭望 | 强国建设 交通先行. <https://cj.sina.com.cn/articles/view/1699432410/654b47da020013us3>
- 徐北瑶, 王体健, 李树, 等. (2022). “双碳”目标对我国未来空气污染和气候变化的影响评估. 科学通报, 67(08), 784–794. <https://doi.org/10.1360/TB-2021-1091>
- 《载货汽车运行燃料消耗量》(GB/T 4352–2022). <https://jtst.mot.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=ca45c3512e4656b4c7862f2b4d6c328>

- 《载客汽车运行燃料消耗量》(GB/T 4353-2022). <https://jtst.mot.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=9fe3c6609afc423c3409255315e0466f>
- 张立, 万昕, 蒋含颖, 等. (2021). 二氧化碳排放达峰期、平台期及下降期定量判断方法研究. *环境工程*, 39 (10), 1-7. <https://doi.org/10.13205/j.hjgc.202110001>
- 智研咨询. (2023). 一文了解 2022 年中国秸秆理论资源量、综合利用量及发展方向分析. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1760938641139181952&wfr=spider&for=pc>
- 中国城市温室气体工作组. (2021). 中国城市二氧化碳排放数据集 (2020). <http://www.cityghg.com/a/data/2022/0212/207.html>
- 中国环境报. (2022). 推动空气质量持续改善. <http://eco.cri.cn/20220315/e208d2f4-1299-a3b5-f110-1239c2fcf5f0.html>
- 中国民用航空局. (2023). 2022 年民航行业发展统计公报. http://www.caac.gov.cn/big5/www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/TJSJ/202305/P020230510495703901392.pdf
- 中国气象局. (2023a). 大气环境气象公报 (2022 年). https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gknr/qxbg/202307/t20230707_5633816.html
- 中国气象局. (2023b). 中国气候公报 (2022 年). <https://mp.weixin.qq.com/s/PjCbhkXJbBhtTKa1f59k-A>
- 中国石油国家高端智库研究中心. (2023). 中国天然气发展报告 (2023). <https://www.emerinfo.cn/download/zgtrqfzbg2003001.pdf>
- 中国冶金报. (2023). 生态环境部: 一季度约 4000 万吨粗钢产能完成全流程超低排放改造. http://www.csteelnews.com/xwzx/hydt/202303/t20230331_73267.html
- 中国 21 世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院 & 清华大学. (2023). 中国二氧化碳捕集利用与封存 (CCUS) 年度报告 (2023). <https://www.acca21.org.cn/trs/000100170002/16690.html>

报告编辑团队

蔡慈澜 清华大学地球系统科学系博士后
中国清洁空气政策伙伴关系秘书处负责人

孙 茹 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处传播经理

刘媛媛 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处项目官员

王雨薇 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处项目官员

李姝慧 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处传播官员

林雨佳 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处传播专员

2023

中国碳中和与清洁空气
协同路径

