

2024

中国碳中和与清洁空气协同路径

减污降碳推动经济绿色发展



中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组

2024年11月

并购家 免费行业报告网

IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

支持单位

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

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（2024），“中国碳中和与清洁空气协同路径2024——减污降碳推动经济绿色发展”，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（2024）

减污降碳推动经济绿色发展

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名誉院长
王会军 中国科学院院士 南京信息工程大学教授
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

尹志聪 南京信息工程大学大气科学学院副院长、教授 (2024 年度报告总召集人)
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
鲁 玺 清华大学碳中和研究院院长助理、清华大学环境学院教授
张 强 清华大学地球系统科学系副主任、教授
宫继成 北京大学环境科学与工程学院长聘副教授
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
CCAPP 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副院长、教授 (召集人)
杨东旭 中国科学院大气物理研究所研究员
胡建林 南京信息工程大学环境科学与工程学院教授
李 伟 南京信息工程大学大气科学学院副教授
马井会 上海市气象局正研级高级工程师
于海鹏 中国科学院西北生态环境资源研究院研究员
耿冠楠 清华大学环境学院副研究员
沈路路 北京大学物理学院大气与海洋科学系助理教授

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 (召集人)
董战峰 生态环境部环境规划院生态环境管理与政策研究所所长、研究员
林永生 北京师范大学经济与工商管理学院教授
汤维祺 复旦大学发展研究院副研究员
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、清华大学环境学院教授 (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、研究员
李墨宇 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心战略规划部

气候战略理论和模型研究室副主任、助理研究员

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 北京化工大学副教授
樊静丽 中国矿业大学（北京）能源与矿业学院副院长、教授
张 宁 清华大学电机工程与应用电子技术系副教授
汪旭颖 生态环境部环境规划院副研究员
郑 博 清华大学深圳国际研究生院副教授
毛博阳 能源基金会环境管理项目主管
王家兴 清华大学环境学院博士研究生

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
李 伟 清华大学地球系统科学系长聘副教授
王旭辉 北京大学城市与环境学院研究员、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副教授
同 丹 清华大学地球系统科学系副教授
偶 阳 北京大学环境科学与工程学院研究员、碳中和研究院双聘研究员

第五工作组

宫继成 北京大学环境科学与工程学院长聘副教授（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长聘副教授
黄存瑞 清华大学万科公共卫生与健康学院副院长、教授
薛 涛 北京大学公共卫生学院研究员
李湉湉 中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所副所长、研究员
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

本报告为《中国碳中和与清洁空气协同路径》年度报告第四期，以“减污降碳推动经济绿色发展”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	15
第二章 空气污染与气候变化	19
2.1 空气质量变化	20
2.2 气候变化与极端天气气候	27
2.3 大气中的温室气体	30
第三章 治理体系与实践	35
3.1 协同治理体系建设	36
3.2 协同治理政策	38
3.3 地方实践	40
第四章 结构转型与治理技术	43
4.1 能源结构转型	44
4.2 产业结构转型	49
4.3 交通结构转型	53
4.4 建筑能源系统低碳转型	55
4.5 碳捕集利用与封存技术	59
4.6 新型电力系统	62
4.7 污染去除技术提质增效	64
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	74
5.3 污染物排放及协同减排进展	77
5.4 协同减排路径	80
第六章 健康影响与协同效益	83
6.1 空气污染与健康影响	84
6.2 气候变化与健康影响	88
6.3 协同治理的健康效益	90
参考文献	92



摘要

近年来，我国实施的一系列大气污染防治政策措施推动空气质量显著改善，但改善成果尚不稳固，秋冬季重污染天气时有发生。在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，协调推进降碳、减污已成为中国社会经济发展实现全面绿色转型的必然趋势。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，是社会各领域关注与探索的重点。

2060



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。本报告是第四期年度报告，在前期研究基础上进一步完善了协同治理监测指标体系，并通过追踪各项指标的进展、对比国内外发展情况、结合地方实践经验，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。

2 空气污染与气候变化

- 空气质量变化
- 气候变化与极端天气气候
- 大气中的温室气体

3 治理体系与实践

- 协同治理体系建设
- 协同治理政策
- 地方实践

4 结构转型与治理技术

- 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
- 污染去除技术提质增效

5 大气成分源汇及减排路径

- 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

6 健康影响与协同效益

- 空气污染与健康影响
- 气候变化与健康影响
- 协同治理的健康效益

1 空气污染与气候变化



空气污染是受多种自然和人为复杂因素影响共同叠加的结果。随着我国污染减排进入深水期，减排难度日益增加，浓度下降幅度放缓，2023 年多个区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度同比出现反弹，空气质量进一步改善的任务艰巨。2023 年全国 339 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度（ $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）相比于 2015 年（ $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）下降 33.3%，保持了持续下降态势；但京津冀及周边、长三角地区、成渝地区和珠三角地区等多个区域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相较于 2022 年小幅反弹，部分城市重度及以上 $\text{PM}_{2.5}$ 污染天数也出现同比反弹。在气象条件方面，2023 年京津冀地区的气象条件总体有利于 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善，而长三角、珠三角和川渝地区的气象条件则偏向不利。 O_3 日最大 8 小时平均值第 90 百分位数浓度（以下简称： O_3 浓度）总体呈波动上升趋势。相较于 2022 年，成渝地区、京津冀及周边和汾渭平原的 O_3 浓度分别上升了 0.96%、1.37% 和 1.45%，而长三角和珠三

角地区则分别降低了 2.32% 和 7.40%。2023 年，全国重点区域的气象条件均有利于 O_3 浓度下降。

2023 年是有记录以来全球最热的一年，气候变化也导致 2023 年的极端天气气候事件呈现出新特征，我国华北、黄淮在内的全球多地极端高温打破历史记录，热带气旋“杜苏芮”北上使得京津冀遭受极端强降水，沙尘以及热浪—臭氧等极端事件加剧了大气污染对人类健康的威胁。人为温室气体排放是气候变化的主因，观测和卫星数据显示，2010–2023 年间我国大气中的二氧化碳增长速率为 $2\text{--}3 \text{ ppm yr}^{-1}$ ；甲烷增长则存在区域差异，华北、长江中下游等地的增加速率达到 $12\text{--}14 \text{ ppb yr}^{-1}$ 。同时，极端天气气候事件也对温室气体排放产生强烈反馈，例如，高温和干旱导致 2023 年加拿大地区发生近二十年来最为严重的森林火灾，二氧化碳排放量超过以往 22 年的总和。

2 治理体系与实践

2023 年国家出台《关于全面推进美丽中国建设的意见》，明确提出开展多领域多层次减污降碳协同创新试点、将减污降碳列入国家基础研究和科技创新重点领域、加快实施减污降碳协同工程等重点任务，减污降碳在组织管理、工程实践、能力建设等方面进一步融入社会经济体系。在生态环境管理方面，以生态环境分区管控为宏观约束、以环评管理为源头防控手段、以融合清单和一体化监测为基础能力支撑的减污降碳协同治理体系基本成型。在全国碳市场建设完善的过程中，如何优化跨行业层面的减污降碳成本，推动跨区域层面的协同治理，将成为我国大气污染与碳排放协同管理实践中需要回答的新问题。

国家大气污染与碳排放协同治理政策进一

步完善。行政管理方面，政府基本构建形成了“自上而下”全面推进的协同治理局面；经济激励方面，以碳市场为主体的市场经济激励政策持续完善；社会参与方面，全社会广泛参与的社会治理政策进一步健全。在生态环境部组织下，21 个城市和 43 个园区于 2023 年启动了减污降碳协同创新试点工作，开始形成一批有特色的工作亮点。但城市层面大气污染与碳排放协同治理成效还不稳固。2015–2022 年间全国共有 88 个城市实现了 $PM_{2.5}$ 年均浓度和 CO_2 排放量协同下降，占城市总数的 26%，与 2015–2021 年相比，实现协同下降的城市数量减少了 17 个。从国家到地方层面，未来都需要继续完善治理体系，推动转型发展，进一步提升大气污染与碳排放协同治理的效能。



3 结构转型与治理技术

2023 年，中国持续刚性增长的能源需求使化石能源和新能源“双向”增长趋势延续。能源结构持续优化，天然气、水电、核电、风电、太阳能发电等清洁能源消费量占能源消费总量比重为 26.4%，非化石能源发电装机在 2023 年首次超过火电装机规模，占总装机容量比重在 2023 年首次超过 50%。煤炭消费占比虽持续下降，但消费量仍然增长 5.6%，进一步减少化石能源消费的挑战仍然存在。

新动能产业水平稳健发展，高技术制造业增加值比上年增长 2.7%。电动汽车、锂电池和太阳能电池等“新三样”产品合计出口 1.06 万亿元，首次突破万亿大关。国家颁布《质量强国建设纲要》《关于加快传统制造业转型升级的指导意见》等重点文件，强化产业低碳绿色发展，推动工业领域能耗强度和碳排放强度下降。

运输结构进一步优化，全国铁路与水路货物运输量分别同比增长 1.0% 和 9.5%，货物“公转铁”“公转水”与车辆“油转电”“油转氢”双向发力，绿色低碳运输体系加快构建。绿色出行持续推进，能效与清洁能源替代持续稳步提升。新能源汽车产销量分别完成 958.7 万辆和 949.5 万辆，同比增长均超过 35%，充电基础设施保有量达 859.6 万台，同比增长 65%。

建筑化石燃料燃烧导致的直接排放占比进一步降低至 21%，电力消费增长导致的间接排放增长至 12.6 亿吨 CO₂。新建建筑节能设计标准不断提高，同时对既有建筑的节能运行改造也逐步成为工作重点，已形成了从单纯抓“增量”到抓“增量”与抓“存量”并重的工作格局。

碳捕集利用与封存（CCUS）技术持续稳步发展，十万吨级及以上项目超过 50 个，逐步覆盖了电力、油气、化工、水泥、钢铁、玻璃等全行业领域。碳捕集成本持续降低，传统电厂、IGCC 电厂的避免成本分别为 60 美元/t CO₂ 和 81 美元/t CO₂。

电力系统整合新能源能力进一步加强。2023 年全国可再生能源发电总装机超过 15 亿千瓦，发电量近 3 万亿千瓦时，接近全社会用电量的 1/3。新能源消纳水平进一步提高，抽水蓄能等灵活调节性电源在电力系统中的比重显著提升。“西电东送、北电南送”的电力流分布持续强化。

大气污染治理继续发力，累计 4.2 亿吨粗钢产能已完成全流程超低排放改造，累计完成 8.5 万个挥发性有机物突出问题的有效整改，国六 b 标准开始全面实施，秸秆综合利用率达 88.1%，城市降尘量明显下降。

4 大气成分源汇及减排路径

受疫情后期经济恢复与刺激政策、能源需求增长、能源供应短缺形势等影响，2020年后中国人为源二氧化碳排放增速有所反弹，2020–2023年间年均排放增速为 $3.5\% \text{ yr}^{-1}$ 。在部门层面，北方居民清洁采暖工作持续推进，推动民用部门碳排放量稳步下降，而电力供热和交通运输部门排放上升是驱动全国碳排放量增加的主要因素。

自上世纪80年代以来，中国实施一系列生态工程和保护管理措施，植被覆盖率持续提高，提供了可观的陆地碳汇。2010–2021年间，中国陆地生态系统约抵消了 $14.69\% (\pm 2.49\%)$ 的人为二氧化碳排放量。我国未来植树造林可在2060年前提供约 0.4 Pg C yr^{-1} 的陆地碳汇，到2100年支持 0.2 Pg C yr^{-1} 的持续生物物理碳汇潜力，抵消目前全国化石燃料二氧化碳排放量的7%到14%。

随着我国大气污染治理进入深水期，大气污染物减排趋势总体放缓。部分时段和区域排放出现反弹是影响全国及重点区域空气质量持续改善的主要原因。2020–2023年间

中国主要污染物排放总体呈下降趋势，其中 SO_2 、 NO_x 、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 和VOCs排放分别下降14.3%、14.6%、7.5%和8.0%。然而，与2022年相比，2023年VOCs排放基本持平，而 SO_2 、 NO_x 和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放则出现不同程度的反弹。民用部门实现了较为显著的二氧化碳与大气污染物协同减排，但电力与供热部门的 CO_2 与主要大气污染物排放仍呈现“双增长”趋势，工业和交通部门的协同减排潜力有待进一步释放。

2030年之前，末端治理政策还将继续在改善空气质量进程中发挥主要作用，而在2030之后，面向碳中和目标的能源与产业结构转型政策将成为持续改善空气质量的主要驱动力。通过实施碳中和与清洁空气协同路径，2060年中国人为源 CO_2 排放可降至9亿吨左右，人群 $\text{PM}_{2.5}$ 平均暴露水平将从2020年的 $33.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 下降到2060年的 $7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。可再生能源代替化石燃料将在协同路径中发挥核心作用，而空气质量的改善也将增强绿色能源利用的稳健性，强化可再生能源的潜力和稳定性，为中国实现甚至超越碳中和目标提供额外动力。

5 健康影响与协同效益

空气污染和气候变化对健康的威胁密不可分，通过协同治理不仅可以改善空气质量，减缓气候变化，还能显著减少过早死亡和疾病负担，实现健康和环境的双重效益。空气污染对人类健康构成重大威胁，2023 年，中国因 $\text{PM}_{2.5}$ 长期暴露和短期暴露导致的过早死亡人数分别为 121 万人和 6 万人，因 O_3 长期暴露和短期暴露导致的过早死亡人数分别为 15 万人和 7 万人，因 O_3 短期暴露导致的过早死亡人数已经超过 $\text{PM}_{2.5}$ 。2023 年， NO_2 暴露导致中国非意外死亡人数为 5.10 万，且老年人和女性更易受到影响。

气候变化带来的极端天气事件，特别是高温和热浪，正显著威胁公众健康。2022 年，中国的人均热浪暴露天数达到 21 天，比历史基线高出 15.6 天。极端高温暴露会增加心肌梗死等心血管疾病的死亡风险。此外，高温还被证实与焦虑、抑郁等心理健康问题密切相关。湿度和温度的复合暴露进一步加剧了人群的死亡率

风险，尤其是在干热和湿冷天气下，死亡风险显著上升。

空气污染与气候变化的协同治理能够带来显著的健康效益。由于人口老龄化背景下人群对空气污染更为敏感，空气污染将在未来对公众健康造成重大威胁。通过实施碳达峰、碳中和与清洁空气协同路径，中国到 2060 年可每年避免 262 万人因空气污染过早死亡，2060 年 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的过早死亡人数将下降至 60 万人。有研究指出，通过实施碳中和路径，中国至 2060 年避免 2900 万到 5000 万例因 $\text{PM}_{2.5}$ 污染暴露导致的过早死亡。协同治理政策的环境和健康收益存在显著的部门和区域异质性，根据不同区域能源禀赋和产业结构特点实施差异化的协同治理措施，是实现普惠民生福祉、最大限度保护公众健康的必要保障。

（相关参考文献未逐一列出，详见第 92 页）





引言



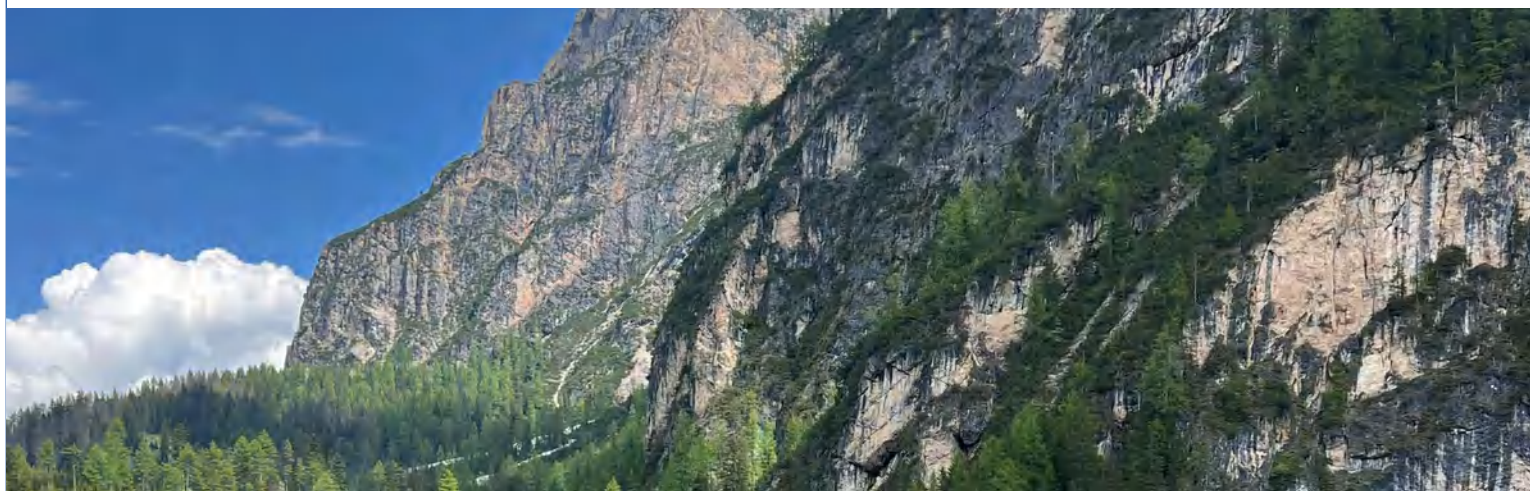
近年来，我国实施的一系列大气污染防治政策措施已经显著改善了大气环境质量。但改善成果尚不稳定，重度污染事件时有发生，部分地区年均 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较去年有小幅回弹。随着大气污染防治工作的不断深入，末端治理方法的减排难度日益增大，污染物减排的空间也逐渐缩小，表明我国在大气污染防治方面仍面临挑战。“双碳”目标提出四年以来，我国积极稳妥推进碳达峰碳中和，完成构建碳达峰碳中和“1+N”政策体系，推动减污降碳协同增效系统谋划，并扎实推进“碳达峰十大行动”，取得积极进展。为新时代新征程深化生态文明体制改革、全面推进美丽中国建设指明了前进方向，推动我国新发展阶段经济社会发展全面绿色转型。

自开展污染防治攻坚战以来，一系列清洁空气政策的实施使我国大气污染防治取得了积极成效。2023 年全国 339 个地级及以上城市 $PM_{2.5}$ 年平均浓度相比 2015 年有显著下降， O_3 污染持续恶化问题得到相对缓解，显示出“十四五”阶段大气污染防治措施取得了较显著的成绩。说明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同步提升。2020 年及之后，受疫情封控及后期经济恢复和刺激作用的影响，我国二氧化碳排放增速有所增加。表明当前改善成效还不稳固，我国面临着气象条件相对不利，经济复苏带来的污染物、温室气体排放量增加的双重压力，空气质量改善形势仍然严峻。中国共产党的二十届三中全会强调，要全面准确落实精准治污、科学治污、依法治污方针，进一步完善生态文明制度体系。加强生态环境系统治理、综合治理、源头治理，坚定不移把改革向前推进。

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，清洁空气政策伙伴关系 (CCAPP) 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候变化与极端天气气候、大气中的温室气体、污染去除技术提质增效三项指标，进一步完善协同治理监测指标体系，并针对部分指标，开展了国内外现状对比。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、气候变化与极端天气气候和大气中的温室气体共三项指标，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去除技术提质增效七项指标，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效益共三项指标，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。2024 年编写过程中共组织了 10 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



空气污染和气候变化是衡量国家和城市“减污降碳”效果的监测指标，两者之间又存在着显著的相互作用。人类活动引发的全球气候变暖及其区域响应将导致极端天气气候事件增多增强，人类活动也会加剧区域空气污染，危害人类健康。另一方面，温室气体和气溶胶可以通过改变有效辐射强迫来影响气候系统内部反馈和全球变化。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、更加精准的制定“碳中和”和“清洁空气”协同路径，提升国家和城市层面应对气候变化、大气污染防治和防灾减灾的能力。

2.1 空气质量变化

2023 年，全国 339 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度（ $30\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）相比于 2015 年（ $45\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）下降 33.3%，低于国家空气质量二级标准（ $35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）。全国 O_3 年均浓度为 $144\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，达到国家二级标准（低于 $160\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的城市占比超过 75%。受经济复苏和不利气象条件影响，京津冀及周边、汾渭平原、成渝地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度相比 2022 年均小幅反弹。因此，清洁空气行动计划需综合考虑人为排放管控与气象条件影响评估。

$\text{PM}_{2.5}$ 变化情况

2023 年全国 339 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度为 $30\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，低于国家空气质量二级标准（ $35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ），但相比 2015 年（ $45\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）下降 33.3%（图 2-1a）。2015 年至 2023 年，全国 339 个地级及以上城市大气 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体呈持续下降态势。如图 2-1a 中折线所示，2015–2023 年间，全国及各个重点区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的三年滑动平均呈现持续下降，显示出“十四五”阶段大气污染防治措施取得了较显著的成绩。值得注意的是， $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度的下降趋势相较之前有所减缓。2023 年间，京津冀及周边、长三角地区、成渝地区和珠三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度出现了小幅反弹（相较于 2022 年）。

2023 年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度低于国家二级标准（ $35\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的城市数量相比 2015 年增长 83%（图 2-1b）。在主要区域中，珠三角地区 2023 年所有城市均达到国家二级标准；长三角地区 2023 年达标城市数量较 2022 年有所下降；汾渭平原和成渝地区达标数量与往年基本持平。各国的评价标准和方式存在差异，若对标 WHO 过渡标准（ $25\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ ），2023 年全国 339 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度低于 WHO 过渡标准的城市数量为 106 个城市，珠三角 2023 年评价价值全面达到 WHO 过渡标准，京津冀及周边地区低于 WHO 过渡标准城市数量仅剩 1 个，汾渭平原和成渝地区各城市浓度均高于 WHO 过渡标准。

2023 年全国 339 个地级及以上城市 $\text{PM}_{2.5}$ 重度及以上污染天数占比为 1.1%，相对 2022

年存在反弹（0.7%），相比2015年（2.8%）下降60.7%，说明PM_{2.5}重度及以上污染得到了有效治理。在重点区域中，2023年京津冀及

周边地区和汾渭平原仍存在2.2%和3.2%的PM_{2.5}重度及以上污染天数，但相比于2015年分别下降78.2%和36.0%；长三角地区和成

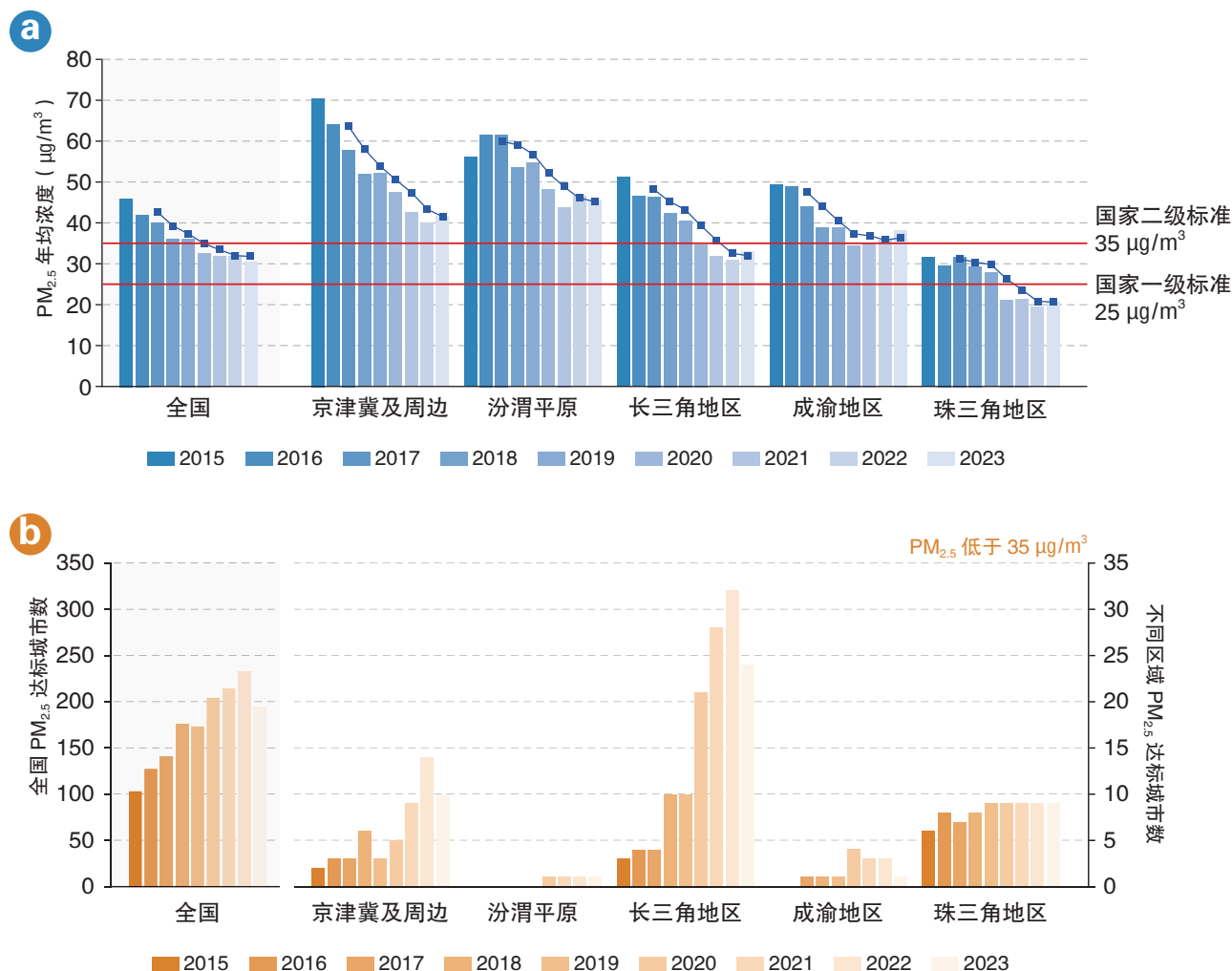


图 2-1 2015 至 2023 年全国及重点区域年均 PM_{2.5} 浓度（柱状）以及三年滑动平均浓度（蓝色点线）变化趋势（a）；2015 年至 2023 年全国及重点区域 PM_{2.5} 年均浓度达标城市数（b），PM_{2.5} 评价标准采用 35μg/m³ 国家二级标准¹
注：数据源自中国生态环境部（2024a）

[1] 其中**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。

渝地区的 PM_{2.5} 重度及以上污染天数分别仅占比 0.6% 和 0.7%；珠三角地区已经连续五年无 PM_{2.5} 重度及以上污染（图 2-2）。

从 2017–2023 年全国及重点区域 PM_{2.5} 气象条件评估指数（EMI: Evaluation Meteorological Index, 附录）的逐年变化来看（图 2-3），2023 年与 2022 年相比，长三角、珠三角地区和成渝地区 EMI 上升，与该地区 PM_{2.5} 年均浓度的变化一致。就长三角地区而言，2023 年 EMI 指数较 2022 年上升了约 4.09%；就成渝地区

而言，2023 年 EMI 指数上升了约 2.21%；就珠三角地区而言，2023 年的 EMI 指数上升约 1.03%。然而，京津冀及周边地区和汾渭平原地区 EMI 指数与 2022 年同比分别下降了 6.92% 和 8.37%。因此，京津冀及周边和汾渭平原地区的清洁空气行动计划应当更加关注人为排放的变化。由此可见，2023 年部分重点区域的 PM_{2.5} 出现小幅反弹，其可能原因包括：1、经济活动复苏引起的污染源（如工业排放、交通排放）变化（详见第五章）；2、2023 年的气象扩散条件亦较为不利。

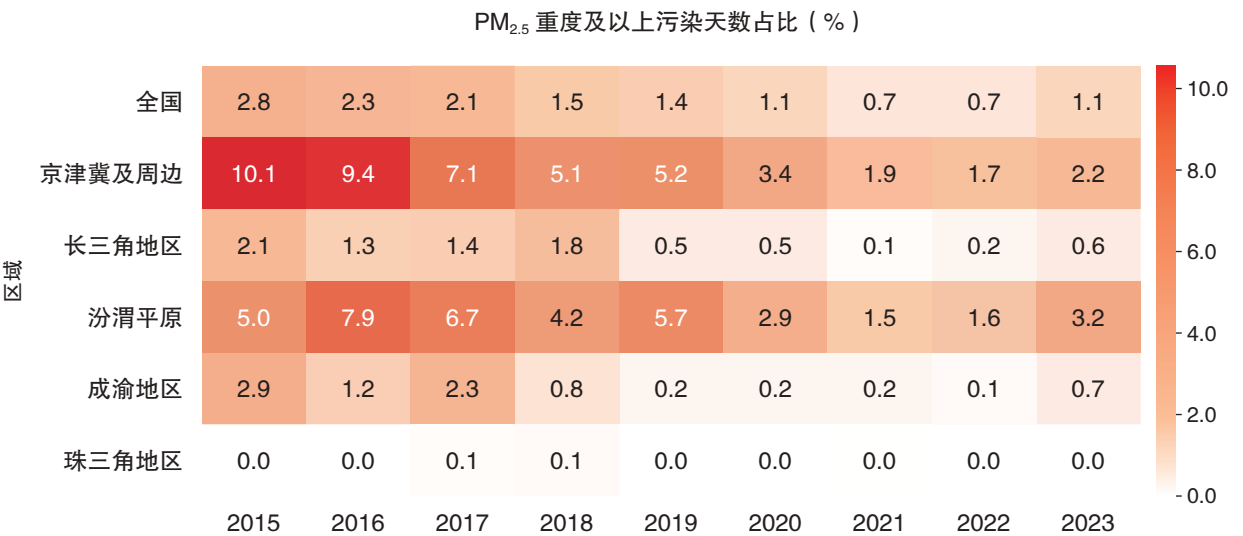


图 2-2 2015 年至 2023 年全国及重点区域 PM_{2.5} 重度及以上污染天数占比情况
注：数据源自中国生态环境部（2024a）

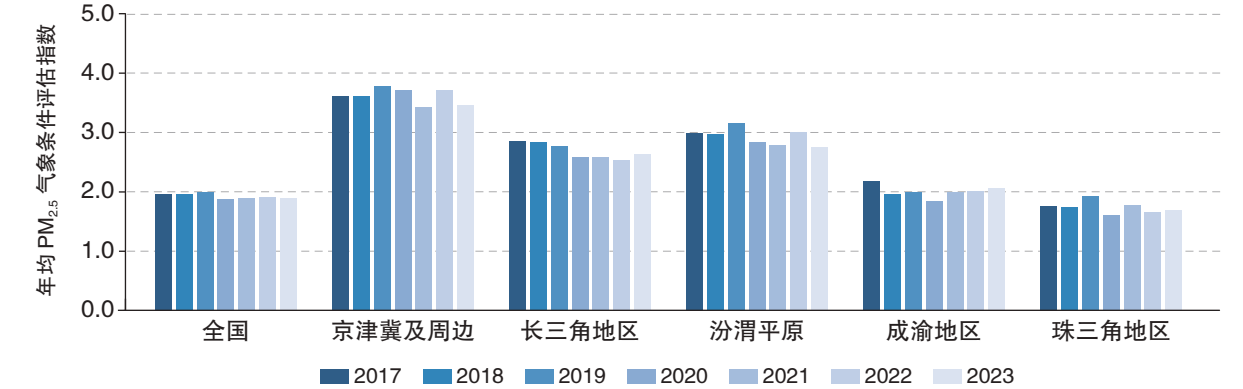


图 2-3 2017 年至 2023 年全国及重点区域 PM_{2.5} 气象条件评估指数（EMI）变化
注：EMI 指数来自国家气象中心

O₃ 变化情况

2023 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 89–198 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，年平均浓度为 144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。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 2–4a）。2023 年成渝地区、京津冀及周边和汾渭平原相较于 2022 年大气 O₃ 浓度分别上升了 0.96%、1.37%、1.45%，长三角地区、珠三角地区相

较 2022 年大气 O₃ 浓度分别下降了 2.32% 和 7.40%。从三年滑动平均来看，2015–2019 年间全国及重点区域 O₃ 浓度持续上升，而 2020–2023 年间全国及重点区域 O₃ 浓度出现持平或者小幅度下降，“十四五”阶段 O₃ 污染持续恶化问题正在得到相对缓解。

2023 年 O₃ 日最大 8 小时平均值第 90 百分位数年平均浓度低于国家二级标准（160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的城市数量为 255 个（图 2–4b），达标占比

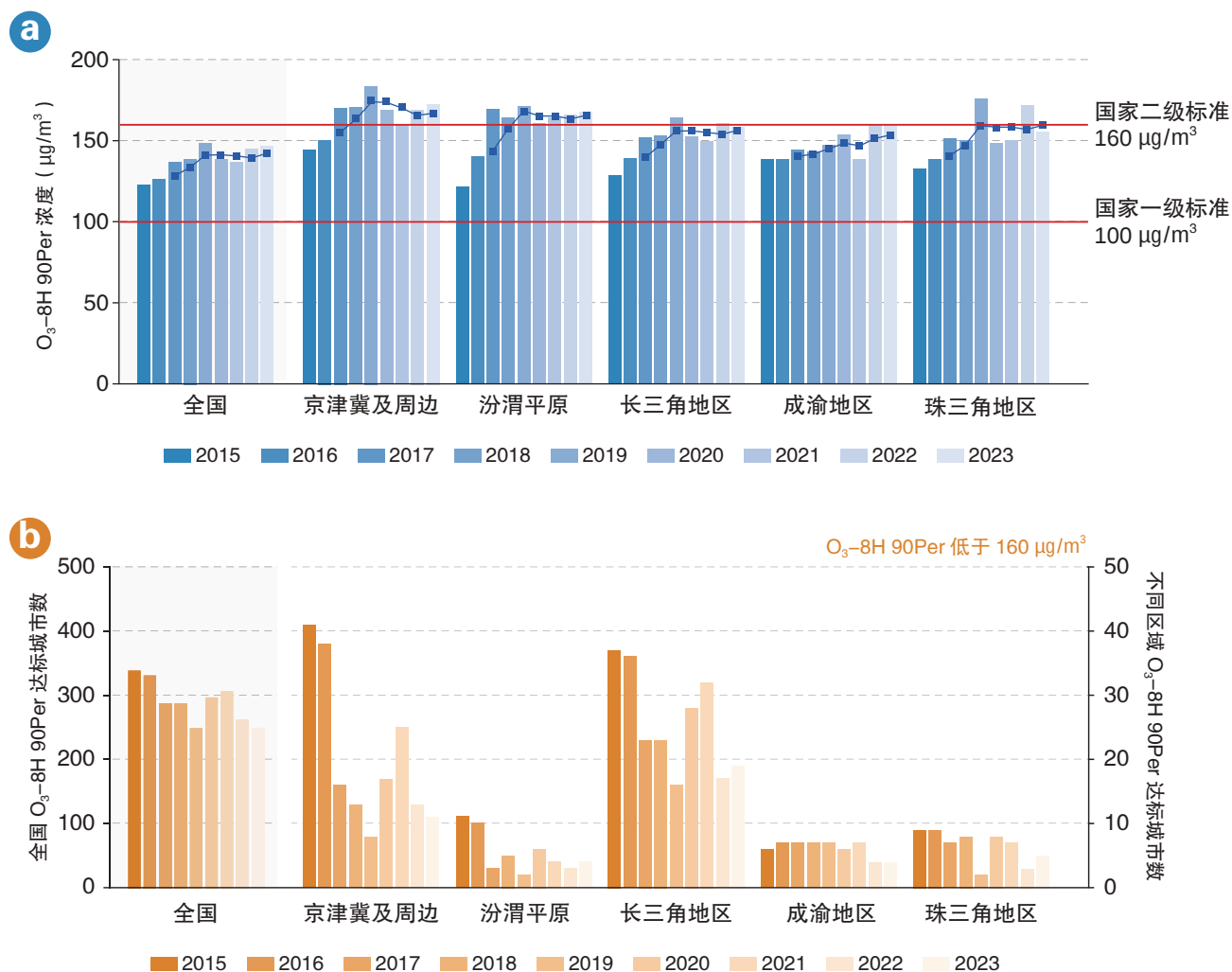


图 2–4 2015 年至 2023 年全国及重点区域 O₃ 日 8 小时滑动平均最大第 90 百分位数浓度（柱状）以及三年滑动平均浓度（蓝色点线）（a）；O₃ 日 8 小时滑动平均最大第 90 百分位数浓度达标城市数（b），O₃ 评价标准采用 160 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 国家二级标准；站点同图 2–1

注：数据源自中国生态环境部（2024a）

超 75%。2015–2023 全国及重点区域 O₃–8H 90Per 达国家二级标准城市数呈现倒“N”型，2015–2019 年间达标城市数量从 318 个下降至 234 个，下降 26.4%，2019–2021 年间，达标城市数量持续上升，2021 年全国 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，2021–2023 年间，达标城市又明显减少，2023 年数量为 255 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。值得注意的是，我国 O₃ 达标的评价方式为所有国控站点的平均值，这与美国等其它国家采用单站点的评价方式存在一定的差异。

O₃ 重度及以上污染的出现频率远少于 PM_{2.5}，2023 年全国 339 个地级及以上城市 O₃ 重度及以上污染天数仅占 0.02%，各重点区

域的 O₃ 重度及以上污染天数占比均在 0.06% 以下。

图 2–5 给出了 2017–2023 年 5–9 月全国及重点区域臭氧气象条件评估指数，该指数值越高代表气象条件越有利于 O₃ 浓度升高（附录）。2023 年，全国重点区域臭氧气象条件均比 2022 年有所下降。其中，长三角地区和汾渭平原地区臭氧污染气象条件较 2022 年同期分别下降 6.68% 和 3.66%，较近 5 年同期平均值分别下降 1.69% 和 0.65%。京津冀及周边、成渝地区和珠三角地区 2023 年 5–9 月臭氧气象条件指数较 2022 年同期下降（幅度分别为 1.32%、3.19% 和 2.72%），但较近 5 年平均值有所上升（升幅分别为 0.23%、3.82% 和 0.25%）。人为源排放和气象因子变化共同影响了 O₃ 污染的年际变化。

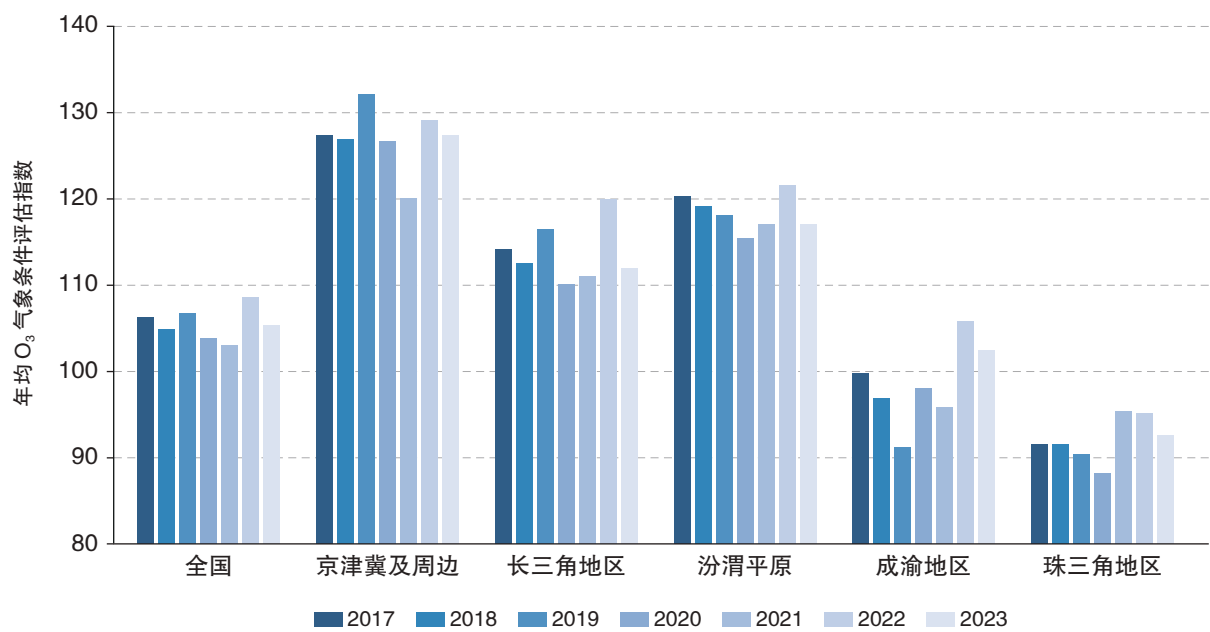


图 2–5 2017 年至 2023 年 5–9 月全国及重点区域臭氧气象条件评估指数变化

注：臭氧气象条件评估指数来自国家气象中心

大气污染格局变化

2015年至2023年间，全球各国的空气质量呈现出显著的多时空变化。图2-6显示了主要国家的PM_{2.5}和暖季（4月–9月）O₃浓度变化对比，可以看出，中国的PM_{2.5}浓度显著下降，从接近50 μg/m³降至2023年的30 μg/m³，显示出中国在治理大气污染方面取得了显著进展。印度的PM_{2.5}浓度尽管有所下降，但仍保持在较高水平，而韩国、日本、美国和英国的PM_{2.5}浓度较低且变化幅度较小，且日本、美国 and 英国保持在15 μg/m³以下，显示其空气质量较为稳定。暖季O₃浓度方面，中国的O₃暖季平均浓度在2015年至2018年稳定上升后略有下降，但总体趋势仍是上升，2023年接近80 μg/m³。美国和韩国的O₃浓度总体上也呈现上升趋势，日本和欧洲地区的O₃以波

动为主，上升趋势不明显。中国暖季O₃浓度自2017年后均高于这些国家，需引起重视。

经过多年的大气污染治理，我国空气质量总体格局发生了显著变化。图2-7a所示为2015和2023年全国339城市年均PM_{2.5}浓度的空间分布。2015年，PM_{2.5}污染最严重的城市集中在京津冀及周边地区。经过多年大气污染治理行动的实施，2023年我国的PM_{2.5}污染得到了显著的缓解，PM_{2.5}污染中心逐渐从河北、山东转移至山西、河南，且污染中心的整体PM_{2.5}浓度由原来的100 μg/m³左右下降至50 μg/m³左右。此外，西北地区由于受沙尘影响，PM_{2.5}污染仍较为显著。

图2-7b所示为2015和2023年全国339城市年均O₃日最大8小时平均值第90百分位

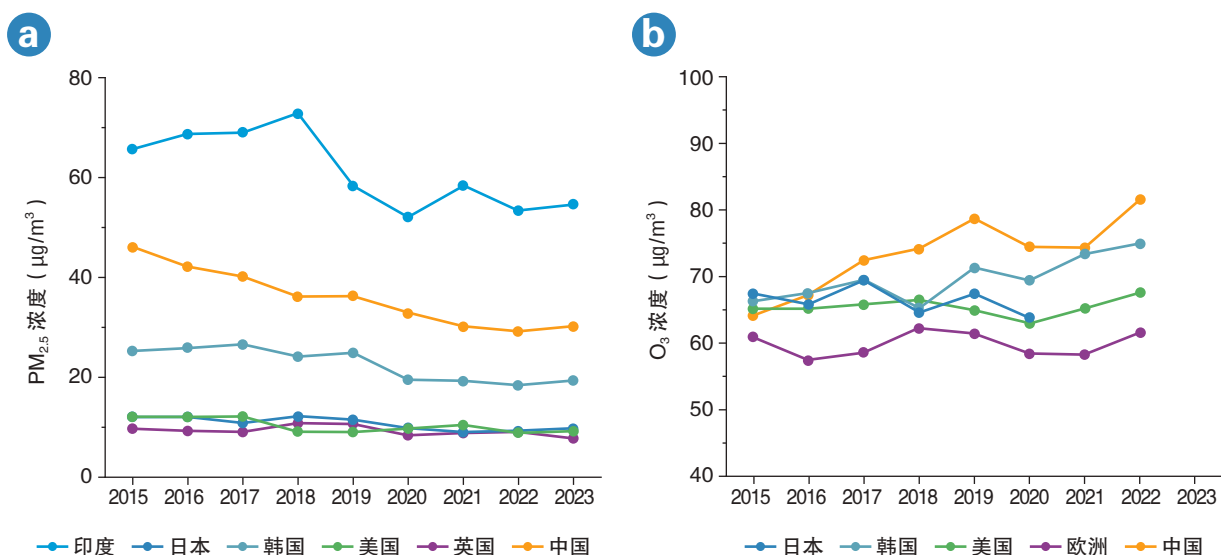


图2-6 2015年至2023年中国、印度、韩国、美国、日本、英国（欧洲）PM_{2.5}年均浓度（a）；O₃暖季（4–9月）浓度（b）

注：PM_{2.5}数据来源：<https://www.iqair.cn/cn/>；O₃数据来源：中国 <http://106.37.208.233:20035/>；美国 https://aqs.epa.gov/aqswweb/airdata/download_files.html；欧洲 <https://discomap.eea.europa.eu/map/fme/AirQualityExport.htm>；韩国 <https://airkorea.or.kr/>；日本 <https://tenbou.nies.go.jp/download/>（O₃数据源自各国空气质量数据网站，其中缺失印度数据；各国数据质量可能存在差异，对结果会造成一定的不确定性）

数浓度的空间分布。2015 年，全国整体 O₃ 污染程度相对较低，O₃ 污染最严重的城市主要位于京津冀及周边、成渝和长三角地区。2023 年，全国整体 O₃ 污染程度有所上升，且京津冀及周

边地区仍存在较严重的 O₃ 污染。成渝地区和长三角地区 O₃ 污染最严重的城市对应 O₃ 浓度明显下降，但整体污染程度有所上升。

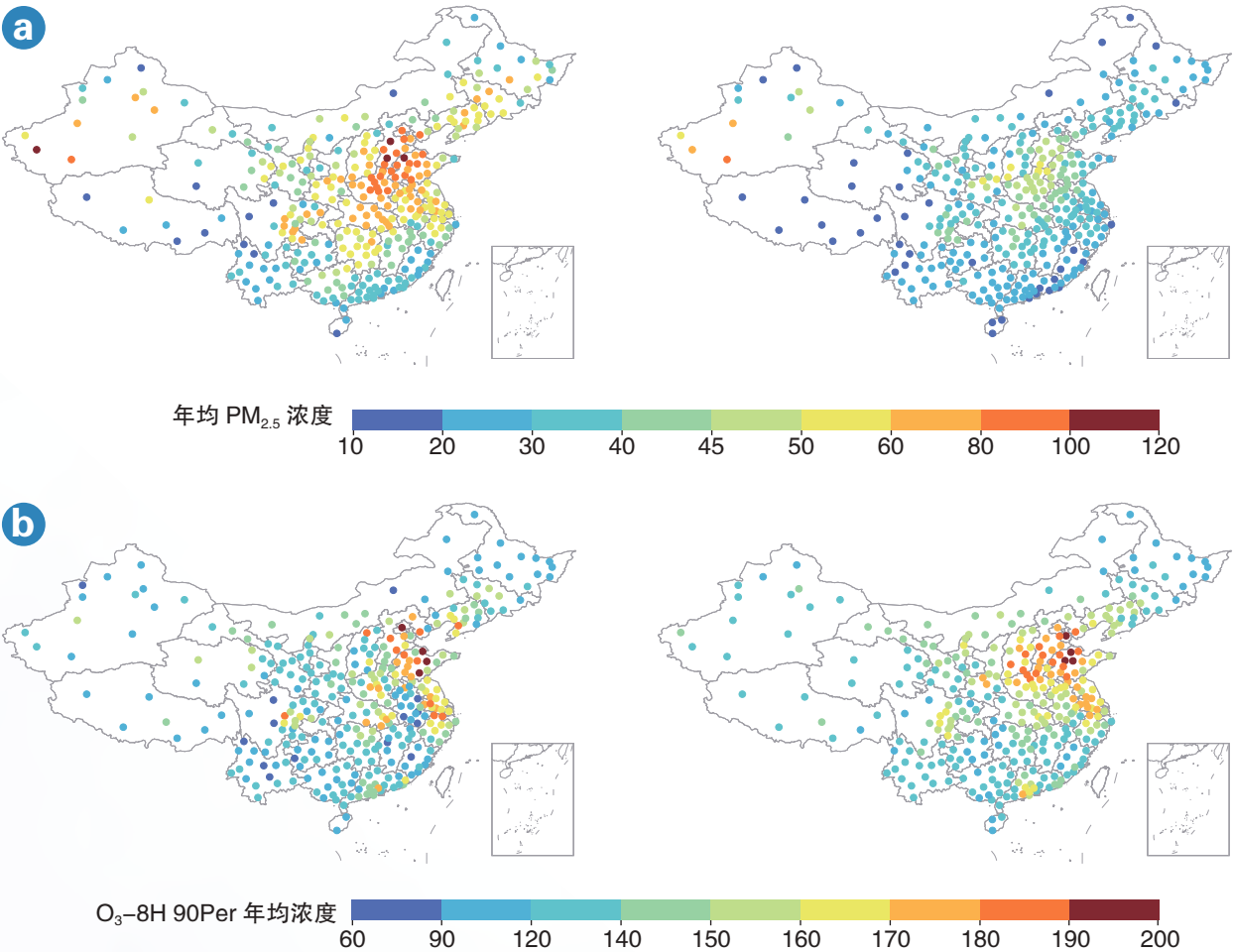


图 2-7 2015 年和 2023 年全国 339 城市年均 PM_{2.5} 浓度 (a) ;
O₃ 日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数浓度 (b)

注：数据源自中国生态环境部 (2024a)

2.2 气候变化与极端天气气候

2023 年为有记录以来最热年份，年均气温较工业化前高 1.45°C ，7 月短暂突破 1.5°C 阈值。变暖导致极端天气涌现出新特征，北半球多地同时发生破纪录极端高温，引发能源压力、生态退化和野火蔓延；热带气旋“杜苏芮”带来华北超千毫米降雨；“弗雷迪”创热带气旋持续时间最长记录；持续干旱影响全球多地，中国云南连旱致 400 万人受影响，亚马逊河流量创新低；沙尘以及热浪－臭氧等极端事件加剧了大气污染对人类健康的威胁；寒潮虽频率降低但强度增强，对农业和能源供应造成严重冲击。

全球气候系统正在经历以变暖为主要特征的显著变化（IPCC, 2021）。世界气象组织的报告指出，2023 年成为有记录以来全球最热的一年，全球年平均气温比工业化前水平（1850–1900 年）高出 $1.45 \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ （WMO, 2024a）。2023 年 7 月作为最“炎热”的月份被载入史册，并且该月的气温较工业化前时期（1850 到 1900 年）的上升幅度已经短暂突破了巴黎协定的 1.5°C 阈值。2023 年我国年平均气温 10.71°C ，较常年（1991–2020 年）偏高 0.84°C ，为 1901 年以来历史最高（中国气象局气候变化中心，2024）。

变暖背景下，全球极端天气气候事件也涌现出新的特征（Yin et al., 2022; Zhang et al., 2024b），以 2023 年尤为明显（图 2–8），导致社会、经济和生态系统遭受重大损失。北半球多地同时发生破纪录极端高温，我国华北黄

淮经历了综合强度为 1961 年有完整气象记录以来最强的高温天气过程，人为气候变化使得华北高温事件发生概率增加了 57 倍，强度增加至少 1.0°C （Qian et al., 2024）。人类活动也导致北美和南欧许多站点的高温天气突破历史记录（Zachariah et al., 2023）。高温天气导致降温耗能普遍增加，同时导致风力发电无法获得足够的风力驱动（Sherman et al., 2017），给电力部门造成了能源保供压力。持续的高温天气还为火灾的蔓延创造了有利环境。夏威夷野火成为美国百年来死亡人数最多的野火事件（至少上百人死亡），加拿大野火的破坏程度更是前所未有，过火面积超过 1300 万公顷，是长期平均的七倍多，严重削弱森林生态系统碳汇功能。

增强的热带气旋引发强降水造成严重洪涝灾害。受热带气旋“杜苏芮”登陆北上的影响，

我国华北、黄淮，京津冀等地遭受极端强降水过程，最大累计降雨量达 1003 毫米（河北邢台临城县），相当于当地两年的降水量总和。近年来西北太平洋的台风活动范围在向北移动（Chen et al., 2022），凸显了我国北方地区提升台风防汛能力的紧迫性。越来越高的海洋温度使得气旋不断的聚集能量和水分（Mei and Xie, 2016），导致气旋强度增加，持续时间延长。“弗雷迪”创下热带气旋持续时间最长的记录，持续时间长达 36 天，造成的经济损失约为 4.81 亿美元；飓风“奥蒂斯”成为有卫星记录以来增速最快的飓风，也是有记录以来令墨西哥损失最惨重的热带气旋之一。预计随着变暖的加剧，由气旋引发的强降水可能导致更加严重的洪涝灾害。

全球范围持续的干旱对多个地区造成不利影响。我国云南经历了 1961 年以来同期最强的

冬春连旱，气象干旱日数长达 102.9 天（中国气象局，2024），干旱引发水资源短缺并破坏生态系统，导致 400 万人受到影响。南美洲亚热带地区遭遇了严重的干旱并且还在加剧，亚马逊雨林中心地区降雨量达到 40 年来最少，河流水位创历史新低，导致巴西第四大水电站停运。虽然厄尔尼诺会导致该地区降水量减少，但是长期的干旱趋势很大程度是由于气候变化造成的，气候变化使得该地区农业干旱的发生可能性增加了约 30 倍（Clarke et al., 2024）。

极端天气加剧大气污染威胁人类健康。极端炎热的夏季持续热浪，通过物理和化学过程会加剧臭氧的积累，定量研究表明热浪会导致城市地区臭氧污染增加 30% 以上（Li et al., 2024a），高温天气和臭氧污染的协同效应对人类健康造成更为严重的威胁。2023 年春季，我国沙尘天气呈现次数偏多、强度偏强、首发



图 2-8 2023 年全球重大极端天气气候事件
注：引自 Zhang 等 (2024b)

时间偏早、影响范围偏大等特征（中国气象局，2024），这与沙源地近期气候环境恶化有关。2023 年我国共发生 17 次沙尘天气，为 2011 年以来最多，受影响国土面积约 508 万平方公里，受影响人口 9.4 亿人（尹志聪等，2023）。最强一次沙尘过程（3 月 19–24 日）造成我国北方 60 多个城市空气质量达到重度污染及以上水平。

强寒潮事件频发屡创低温记录。近年来我国冷事件的数量虽然在减少，但是强度

强、范围广、影响大的强寒潮依然时有发生。1 月下旬，三次寒潮过程袭击我国，黑龙江漠河市最低温度达到零下 53℃，刷新我国有气象记录以来历史最低气温值。12 月我国遭遇了一轮有完整气象记录以来最强的寒潮过程，全国 162.5 万平方公里国土面积降温幅度超 14℃，强寒潮创多地低温与积雪新纪录。持续性大范围的霜冻天气使农业、交通运输及能源供应等方面产生破坏性影响，北方大部分地区的采暖耗能较常年同期增加 24%~39%。



2.3 大气中的温室气体

2023 年，全球温室气体浓度持续上升，大气年平均 CO₂ 浓度达 420.0 ppm，为工业化前水平的 151%，年增量 2.3 ppm，连续 12 年增幅超 2 ppm。我国瓦里关本底站记录的增速略低于全球平均。CH₄ 浓度达 1934 ppb，比工业化前高 265%，年增速为 10.7 ppb，其中东亚地区增速略低于全球平均。N₂O 浓度达 336.9 ppb，为工业化前的 125%，增速 1.07 ppb。极端天气加剧温室气体排放，如高温和降水增加湿地甲烷排放，而森林火灾导致二氧化碳排放显著上升。

二氧化碳（CO₂）

2023 年，全球大气年平均 CO₂ 浓度达到 420.0 ppm（WMO, 2024b），是工业化前（1750 年前）水平的 151%（表 2-1）。相比

于 2022 年增长了 2.3 ppm，过去十年（2014–2023）的平均增长速率为 2.4 ppm yr⁻¹，标志着连续 12 年增幅超过了 2 ppm。尽管二氧化碳浓度有明显的季节变化，但整体而言均呈现上升趋势，夏季的低浓度主要是陆地和海洋生态

表 2-1 基于全球大气观测计划（Global Atmosphere Watch）站网观测的 2023 年全球平均温室气体浓度及其趋势。单位是干空气中的浓度。
注：引自 WMO（2024b）

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
2023 年平均浓度	420.0 ± 0.1 ppm	1934 ± 2 ppb	336.9 ± 0.1 ppb
2023 年相对于 1750 年 ^a 的百分比	151%	265%	125%
2023 年相对于 2022 年的绝对增量	2.3 ppm	11 ppb	1.1 ppb
2023 年相对 2022 年的相对增量	0.55%	0.57%	0.33%
过去 10 年的年平均绝对增量	2.4 ppm yr ⁻¹	10.7 ppb yr ⁻¹	1.07 ppb yr ⁻¹

a: 假设工业化革命前 CO₂ 浓度为 278.3 ppm，CH₄ 浓度为 729.2 ppb，N₂O 浓度为 270.1 ppb。

系统的光合作用吸收在该季节达到最高。由于化石燃料燃烧主要集中在北半球，南半球与北半球二氧化碳同时刻浓度存在小幅差异，南半球二氧化碳浓度相对较低，但也逐年增加，且增长速率明显低于北半球。基于我国瓦里关本底站的数据，过去十年（2013–2022）的年平均绝对增量（ 2.16 ppm yr^{-1} ）略低于全球平均（中国气象局，2023）。卫星数据表明（2010–2023年），东亚地区的平均增长速率为 $2.43 \pm 0.33 \text{ ppm yr}^{-1}$ ，与全球增速持平。我国二氧化碳浓度以及变化趋势与北半球相似（图 2–9），这一

结果与我国地面 CO_2 浓度背景观测的趋势一致。我国二氧化碳的高值区域主要集中在华北地区以及部分的华中区域。造成这一现象的主要原因是华北地区不仅是主要的产煤区域，也是集中供暖地区。而部分华中地区人口较为密集，人为活动排放的二氧化碳相对较多。此外，珠三角是中国二氧化碳峰值区域，这一现象与该地区大量的能源排放、较为密集的工业排放以及交通排放有密切联系。对比而言，新疆、西藏以及青海等地域广袤、人为活动较少的地区，二氧化碳浓度较低。

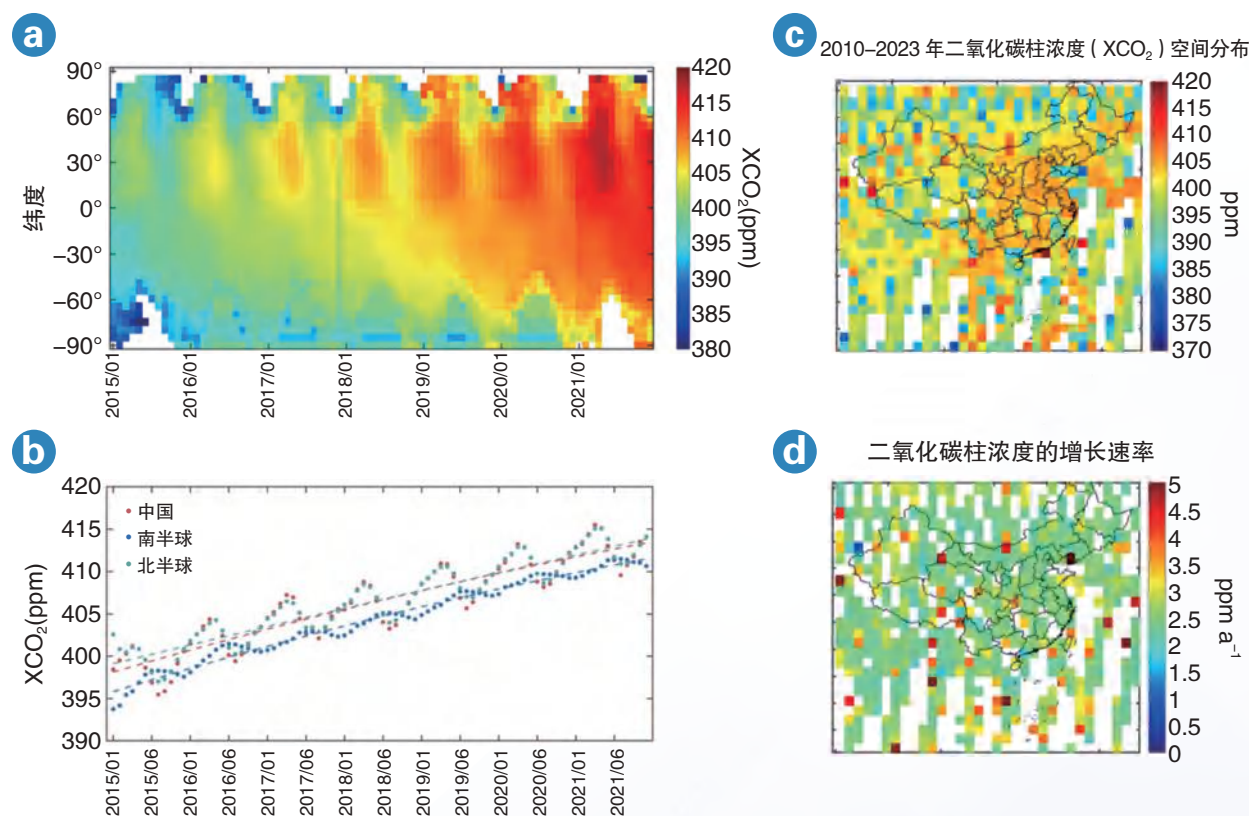


图 2–9 GOSAT 卫星观测到的全球纬度平均二氧化碳浓度（ XCO_2 ）变化（a）；我国和全球二氧化碳浓度增长趋势（b）；东亚和中国地区（2010–2023 年）二氧化碳浓度空间分布（c）；东亚和中国地区二氧化碳浓度分布以及增长速率（2010–2023 年）（d）

注：GOSAT XCO_2 数据来源：https://data2.gosat.nies.go.jp/index_en.html

甲烷 (CH₄)

2023 年, 全球大气年平均 CH₄ 浓度达到 1934 ppb, 是工业化前水平的 265%。相比于 2022 年, 增长了 11 ppb。过去十年 (2014–2023) 的平均增速达到了 10.7 ppb yr⁻¹, 其中 2020–2022 年的增速 (15.4 ppb yr⁻¹) 达到自 1984 年有全球系统性地面观测以来的最高值, 主要驱动因素包括湿地排放的快速增长, 新冠疫情导致人为 NO_x 排放降低等。东亚地区的 CH₄ 平均增长速率为 9.0 ± 0.7 ppb yr⁻¹, 略低于全球平均增速但是差异不显著。夏季的自然系统排放 (湿地、湖泊等) 和部分人为排放 (垃圾填埋、废水

处理) 达到一年中最大值, 但是其对流层的化学分解 (与大气中的 OH 自由基反应) 也达到一年最大值并超过源排放, 因而降低了该季节的 CH₄ 浓度 (Saunois et al., 2020)。基于我国瓦里关本底站的数据表明, 过去十年 (2013–2022) 的年平均绝对增量为 9.8 ppb yr⁻¹, 略低于全球平均。TROPOMI 卫星观测到的中国甲烷柱浓度的最高值出现在中国东部人口密集的区域 (图 2–10), 其 2019–2023 年的甲烷浓度增长速率也呈现较大的地区差异性, 在华北、长江中下游平原和新疆等地区呈现较高的增长速率 (12–14 ppb yr⁻¹), 其他区域的增长速率略低 (10–11 ppb yr⁻¹)。

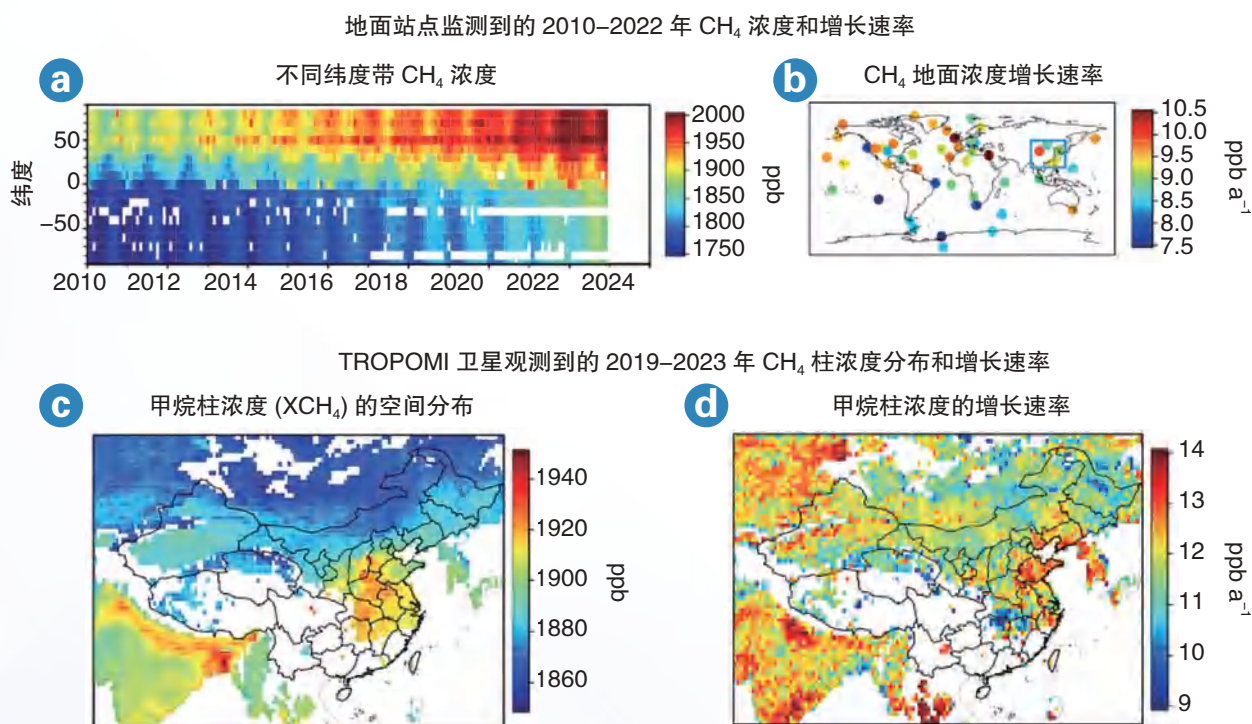


图 2–10 全球地面站点和卫星监测到 CH₄ 浓度变化

(a–b) 地面站点观测到的 2010–2022 年地面 CH₄ 浓度变化, 数据来源于 <https://gml.noaa.gov/ccgg/about.html>; (c–d) TROPOMI 卫星观测到的东亚地区 2019–2023 年甲烷柱浓度分布和增长速率

氧化亚氮 (N₂O)

2023 年，全球大气年平均 N₂O 浓度达到 336.9 ppb，是工业化前水平的 125%。相比于 2022 年，增长了 1.1 ppb。过去十年（2014–2023）的平均增速达到了 1.07 ppb yr⁻¹，其中 2021–2022 年间的增速达到有观测以来的最高值（1.29 ppb yr⁻¹）；东亚地区的平均增长速率为 1.01 ± 0.02 ppb yr⁻¹，与全球平均增速持平（图 2-11）。基于我国瓦里关本地站的数据表明，过去十年（2013–2022）的年平均绝对增量为 1.09 ppb yr⁻¹，略高于全球平均。尽管土壤排在夏季达到全年最高值，但由于该季节平流层中低浓度的 N₂O 与对流层的混合最为强烈（Jiang et al., 2007），因而使得夏季的 N₂O 浓度反而较低。

频发的极端天气气候事件也对温室气体排放产生了显著反馈。极端降水会显著增

加湿地面积，从而增加甲烷排放（Zhang et al., 2023d）。全球高温会增加土壤细菌活跃度，从而增加 CH₄ 和 N₂O 排放（Koffi et al., 2020）。尽管过去二十年全球过火面积大幅下降，但由于森林火灾二氧化碳排放量的增加抵消了草地和灌木丛火灾排放量的减少，全球火灾排放量一直稳定或略有下降（Zheng et al., 2021）。2001–2022 年间，全球年均森林过火面积为 4695 万公顷，是同期年均人工林增长面积的 11 倍。我国林火管控较好，虽然森林面积占全球的 5.4%，但林火碳排放量仅占全球的 0.65%（中国科学院，2023）。受到气候变化的影响，热浪和干旱频发，是引起林火事件的主要助推剂。北方火灾通常占全球火灾二氧化碳排放量的 10%，而 2021 年贡献了 23%（4.8 亿吨碳）（Zheng et al., 2023），2023 年加拿大林火，产生的 CO₂ 排放量超过 15 亿吨，高于过去 22 年林火产生 CO₂ 排放量的总和（13.74 亿吨）。

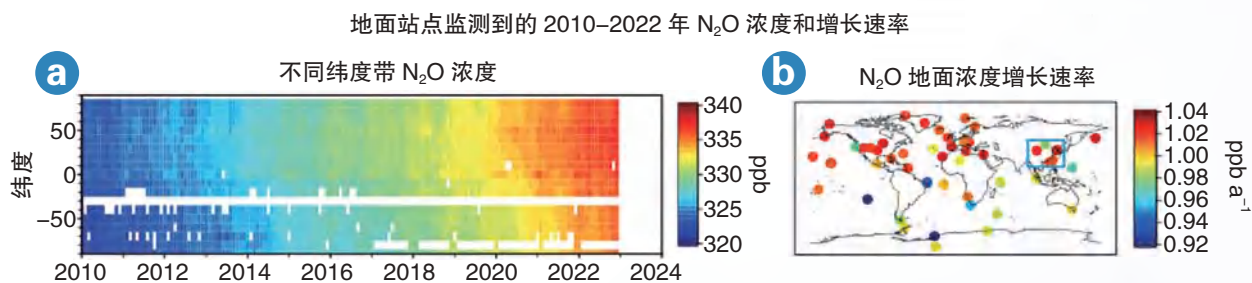


图 2-11 全球地面站点观测到的 2010–2022 年 N₂O 浓度变化

注：数据来源于 <https://gml.noaa.gov/ccgg/about.html>



A photograph of a modern glass building with greenery in front of it. The building has a grid-like structure with glass panels and green louvers. The greenery consists of several tall, leafy trees in the foreground. The image is used as a background for the chapter header.

治理体系与实践

2023 年出台的《中共中央国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》明确提出了开展多领域多层次减污降碳协同创新试点、加强减污降碳等国家基础研究和科技创新重点领域的攻关、加快实施减污降碳协同工程等重点任务。国务院发布的《空气质量持续改善行动计划》再次强调了协同推进降碳、减污、扩绿、增长的工作要求。在国家自上而下的推动下，空气质量改善和温室气体减排协同的治理体系进一步完善。本章以 2023 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，以及地方实践和成效，进而反映协同治理的工作进程。

3.1 协同治理体系建设

自 2021 年以来，生态环境部积极推动减污降碳协同治理体系的建设，通过改进环境评价和监测等管理工具，逐步建立起一套综合管理体系。该体系以生态环境分区管控为宏观约束，以环境影响评价管理为源头防控，以融合清单和一体化监测为基础能力支撑，并在环境管理实践中试图逐步将温室气体控制融入已有环境治理框架。同时，大量研究指出协同治理在研究对象、成本技术、政策机制等方面的关键问题。

2021 年以来，生态环境部通过改进环评、监测等管理工具，逐渐推动建立以生态环境分区管控为宏观约束、以环评管理为源头防控手段、以融合清单和一体化监测为基础能力支撑的减污降碳协同治理体系（图 3-1）。

在宏观管控方面，2024 年 3 月，国务院办公厅发布《关于加强生态环境分区管控的意见》，明确提出要“开展生态环境分区管控减污降碳协同试点，研究落实以碳排放、污染物排放等为依据的差别化调控政策”。部分省市开始先行先试，尝试建立生态环境分区管控下的减污降碳协同试点，从空间管理出发推动减污降碳协同增效。

在源头防控方面，温室气体排放环境影响评价管理制度的研究和试点逐步展开。2021 年以来，浙江、重庆等 9 个省（区、市）聚焦钢铁、建材、有色、石化化工等 6 个重点行业共 500 余

个建设项目开展了温室气体排放环境影响评价、7 个产业园区开展了规划环评碳排放环境影响评价试点工作。浙江省发布《生态环境保护条例》，明确要求环境影响评价中开展温室气体评价；山东省、重庆市也正式发布文件，提出建立碳排放与环境影响评价、排污许可联动管理机制、将碳排放减量替代纳入环境影响评价管理等要求。

在治理能力支撑方面，生态环境部印发《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南（试行）》，指导地方建立真实反映本地大气污染物和温室气体排放特征的融合清单；印发《碳监测评估试点工作方案》，在区域、城市和重点行业三个层面开展碳监测评估试点，支撑排放源层面精细协同治理。这些工作有助于各级政府对大气污染物和温室气体排放、浓度的时刻分布特征及其来源形成更加准确和清晰的认知，有效支撑了减污降碳协同治理的目

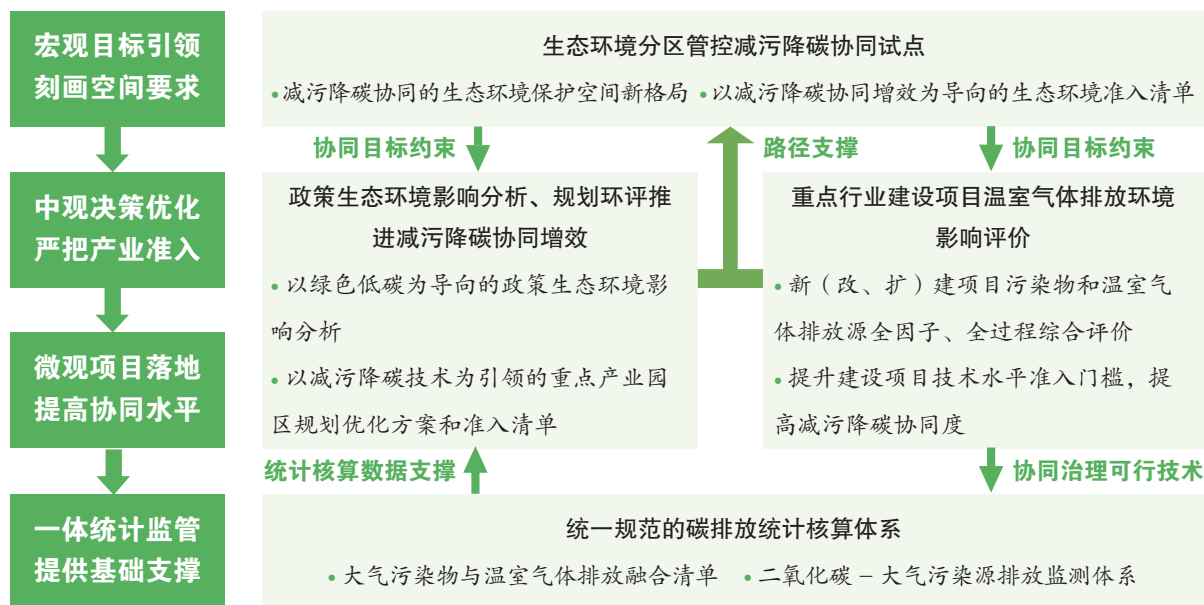


图 3-1 生态环境领域减污降碳协同治理的体系建设方向

标识别、路径优化、政策制定和效果评估。

在环境管理实践中试图逐步将温室气体控制融入已有环境治理框架，以实现协同，学术界围绕温室气体与大气污染物协同的治理体系研究更多集中于治理对象选择和治理架构设计。前者主要在深入挖掘温室气体与大气污染物“同根同源性”特征的基础上，针对不同治理对象分析温室气体与大气污染物协同控制的成本效益，进而提出协同治理的优先对象，进行协同治理体系的画像；后者主要从社会治理的组织角度出发，从治理手段和治理工具的视角，分析已有的大气环境和温室气体治理体系如何进行整合，才能够在降低全社会管理成本的基础上取得协同治理的实效。

目前的研究发现，要构建大气污染与温室气体控制的协同机制，不能局限于目前针对单一对象的管理，而需要在更大的边界和更高的维度进行协同优化，需要细致剖析减排成本和环境效益在区域和行业，乃至工艺技术维度上的异质性；深入分析多种政策规制工具、市场

引导和激励机制之间的交互影响。在跨行业的层面上看，不同行业生产技术、用能特征和排放特征存在差异，减污降碳协同效应也明显不同，需要根据碳、污减排目标和各行业排放的特点，科学设定分行业的碳、污减排目标，并通过管理手段加以引导。在跨区域的层面上，不同地区产业结构、技术水平、能源使用情况和排放治理水平存在较大差距，在碳、污减排目标设计的过程中，不仅需要考虑各地区温室气体减排成本的差异，还需要结合各地本底污染情况、跨区域输送情况，以及基于人口和经济产业对污染的敏感性、暴露程度评估污染物减排的边际环境健康效益，对大气污染物和温室气体排放目标进行优化和调整（孙雪妍等，2023）。随着全国碳市场范围的扩展，碳污协同控制机制的设计面临新的挑战（罗良文等，2024）：如何通过碳市场行业覆盖范围的调整，优化跨行业层面的减污降碳成本；如何通过碳配额分配、碳排放抵消和配额跨期使用机制的创新，推动跨区域层面的协同治理，都成为管理实践中需要解决的关键问题。

3.2 协同治理政策

中国政府一直致力于将协同减污降碳作为推动经济社会全面绿色转型的关键举措，并在构建促进减污降碳的约束、激励和引导机制方面取得了显著成效。在行政管理、经济激励和社会参与这三个关键领域，政策工具得到了广泛的探索和应用，使得协同治理的政策体系逐渐得到完善和加强。

近年来，中国政府始终将减污降碳协同增效作为经济社会发展全面绿色转型的总抓手，推动构建减污降碳的约束激励与引导机制，减污降碳协同治理取得显著成效。行政管理、经济激励、社会参与这三个领域的政策工具都有所探索与应用，协同治理的政策框架逐步完善（图 3-2）。

在行政管理方面，政府基本构建形成了“自上而下”全面推进的协同治理局面。一是 2022 年 6 月，中国国家层面印发《减污降碳协同增效实施方案》后，截至 2023 年底，中国所有的省（区、市）均已出台减污降碳协同增效工作方案，中央到地方部门协作、上下协同的工作推进格局基本形成。二是出台《关于推动能耗双控逐步转向碳排放双控的意见》，强化从以能源强度和总量双控制的政策导向向以减碳为驱动的政策方向调整。三是开展多类型政策试点。开展政策实验并复制推广经实践检验行之有效的模式是中国政府多年以来积累的有效经验。2023 年，生态环境部开始推进城市和产业园区减污降碳协同创新试点，碳监测评估、碳排放环境影响评价等试点

工作也在不断深化。

在经济激励方面，以碳市场为主体的市场经济激励政策持续完善。一是碳市场交易政策加快绿色低碳转型的作用初步显现。截至 2023 年底，中国碳排放权交易市场累计成交量达 4.4 亿吨、成交额约 249 亿元，覆盖年二氧化碳排放量约 51 亿吨，成为全球覆盖温室气体排放量最大的碳市场；出台实施了《温室气体自愿减排交易管理办法（试行）》，多元化碳市场体系更加完善。二是延续多项税收优惠政策支持绿色低碳发展。中国财政部、国家税务总局等部门于 2023 年 9 月 4 日继续公布，延续多项税收优惠政策到 2027 年底，其中，涉及减污降碳领域的包括对符合条件的从事污染防治的第三方企业减按 15% 的税率征收企业所得税和对充填开采置换出来的煤炭资源税减征 50%。三是适应绿色发展要求的价格机制更加完善，持续落实包括高耗能行业阶梯电价、污水处理收费等在内的价格政策。四是持续创新气候投融资政策解决绿色低碳转型阶段的资金需求。银行机构积极引导金融资

3.3 地方实践

《城市和产业园区减污降碳协同创新试点实施方案》印发后，各地结合自身特征，积极开展多层次多领域减污降碳协同创新。截至 2024 年 3 月，已经有 21 个不同类型的城市和 43 个园区开展推动地方创新试点工作。

2023 年，生态环境部印发《城市和产业园区减污降碳协同创新试点实施方案》，各地在此基础上结合自身特点，积极部署开展多层次多领域减污降碳协同创新。城市层面的创新试点包括创新减污降碳协同政策体系、创新减污降碳协同减排路径、创新减污降碳协同管理机制、开展重点领域协同试点、统筹各类城市试点创建等方面，园区层面的创新试点包括探索协同减排技术路径、探索协同创新管理体系、探索基础设施协同模式、开展重点行业协同试点、统筹各类园区试点创建等方面。截至 2024 年 3 月，已经有 21 个不同类型的城市（包括资源型、工业型、综合型、生态良好型和农业型）和 43 个园区（石化化工、资源回收、装备制造、钢铁焦化、农业、新材料、新能源、煤化工）开展推动地方创新试点工作。城市和园区在推动大气污染物和温室气体协同治理实践中初步形成一些有特色的工作亮点：郑州等城市通过编制大气污染物和温室气体排放融合清单，识别减污降碳协同治理的重点排放环节；无锡等城市通过比较重点行业协同治理技术，形成关

键治理技术清单；杭州等城市通过构建城市－区县－园区－行业四级指标评价体系，发挥评价“指挥棒”作用，推动不同层级碳污协同治理责任落实。河北武安工业园区等以高耗能高排放行业为主导产业的园区针对主要排放环节开展工作，在能源结构转型、钢焦一体化、清洁运输等方面持续发力；杭州上虞经济技术开发区等精细化工园区推动新技术手段和新管理工具的应用，利用信息化技术构建企业碳污指纹库，结合无人机和地面走航实现精准溯源和管控。

为定量表征和准确认识我国不同城市大气污染及碳排放协同控制的水平，中国城市温室气体工作组基于中国环境监测总站发布的环境空气质量监测数据和《中国城市二氧化碳排放数据集》（Cai, 2018）对全国 335 个地级及以上城市（除儋州和三沙）2022 年 $PM_{2.5}$ 浓度和 CO_2 排放特征进行评估。结果表明高碳排放城市呈现出 $PM_{2.5}$ 污染更为严重的态势：2022 年 $PM_{2.5}$ 浓度年均值未达标的 84 个城市平均 CO_2

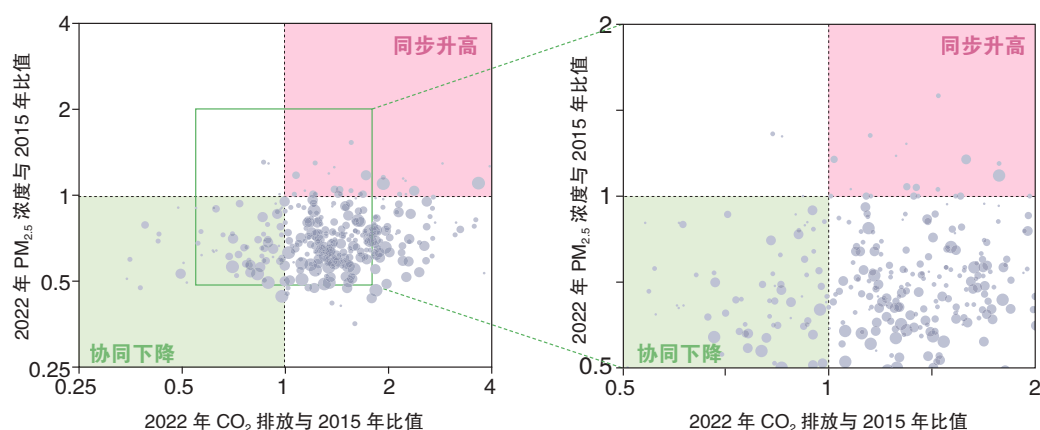


图 3-3 2015 年至 2022 年城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度和 CO_2 排放量变化情况比较

注：散点大小表示 2022 年 CO_2 排放

排放量（5684 万吨）比 251 个 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达标城市平均 CO_2 排放总量（3795 万吨）高出约 50%；在 CO_2 排放总量高于 5000 万吨的 97 城市中， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达标的城市比例（61%）明显低于 CO_2 排放总量低于 5000 万吨的城市（约占 81%）。结果还显示，当前约 31% 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）（Zhang et al., 2022b; Zhang et al., 2024a; Ruan et al., 2024），其中约 74% 的城市实现了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达标；约 14% 的城市处于碳排放平台期，其中约 77% 的城市实现了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度达标；剩余约 54% 的城市处于未达峰状态。

2015–2022 年间 320 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈下降趋势，占城市总数的约 96%，仅有 15 个城市出现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度持平或者上升趋势，占城市总数的约 4%。然而针对 CO_2 排放量，2015–2022 年间仅 95 个城市实现碳减排，占城市总数的约 28%，剩余约 72% 的城市碳排放持续上升。协同变化趋势结果显示（图 3-3），2015–2022 年间仅有 88 个城市实现了 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度和 CO_2 排放量协同下降，占城市总数的约 26%，与 2015–2021 年协同下降的城市数量相比减少了 17 个；有 5 个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度和 CO_2 排放量同步升高，占城市总数的 2.7%，相比 2015–2021 年减少 4 个。



结构转型与治理技术



随着中国“双碳”目标的持续和稳步推进，结构转型与清洁技术发展也面临着新的变革与挑战。在保障能源安全的同时，加速新能源、新技术的渗透已成为实现美丽中国目标的关键举措。本章通过追踪中国在能源、产业、交通等领域的结构转型进展和治理技术发展情况，分析多指标下的降碳减污路径发展动态与转型挑战，为进一步从根本上削减中国碳污排放提供参考。

4.1 能源结构转型

中国共产党“二十大”报告和二十届三中全会提出牢固树立系统观念，把握好全局和局部、当前和长远、发展和转型、政府和市场的关系，更好统筹高质量发展和高水平安全，坚决守住能源安全底线，坚决推动能源清洁转型，为高质量发展提供有力支撑保障。本小节指标基于 2023 年以来中国能源绿色低碳发展的进展数据，介绍了中国能源转型新形势，并结合《联合国气候变化框架公约》第 28 次缔约方大会（COP28）目标分析了能源转型的新要求下中国能源高质量发展路径。

能源结构转型延续“新”变化。2023 年能源系统在统筹发展和安全主基调下，实现能源安全保供和清洁转型双提升、双平稳，化石能源和新能源“双向”增长趋势延续，能源需求仍呈刚性增长态势（电力规划设计总院，2023）。2023 年全年能源消费总量达到 57.2 亿吨标准煤，同比增长 5.7%，增量创 2005 年以来新高，增速创 2012 年以来新高。“十四五”以来，我国能源消费弹性系数呈上升趋势，2023 年能源消费弹性系数达到 1.1，是自“十一五”以来首次超过 1（CREIA, 2024），显示出经济发展更加倚重能源的趋势。能源结构调整稳中有进，2023 年煤炭消费量占能源消费总量比重较去年降低 0.7 个百分点，达到 55.3%；天然气、水电、核电、风电、太阳能发电等清洁能源消费量占能源消费总量比重上升 0.4 个百分点，达到 26.4%（国家统计局，2024）。

电力消费增速攀升。2023 年，随着国内终端用能电气化水平的不断提升，工业、交通、建筑等重点行业电能替代持续推进，电力消费需求快速增长。2023 年电力消费弹性系数达到 1.29，已连续 4 年均超过 1（CCETP, 2024）。全社会用电量达到 9.22 万亿千瓦时，同比增长 6.7%，增速比上年提高 3.1 个百分点，人均用电量达到 6539 千瓦时，创历史新高。新兴产业用电量保持快速增长势头，高技术及装备制造业用电量同比增长 11.3%，超过制造业整体增长水平 3.9 个百分点。电能占终端能源消费比重提升至约 28%，工业、建筑、交通部门分别达到 27.6%、48.1%、4.3%（中国电力企业联合会，2024）。

减少化石能源消费的挑战仍然存在。2023 年能源系统对煤、电、气等资源保障力度有所提升，原煤、原油、天然气产量有所增长。尽

管 2023 年煤炭消费在能源消费总量中的占比进一步下降，但煤炭消费量仍增长 5.6%，已连续三年增长超 4%，其中电力部门的电煤消费增量占到全国煤耗增量的八成以上（CCETP, 2024）。油气增储上产持续推进，2023 年原油消费量增长 9.1%，天然气消费量增长 7.2%（国家统计局，2024）。新建原油产能 2250 万吨、天然气产能 420 亿立方米，全年原油产量稳定在 2 亿吨以上，天然气产量超过 2300 亿立方米，同比增长超过 4.5%（中能传媒研究院，2024）。

可再生能源装机快速增长。截至 2023 年底，全国全口径发电装机容量 29.2 亿千瓦，同比增长 13.9%。人均发电装机容量首次历史性突破 2 千瓦/人，达到 2.1 千瓦/人。非化石能源发电装机在 2023 年首次超过火电装机，占总装机容量比重首次超过 50%，煤电装机占比首次降至 40% 以下（中电联，2024）。其中，火电装机容量 13.9 亿千瓦，增长 4.1%；水电装机容量 4.2 亿千瓦，增长 1.8%；核电装机容量 5691 万千瓦，增长 2.4%；并网风电装机容量 4.4 亿千瓦，增长 20.7%；并网太阳能发电装机容量 6.1 亿千瓦，增长 55.2%（国家统计局，2024）。若要实现 COP28 通过的到 2030 年将全球可再生能源装机容量增加两倍的目标，到 2030 年我国可再生能源装机需达到 36.4 亿千瓦，若保持 2023 年可再生能源装机年增量，到 2030 年有望实现这一目标。在可再生能源发电持续快速的带动下，预计 2024 年新投产发电装机规模将突破 3 亿千瓦，新能源发电累计装机规模将首次超过煤电装机规模（中电联，2024）。

能源效率提升放缓。2023 年我国能耗强度降幅趋小，重点耗能工业企业单位电石综

合能耗下降 0.8%，单位合成氨综合能耗上升 0.9%，吨钢综合能耗上升 1.6%，单位电解铝综合能耗下降 0.1%，每千瓦时火力发电标准煤耗下降 0.2%。初步测算，扣除原料用能和非化石能源消费量后，全国万元国内生产总值能耗比上年下降 0.5%（国家统计局，2024）。

“十四五”前 3 年，全国完成煤电节能降碳改造、灵活性改造、供热改造超 7 亿千瓦，火电平均供电煤耗降低 0.9%。钢铁、电解铝、水泥、炼油、乙烯、合成氨等行业能效标杆水平以上产能占比平均提高 6 个百分点（国家发改委，2024）。COP28 “阿联酋共识”决定中要求到 2030 年全球能效提升一倍，即全球能源强度需平均每年下降 4%，从过去十年来看，我国能耗强度累计降低 26.4%（国家发改委，2023；新华社，2023），但未来维持这一速度存在挑战（澎湃新闻，2023）。

煤电装机延续快速增长趋势。2023 年煤电装机延续了上一年强势反弹的趋势，全年新增核准煤电项目总装机达到 1.06 亿千瓦，核准装机容量已达“十三五”期间获批总量的 73.5%，高于 2021 年的 1855 万千瓦和 2022 年的 9071.6 万千瓦（绿色和平，2024）。全年煤电累计发电 5.35 万亿千瓦时，较 2022 年增长 6.1%（国资委，2024）。煤电仍是当前我国电力供应的主力电源，通过建立健全市场化的电价机制促进煤电角色的转变是加快电力行业转型的有效举措（中国电力企业联合会，2024）。2023 年 11 月，国家发改委及能源局出台《关于建立煤电容量电价机制的通知》，规定 2024 年起煤电容量电价调整为两部制，各省份通过容量电价回收的固定成本比例可达 30–50%，这一规定是煤电定位从基荷性电源向调节性电源转型的一个重要标志。

能源结构和排放强度与发达经济体仍有差距。我国能源结构持续优化，但与发达经济体仍有一定差距（图 4-1），2023 年煤炭消费占比仍超过 50%，优于南非，与印度水平相近，而欧盟、美国仅有 12%、10%。随着我国可再生能源的快速发展，可再生能源消费占比提升，2023 年非水可再生能源消费占比高于世界平均

水平 0.9 个百分点，仅比日本、美国低 0.2、0.4 个百分点。碳强度和温室气体排放强度自 2016 年起低于南非，但仍显著高于发达经济体，2022 年碳强度较美欧分别超出 54%、72%（European Commission et al., 2024）。人均碳排放和温室气体排放仍在上升，增速虽逐渐趋缓但已超过大部分发达经济体及发展中大国水平。

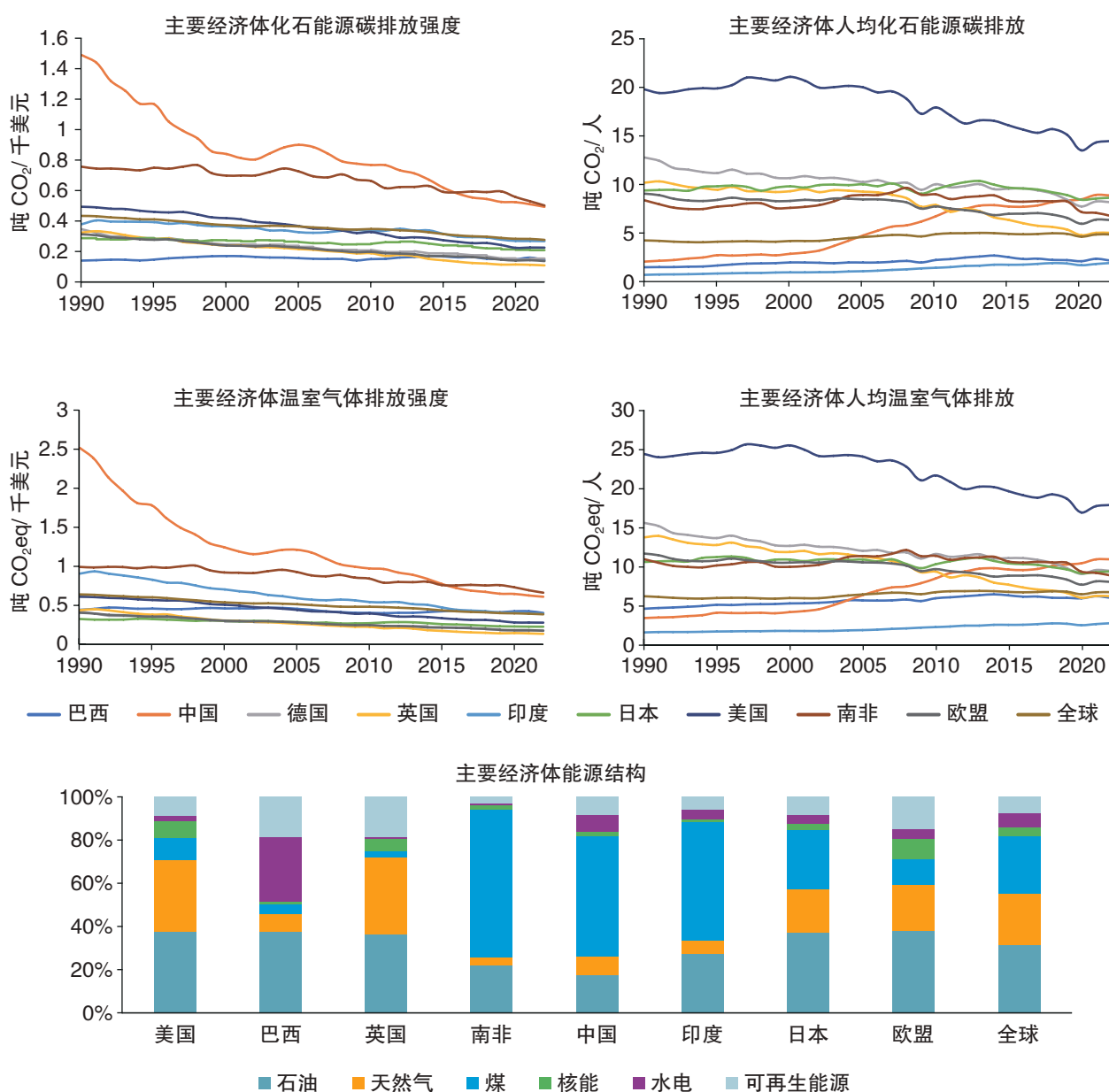
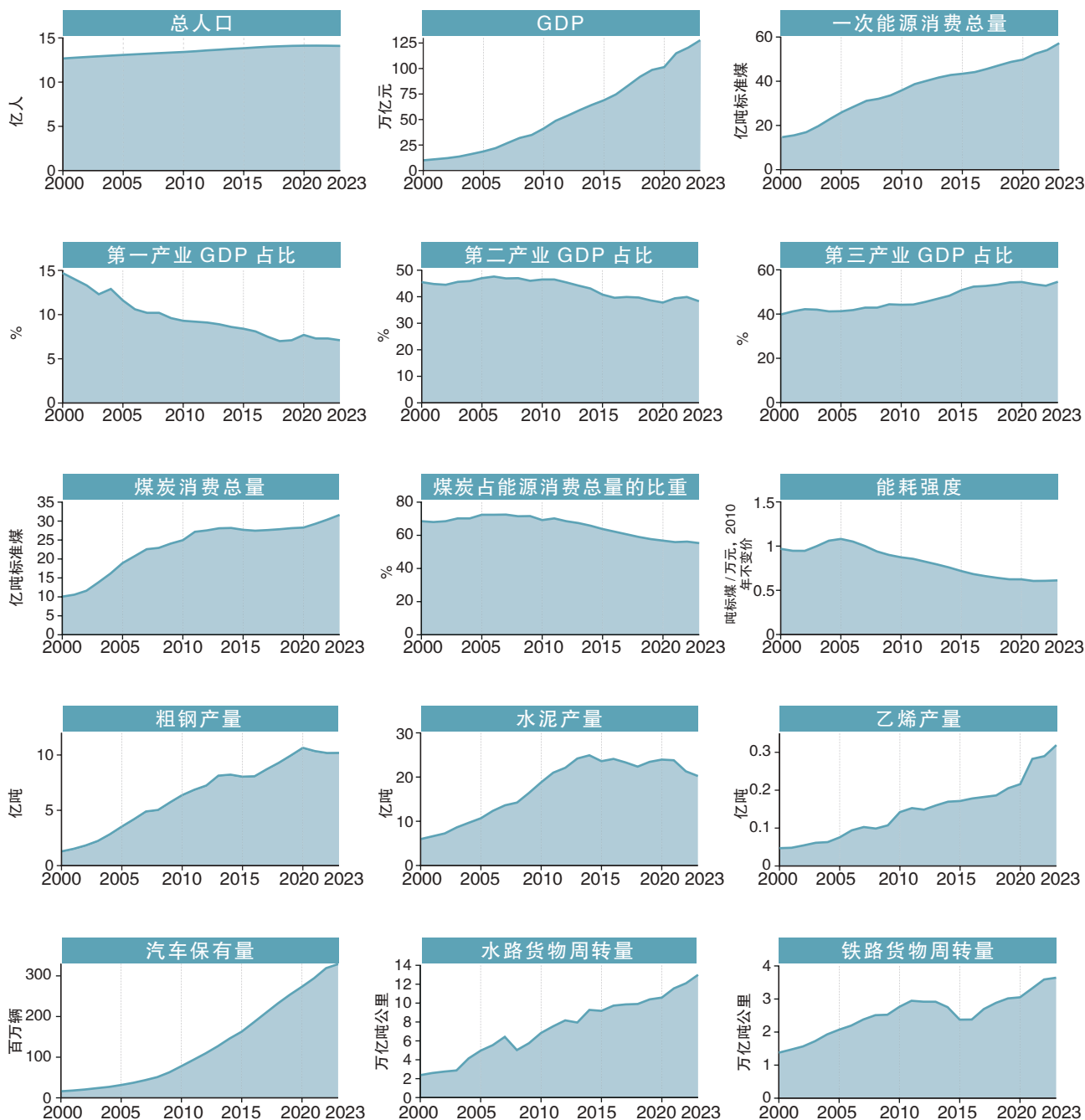


图 4-1 主要经济体能源结构与排放情况

中国共产党“二十大”报告、中共中央政治局二十届三中全会和2023年中央经济工作会议重点强调要加快建设新型能源体系，加强资源节约集约循环高效利用，提高能源资源安全

保障能力，加强煤炭清洁高效利用和可再生能源消纳利用，持续有力开展“碳达峰十大行动”，扎实推进绿色低碳发展。



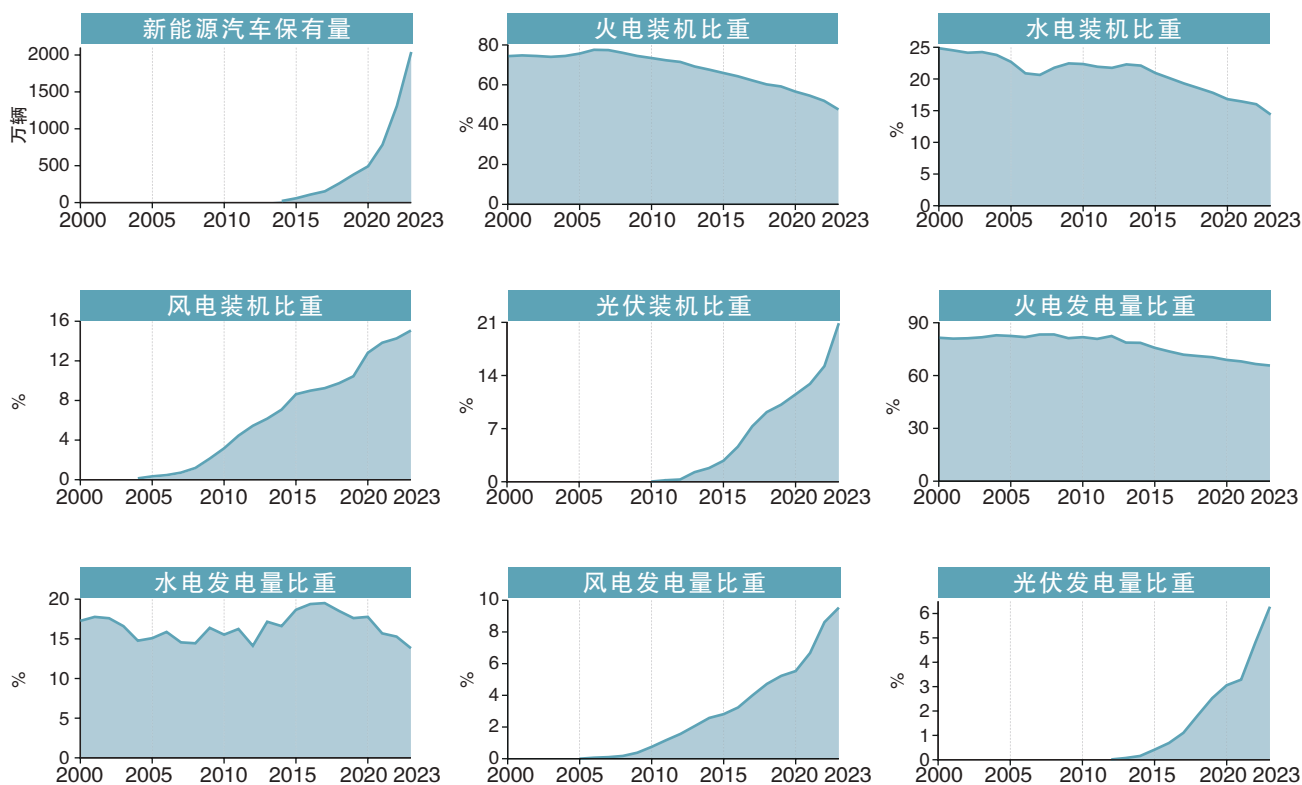


图 4-2 2000 年至 2023 年结构转型进展



4.2 产业结构转型

2023 年，我国经济社会发展已加快进入绿色化、低碳化的高质量发展阶段。我国新动能产业在稳健发展的同时，高端技术制造业和绿色低碳转型也取得了显著进展。为全面推进“双碳”目标的达成，稳基础、强动力，加快建设现代化产业体系，实现更高水平的发展，仍需在创新能力和高端制造方面持续发力。

行业进展

新动能产业水平稳健发展。2022 至 2023 年，我国国内生产总值从 121.0 万亿元增长至 126.1 万亿元，比上年增长 5.2%。第一产业增加值占国内生产总值比重为 7.1%，第二产业增加值比重从 2022 年的 39.9% 降低至 38.3%，第三产业增加值比重进一步增加，从 52.8% 增加到 54.6%。高技术制造业增加值比上年增长 2.7%，占规模以上工业增加值的比重从 15.5% 提高至 15.7%。全年新能源汽车产量 944.3 万辆，比上年增长 30.3%。太阳能电池（光伏电池）产量 5.4 亿千瓦，增长 54.0%。电动载人汽车、锂电池和太阳能电池等“新三样”产品合计出口 1.06 万亿元，首次突破万亿大关（国家统计局，2023，2024）。

推动重点领域能效持续提升，促进传统产业向高端化迈进。2023 年，国务院发布了《关于全面推进美丽中国建设的意见》，要求坚持全领域转型，加强绿色科技创新，推动钢铁、石化、化工、建材等重点行业实现绿色转型；

到 2027 年，新增汽车中新能源汽车占比力争达到 45%，老旧内燃机车基本淘汰。同年 9 月，习近平总书记首次提出“新质生产力”，指出新质生产力是“由产业深度转型升级而催生”。新质生产力涉及领域新技术含量高，代表着生产力的跃迁，是反映产业升级转型的重要标志。

质量强国、制造强国建设助力产业深入绿色低碳化。2023 年，国务院印发的《质量强国建设纲要》提出，加快低碳零碳负碳关键核心技术攻关，推动高耗能行业低碳转型，全面推行绿色设计、绿色制造、绿色建造，推动钢材、玻璃、陶瓷等传统建材升级换代。同年，工信部等八部门发布了《关于加快传统制造业转型升级的指导意见》，要求强化绿色低碳发展，深入实施节能降碳改造。到 2027 年，传统制造业高端化、智能化、绿色化、融合化发展水平明显提升，在全球产业分工中的地位和竞争力进一步巩固增强。工业企业数字化研发设计工具普及率、关键工序数控化率分别超过 90%、70%，工业能耗强度和二氧化碳排放强度持续下降。

我国已发布了一系列政策，较为系统地搭建了各重点行业绿色低碳转型的政策体系，明确了转型后的目标。如《工业领域碳达峰实施方案》提出，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 排在 2030 年前达峰。产业转型政策体系的完善虽然为产业转型提供了基础和保障，但我国制造业仍存在低端供给过剩和高端供给不足并存的问

题，仍然需要采取进一步的努力推进产业持续优化和政策的推进落实。例如，2023 年全年我国电炉钢总产量虽再次突破 1 亿吨，但比例仍不足 10%（目标 15%）。对比 2020 年，美国近 71% 的钢铁产量来自电弧炉，2023 年欧洲为 43%，全球这一比例为 26%。2023 年，我国主要再生有色金属品种产量达 1770 万吨，同比增长 6.95%，其中再生铝产量 950 万吨，同比增长 9.83%，约占电解铝产量的 22.8%，对比美国 2018 年再生铝占比为 35.8%。因此，我国产业转型仍然需要针对高端产业发展短板精准发力，进一步促进工业行业的绿色高质量发展。

表 4-1 2024 年代表性省（区、市）政府工作报告中产业结构调整相关政策与措施

	省（区、市）	产业结构调整相关措施亮点
	天津	加快推进新型工业化，提升产业链竞争力，推动政府“定链”向市场“成链”转变；加快绿色化转型，鼓励新能源企业、能源管理服务公司参与企业绿色化改造，以绿色标准促进企业有序实施清洁化生产和节能降耗改造，新创建 20 家国家级绿色制造单位；组织实施中新天津生态城绿色创新产业园区规划建设，积极引进国内外优质绿色低碳产业资源，推动绿创园、天津软件园建设，统筹绿色低碳经济和城市建设协同共进。
	内蒙古	坚持以新能源带动新工业、以先进制造业带动新型工业化；要锚定“再造一个工业内蒙古”目标加快壮大新能源产业；开发要扩量提速，消纳要破解瓶颈、坚决防止大规模弃风弃光，新型电力系统要加快构建，绿电绿证交易要全面推开，新能源装备制造要加力提效、量质齐升；新能源全产业链要力争完成投资 3000 亿元，新增装机规模 4000 万千瓦以上、提前一年实现超过火电装机规模的目标。
	上海	积极稳妥推进碳达峰碳中和，推动能耗双控向碳排放双控转变，加快实施煤电节能降碳改造，推动深远海海上风电建设，新建 1 万个电动汽车公共充电桩；积极推进虚拟电厂建设，着力降低电力峰谷差；落实超低能耗建筑项目 200 万平方米、公共建筑节能改造 400 万平方米；支持重点行业探索碳排放核算、碳足迹认证评价，淘汰落后产能 450 项；推进绿色制造标准体系和绿色低碳供应链体系建设，打造一批绿色工厂、绿色园区。
	安徽	乘势而上壮大汽车“首位产业”，推动汽车制造向“产品+服务”延伸，支持发展汽车新零售、充换电服务等新业态；加快新兴产业集群发展、未来产业前瞻布局，加快建设先进光伏和新型储能产业集群，开展下一代电池技术等领域技术攻关，推广“光伏+”综合应用；加快产业链供应链优化升级和传统产业转型升级，完善绿色制造和服务体系；建立健全分市碳排放统计核算方法，推进全省“双碳”管理一体化平台建设。

地方进展

习近平总书记指出，“绿色发展是高质量发展的底色，新质生产力本身就是绿色生产力。必须加快发展方式绿色转型，助力碳达峰碳中和。”这一重要论述为我国协同推进经济发展和环境保护指明了方向。2024年初，各省（区、市）在政府工作报告中相继提出要大力发展新质生产力，推动产业结构优化和增长动能转换，促进发展方式绿色低碳转型。在具体措施方面，各地提出了多种与降碳减污协同增效紧密相关的行动，为进一步促进新质生产力发展提供了坚实的保障（表 4-1）。通过推动包括新能源

汽车、动力电池、风电、光伏、氢能、新型储能等产业的发展优化，同时开展能源管理服务、参与碳排放权交易等市场化举措，加快传统产业的降碳改造。

省级层面，以安徽省为例，为通过优化产业结构促进新质生产力发展和降碳减污协同，安徽省立足自身优势，针对汽车产业、新兴产业、产业链供应链提出多项措施。支持汽车产业发展方面，提出支持汽车“皖军”做强做大，培育招引关键领域零部件优质企业，完善整车和零部件企业机制化对接平台，引导传统零部件企业向“新能源化”转型。加快发展新兴产业方面，提出加快建设先进光伏和新型储能产

	省（区、市）	产业结构调整相关措施亮点
	江西	实施打造国家生态文明建设高地三年行动计划，以更高标准打造美丽中国“江西样板”；大力发展绿色低碳经济，推进低碳、零碳、负碳技术开发应用，加大绿色工厂、绿色园区、绿色供应链管理企业培育力度，推动节能环保产业高质量发展，促进再生资源清洁回收、资源化利用和集聚发展；促进生态产品价值实现，深入实施林下经济发展“三千亿工程”、油茶产业高质量发展三年行动计划，做大做优森林旅游、森林康养产业。
	广东	坚持实体经济为本，制造业当家，建设更具国际竞争力的现代化产业体系，加快形成新质生产力；传统产业、新兴产业、未来产业并举，推进产业基础高级化、产业链现代化，促进制造业智能化、绿色化、融合化发展；拓展新能源汽车产业链，推动智能网联汽车测试应用，推进燃料电池汽车示范应用城市群建设；推动钢铁、石化、有色、建材、造纸等行业绿色化改造，创建绿色工厂、绿色园区、绿色供应链管理企业。
	贵州	巩固提升优势产业，加快建设“电动贵州”，发挥宁德时代、比亚迪等龙头企业“链主”作用，推动产业链企业技术和产品升级，提升本地配套能力；推动“动力电池+储能电池”双赛道发展，大力发展电池回收梯次利用产业，加快形成完整产业链；推动重点新能源整车项目落地建设，同步开展配套企业招引，加快新能源汽车推广应用，大力推进充换电基础设施建设；加快推进节能降碳，推动煤炭清洁高效利用，探索“零碳工厂”“零碳园区”建设。
	青海	加快实施减污降碳协同工程，建好零碳产业园区，加快重点行业企业绿色低碳节能改造；围绕“东数西算”“东数西储”“数据援青”，落实“数据要素×”三年行动计划，协同推进数字产业化和产业数字化，实施绿色算力基地建设工程，组建绿色算力研究中心，建设清洁能源和数字经济融合发展基地，增强泛共和盆地、环湖地区生态旅游、生态农牧、清洁能源、大数据产业等绿色发展动能，支持青南地区在高水平保护的基础上发展壮大绿色产业。

业集群，开展下一代电池技术等领域技术攻关，推广“光伏+”综合应用，实施氢能产业高质量发展三年行动计划。优化产业链和供应链方面，提出“一链一策”打造高水平现代化产业链，完善绿色制造和服务体系，加强绿色工厂、绿色工业园区创建，培育一批绿色供应链管理企业，“一企一策”实施重点企业节能降碳升级改造，建设一批零碳产业园。

市级层面，以山西省临汾市为例，由于城市经济发展对高化石能源消耗和高能耗工业行业高度依赖，临汾市空气质量水平排名长期处于全国倒数。为了实现空气质量持续改善，推动空气质量尽早达标，临汾市通过研究制定空气质量总体战略方案，细化电力、城市供热、钢铁、焦化、交通、农村散煤等

重点领域的减排措施。通过以空气质量改善目标为驱动，促进经济、能源、交通结构转型，在工业领域，率先提出“钢焦氢化”一体化的模式，推动炼钢行业能源高效利用和绿色化转型；在交通领域，积极探索建设“零排放货运示范区”，加速重型货运车辆新能源化进程；在能源领域，实践农村能源革命，通过因地制宜地采用分布式光伏、空气源热泵、生物质能等多种方式，实现农村散煤的可再生能源替代。在推进近中期措施的同时，临汾市也积极探寻减污降碳和可持续的多元发展之路，通过设计研究符合临汾地域和产业基础特点的氢能、精品钢、新能源重卡、现代物流、绿色文旅等产业的发展路径，在实践中探索低碳转型带来的协同增长潜力，在中远期推动经济社会的全面绿色转型。



4.3 交通结构转型

交通运输是国民经济中的基础性、先导性、战略性产业和重要服务性行业，也是国家生态环境保护、节能减排和应对气候变化的重点领域之一。交通运输绿色低碳转型工作涉及运输装备、运输组织、交通基础设施等众多领域，做好交通运输减污降碳工作对于推动交通运输高质量发展、加快建设交通强国具有重要意义。本小节指标既包括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的转型进展，又包括能效提升、运输组织效率提升、管理强化等交通领域重要低碳任务的发展情况。

运输结构逐步优化。2023 年，全国铁路货运总发送量 50.35 亿吨、同比增长 1.0%，水路货物运输量 93.67 亿吨、同比增长 9.5%，公路货物运输量 403.37 亿吨、同比增长 8.7%，货物“公转铁”、“公转水”与车辆“油转电”、“油转氢”双向发力，共同助力绿色低碳运输体系的加快构建；全国港口集装箱铁水联运量完成 1018.36 万标准箱，同比增长 15.9%；铁路煤炭发送量 27.81 亿吨，同比增长 1.9%，铁路集装箱发送量 7.91 亿吨，同比增长 7.4%，铁路承担大宗货物和集装箱的运输潜力逐渐释放；沿海主要港口煤炭、铁矿石利用绿色运输方式输运比例分别超过 90%、78%（交通运输部，2024；国家铁路局，2024）。

绿色出行持续推进。2023 年，6 批 76 个城市获得“国家公交都市建设示范城市”称号，30 个城市作为“十四五”期国家公交都

市建设示范工程创建城市；全国城市公共汽车客运量 380.50 亿人次，同比增长 18%，城市轨道交通客运量 293.89 亿人次，同比增长 52.2%；城市轨道交通运营线路 308 条，运营里程 10158.6 公里，13 个城市轨道交通占公共交通的客运量比重超过 50%；北京、上海、广州、深圳、成都等城市积极探索公共出行领域碳普惠激励机制；全国铁路旅客发送量 38.55 亿人次，同比增长 130.4%，近 10 年全国铁路客运量年均增速超过 6%，公路营业性客运量 110.12 亿人次，同比增长 22.4%（交通运输部，2024；国家铁路局，2024）。

交通行业能效持续提升。2023 年，中国境内 119 家乘用车企业共生产/进口乘用车 2250.2 万辆，平均燃料消耗量实际值（WLTC 工况）为 3.78 升/100 公里，其中 95 家境内乘用车生产企业累计生产乘用车 2178.7 万辆，

平均燃料消耗量实际值为 3.68 升 /100 公里，24 家进口乘用车供应企业进口乘用车 71.6 万辆，平均燃料消耗量实际值为 7.34 升 /100 公里（工信部等，2024）；国家铁路单位运输工作量综合能耗 3.81 吨标准煤 / 百万换算吨公里，同比下降 3.3%（国家铁路局，2024）；民航吨公里油耗 0.292 公斤，较 2005 年下降 14.3%，机场平均每客能耗和每客 CO₂ 排放较基线（2013–2015 均值）分别下降 38.4% 和 60.5%（中国民用航空局，2024）。

清洁能源替代稳步推进。2023 年，全国新能源汽车保有量达 2041 万辆，其中纯电动汽车占 76.04%；新能源汽车产销量分别达到

958.7 万辆和 949.5 万辆，同比增长 35.8% 和 37.9%，市场占有率达到 31.6%；全国充电基础设施保有量达 859.6 万台，同比增长 65%，6328 个高速公路服务区配建了充电设施，占服务区总数的 95%，北京、上海、河北、安徽等 15 个省市高速公路服务区已全部具备充电能力；全国铁路电气化率 75.2%，铁路电力机车 1.46 万台，占 65.2%（交通运输部，2024）；全国机场场内电动车辆设备 12790 万台，充电设施 5802 个，电动车辆占比 26.4%，机场电力、天然气、外购热力占比达到 89.0%（中国民用航空局，2024）；加快推动岸电常态化使用，长江经济带船舶靠港使用岸电超过 1.24 亿千瓦时；国内首艘氢燃料电池动力船舶“氢舟 1 号”实现首航。

双碳管理不断强化。2023 年，《关于进一步构建高质量充电基础设施体系的指导意见》、《加快建设交通强国五年行动计划（2023–2027 年）》、《推进铁水联运高质量发展行动方案（2023–2025 年）》、《船舶制造业绿色发展行动纲要（2024–2030 年）》、《绿色航空制造业发展纲要（2023–2035 年）》等政策文件相继印发；15 个城市启动首批公共领域车辆全面电动化先行区试点；《关于延续和优化新能源汽车车辆购置税减免政策的通知》印发实施。

未来几年，我国运输需求仍将呈现增长态势，碳排放总体上仍处于惯性增长期，应以持续推动交通运输高质量发展和绿色低碳转型为主线，把握交通能源融合发展和交通运输大规模设备更新政策机遇，积极稳妥推进交通用能清洁低碳多元发展，高质量建设绿色交通基础设施，构建绿色高效的综合运输体系，不断建立健全绿色交通政策法规、体制机制、标准规范、监测统计等体系。



4.4 建筑能源系统低碳转型

2024 年 3 月，国务院办公厅转发了国家发展改革委、住房城乡建设部《加快推动建筑领域节能降碳工作方案》，明确提出了建筑领域节能降碳工作到 2025 年和 2027 年两个阶段的目标，提出了 12 项重点任务，包括提升城镇新建建筑节能降碳水平、推进城镇既有建筑改造升级、强化建筑运行节能降碳管理、推动建筑用能低碳转型、推进供热计量和按供热量收费、提升农房绿色低碳水平、推进绿色低碳建造、严格建筑拆除管理、加快节能降碳先进技术研发推广、完善建筑领域能耗碳排放统计核算制度、强化法规标准支撑和加大政策资金支持力度等工作。国务院文件进一步强化了建筑领域节能降碳工作要求，对于推动建筑能效提升及建筑能源系统低碳转型具有重要作用。

2022 年我国建筑运行过程中的碳排放总量为 22 亿吨 CO₂，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，占比 21%。建筑运行用电量显著增加，超过 2.3 万亿千瓦时，电力间接碳排放增长至 12.6 亿吨 CO₂，占比

58%。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，2022 年占比 21%（图 4-3）。

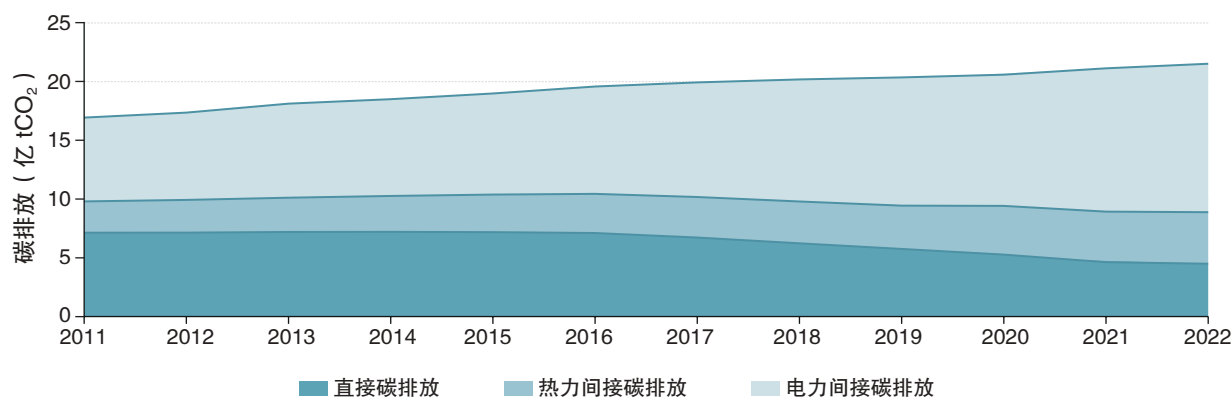


图 4-3 中国建筑运行逐年碳排放（2011 年至 2022 年）

建筑运行碳排放同时受建筑运行能耗、建筑用能结构与能源转换效率的影响，对比各国建筑领域的碳排放总量和强度（图 4-4）可以发现，由于我国建筑运行能耗较低，所以建筑运行的人均碳排放和单位面积碳排放低于大部分发达国家，我国人均碳排放低于美国的三分之一，是加拿大、日本、韩国的二分之一，而从单位建筑面积碳排放来看，我国也处于较低水平。但是，虽然我国的建筑用能强度低于法国和瑞典等国，但碳排放强度却高于这些国家，这主要是由于法国、瑞典低碳的能源结构（法国以核电为主，瑞典以水电为主）使其实现了建筑领域的低碳目标。这进一步体现了建筑领域的节能低碳工作不仅要注意建筑节能、能效提升，也要实现能源系统的低碳化和建筑用能结构的低碳化转型。

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应顺应工作形势的变化，不能仅关注建筑能效提升，更应将工作重心放在建筑能源系统低碳转型方面。

推进建筑能效提升，一直以来是我国开展建筑节能管理的主要工作。一方面，逐步提高新建建筑节能设计标准，城镇新建居住建筑节能目标从 30% 逐步提高到 50%、65%、75%，城镇新建公共建筑节能目标从节能 50% 提高到 65%、72%。在逐步提高节能标准的同时，全国特别是北方寒冷地区部分省市开始推广超低能耗建筑、近零能耗建筑。

另一方面，针对量大面广的既有建筑，以既有公共建筑和北方地区城镇既有居住建筑为重点，推动既有建筑节能运行与改造，逐步成为建筑节能工作重点，形成了从单纯抓“增量”到抓“增量”与“存量”并重的工作格局。

在下一阶段，建筑能源系统的低碳转型工作日益重要，一是要推动建筑用能的全面电气化，围绕生活热水、供暖、炊事等三类建筑用能需求，全面推动以电代煤、电代气，逐步消除建筑用能直接排放。在生活热水方面，系统评估居住建筑和公共建筑中现有的集中式生活热水系统运行状况，逐步采用分散式电热水器、

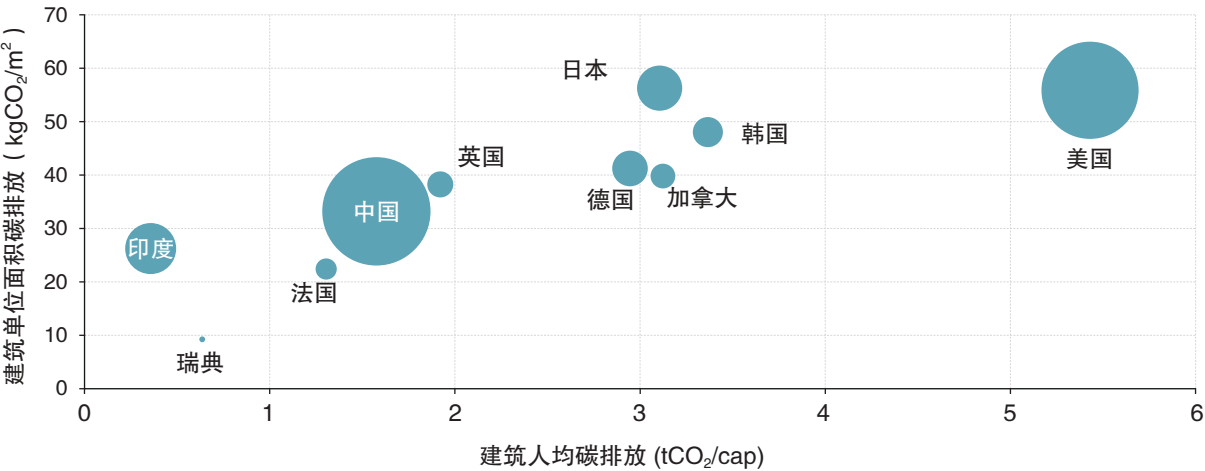


图 4-4 中外建筑运行碳排放对比 (2021 年)

注：圆圈大小表示建筑运行碳排放总量

高效空气源热泵等技术进行替代；在供暖方面，严寒寒冷地区城市应系统评估城市内部或周边的热电联产和工业余热资源条件，在城市供热管网不能覆盖的区域，尤其在农村地区，积极推广空气源热泵等采暖电气化技术，并从提高室内舒适度、降低农户的采暖成本、保障电力安全等角度出发，与建筑围护结构保温、建筑需求响应技术等共同实施，引导有条件城市率先制定出台建筑消费化石能源的限制、禁止性措施；在炊事用能方面，一方面随着城镇居民越来越多地选择在外用餐，炊事能耗从住宅向公建转移，因此优先鼓励公共建筑炊事电气化，另一方面，居民用户的炊事习惯改变是住宅炊事电气化的难点，需要加以引导，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，同时积极开发推广高效电炊具，促进建筑炊事用能的电气化。

同时，要以新建公共建筑为突破口，围绕公共建筑电气化，聚焦公共建筑用能、产能、储能等各环节开展现状调研，编制覆盖公共建筑电气化现状、技术成熟度、产品成熟度和标准规范等方面的调研报告，制定公共建筑全电气化设计标准框架和路线图。依据现状调研成果，结合在广泛调研基础上形成的标准框架和路线图，创新完善建筑电气化设计流程与方法，编制建筑全电气化设计标准，构建覆盖全专业的建筑电气化设计与技术体系。选取不同类型的适合项目，开展“新建公共建筑全电气化设计标准”试点示范应用，编制评价标准，通过实际项目检验研究成果，支撑建筑领域全电气化工作深化开展与推广。

其次，要全面挖掘建筑领域应用可再生能源的潜力，特别是太阳能光伏产品的建筑应用，引导各城市开展本地区建筑及其附属设施安装

太阳能光伏产品的空间资源普查及应用潜力评估，并基于评估结果研究制定建筑领域应用太阳能光伏产品的规划、行动计划，结合城市总体规划、住房建设规划等，划定太阳能光伏应用管理目标单元，明确发展目标、重点任务和工作计划安排。根据建筑利用条件和用能需求，推动太阳能光伏与建筑本体、建筑附属设施、城市基础设施等要素融合发展，推动新建建筑实施光伏建筑一体化，实现同步设计、同步施工、同步使用。城镇新建公共建筑逐步强制安装太阳能光伏系统，鼓励具备条件的新（改、扩）建筑加装太阳能光伏系统。推动太阳能光伏应用项目规划建设管理全过程质量提升。

另外，要重视农村新型能源系统建设，充分发挥农村的空间资源和可调蓄用电资源，助力能源系统全面低碳转型。开展农村建筑节能工作、提升农房绿色低碳水平，同时结合电气化进程建成农村新型能源系统，是建筑领域低碳转型与空气污染治理的重要领域。我国农林牧区的建筑屋顶可安装光伏 19.7 亿千瓦，全年发电接近 3 万亿千瓦时，是发展光电的最主要空间。建成农村分布式光伏系统，可以通过屋顶光伏发电全面满足农村的生产、生活用能，余电还可经调蓄后送电上网。目前一些北方农村发展屋顶光伏，每户最少安装容量为 20 千瓦，年发电接近 3 万千瓦时，远超未来一户家庭的生产、生活、交通所需的用电量。建立以屋顶式光伏为基础的农村新型能源系统，由农村屋顶光伏发电来全面支持农村的生产、生活、交通用能，可实现既能替代煤、柴油和天然气，也不使用生物质能源的效果，从而实现农村清洁用能，全面消除农村建筑用能直接排放，同时改善农村环境，恢复绿水青山。同时，利用光伏可将生物质加工成商品燃料进入市场流通，并结合余电上网售电进一步增加农民收

入。按照这种模式，建成以屋顶光伏为基础的农村新型能源系统，可以在为农民生活和农业生产提供绿色、低碳的低成本能源的同时，提升农村居民生活水平，助力乡村振兴。目前这一系统已经在山西芮城庄上村成功示范，并计划在山西、川西等其他地方的农村进一步推广。但目前分布式光伏仍面临着电网灵活性不足、配电容量不足的瓶颈，全国有大量地区成为限

制分布式光伏发展的“红区”。为破解这一问题，未来应加速推进农村电气化进程，通过各类政策补贴增加农户的分布式储能，使农户能够在光伏发电高峰期储存多余电量，并在晚上用电高峰期送电上网，替代调峰火电，从而破解“红区”限制，实现农村屋顶光伏系统的进一步发展。



4.5 碳捕集利用与封存技术

我国高度重视碳捕集利用与封存（CCUS）技术发展，近年来各环节技术取得突破，新技术类型不断涌现，成本能耗持续下降，系列示范项目落地运行，相关国家政策和发展规划进一步建立完善。

我国 CCUS 各相关技术持续取得积极进展，总体与全球水平接近，并展现中国特色（图 4-5）。在捕集技术方面，工艺不断向低能耗、

低成本方向更新迭代，除固体吸附、化学链、直接空气捕集仍处于中试阶段之外，其他多类技术均已达到项目示范或商业化水平。其中，

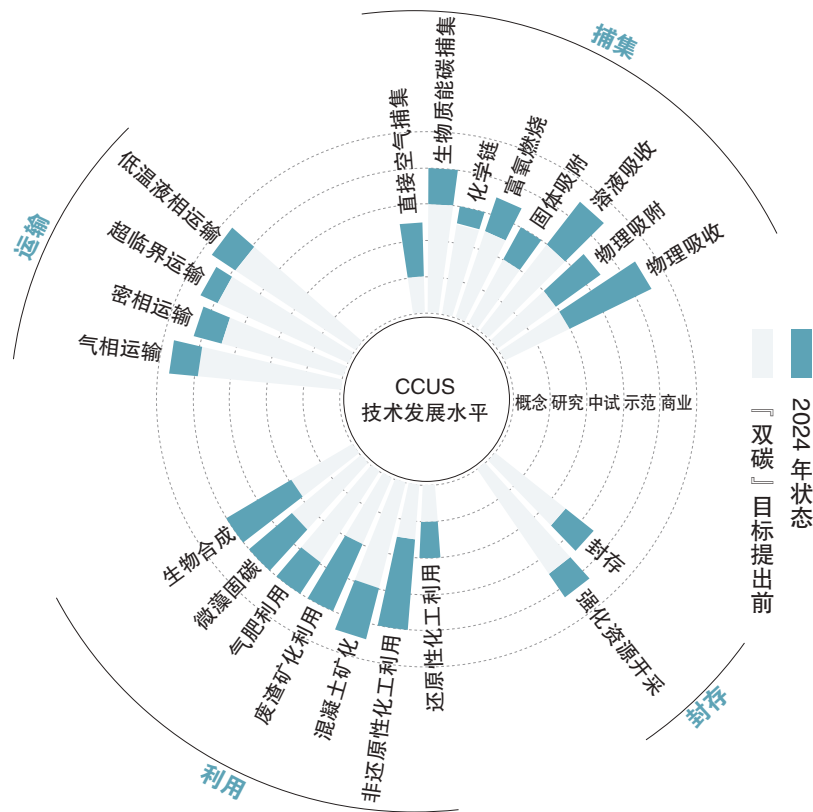
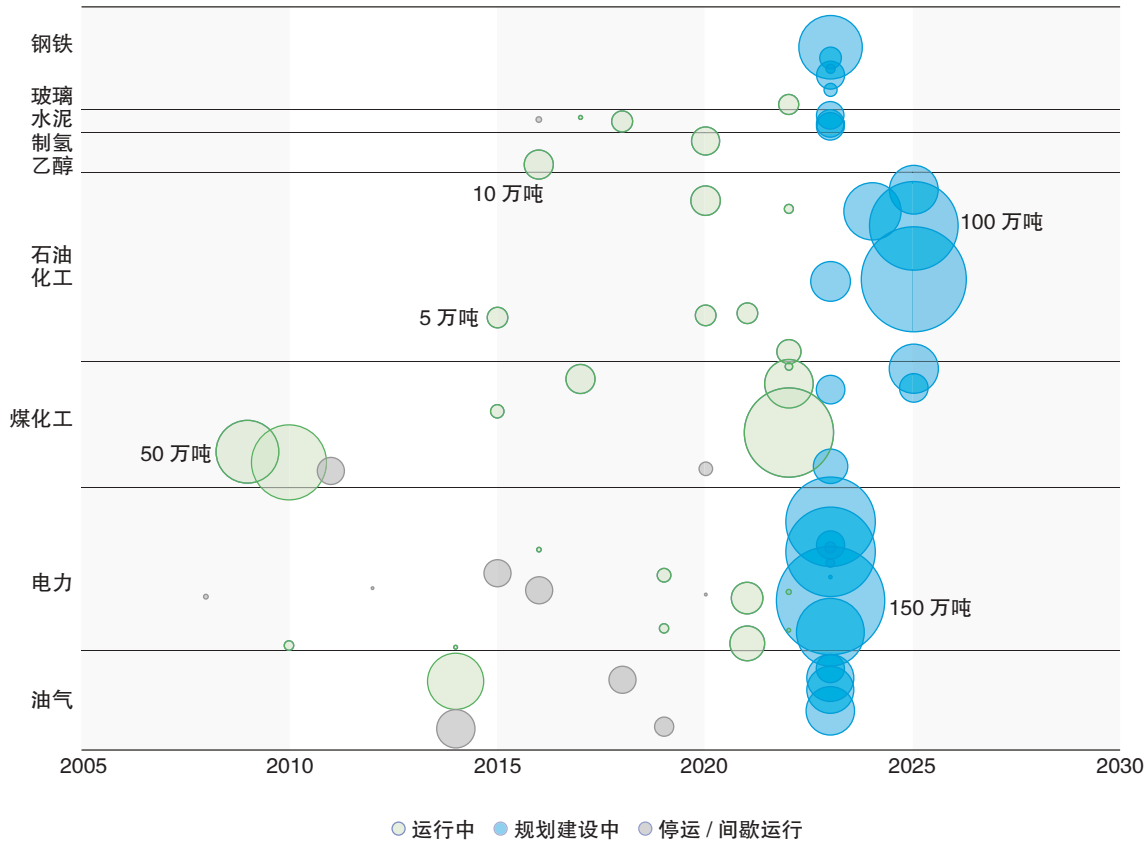


图 4-5 中国 CCUS 各环节主要技术发展水平对比

溶液吸收技术取得较大突破，50 万吨 / 年的燃煤电厂示范工程成功将再生热耗从 3.8 GJ/tCO₂ 降至 2.4 GJ/tCO₂ 以下，下降幅度接近 40%。在运输技术方面，公路罐车和船舶运输均已达到商业化水平；管道输送突破关键技术瓶颈，管输压力迈入超临界范围，规模化趋势不断加强，气相 - 超临界 - 密相管道均已建成投运。化学、生物、矿化等多类利用技术已开展工业示范或商业应用，总体领先于国外水平。地质利用与封存技术中，CO₂ 驱油、铀矿浸采等强化资源开采技术达到国际先进水平；深部咸水封存技术已实现大规模项目示范。此外，全流程集成优化技术正快速发展，但与国际先进水平相比仍存在一定差距。

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，集群化趋势明显。据不完全统计，中国已投运和规划建设中的 CCUS 示范项目总数超过百个，累计捕集规模超过 500 万吨 / 年（图 4-6），注入总量超过 200 万吨 / 年。近年来，CCUS 示范项目规模明显扩大，十万吨级及以上项目超过 50 个，多个百万吨级以上项目正在规划和建设中。例如，捕集规模达 50 万吨 / 年的煤电碳捕集项目自 2023 年 6 月正式投运以来长期稳定运行。2022 年以来新投运的 45 个项目广泛地覆盖了 12 个行业，除电力、钢铁、水泥等传统行业继续扩大部署规模外，玻璃、印染、石灰、石化和生物质电厂等行业均已成功投运首个示范项目。在实现数量和规模跨越式增长的同时，



我国也开始谋划 CCUS 集群化部署战略，目前正在规划建设鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、大亚湾、长三角等多个千万吨级 CCUS 产业集群。全球范围内，CCUS 项目数量和捕集规模同样增长迅速。根据全球碳捕集与封存研究院 GCCSI 的 2024 年度报告，截至 2024 年 7 月，全球规划、在建和运营的 CCUS 管道项目设施数量共计 628 个，捕集能力约 4.2 亿吨 / 年，与 2023 年相比，总数量增加了 236 个，捕集能力增加了 0.6 亿吨 / 年。

随着示范项目增多和技术成熟度的提高，我国 CCUS 技术成本稳步下降，与国外相比具备一定成本优势。针对 CCUS 全链条技术，现阶段全球主要碳捕集源（煤电、燃气、煤化工、天然气加工、钢铁、水泥等）的碳避免成本约为 20~190 美元 / tCO₂。我国传统电厂、整体煤气化联合循环（IGCC）电厂的碳避免成本分别约为 60 和 80 美元 / tCO₂，处于全球最低水平；我国天然气联合循环（NGCC）电厂、钢铁厂、水泥厂、化肥厂的碳避免成本分别约为 100、70、130 和 30 美元 / tCO₂，也处于全球相对低位水平。此外，直接空气捕集成本呈现更大幅度降低趋势，过去十余年降幅高达 60%–80%；从 2011 年捕集成本超过 600 美元 / tCO₂，大幅降低至近年来约 100–220 美元 / tCO₂，但相比于固定排放源整体仍然处于较高水平。

我国对 CCUS 技术的重视程度日益增加，颁布了战略规划、发展纲要、标准法规、路线图等政策文件全方位支持 CCUS 技术研发、试验和项目示范。现阶段，我国已发布 CCUS 政策相关文件多达 80 余条，尤其在“双碳”目标提出以来，相关政策数量出现爆发性增长。其中，

碳达峰、碳中和“1+N”政策体系为 CCUS 政策顶层设计奠定了坚实基础，对于促进技术研发和未来规划起到宏观指导作用。2023 年 8 月，国家发改委等多部门联合发布的《绿色低碳先进技术示范工程实施方案》，明确了利用中央政府预算为选定 CCUS 项目提供资金支持。2024 年 7 月，国家发改委发布的《煤电低碳化改造建设行动方案（2024–2027 年）》明确了煤电减排的三个主要战略：绿氨掺烧、生物质掺烧或实施 CCUS。国际合作方面，2023 年 11 月中美两国发表关于加强合作应对气候危机的阳光之乡声明，承诺到 2030 年，两国将分别推动至少 5 个工业和能源等领域的 CCUS 大规模合作项目。此外，国际社会也在积极出台 CCUS 补贴政策，主要通过直接资金支持来激励相关技术的创新，并对负排放技术给予更高的激励。其中，2022 年美国通过《通胀削减法案》提高了原有 45Q 税收抵免的激励力度，并特别增加了针对直接空气捕集项目的信贷金额；2024 年英国宣布在未来 25 年为其首批碳捕集项目提供高达 217 亿英镑的资金支持，以及引入 CO₂ 运输和封存的许可制度，帮助建立碳捕集基地。

总体来看，我国在 CCUS 技术研发、项目示范和激励政策等方面发展迅速且成效显著，但当前阶段 CCUS 各环节的技术成本及能耗水平仍有较大下降潜力，针对性激励政策仍有待进一步强化。此外，以实现负排放为代表的生物质耦合碳捕集与封存、直接空气捕集技术仍处于研发试验阶段，与国外成熟的项目示范有明显差距。未来，应从多维度、深层次加强薄弱技术环节的重点攻关，强化全链条 CCUS 示范工程和超大型 CCUS 产业集群建设的激励措施，以推动 CCUS 技术在我国碳中和进程中发挥更加重要的作用。

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。本指标基于近年来中国电力系统低碳转型方面的进展数据，介绍了中国在构建新型电力系统方面的积极成效，并对新型电力系统的特征和未来技术发展方向进行了探讨。

电力生产平稳增长。2023 年，全国发电量达到 9.45 万亿千瓦时，较上年增长 6.9%。其中风光可再生能源发电量达 1.47 万亿千瓦时，约占全部发电量的 15.5%；火电发电量 6.26 万亿千瓦时，约占全部发电量 66.2%，同比增长 6.4%；核电发电量 4347.2 亿千瓦时，同比增长 4.1%。总可再生能源发电量接近 3 万亿千瓦时，接近全社会用电量的 1/3。发电装机容量稳步上升，截至 2023 年末全国发电装机容量 291965 万千瓦，比上年末增长 13.9%。

可再生能源装机占比持续提升。截至 2023 年底，全国可再生能源装机突破 15 亿千瓦，在全国发电总装机中的比重突破 50%，装机规模已超过火电装机，其中，水电装机 4.21 亿千瓦，风电装机 4.41 亿千瓦，太阳能发电装机 6.09 亿千瓦（国家统计局，2024）。可再生能源装机已连续多年稳居世界第一，截至 2023 年 12

月底，中国可再生能源总装机在全球可再生能源发电总装机中的比重接近 40%；2023 年全国可再生能源新增装机 3.05 亿千瓦，占全国新增发电装机的 82.7%，占全球新增装机的一半，超过世界其他国家的总和。

新能源消纳水平不断提高。2023 年我国平均风电利用率为 97.3%，平均光伏发电利用率为 98.0%，全年全国弃风电量 224 亿千瓦时，较 2017 年弃风率下降了 9.3%，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 2023 年底抽水蓄能累计装机容量达 5019 万千瓦，较 2021 年增长 44.21%，《抽水蓄能中长期发展规划（2021-2035 年）》印发，预计到 2030 年我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、

锂离子储能、液流电池储能等新型储能技术将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，全国新增 220 千伏及以上输电线路长度 3.81 万千米；新增 220 千伏及以上变电设备容量（交流）2.57 亿千伏安；新增直流换流容量 1600 万千瓦，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，以确能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，风光发电占比将达到 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、CCUS 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，到 2023 年底，我国生物质能发电装机容量累计达 4414 万千瓦，已连续



五年位居世界第一，预计未来将作为重要的灵活性资源对构建新型电力系统提供支撑。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 通信等数字化技术更快融入电力系统，加速传统电力行业业务数字化转型。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 污染去除技术提质增效

2013 年以来，随着《大气污染防治行动计划》、《打赢蓝天保卫战三年行动计划》、《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》等污染防治专项政策的先后出台，中国大气污染防治工作全面快速开展，推动全国及重点区域环境空气质量取得明显改善。2023 年，国务院印发《空气质量持续改善行动计划》，强调要继续坚持以精准、科学、依法治污为引领，将结构调整、末端治理、强化监管等措施落到实处，持续深入打好蓝天保卫战。

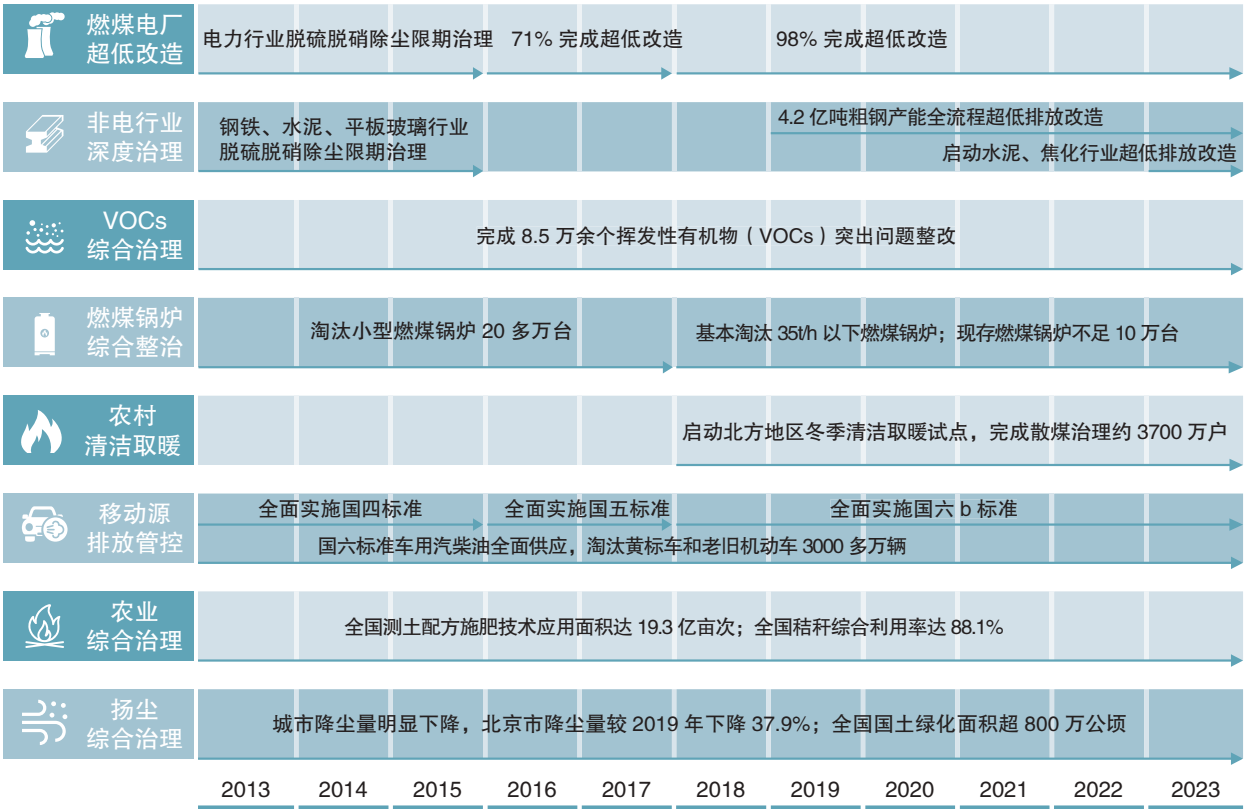


图 4-7 2013 年至 2023 年污染治理指标进度

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 2023 年底，全国达到超低排放限值的煤电机组已达 11.8 亿千瓦，占全国煤电总装机容量 98%（前瞻网，2024）。

2. 非电行业深度治理。2013 年以来，中国已制修订水泥、石化、涂料油墨、制药等多个行业排放标准，并开展工业窑炉的深度治理。2019 年以来，中国政府大力推进钢铁行业超低排放改造工作，截至 2023 年底，全国已累计完成 4.2 亿吨粗钢产能全流程超低排放改造，4 亿吨粗钢产能实现烧结球团脱硫脱硝、料场封闭等重点工程改造（生态环境部，2024b）。2023 年，水泥行业、焦化行业超低排放改造工作启动（生态环境部，2023a），非电行业治理持续推进。

3. 挥发性有机物治理。“十三五”以来，中国挥发性有机物（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 2023 年底，全国累计完成 8.5 万个 VOCs 突出问题整改（生态环境部，2024b）。

4. 燃煤锅炉整治。2013 年以来，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），每小时 35 蒸吨以下燃煤锅炉已被基本淘汰（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 2023 年底，北方地区完成散煤治理约 3700 万户（中国人大网，2024；人民网，2023）。

6. 移动源排放管控。机动车排放标准进一

步加严，自 2023 年 7 月 1 日起，全国范围内全面实施轻型汽车国六排放标准 6b 阶段和重型柴油车国六排放标准 6b 阶段，禁止生产、进口、销售不符合国六排放标准 6b 阶段的汽车（生态环境部等，2023）。同时，机动车“国七”排放标准制订工作研究启动。连续六年开展机动车检验检测机构“双随机、一公开”监督检查，督促 13 家车企实施环保召回，共涉及车辆 326 万辆（生态环境部，2024b）。

7. 农业综合治理。深入实施秸秆综合利用行动，秸秆露天焚烧得到有效控制，持续提升全国秸秆综合利用效能，2023 年全国秸秆综合利用率达 88.1%，肥料化、饲料化、能源化、基料化、原料化利用率分别达到 57.6%、20.7%、8.3%、0.7% 和 0.8%（农民日报，2024）。

8. 扬尘综合治理。2013 年以来，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。城市降尘量明显下降，2023 年北京市全市降尘量为 3.6 吨/平方公里·月，较 2019 年下降 37.9%；“十三五”以来，在重点区域流域部署开展的历史遗留废弃矿山生态修复工程已带动全国累计修复治理面积 32 万公顷（自然资源部，2024）；2023 年，全国国土绿化面积超 800 万公顷，全国全年完成造林 399.8 万公顷、种草改良 437.9 万公顷、治理沙化石漠化土地 190.5 万公顷（全国绿化委员会，2024）。

近年来，中国在电力、工业、交通、用地等多部门发力深入推进大气污染防治工作。以工业部门为例，中国不断加严重点行业大气污染物排放标准限值要求，超低排放改造政策的实施有效推动了国内大气污染防治技术市场的快速发展与企业大气污染防治装备应用的不断

升级。当前中国电力、钢铁、水泥、焦化等行业大气污染物排放标准限值要求在世界范围内均已属最严行列（表 4-2）。

下一步，随着电力、工业部门各行业超低排放改造技术的推广实施，以及交通部门国六 b 阶段标准的实施，这些领域的末端治理减排空间将被逐步压缩，常规大气污染物减排潜力的挖掘工作重心，尤其是减污降碳协同治理的工

作重心，应更多转向以能源转型和技术革新为根本的结构调整领域。促进以绿色转型升级为引领的大气污染治理提质增效将是未来进一步降低空气污染的重要方向。此外，如何在有效保障能源安全与粮食安全的基础上，采取更有力的政策和措施，加强油气行业 VOCs 和甲烷、农业部门氨与甲烷、N₂O 等协同控制，也是大气污染物与温室气体协同减排领域应受到关注的问题。

表 4-2 中国重点行业超低排放标准与国外排放标准对比

行业	国家	烟尘（mg/m ³ ）	SO ₂ （mg/m ³ ）	NO _x （mg/m ³ ）
煤电	中国	10	35	50
	欧盟	3-22	25-400	80-330
钢铁 （以炼铁为例）	中国	10	35	50
	欧盟	10	200	100
水泥	中国	10	35	50
	欧盟	10-20	50-400	200-800
焦化	中国	10	30	150
	欧盟	1-20	200-500	350-650







大气成分源汇 及减排路径

推进减污降碳协同增效，是贯彻新发展理念促进经济社会发展全面绿色转型的重要举措。把握减污与降碳的同源性特征，推动电力供热、工业、交通和民用行业有序转型，是未来实现碳中和与清洁大气协同治理的关键。本章将从行业和能源视角出发，追踪当前我国二氧化碳和大气污染物的协同减排进展，并与全球其他主要国家的排放趋势进行比较；解析中国陆地生态系统碳汇变化的驱动因素，讨论陆地碳汇对实现碳中和目标的潜在贡献；基于资源禀赋、能源消费结构等角度，深入探讨我国各省实现协同治理的关键影响因素，提出差异化的协同减排路径。

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。本指标基于多尺度排放清单模型 MEIC，从行业和能源角度分析中国 2000–2023 年二氧化碳排放的动态变化趋势及主要驱动因素。进一步对比近十年中国及全球主要国家和地区碳排放变化趋势和差异来源，分析中国碳减排特征及面临挑战。

图 5-1 展示了 2000–2023 年中国 CO₂ 排放变化趋势和行业贡献 (Xu et al., 2024)。2020 年之前，中国 CO₂ 排放经历了由快速增长阶段向平缓增长阶段的过渡。中国 CO₂ 排放增速下降主要源于以“数量”向“质量”转变的新常态发展机制，以及中国逐步深化的大气污染控制行动的协同减排效应 (Shi et al., 2022)，中国各行业及 CO₂ 排放总量逐步进入平缓增长阶段。2020 年及之后，受疫情封控及后期经济恢复和刺激作用的影响，中国 CO₂ 排放增速有所增加，2020 至 2023 年间碳排放总量增加了约 11.51 亿吨，年均增速 3.5%。

2020 至 2023 年间，除了民用部门 CO₂ 排放有所降低，电力、热力、工业和交通部门的碳排放均有不同程度的增加。近年来，尽管中国持续推进电力系统可再生能源改革，但是短期内以燃煤发电为主的电力供应格局仍很难改变；2020 至 2023 年，中国火力发电量增加了 18%，相关 CO₂ 排放增加了 7.01 亿吨，贡献了研究期内 CO₂ 排放增加量的 60.9%。为推动居民生活消费

的持续改善，供热部门能源消费量及其 CO₂ 排放持续增加；2000 至 2020 年供热部门 CO₂ 排放占全行业总排放比重逐步从 2000 年的 4.6% 上升到 2020 年的 8.9%，2020 至 2023 年期间进一步增加至 10.1%，绝对增量 2.44 亿吨，占 2020 至 2023 年全行业总增量的 21.2%。

2013 年之后，在大气污染控制减排行动的协同作用下，工业能效持续提升，工业部门 CO₂ 排放基本平稳。2020 至 2023 年间，相对于电力和热力部门，工业部门 CO₂ 排放增幅较小。在经济增长恢复和水泥减产的综合作用下，工业部门 CO₂ 排放总量仅增加 0.65 亿吨，占全行业排放增量的 5.7%。交通部门 CO₂ 排放维持在全国排放总量的 7–9% 之间；2020 年，在经历疫情影响的短暂下降后，交通部门 CO₂ 排放迅速恢复，尤其是道路交通，2020–2023 年间增加了 2.08 亿吨，贡献了全行业排放增加量的 18.1%。清洁能源改造是民用部门碳排放持续降低的重要驱动力；2020 至 2023 年这一趋势进一步加速，民用燃煤相关的 CO₂ 排放降低

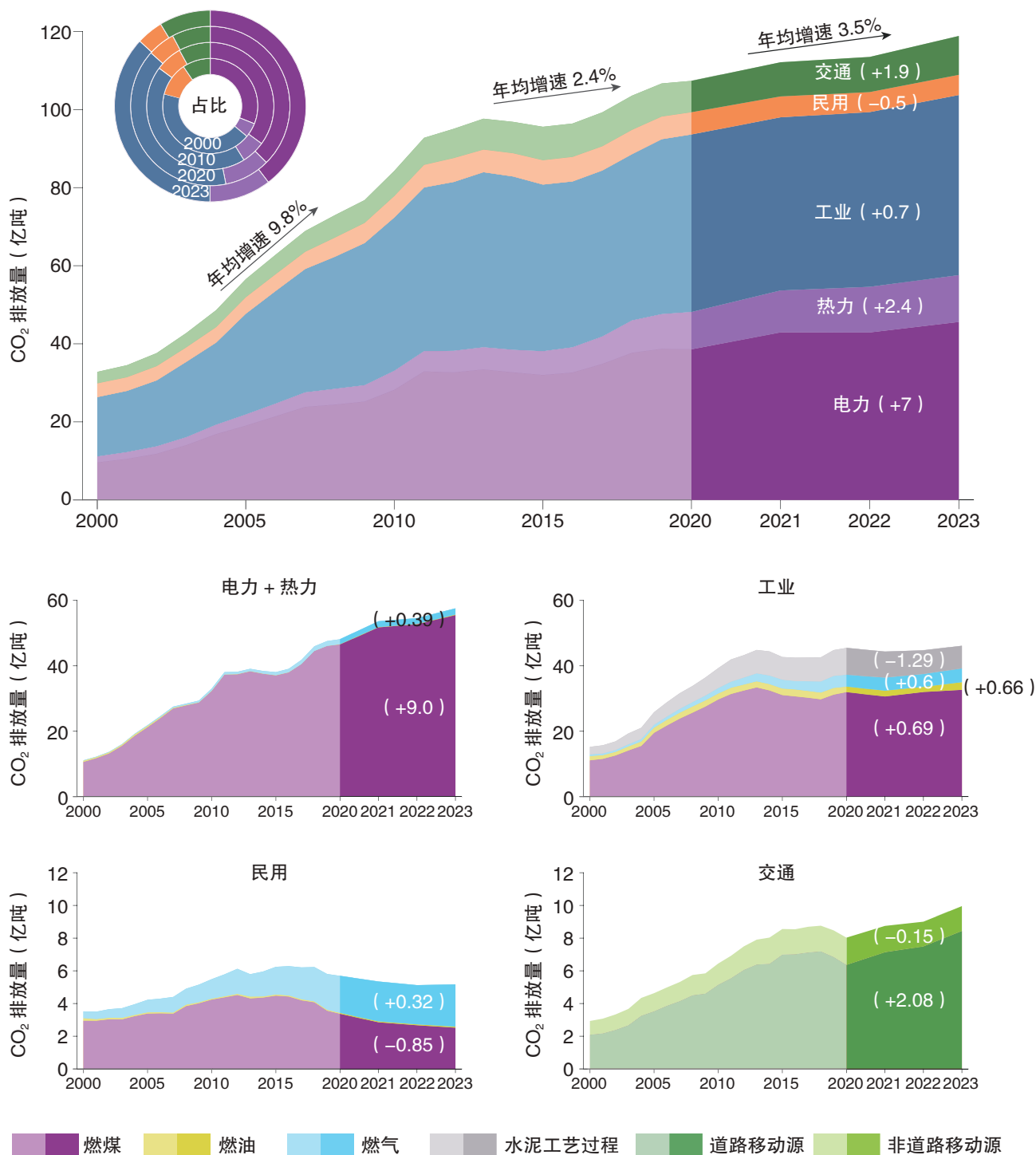


图 5-1 2000 年至 2023 年中国 CO₂ 排放变化趋势和行业组成 (Xu et al., 2024)

0.85 亿吨，燃气排放仅增加了 0.32 亿吨，燃油排放略有增加，合计减排 0.52 亿吨。

图 5-2 进一步展示了近十年来全球主要国家和地区二氧化碳排放量变化及行业和燃料来源贡献。与中国碳排放发展趋势相近，印度和亚洲其他地区碳排放增加也主要受电力和工业部门排放主导，且燃煤消费的增长为主要决定因素（图 5-2）。2010-2022 年间，印度和亚洲其他国家碳排放分别增加了 90.8% 和 32.3%，电力和工业部门分别贡献了各区域增量的 52.1% 和 30.0%，52.8% 和 18.4%。燃煤分别贡献了印度和亚洲其他地区 74.1% 和 44.9% 的碳增长。此外，亚洲其他地区交通运输部门排放贡献也较为突出，2010-2022 年间其排放增加 3.24 亿吨，贡献了区域碳排放增量

的 23.9%。相反，2010-2022 年期间美国和欧盟等国电力行业二氧化碳排放降低主导了各区域排放总量的下降，主要是由于这些区域电力部门可再生能源比例的增加和火电部门化石能源结构调整（Qin et al., 2022）。此外，清洁能源转型带来的欧盟和英国民用部门二氧化碳排放的减少也贡献了 2010-2022 年间其排放降低总量的 20.5%。

近年来，中国政府持续推进电力系统变革，增加水电、风电和光伏等可再生能源装机比重，火电占比持续降低。在保障经济稳定发展和居民需求基础上，持续推进我国电力系统的清洁化改革，加快工业、交通和民用终端用能过程的低碳化进程将是中国如期实现碳达峰和碳中和目标的关键。



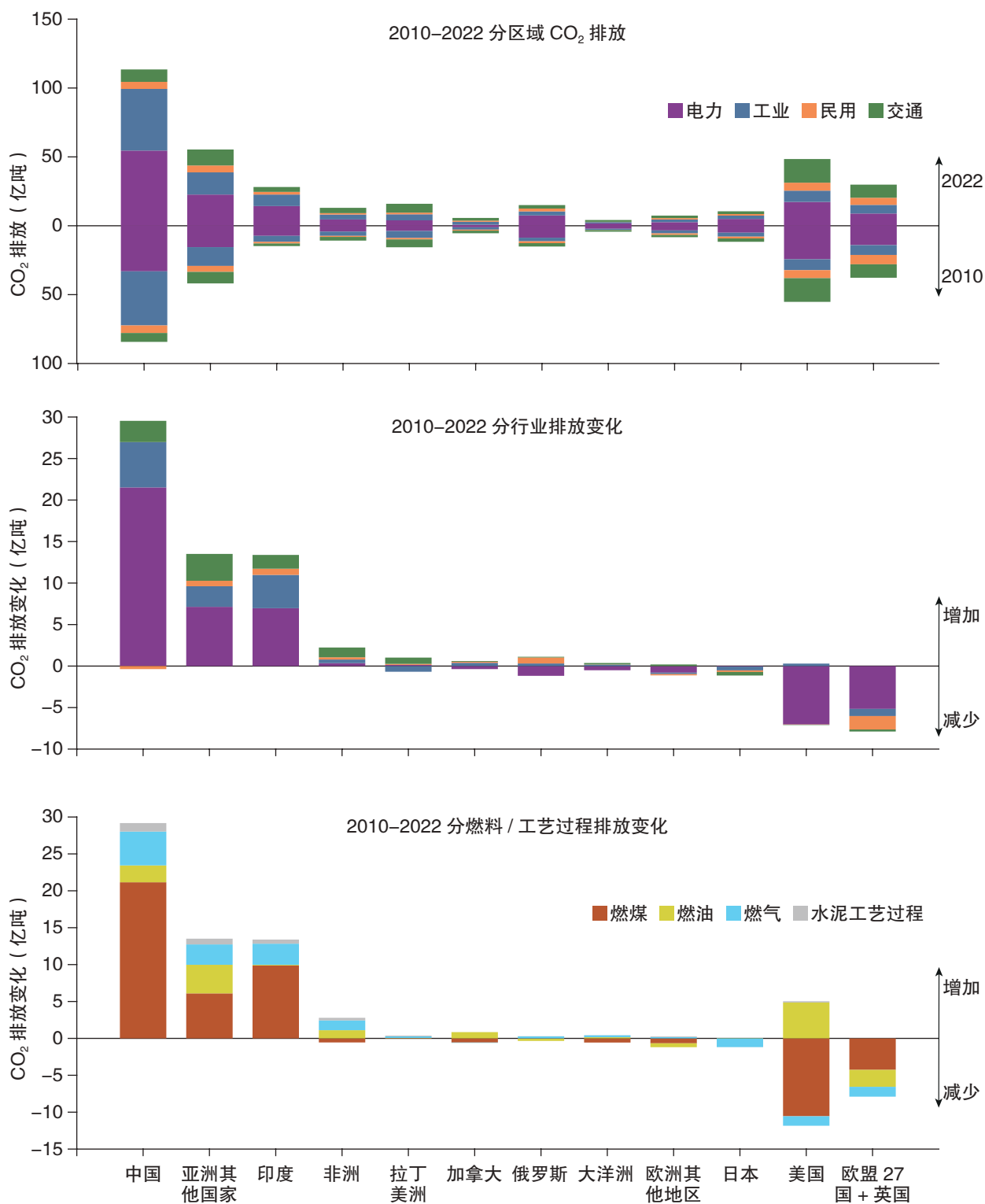


图 5-2 2010 年至 2022 年全球主要国家和地区二氧化碳排放量变化及行业和燃料来源贡献

5.2 土地利用变化与陆地碳汇

陆地生态系统是重要的大气碳汇，在过去十年间约抵消了 34% 化石燃料燃烧排放的二氧化碳（Friedlingstein et al., 2023）。因此，维持和增强陆地生态系统碳汇对缓解全球气候变化具有重要的意义，也是我国实施碳中和战略的关键组成部分。本指标对中国陆地碳汇及其驱动因素进行了综合分析，并讨论了中国未来森林碳汇对“碳中和”目标的潜在贡献。

自 20 世纪 80 年代以来，我国实施了“三北”防护林工程、退耕还林工程以及天然林保护工程等一系列生态工程和保护管理措施，使我国成为世界上少数植被覆盖率持续提高的地区之一（Chen et al., 2019）。森林面积的扩张为中国提供了可观的陆地碳汇，对中国陆地碳收支产生了深刻的影响（Yu et al., 2022; Wang et al., 2023b）。然而，对于土地利用变化导致的二氧化碳通量的估算一直存在较大的不确定性（Friedlingstein et al., 2023），不同模型和方法对中国陆地碳汇的估算结果相差很大（Piao et al., 2022）。全球碳计划使用的动态植被模型和簿记模型使用的土地利用变化数据因为不能正确反映中国森林面积的增长，忽视了植树造林对陆地碳汇的贡献（图 5-3），使得近十年中国陆地碳汇被显著低估（Wang et al., 2024）。最新的中国碳收支多模型比较计划提供了 1980–2023 空间分辨率 10 km 的中国陆地碳汇及其驱动因素的评估结果（Xia et al., 2024）。研究结果显示，2010s 中国陆地碳汇约 $1.25 \text{ Gt CO}_2 \text{ yr}^{-1}$ （图

5-4），以全球 7% 陆地面积贡献了超过同期全球 10% 的陆地碳汇。二氧化碳施肥效应和大规模植树造林是我国陆地碳汇的主要贡献因素，植树造林对碳汇的贡献日益增加，而气候变化对碳汇的负面效应日益增强（图 5-5）。2010–2021 年间，中国陆地生态系统约抵消了 $14.69\% \pm 2.49\%$ 的人为二氧化碳排放量（Xia et al., 2024）。与中国土地利用变化导致显著碳汇相反的是，2013–2022 年全球土地利用导致净碳排

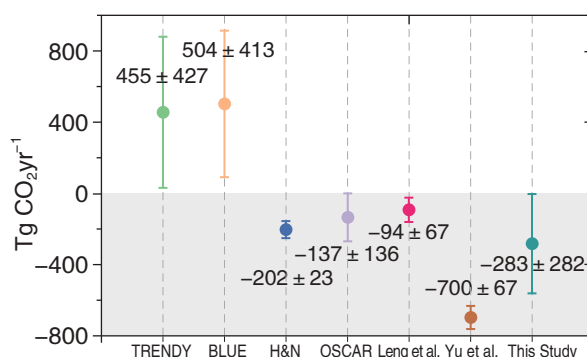


图 5-3 中国土地利用变化碳收支的不同估算结果

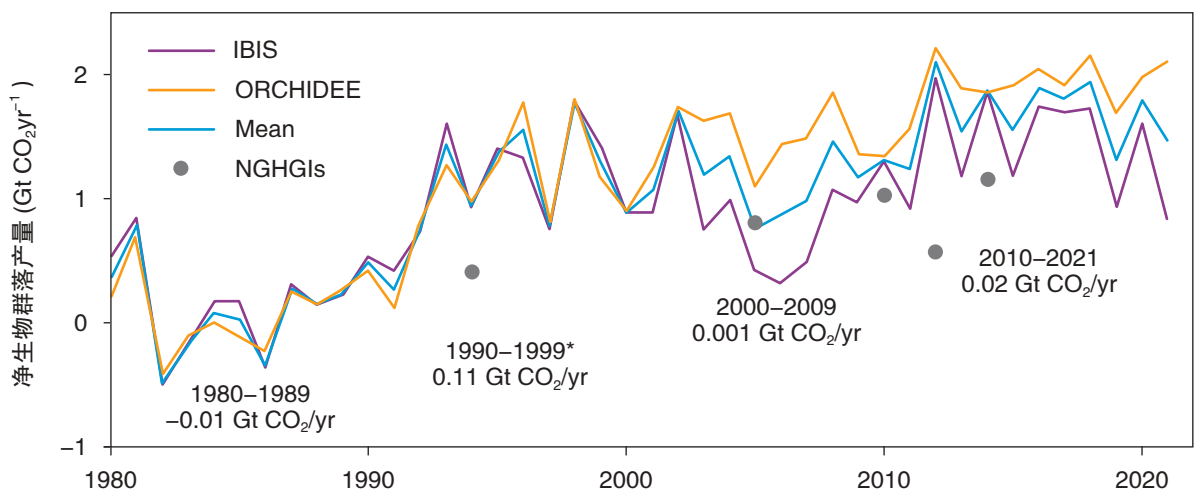


图 5-4 中国陆地碳汇的变化

注：IBIS, Integrated Biosphere Simulator（集成生物圈模拟器）；ORCHIDEE, Organizing Carbon and Hydrology in Dynamic Ecosystems（陆地生物圈模型）；NGHGIs, China's National Greenhouse Gas Inventories（温室气体排放清单）；Mean：平均

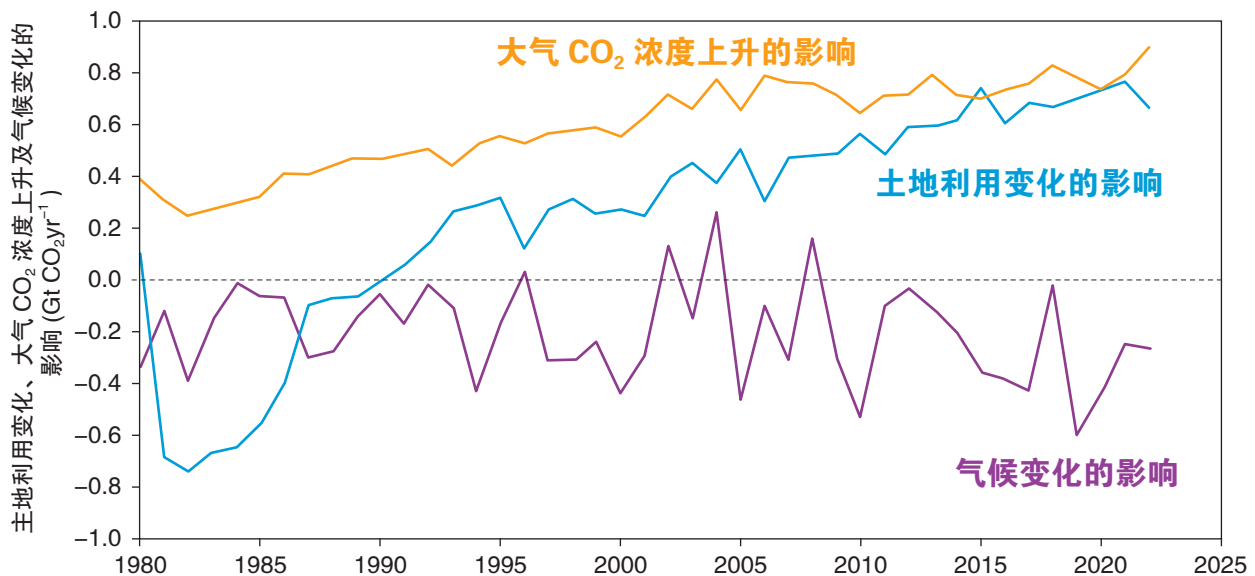


图 5-5 中国陆地碳汇的驱动因素

放 ($1.3 \pm 0.7 \text{ Gt C yr}^{-1}$)，排放源主要来自森林砍伐，其中巴西、印度尼西亚和刚果民主共和国 3 个国家贡献了全球土地利用碳排放的一半以上 (Friedlingstein et al., 2023)。

目前，中国政府已宣布了多个具有里程碑

意义的森林覆盖率目标，但有关造林地的气候适宜性及空间分布的选择都还不确定 (Lu et al., 2022)。造林树种的选择决定造林项目中林木的存活率和固碳能力 (Zhang et al., 2022a; Bukoski et al., 2022)，而造林时间则通过改变林龄结构来影响森林的固碳量 (Zhu et al., 2018)。由于

林龄和气候变化的综合作用，现存森林的生物量碳汇未来将持续降低，维持和增强中国陆地碳汇需要因地制宜地选择合适的树种与合适的时间（图 5-6）。最近的研究通过整合多种方法和数据源，绘制了中国潜在造林空间的分布图，回答了“在哪里造林”、“用什么树种造林”和“何时造林”三个关键问题（Xu et al., 2023a）。研究结果显示，到 2060 年代，使用合适的树种再逐步造林 7800 万公顷，将提供持续的生物物理碳汇潜力，有效支持中国的碳中和战略（Xu et al., 2023a）。在综合考虑林龄、树种、CO₂ 施肥和气候变化等因素后，我国未来植树造林可以在 2060 年前提供约 0.4 Pg C yr⁻¹ 的陆地碳汇，到 2100 年可支持 0.2 Pg C yr⁻¹ 的持续生物物理碳汇潜力，抵消目前全国化石二氧化碳排放量的 7% 到 14%（图 5-7，Xu et al., 2023a）。基于过程模型的模拟结果显示，我国森林生物量碳储量在 2020~2100 年间预计可以提升 13.6 ± 1.5 Pg C，而人为管理活动可以进一步提升 2.3 ± 0.03 Pg C，并且木材产品库可以储存 1.9 ± 0.1 Pg C（Yu et al., 2024）。研究结果表明，通过树种替代、延长轮伐期和提升木材产品碳库等方式可以进一步提升中国陆地碳储量，从而更有效

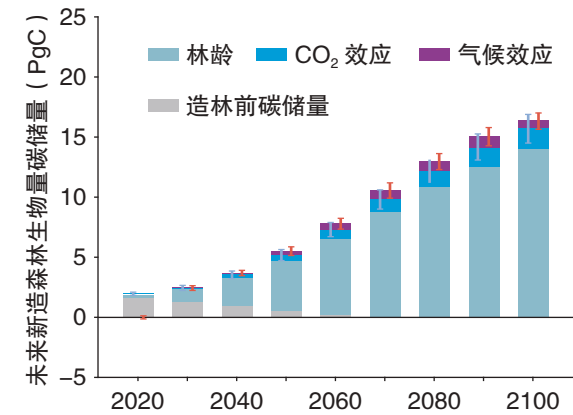


图 5-7 中国森林生物量碳储量的预测

地服务于“碳中和”目标（Yu et al., 2024）。

在造林实践中需要全面考虑生态、气候、社会和经济背景下的多重影响和潜在权衡。受限于土地利用供需矛盾和林龄老化等问题，实际实现的造林面积和碳汇可能会低于预期（Xu et al., 2023a）。因此，造林和森林恢复这种基于自然的减排措施不能替代其他领域的碳减排量，只有将森林碳汇潜力的时间路径与能源和工业部门的减排规划相结合，才能长期维持净零排放状态。

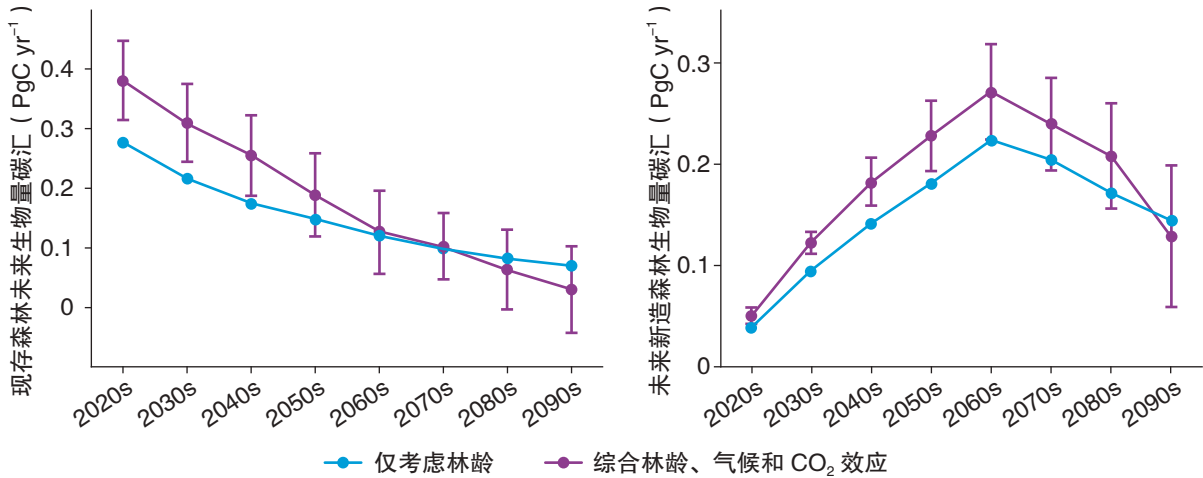


图 5-6 现存森林和未来新造林的生物量碳汇变化

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。本指标基于多尺度排放清单模型（MEIC），从行业和能源等角度分析了主要大气污染物 CO₂ 与 SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5}、VOCs 过去近三年的排放变化，聚焦中国能源 / 行业转型与终端控制的减排效果和政策影响，展望未来协同减排重点方向。进一步对比分析发达经济体近二十年来排放演变趋势，揭示中国清洁空气行动取得的积极成效。

图 5-8 从行业 - 燃料角度分析了我国 CO₂ 与主要大气污染物的协同减排进展。2020-2023 年间我国 CO₂ 排放增加 12%，SO₂、NO_x、一次 PM_{2.5} 和 VOCs 分别下降 14%、15%、8% 和 8%。

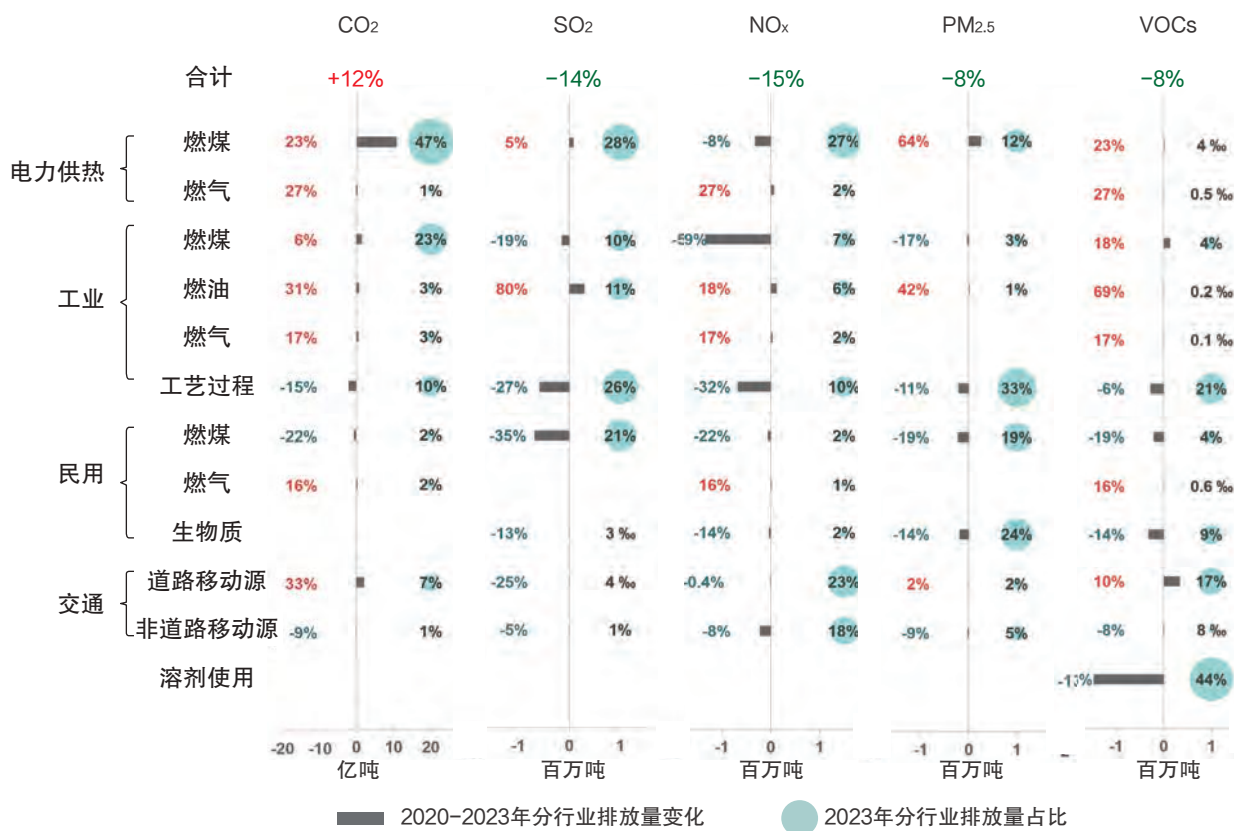


图 5-8 2020 年至 2023 年中国分行业污染物和 CO₂ 排放量占比分布和排放量变化

15%、8% 和 8%，CO₂ 减排与主要大气污染物减排呈现出负协同效应。相比于《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》实施期间（2013–2020 年），主要大气污染物的减排速度有所放缓，CO₂ 涨幅相近（Shi et al., 2022）。各部门中，仅民用整体实现了 CO₂ 排放与主要大气污染物排放协同下降。其中，民用燃煤过程中 CO₂ 与主要污染物实现显著的协同减排。这得益于民用散煤替代的实施降低了民用部门的煤炭消耗。但部分“煤改气”政策的实施使得民用燃气过程的 CO₂ 和 NO_x 排放有所上涨。

工业部门主要大气污染物均呈下降趋势，CO₂ 有所增加，但涨幅较缓。其中，仅工艺过程实现 CO₂ 排放与主要大气污染物排放协同下降。表明我国近年来在钢铁、水泥等行业持续推进一系列与产业结构调整的相关举措（如，淘汰落后产能和化解过剩产能等）取得了良好成效。而工业终端能源消费总量持续增加（年均增速约为 5%），工业燃煤、燃油和燃气过程中 CO₂ 与部分大气污染物均有所增加，仍具有协同减排潜力。电力供热部门作为最大的 CO₂ 排放来源，其 CO₂ 与主要大气污染物在过去三年呈现“双增长”趋势，尤以燃煤过程最为显著（约 10.6 亿吨）。由于工业、民用、交通等部门电气化迅速发展，电力终端消费持续增长（年均增速约为 7%），同时伴随着煤电规模的持续增加，电力行业末端控制在未来的 CO₂ 与污染物协同减排潜力相对有限。电力工业部门能源结构调整的协同减排潜力，特别是涉及煤及其衍生品使用的领域，有待大幅度释放。交通部门中，随着能效提升措施的持续推进，非道路移动源的 CO₂ 和大气污染物实现协同减排。然而，由于我国机动车总量仍处于增长阶段，道路移动源的协同减排潜力亟需进一步释放。

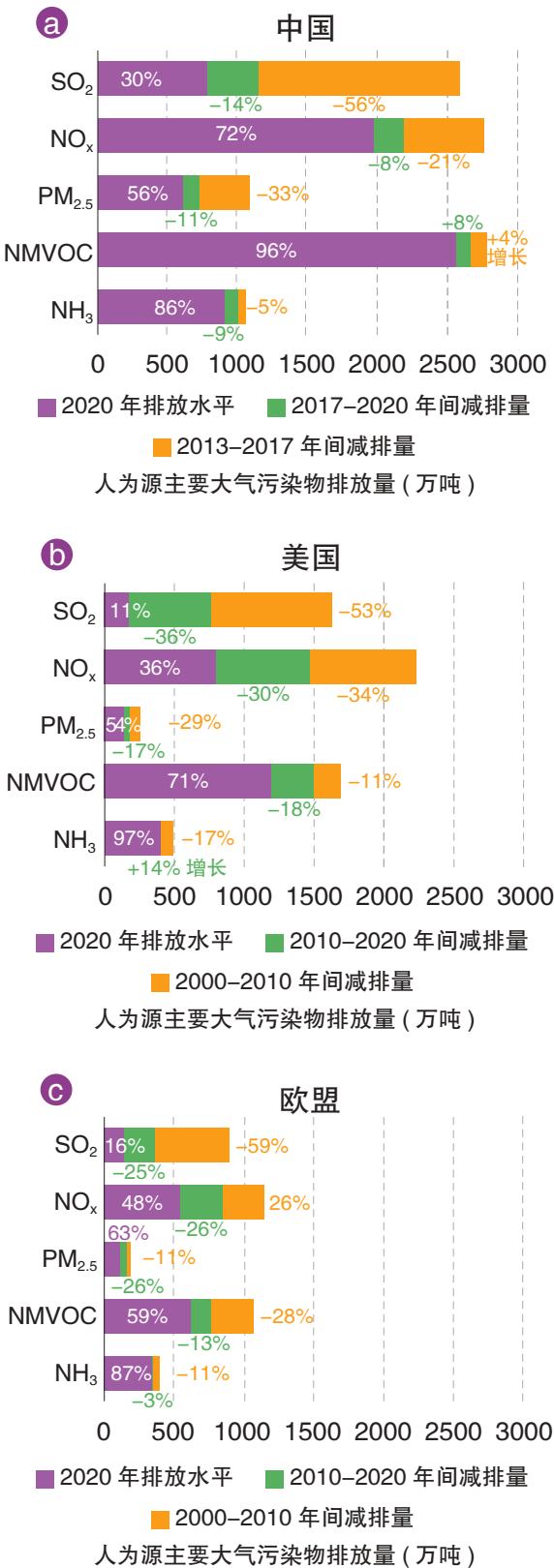


图 5-9 我国两阶段清洁空气行动（2013 年至 2020 年）与主要发达经济体近二十年间（2000 年至 2020 年）主要大气污染物减排成效对比

尽管我国在碳污协同治理方面仍有提升空间，但回顾《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》两阶段清洁空气行动，我国已经取得了历史性的大气污染治理成效（Geng et al., 2021）。在 2013–2020 年间，全国人为源 SO_2 和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放分别减少了 70% 和 44%（图 5–9），这一减排率与美国和欧盟等主要发达经济体在过去二十年间（即 2000–2020 年）所取得的减排成效基本相当。同期，全国人为源 NO_x 、 NH_3 、NMVOC 的排放量分别下降了 29%、14% 和 4%，这些污染物仍有较大的减排空间。与第一阶段清洁空

气行动（2013–2017 年）的减排速度相比，大多数排放物种的减排速度在第二阶段清洁空气行动（2017–2020 年）略有降低（Geng et al., 2024）。其中， SO_2 、 NO_x 的年减排率从第一阶段的 360、140 万吨/年下降到第二阶段的 120、70 万吨/年。这一变化主要归因于当前我国大气污染治理已经迈入深水期，针对电力和工业部门的末端治理措施减排空间已经逐渐收窄。未来，我国需持续以能源、工业和交通等关键领域作为主要抓手进行结构性调整，实现碳污协同深度治理。



5.4 协同减排路径

我国不同省份的减污降碳协同治理效应呈现出显著的空间差异。基于对现有研究的总结与分析，本指标从资源禀赋、能源消费结构等角度深入探讨了影响我国各省 CO₂ 和污染物协同减排的关键因素，强调了政策因素在推动协同减排中发挥的关键作用，评估了双碳目标下各省减污降碳协同效应潜力和主要驱动力，并进一步从市场调节、可再生能源发展以及政策协同等方面提出了建议，旨在指导我国各省制定差异化的协同减排路径，以确保实现碳中和和空气质量改善的双重目标。

我国在 CO₂ 和污染物协同治理方面已取得显著进展，但各省的减污降碳协同效应仍存在着明显的空间差异 (Fu et al., 2024)。北京、上海等直辖市，以及浙江、广东等沿海发达省份，通过减少高耗能、高污染产业的比重，积极培育和发展绿色低碳产业，不断优化和升级产业结构，展现出显著的减污降碳协同效应 (张瑜等, 2022)。研究显示，碳减排对同期 PM_{2.5} 浓度的降低贡献率分别高达 47.6%、33.5%、25.3% 和 21.1% (Wang et al., 2023a)。然而，以煤炭为主的能源消耗是碳排放和大气污染物的主要来源，山西、陕西、内蒙古等依赖煤炭开采和能源密集型制造业的省份，因当前能源消费结构的限制，协同效应相对较低 (Li et al., 2023b)。尽管中国在空气污染防治和 CO₂ 减排方面已取得显著成效，但各省的治理措施仍存在差异。例如，北京、天津、河北等省市通过推广清洁低碳能源发电，展现出较高的 PM_{2.5} 和 O₃ 协同防治效益；而江苏、浙江则通过共同

推进清洁低碳能源发电和电炉钢工艺，有效提升了减污降碳的综合效益 (Li et al., 2024b)。

政策因素是影响减污降碳协同治理的关键。实施严格污染控制措施的省份在降低 PM_{2.5} 浓度和二氧化碳排放方面表现出更高的协同治理水平 (Shi et al., 2022)。例如，在“大气十条”和“蓝天保卫战”期间，作为中国大气污染治理重点区域的河北省，SO₂、NO_x 和 PM_{2.5} 排放量分别减少了 73%、28.8% 和 55.1%，而 CO₂ 排放量仅小幅上升 0.9% (孙世达等, 2023)。同时，双碳目标的实现将显著改善空气质量。由于碳排放和部分污染物在能源燃烧过程中的同源性，到 2060 年碳中和情景下，SO₂、NO_x 和一次 PM_{2.5} 排放较 2020 年将下降 90% 以上，非甲烷挥发性有机化合物 (NMVOCs) 排放也将下降超过 50% (Sun et al., 2024)。从区域来看，以资源能源供应和基础工业为主的省份，如山西、河北、江西和陕西，具有最大的协同

减排潜力。如图所示，与 2020 年相比，这些省份在 2060 年 CO₂ 减排和 PM_{2.5} 浓度降低的百分比均超过 80%。从区域上看，山西、河北、江西和陕西等经济发展以资源能源供应和基础工业为主的资源型省份协同减排潜力最大。此外，相较于 2020 年，2060 年这些省份 CO₂ 减排百分比和 PM_{2.5} 浓度降低百分比均在 80% 以上。而在不同碳中和路径与清洁空气行动的共同作用下，全国人口加权年均 PM_{2.5} 浓度将从 2020 年的 ~33.4 μg/m³ 下降至 2035 年的 17.2 μg/m³，甚至进一步下降到 2060 年的 12.1 μg/m³，7.6 μg/m³ 或 5.3 μg/m³，呈现出通过减污降碳显著改善空气质量的趋势，特别是在中长期内体现出“以碳促污”的特征（Cheng et al., 2023a; Qin et al., 2024; Sun et al., 2024）。然而，受技术成熟度和成本的限制，能源和产业转型措施在短期内难以大规模实施，因此到 2030 年之前，末端治理措施将继续发挥主导作用。2030 年后，随着能源和产业转型措施的逐步实施，碳中和政策将成为持续改善空气质量的主要驱动力。

由于各省份经济发展阶段、产业结构不一，只有因地制宜地实施差异化的协同治理措施，

才能最大限度实现减污降碳协同效应。减污降碳不可避免导致改革成本分担和利益分配问题，且风险和收益时常存在时空错配（孙雪研等，2023），未来可充分利用市场的调节作用，将专项转移支付、大气污染防治资金等财政基金向中西部省份倾斜，支持其开发更高效的能源利用技术，进行转型的成本分摊、效益分享，促进各地平衡发展（Qin et al., 2024）。同时，需重视政策间的协同，统筹考虑“政策工具箱”中各措施如何调整衔接以发挥政策合力，避免监管漏洞或监管重叠造成的效率损失（Peng et al., 2021），强调减污降碳协同治理体系向源头化、综合化、系统化方向改革。

综上所述，尽管中国的减污降碳协同效应整体上显著提升，但由于各省份经济发展阶段和产业结构的差异，各地在减污降碳协同效应及其潜力上仍存在显著的时空差异。只有根据地方实际情况，因地制宜地实施差异化的协同治理措施，才能最大化发挥减污降碳的效果。深入探讨这些空间差异的影响因素，有助于识别大气污染物与碳排放协同治理的驱动机制，激发地方政策创新，并为各省动态调整和优化协同减排路径提供重要参考。

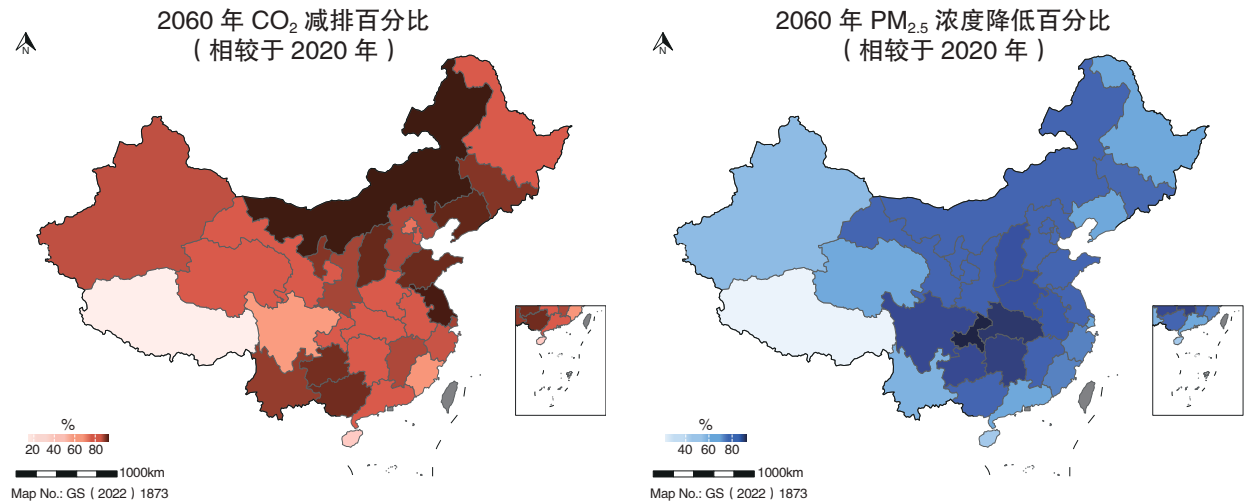


图 5-10 全国各省在碳中和路径下减污降碳协同效果（Adapted from Sun et al., 2024）



健康影响与协同效益

为了实现“碳中和”目标，我国需要采取空气污染治理和气候变化的协同治理措施。这一过程对我国人民的健康影响至关重要，是评估协同治理路径的关键指标。尽管我国近年来已经采取了一系列大气污染控制措施，但颗粒物和臭氧污染问题仍然严峻，对我国人口的非意外死亡有显著影响。同时，全球气候变化导致我国高温天气和其他极端天气事件的频率和强度不断增加，对人民的生命健康构成了严重威胁。空气污染和气候变化之间存在密切的联系。通过减少碳排放来减缓气候变化的同时，空气污染物的排放也会减少，从而改善空气质量。此外，空气污染控制措施可以减少影响气候变化的相关污染物排放，实现减缓气候变化的目标。因此，我们需要探索碳减排和空气污染控制的协同路径。通过分析不同协同路径下我国居民的健康效益，我们可以为实现“碳中和”目标提供科学依据，确保这一过程真正关注人民的生命健康。

6.1 空气污染与健康影响

在全球范围内，空气污染的健康影响研究正日益成为推动环境政策和健康战略发展的关键动力。通过分析中国实施环境改善政策十年来的空气污染数据，本指标量化了 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 对公共健康的影响，强调了空气质量改善对于提升国民健康水平的紧迫性，也揭示了不同人群对空气污染的敏感性差异，为后续精准公共卫生干预提供了科学依据。

$\text{PM}_{2.5}$ 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）， $\text{PM}_{2.5}$ 可升高脑卒中、缺血性心脏病、慢性阻塞性肺部、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。2022 至 2023 年，我国人口加权的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略有升高，从 $30.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 升至 $30.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，但重污染天数略有下降。沿用 Xiao et al.（2022）研究中的数据来源和方法进行测算，2023 年我国 $\text{PM}_{2.5}$ 长期暴露相关的成人过早死亡人数为 121 万（95% CI: 109–135 万），相比于 2022 年的 119 万略有升高，短期暴露相关的死亡人数为 6 万（95% CI: 4–7 万），相比 2022 年略有下降。总体来讲，2018–2023 五年间我国 $\text{PM}_{2.5}$ 长期、短期暴露相关的成人过早死亡依旧呈下降趋势，下降幅度分别为 12.4% 和 26.2%。

部分研究表明， O_3 暴露是独立于 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露的健康危害。由于 O_3 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。2023 年 O_3 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: 7–24 万）和 7 万（95% CI: 4–11 万），相比于 2022 年基本持平。虽然 O_3 暴露相关的过早死亡总数远低于 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露相关的过早死亡总数，但在短期暴露的情况下， O_3 暴露相关的过早死亡人数已超过 $\text{PM}_{2.5}$ 。此外，需要注意的是，近三年来， $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 所致的过早死亡人数下降速度均较为缓慢，我们应寻求新的策略来降低空气污染所致的健康危害。

根据最新环境空气质量国控监测站数据，2023 年全国人口加权的年均 NO_2 暴露浓度为 $23.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相比 2013 年（ $45.44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）和 2017 年（ $34.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）分别下降了 48.92% 和 33.01%。但我国 2022 年 NO_2 年均浓度仍高于 WHO 于 2021 年发布的 AQG 年均基准值 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。环境空气质量国控监测站数据显

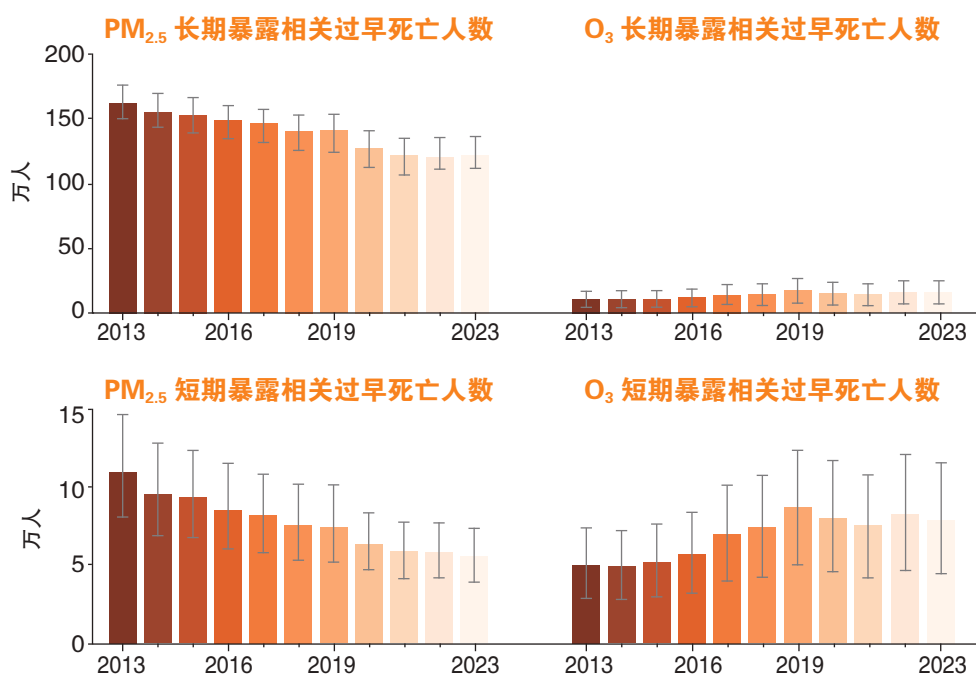


图 6-1 2013 年至 2023 年我国细颗粒物和臭氧长期和短期暴露浓度变化情况

示，2022 年全国人口加权的日均 NO₂ 浓度超过 AQG 日均基准值（25 μg/m³）的天数为 137 天，相比 2017 年减少 164 天，NO₂ 污染形势改善明显。在全国各个地区中，北方地区仍然有着最高的 NO₂ 年均暴露浓度，其次是西北地区与

南方地区，青藏地区浓度最低（图 6-2）。四个区域 2023 年的年均暴露浓度相比 2013 年分别下降了 51.49%，51.15%，53.78% 和 47.23%，污染显著改善。但目前，我国全国以及各个地区的 NO₂ 的长期和短期暴露浓度均高

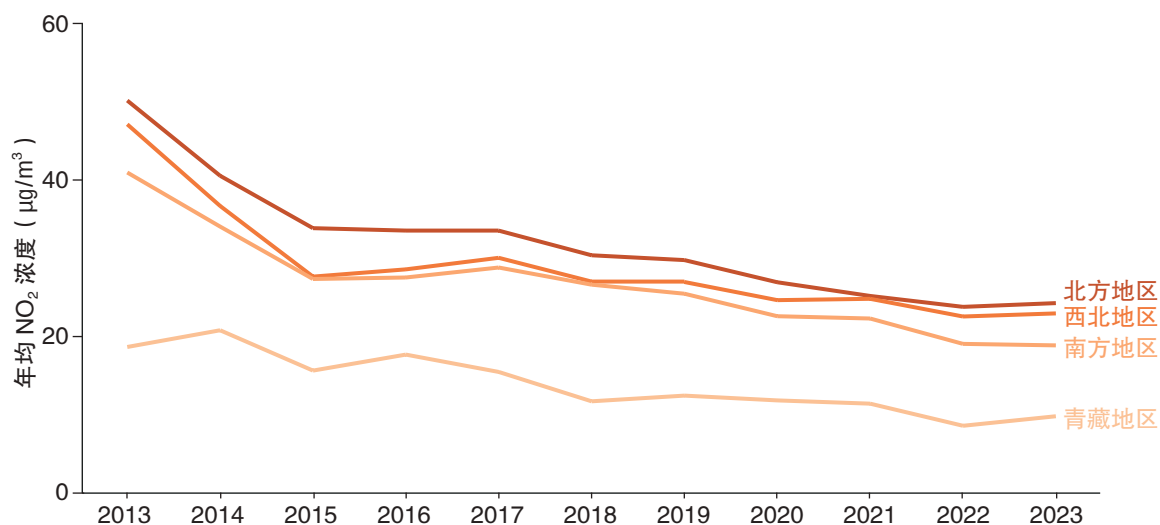


图 6-2 2013 年至 2023 年我国不同地区 NO₂ 年均浓度变化情况

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。

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，NO₂ 长期暴露可能增加心脑血管疾病、糖尿病等疾病的死亡风险，也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 短期暴露对居民具有独立的急性健康危害（Meng et al., 2021）。因此，我国应该采取高效的大气污染防控措施，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., 2018），计算可得 2023 年 NO₂ 短期暴露相关的非意外死亡人数、心血管疾病死亡人数和呼吸系统疾病死亡人数分别为 5.10 万（95% CI:

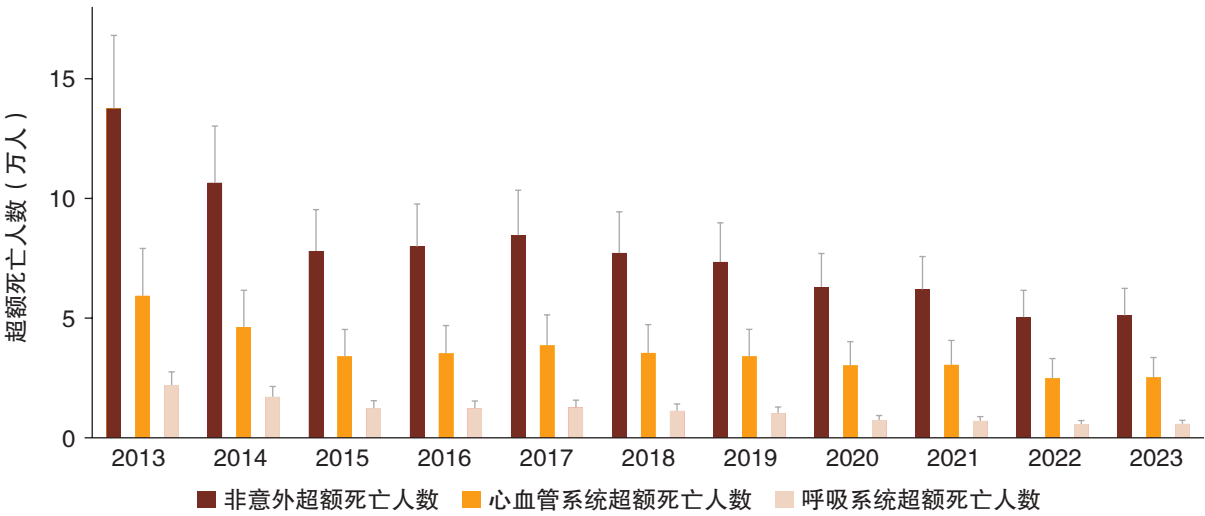


图 6-3 2013 年至 2023 年我国归因于 NO₂ 短期暴露的超额死亡人数

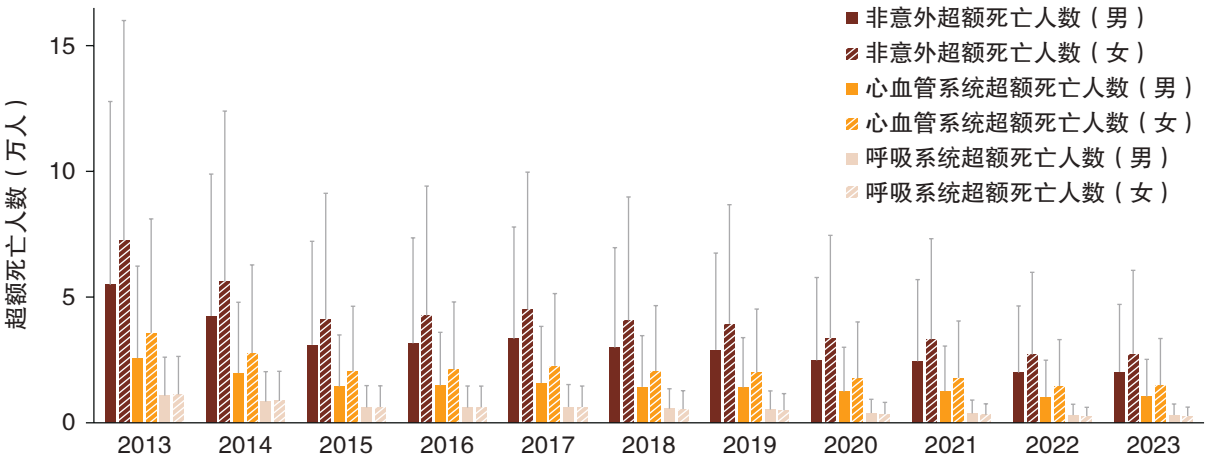


图 6-4 2013 年至 2023 年我国男性和女性归因于 NO₂ 短期暴露的超额死亡人数

3.97–6.24 万)、2.51 万(95% CI: 1.95–3.35 万)、0.58 万(95% CI: 0.44–0.73 万)。相较于 2013–2020 年,2023 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 污染对我国人群的健康危害,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。

大气 NO₂ 暴露对于不同年龄层和性别人群的健康效应可能存在差异。有研究指出,老年群体以及女性对于 NO₂ 的暴露可能更敏感(Chen et al., 2018; Shin et al., 2022)。基于上述暴露反应关系研究结果,2023 年我国女性可归因于 NO₂ 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 7.24 万(95% CI: 5.73–8.76 万)、3.58 万(95% CI: 2.62–4.53 万)和 1.13 万(95% CI: 0.75–1.51 万);而男性分别为 5.49 万(95% CI: 3.60–7.29 万)、2.57 万(95% CI: 1.44–3.66 万)和 1.08 万(95% CI: 0.63–1.53 万)。我国女性与 NO₂ 短期暴露相关死亡人数整体略高于男性(图 6-4)。2013–2023 年,我国女性与男性 NO₂ 短期暴露相关的死亡人数均成下降趋势,且下降幅度相近。与 2013 年相比,2023 年女性可归因于 NO₂ 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下降了 62.10%, 58.66% 和 76.36%;男性则分别下降了 63.15%, 59.51% 和 71.36%。基于同样的计算方法,可得 NO₂ 短期暴露相关的死亡人数在我国不同年龄层人群中的分布(图 6-5)。2023 年我国 75 岁以上人群中归因于 NO₂ 短期暴露的死亡人数占有所有归因死亡数的绝大多数(72.55%),并且这一比例在过去十



图 6-5 2013 年至 2023 年我国不同年龄层归因于 NO₂ 短期暴露的超额死亡人数

年间基本保持稳定。对于我国大气污染的脆弱群体,相关部门有必要开展针对性的健康宣教,促使其提高高污染天气下的自我保护意识和能力。

6.2 气候变化与健康影响

在全球气候变化的大背景下，中国正经历着极端天气事件的频繁发生与加剧，这对公共健康构成了前所未有的挑战。本指标从单一气象因素到极端天气事件，综述了气候变化对人群健康的影响，强调了适应性措施的重要性，旨在为政策制定者提供科学依据，以减轻气候变化对人类健康的影响，并推动构建更具韧性的健康社会。

2022 年中国人均热浪天数达到 21 天，比历史基线的（1986–2005 年）平均水平高出 15.6 天（Zhang et al., 2023b）。受气候变化的影响，我国正面临着极端天气事件频发与增强的严峻挑战，这直接导致了气候相关疾病风险的显著上升。目前，我国由极端温度导致的心血管疾病负担仍然较重，当暴露于强度更大、持续时间更长的极端高温事件时，心肌梗死的死亡风险增加（Xu et al., 2023b）。此外，持续的高温天气已被证实是增加人群焦虑、抑郁情绪和攻击性行为的重要诱因（Fang et al., 2023b）。气候灾害直接导致的生存环境破坏会使人安全感和幸福感降低（Cheng et al., 2023c）；同时，极端气候条件下人体生理机能、调节功能和情绪状态发生变化，可能影响到血清素、多巴胺、 γ -氨基丁酸等神经递质分泌（Fang et al., 2023c），进而发展为抑郁症、焦虑症，甚至精神分裂症等严重精神疾病。

除单一的温度暴露外，湿度作为调节人

体对环境温度感知的关键气象参数，其变化显著影响人体热舒适度和生理反应，进而对公众健康构成潜在威胁。基于我国多个城市数据的研究显示，温湿复合暴露导致人群死亡率增加，且不同暴露模式的健康效应在不同的季节具有较大差异，例如在夏季，干热天气相较于湿热天气，更易加剧非意外死亡风险，具体表现为干热天气引起的非意外死亡超额风险为 10.18%，而湿热天气则为 3.21%（Fang et al., 2023a）；然而在冬季，湿冷天气对人群健康构成更大威胁，其导致的死亡风险为 1.24%，略高于干冷天气的 1.14%（Li et al., 2023a）。因此在未来制定适应气候变化的政策和措施时，可重点关注干热、湿冷天气，减少气候变异对人群健康的比例影响。

作为全球气候变化的敏感区和影响显著区，我国气候风险指数呈升高趋势，不仅仅是极端温度暴露，台风、沙尘暴等极端天气事件发生频次有所增加，危害人群健康。我国学者

研究发现，除沿海地区外，台风亦可增加内陆地区居民死亡风险，台风过后的第二周，循环系统疾病的死亡风险上升 19%，此外，研究指出，女性与老年人群的健康更容易受到台风影响（Ma et al., 2024）。2013–2018 年我国沙尘暴导致缺血性脑卒中、心肌梗死以及慢性阻塞性肺疾病等慢性病的超额死亡风险不同程度上升（Zhang et al., 2023a）。因此，气象灾害防范和应对方面，不能忽视内陆地区，需要制定全面覆盖的防灾减灾措施。气候变化已经对我国人群健康造成严重影响，必须从多个层面加强防范和应对，在极端天气气候事件来临之前合理布局医疗资源，提高人群健康风险意识，以减轻气候变化健康危害。

随着热浪事件发生频率和强度的增加，全面认识炎热天气对人群健康的影响至关重要。中国面临着人口结构不断演变和老龄人口增加等挑战，这些挑战与气候变化密切相关。老年群体是气候变化的敏感和脆弱人群，尤其是他们独特的生理特征、生活环境和行为方式，使得他们更容易受到气候变化的健康威胁。我国学者基于中国纵向健康长寿调查数据分析了 65 岁以上人群热浪死亡相关的危险因素，发现功能性老化例如活动能力功能下降、日常生活活动依赖、认知障碍、社会孤立的个体均会导致热浪相关死亡风险的增加（Xi et al., 2024），这有助于更深入地理解气候变化与老年人群健康之间的关系，为制定有效的应对策略提供科学依据。未来在关注老年人健康时，不仅要考虑他们的生理年龄，还要关注他们的生活环境与功能需求，综合评估他们的气候适应能力，提高应对策略的针对性与有效性。卫生专业人员和政策制定者应关注有特定身体和认知障碍的老年人，便于有效地降低老年人群的气候健

康风险。

气候变化已经导致全球气温上升、极端气候事件频发等一系列严重后果，适应性措施则能够帮助我们应对已经发生的气候变化影响，减轻其对人类社会的损害。世界卫生组织（WHO）发布了“2023 年国家自主贡献和长期战略中的卫生事项审查”强调了确保人民健康得到充分优先考虑，并被纳入国家气候变化应对计划所需的行动。为了应对气候变化带来的健康风险，我国也采取了相应的适应与减缓并重的措施。加强灾害预警应对是适应性措施的重要组成部分，早期预警系统是保障人群生命健康与财产安全的高成本、高效益措施（Ji et al., 2023）。总体上，国内的高温热浪预警系统多面向政府、气象等部门提供辅助决策服务，缺乏考虑不同用户的个性化需求或群体的特征差异。未来，早期预警系统应加强对儿童、孕妇、老年人、户外工作者等脆弱人群提供个性化的气候相关健康建议与辅助决策支持，保护人群健康。

此外，适应性措施还需要在基础设施规划方面进行改进。在规划城市基础设施时，应充分考虑气候变化的影响，提高基础设施的适应性和韧性。以城市绿地为例，城市绿地具有显著的降温效应，可以减少人群因高温引起的中暑、热射病等健康风险。同时，城市绿地可以为老年人群提供社交和心理支持，促进老年人积极参与各种社交活动，缓解功能性老化对热浪相关死亡风险的影响。此外，有效的城市规划，包括适当的建筑布局、城市垂直绿化，可以增强空气流通，减少污染物，减轻热岛效应，从而改善当地的小气候，有助于降低高温造成的死亡率。

6.3 协同治理的健康效益

气候变化与空气污染的协同治理可以显著改善人群健康，但是如何量化健康效益的改善程度及其在各行业和地区的分布仍存在不确定性。本指标以气候变化与空气污染协同治理为出发点，衡量区域、行业的减排潜力及健康效益，为碳污协同治理提出重要的科学建议。

极端高温与大气污染的影响叠加会显著增加人群死亡率和发病率的风险。2020 年，337 个城市最大日 8 小时平均臭氧浓度在 90% 的分位数从 $60\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 到 $192\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，平均浓度 $136\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，比 2019 年低 8.0%，比 2015 年高出 11.1%（Zhang et al., 2023b）。有研究显示，近年来同时暴露于热浪和高臭氧污染的死亡风险明显提升，2017 年并发事件导致的额外死亡人数显著增加，2017 年至 2020 年中国因并发事件导致的年均超额死亡人数为 6249 人，是 2013 年至 2016 年因并发事件导致的年均超额死亡人数（934 例）的 5.7 倍，且并发事件下的死亡风险在 74 岁以上的老年人群中更为显著（Du et al., 2024）。

碳中和目标倒逼的能源结构优化将大幅减少碳和空气污染物的排放，同时带来可观的健康效益。通过气候减缓措施，2060 年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露水平可较基准情景降低近 $14.5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，占 $\text{PM}_{2.5}$ 减缓总量的 64.4%。未来，通过实施与碳达峰、碳中和及空气污染控制相关的政策，2030

年和 2060 年 $\text{PM}_{2.5}$ 相关的过早死亡人数将进一步下降至 99–159 万人和 36–93 万人（Cheng et al., 2023b）。考虑到实现碳中和目标的多种能源和技术途径，2035 年和 2060 年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度可分别下降到 $18.7\text{--}23\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $6.1\text{--}11\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，2060 年可再生能源主导路径将使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度下降到 $6.1\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，到 2060 年累计避免的过早死亡将达到 2900–5000 万（Lei et al., 2024）。农村居民部门的低碳转型明显改善北方地区的空气质量，2050 年全国预计避免约 75500 例 $\text{PM}_{2.5}$ 相关过早死亡（Ma et al., 2023）。电力部门脱碳可使 2025 年–2050 年暴露于 $\text{PM}_{2.5}$ 的总健康损害减少 17% 至 27%，避免了大量因 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露导致的过早死亡（Luo et al., 2023）。如果到 2030 年中国电力部门煤炭能够被完全替代，可以避免多达 1.71–2.42 万人过早死亡。考虑到现有发电厂的提前退役，2030 年可避免 7.72 万人过早死亡（Lei et al., 2024）。

碳中和目标的实现将显著改善人群健康和降低经济损失，其导致的环境和健康收益存在显著

的区域异质性与不平等。在 2℃情景下，到 2030 年，东部地区、中部地区及西部地区可分别避免的过早死亡人数将为 86771 人、49712 人和 25734 人。与污染控制政策相比，碳交易政策可以在很大程度上改善健康效益，降低成本。到 2030 年，可避免全国范围内 15038 例急性过早死亡，87692 例慢性过早死亡，以及总计 550 亿美元的统计生命损失（Zhang et al., 2023c）。研究发现，2050 年粤港澳大湾区碳中和可使 PM_{2.5} 与臭氧污染协同改善而带来可观的健康效益，可节省 2–5 小时/年人均工作时间损失和因臭氧污染减轻而节省的医疗支出达 8980 万美元（Xie et al., 2023a）。研究显示，延续现有政策，粤港澳大湾区 2050 年空气质量虽改善但仍未达标（WHO AQG），PM_{2.5} 和臭氧浓度分别为 9.6 μg/m³ 和 157.5 μg/m³，实现碳中和将使 PM_{2.5} 浓度进一步下降 1.2 μg/m³ 至 8.4 μg/m³，臭氧下降 13.1 μg/m³ 至 144.4 μg/m³，分别可额外避免过早死亡 2500 人和 3300 人（Xie et al., 2023b）。而京津冀地区在延续当前政策下 2060 年区域平均 PM_{2.5} 浓度为 43.94 μg/m³，而综合考虑可再生能源替代与电气化可分别实现 PM_{2.5} 浓度下降 13.95% 和 14.56%，避免了约 8189–8528 例过早死亡（Guo et al., 2024）。



参考文献

- Bukoski, J. J., Cook-Patton, S. C., Melikov, C., Ban, H., Chen, J. L., Goldman, E. D., Harris, N. L., & Potts, M. D. (2022). Rates and drivers of aboveground carbon accumulation in global monoculture plantation forests. *Nature Communications*, 13, 4206. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31380-7>
- Cai, B., Liang, S., Zhou, J., Wang, J., Cao, L., Qu, S., Xu, M., & Yang, Z. (2018). 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>
- Chen, C., Park, T., Wang, X., Piao, S., Xu, B., Chaturvedi, R. K., Fuchs, R., Brovkin, V., Ciais, P., Fensholt, R., Tømmervik, H., Bala, G., Zhu, Z., Nemani, R. R., & Myneni, R. B. (2019). China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2, 122–129. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0220-7>
- Chen, R., Yin, P., Meng, X., Wang, L., Liu, C., Niu, Y., Lin, Z., Liu, Y., Liu, J., Qi, J., You, J., Kan, H., & Zhou, M. (2018). Associations Between Ambient Nitrogen Dioxide and Daily Cause-specific Mortality. *Epidemiology*, 29, 482–489. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000829>
- Chen, T., Chen, S., Zhou, M., Tu, C., Zhang, A., Chen, Y., & Li, W. (2022). Northward Shift in Landfall Locations of Tropical Cyclones over the Western North Pacific during the Last Four Decades. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(2), 304–319. <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1077-z>
- Cheng, J., Tong, D., Liu, Y., Geng, G., Davis, S. J., He, K., & Zhang, Q. (2023a). A synergistic approach to air pollution control and carbon neutrality in China can avoid millions of premature deaths annually by 2060. *One Earth*, 6(8), 978–989. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.07.007>
- Cheng, S., Zhang, B., Peng, P., & Lu, F. (2023b). Health and economic benefits of heavy-duty diesel truck emission control policies in Beijing. *Environment International*, 179, 108152. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108152>
- Cheng, Y., Yu, Z., Xu, C., Manoli, G., Ren, X., Zhang, J., Liu, Y., Yin, R., Zhao, B., & Vejre, H. (2023c). Climatic and Economic Background Determine the Disparities in Urbanites' Expressed Happiness during the Summer Heat. *Environmental Science & Technology*, 57(30), 10951–10961. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01765>
- Clarke, B., Zachariah, M., Baumgart, N., Libonati, R., Alves, L. M., Otto, F. E. L., Philip, S., Kew, S., & Bazo, J. (2024). *Climate change, not El Niño, main driver of exceptional drought in highly vulnerable Amazon River Basin*. <https://doi.org/10.25561/108761>

- Du, H., Yan, M., Liu, X., Zhong, Y., Ban, J., Lu, K., & Li, T. (2024). Exposure to Concurrent Heatwaves and Ozone Pollution and Associations with Mortality Risk: A Nationwide Study in China. *Environmental Health Perspectives*, 132(4), 047012. <https://doi.org/10.1289/EHP13790>
- European Commission, Joint Research Centre, Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Becker, W.E., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Koykka, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Manca, G., Pisoni, E., Vignati, E., & Pekar, F., *GHG emissions of all world countries*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024, https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897_JRC138862.
- Fang, W., Li, Z., Gao, J., Meng, R., He, G., Hou, Z., Zhu, S., Zhou, M., Zhou, C., Xiao, Y., Yu, M., Huang, B., Xu, X., Lin, L., Xiao, J., Jin, D., Qin, M., Yin, P., Xu, Y., ... Ma, W. (2023a). The joint and interaction effect of high temperature and humidity on mortality in China. *Environment International*, 171, 107669. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107669>
- Fang, W., Liu, L., Yin, B., Ke, L., Su, Y., Liu, F., Ma, X., & Di, Q. (2023b). Heat exposure intervention, anxiety level, and multi-omic profiles: A randomized crossover study. *Environment International*, 181, 108247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108247>
- Fang, Y. R., Sun, X., Zhang, S., Liu, G., Liu, X., Zhang, P., Kang, Y., & Dai, H. (2023c). Regionally differentiated promotion of electric vehicles in China considering environmental and human health impacts. *Environmental Research Letters*, 18(7), 074022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acdbde>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Bakker, D. C. E., Hauck, J., Landschützer, P., Le Quéré, C., Luijkx, I. T., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Schwingshackl, C., Sitch, S., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Alin, S. R., Anthoni, P., ... Zheng, B. (2023). Global Carbon Budget 2023. *Earth System Science Data*, 15, 5301–5369. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5301-2023>
- Fu, X., Cheng, J., Peng, L., Zhou, M., Tong, D., & Mauzerall, D. L. (2024). Co-benefits of transport demand reductions from compact urban development in Chinese cities. *Nature Sustainability*, 7, 294–304. <https://doi.org/10.1038/s41893-024-01271-4>
- Geng, G., Zheng, Y., Zhang, Q., Xue, T., Zhao, H., Tong, D., Zheng, B., Li, M., Liu, F., Hong, C., He, K., & Davis, S. J. (2021). Drivers of PM_{2.5} air pollution deaths in China 2002–2017. *Nature Geoscience*, 14(9), 645–650. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00792-3>
- Geng, G., Liu, Y., Liu, Y., Liu, S., Cheng, J., Yan, L., Wu, N., Hu, H., Tong, D., Zheng, B., Yin, Z., He, K., Zhang, Q. (2024). Efficacy of China's clean air actions to tackle PM_{2.5} pollution between 2013 and 2020. *Nature Geoscience*, 17, 987–994. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01540-z>
- Guo, Z.-Q., Zhang, J.-Q., Zhang, W.-W., Zhao, B., Jiang, Y.-Q., Wang, S.-X., Sheng, X.-Y., Wu, Y., Chen, X.-Q., Rao, L.-L., & Nie, J.-Y. (2024). Air quality and health co-benefits of low carbon transition policies in electricity system: the case of Beijing–Tianjin–Hebei region.

Environmental Research Letters, 19(5), 054039. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad3f33>

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. P é an, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ji, J. S., Xi, D., & Huang, C. (2023). Building resilience in heatwaves. *Nature Medicine*, 29, 1613–1614. <https://doi.org/10.1038/s41591-023-02409-1>
- Jiang, X., Ku, W. L., Shia, R., Li, Q., Elkins, J. W., Prinn, R. G., & Yung, Y. L. (2007). Seasonal cycle of N₂O: Analysis of data. *Global Biogeochemical Cycles*, 21. <https://doi.org/10.1029/2006GB002691>
- Koffi, E. N., Bergamaschi, P., Alkama, R., & Cescatti, A. (2020). An observation-constrained assessment of the climate sensitivity and future trajectories of wetland methane emissions. *Science Advances*, 6(15). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay4444>
- Lei, Y., Yin, Z., Lu, X., Zhang, Q., Gong, J., Cai, B., Cai, C., Chai, Q., Chen, H., Chen, R., Chen, S., Chen, W., Cheng, J., Chi, X., Dai, H., Feng, X., Geng, G., Hu, J., Hu, S., … He, K. (2024). The 2022 report of synergetic roadmap on carbon neutrality and clean air for China: Accelerating transition in key sectors. *Environmental Science and Ecotechnology*, 19, 100335. <https://doi.org/10.1016/j.es.2023.100335>
- Li, M., Fang, W., Meng, R., Hu, J., He, G., Hou, Z., Zhou, M., Zhou, C., Zhu, S., Xiao, Y., Yu, M., Huang, B., Xu, X., Lin, L., Jin, D., Qin, M., Yin, P., Xu, Y., Liu, T., & Ma, W. (2023a). The comparison of mortality burden between exposure to dry-cold events and wet-cold events: A nationwide study in China. *Science of The Total Environment*, 904, 166859. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166859>
- Li, M., Huang, X., Yan, D., Lai, S., Zhang, Z., Zhu, L., Lu, Y., Jiang, X., Wang, N., Wang, T., Song, Y., & Ding, A. (2024a). Coping with the concurrent heatwaves and ozone extremes in China under a warming climate. *Science Bulletin*, 69(18), 2938–2947. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2024.05.034>
- Li, S., Wang, S., Wu, Q., Zhang, Y., Ouyang, D., Zheng, H., Han, L., Qiu, X., Wen, Y., Liu, M., Jiang, Y., Yin, D., Liu, K., Zhao, B., Zhang, S., Wu, Y., & Hao, J. (2023b). Emission trends of air pollutants and CO₂ in China from 2005 to 2021. *Earth System Science Data*, 15, 2279–2294. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2279-2023>
- Li, S., Wang, S., Wu, Q., Zhao, B., Jiang, Y., Zheng, H., Wen, Y., Zhang, S., Wu, Y., & Hao, J. (2024b). Integrated Benefits of Synergistically Reducing Air Pollutants and Carbon Dioxide in China. *Environmental Science & Technology*, 58(32), 14193–14202. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c00599>

- Lu, N., Tian, H., Fu, B., Yu, H., Piao, S., Chen, S., Li, Y., Li, X., Wang, M., Li, Z., Zhang, L., Ciais, P., & Smith, P. (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>
- Luo, Q., Garcia–Menendez, F., Lin, J., He, G., & Johnson, J. X. (2023). Accelerating China's power sector decarbonization can save lives: integrating public health goals into power sector planning decisions. *Environmental Research Letters*, 18(10), 104023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acf84b>
- Ma, T., Zhang, S., Xiao, Y., Liu, X., Wang, M., Wu, K., Shen, G., Huang, C., Fang, Y. R., & Xie, Y. (2023). Costs and health benefits of the rural energy transition to carbon neutrality in China. *Nature Communications*, 14(1), 6101. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41707-7>
- Ma, Y., Zhang, X., Zhang, Y., Du, J., Chu, N., Wei, J., Cui, L., & Zhou, C. (2024). The threaten of typhoons to the health of residents in inland areas: a study on the vulnerability of residents to death risk during typhoon "Lekima". *BMC Public Health*, 24, 606. <https://doi.org/10.1186/s12889-024-17667-y>
- Mei, W., & Xie, S.–P. (2016). Intensification of landfalling typhoons over the northwest Pacific since the late 1970s. *Nature Geoscience*, 9(10), 753–757. <https://doi.org/10.1038/ngeo2792>
- Meng, X., Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo–Cabrera, A. M., Milojevic, A., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M. de S. Z. S., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Correa, P. M., Ortega, N. V., Osorio, S., Garcia, Kysely, J., Urban, A., Orru, H., Maasikmets, M., ... Kan, H. (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>
- Murray, C. J. L., Aravkin, A. Y., Zheng, P., Abbafati, C., Abbas, K. M., Abbasi–Kangevari, M., Abd–Allah, F., Abdelalim, A., Abdollahi, M., Abdollahpour, I., Abegaz, K. H., Abolhassani, H., Aboyans, V., Abreu, L. G., Abrigo, M. R. M., Abualhasan, A., Abu–Raddad, L. J., Abushouk, A. I., Adabi, M., ... Lim, S. S. (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. *Lancet*, 396(10258), 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., Bardach, A., & Ciapponi, A. (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>
- Peng, W., Iyer, G., Binsted, M., Marlon, J., Clarke, L., Edmonds, J. A., & Victor, D. G. (2021). The surprisingly inexpensive cost of state–driven emission control strategies. *Nature Climate Change*, 11, 738–745. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01128-0>
- Piao, S., He, Y., Wang, X., & Chen, F. (2022). Estimation of China's terrestrial ecosystem carbon sink: Methods, progress and prospects. *Science China Earth Sciences*, 65, 641–651. <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9892-6>

- Qian, C., Ye, Y., Jiang, J., Zhong, Y., Zhang, Y., Pinto, I., Huang, C., Li, S., & Wei, K. (2024). Rapid attribution of the record-breaking heatwave event in North China in June 2023 and future risks. *Environmental Research Letters*, 19(1), 014028. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad0dd9>
- Qin, X., Tong, D., Liu, F., Wu, R., Zheng, B., Zheng, Y., Liu, J., Xu, R., Chen, C., Yan, L., & Zhang, Q. (2022). Global and Regional Drivers of Power Plant CO₂ Emissions Over the Last Three Decades Revealed From Unit-Based Database. *Earth's Future*, 10(10), e2022EF002657. <https://doi.org/10.1029/2022EF002657>
- Qin, Y., Zhou, M., Hao, Y., Huang, X., Tong, D., Huang, L., Zhang, C., Cheng, J., Gu, W., Wang, L., He, X., Zhou, D., Chen, Q., Ding, A., & Zhu, T. (2024). Amplified positive effects on air quality, health, and renewable energy under China's carbon neutral target. *Nature Geoscience*, 17, 411–418. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01425-1>
- Ruan, J., Qin, Z., Qian, S., Li, M., Jia, M., Zhang, L., Zhang, Z., Zhu, S., Jiang, H., Cai, B., Wang, S., & Tang, L. (2024). A hybrid method for assessing the city emission status toward carbon peak. *Urban Climate*, 55, 101927. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101927>
- Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Raymond, P. A., Dlugokencky, E. J., Houweling, S., Patra, P. K., Ciais, P., Arora, V. K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D. R., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K. M., Carrol, M., ... Zhuang, Q. (2020). The Global Methane Budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12(3), 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Sherman, P., Chen, X., & McElroy, M. B. (2017). -generated Electricity in China: Decreasing Potential, Inter-annual Variability and Association with Changing Climate. *Scientific Reports*, 7(1), 16294. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-16073-2>
- Shi, Q., Zheng, B., Zheng, Y., Tong, D., Liu, Y., Ma, H., Hong, C., Geng, G., Guan, D., He, K., & Zhang, Q. (2022). Co-benefits of CO₂ emission reduction from China's clean air actions between 2013–2020. *Nature Communications*, 13(1), 5061. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32656-8>
- Shin, H. H., Maquiling, A., Thomson, E. M., Park, I.-W., Stieb, D. M., & Dehghani, P. (2022). Sex-difference in air pollution-related acute circulatory and respiratory mortality and hospitalization. *Science of The Total Environment*, 806, 150515. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150515>
- Sun, Y., Jiang, Y., Xing, J., Ou, Y., Wang, S., Loughlin, D. H., Yu, S., Ren, L., Li, S., Dong, Z., Zheng, H., Zhao, B., Ding, D., Zhang, F., Zhang, H., Song, Q., Liu, K., Klimont, Z., Woo, J.-H., ... Hao, J. (2024). Air Quality, Health, and Equity Benefits of Carbon Neutrality and Clean Air Pathways in China. *Environmental Science & Technology*, 58(34), 15027–15037. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c10076>
- Wang, J., Lu, X., Du, P., Zheng, H., Dong, Z., Yin, Z., Xing, J., Wang, S., & Hao, J. (2023a). The Increasing Role of Synergistic Effects in Carbon Mitigation and Air Quality Improvement, and Its Associated Health Benefits in China. *Engineering*, 20, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.06.004>

- Wang, X., Gao, Y., Jeong, S., Ito, A., Bastos, A., Poulter, B., Wang, Y., Ciais, P., Tian, H., Yuan, W., Chandra, N., Chevallier, F., Fan, L., Hong, S., Lauerwald, R., Li, W., Lin, Z., Pan, N., Patra, P. K., Piao, S. (2024). The Greenhouse Gas Budget of Terrestrial Ecosystems in East Asia Since 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 38(2), e2023GB007865. <https://doi.org/10.1029/2023GB007865>
- Wang, X., Gao, Y., Wang, K., Sang, Y., Wang, Y., Zhang, Y., Hong, S., Zhang, Y., & Yuan, W. (2023b). The greenhouse gas budget for China's terrestrial ecosystems. *National Science Review*, 10(3). <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad274>
- World Meteorological Organization (WMO). (2024a). *State of the Global Climate 2023*. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2023>
- World Meteorological Organization (WMO). (2024b). *The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2023*. <https://library.wmo.int/records/item/69057-no-20-28-october-2024>
- Xi, D., Liu, L., Zhang, M., Huang, C., Burkart, K. G., Ebi, K., Zeng, Y., & Ji, J. S. (2024). Risk factors associated with heatwave mortality in Chinese adults over 65 years. *Nature Medicine*, 30(5), 1489–1498. <https://doi.org/10.1038/s41591-024-02880-4>
- Xia, X., Ren, P., Wang, X., Liu, D., Chen, X., Dan, L., He, B., He, H., Ju, W., Liang, M., Lu, X., Peng, J., Qin, Z., Xia, J., Zheng, B., Wei, J., Yue, X., Yu, G., Piao, S., & Yuan, W. (2024). The carbon budget of China: 1980–2021. *Science Bulletin*, 69, 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2023.11.016>
- Xiao, Q., Geng, G., Xue, T., Liu, S., Cai, C., He, K., & Zhang, Q. (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>
- Xie, Y., Liu, X., Li, D., Zhao, M., Weng, Z., Zhang, L., & Xu, M. (2023a). Health and economic benefits of reducing air pollution embodied in GBA's green and low-carbon development. *Urban Climate*, 52, 101755. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101755>
- Xie, Y., Xu, M., Pu, J., Pan, Y., Liu, X., Zhang, Y., & Xu, S. (2023b). Large-scale renewable energy brings regionally disproportional air quality and health co-benefits in China. *IScience*, 26(8), 107459. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.107459>
- Xu, H., Yue, C., Zhang, Y., Liu, D., & Piao, S. (2023a). Forestation at the right time with the right species can generate persistent carbon benefits in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120, e2304988120. <https://doi.org/10.1073/pnas.2304988120>
- Xu, R., Huang, S., Shi, C., Wang, R., Liu, T., Li, Y., Zheng, Y., Lv, Z., Wei, J., Sun, H., & Liu, Y. (2023b). Extreme Temperature Events, Fine Particulate Matter, and Myocardial Infarction Mortality. *Circulation*, 148(4), 312–323. <https://doi.org/10.1161/CIRCULATIONAHA.122.063504>
- Xu, R., Tong, D., Xiao, Q., Qin, X., Chen, C., Yan, L., Cheng, J., Cui, C., Hu, H., Liu, W., Yan, X., Wang, H., Liu, X., Geng, G., Lei, Y., Guan, D., He, K., & Zhang, Q. (2024). MEIC-global-CO₂: A

new global CO₂ emission inventory with highly-resolved source category and sub-country information. *Science China Earth Sciences*, 67, 450–465. <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1230-3>

- Yin, Z., Wan, Y., Zhang, Y., & Wang, H. (2022). Why super sandstorm 2021 in North China. *National Science Review*, 9(3), nwab165. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab165>
- Yu, Z., Ciais, P., Piao, S., Houghton, R. A., Lu, C., Tian, H., Agathokleous, E., Kattel, G. R., Sitch, S., Goll, D., Yue, X., Walker, A., Friedlingstein, P., Jain, A. K., Liu, S., & Zhou, G. (2022). Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 13, 5374. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32961-2>
- Yu, Z., Liu, S., Li, H., Liang, J., Liu, W., Piao, S., Tian, H., Zhou, G., Lu, C., You, W., Sun, P., Dong, Y., Sitch, S., & Agathokleous, E. (2024). Maximizing carbon sequestration potential in Chinese forests through optimal management. *Nature Communications*, 15, 3154. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47143-5>
- Zachariah, M., Philip, S., Pinto, I., Vahlberg, M., Singh, R., & Otto, F. (2023). Extreme heat in North America, Europe and China in July 2023 made much more likely by climate change. *World Weather Attribution (WWA)*. <https://doi.org/10.25561/105549>
- Zhang, C., Yan, M., Du, H., Ban, J., Chen, C., Liu, Y., & Li, T. (2023a). Mortality risks from a spectrum of causes associated with sand and dust storms in China. *Nature Communications*, 14, 6867. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42530-w>
- Zhang, L., Ruan, J., Zhang, Z., Qin, Z., Lei, Z., Cai, B., Wang, S., & Tang, L. (2024a). City-level pathways to carbon peak and neutrality in China. *Cell Reports Sustainability*, 1(5), 100102. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100102>
- Zhang, L., Sun, P., Huettmann, F., & Liu, S. (2022a). Where should China practice forestry in a warming world. *Global Change Biology*, 28, 2461–2475. <https://doi.org/10.1111/gcb.16065>
- Zhang, L., Wu, P., Niu, M., Zheng, Y., Wang, J., Dong, G., Zhang, Z., Xie, Z., Du, M., Jiang, H., Liu, H., Cao, L., Pang, L., Lv, C., Lei, Y., Cai, B., & Zhu, Y. (2022b). 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, Q., Yin, Z., Lu, X., Gong, J., Lei, Y., Cai, B., Cai, C., Chai, Q., Chen, H., Dai, H., Dong, Z., Geng, G., Guan, D., Hu, J., Huang, C., Kang, J., Li, T., Li, W., Lin, Y., ... He, K. (2023b). Synergetic roadmap of carbon neutrality and clean air for China. *Environmental Science and Ecotechnology*, 16, 100280. <https://doi.org/10.1016/j.esse.2023.100280>
- Zhang, S., Zhang, C., Cai, W., Bai, Y., Callaghan, M., Chang, N., Chen, B., Chen, H., Cheng, L., Dai, H., Dai, X., Fan, W., Fang, X., Gao, T., Geng, Y., Guan, D., Hu, Y., Hua, J., Huang, C., ... Gong, P. (2023c). The 2023 China report of the Lancet Countdown on health and climate change: taking stock for a thriving future. *The Lancet Public Health*, 8(12), e978–e995. [https://doi.org/10.1016/S2468-2667\(23\)00245-1](https://doi.org/10.1016/S2468-2667(23)00245-1)

- Zhang, W., Clark, R., Zhou, T., Li, L., Li, C., Rivera, J., Zhang, L., Gui, K., Zhang, T., Li, L., Pan, R., Chen, Y., Tang, S., Huang, X., & Hu, S. (2024b). 2023: Weather and Climate Extremes Hitting the Globe with Emerging Features. *Advances in Atmospheric Sciences*, 41, 1001–1016. <https://doi.org/10.1007/s00376-024-4080-3>
- Zhang, Z., Poulter, B., Feldman, A. F., Ying, Q., Ciais, P., Peng, S., & Li, X. (2023d). Recent intensification of wetland methane feedback. *Nature Climate Change*, 13, 430–433. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01629-0>
- Zheng, B., Ciais, P., Chevallier, F., Chuvieco, E., Chen, Y., & Yang, H. (2021). Increasing forest fire emissions despite the decline in global burned area. *Science Advances*, 7(39), eabh2646. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abh2646>
- Zheng, B., Ciais, P., Chevallier, F., Yang, H., Canadell, J. G., Chen, Y., van der Velde, I. R., Aben, I., Chuvieco, E., Davis, S. J., Deeter, M., Hong, C., Kong, Y., Li, H., Li, H., Lin, X., He, K., & Zhang, Q. (2023). Record-high CO₂ emissions from boreal fires in 2021. *Science*, 379(6635), 912–917. <https://doi.org/10.1126/science.ade0805>
- Zhu, K., Zhang, J., Niu, S., Chu, C., & Luo, Y. (2018). Limits to growth of forest biomass carbon sink under climate change. *Nature Communications*, 9, 2709. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05132-5>
- 罗良文, & 雷朱家华. (2024). 中国碳市场政策的减污降碳协同效应. *资源科学*, 46, 53–68.
- 孙雪妍, 白雨鑫, & 王灿. (2023). 减污降碳协同增效: 政策困境与完善路径. *中国环境管理*, 15, 16–23. <https://doi.org/10.16868/j.cnki.1674-6252.2023.02.016>
- 孙世达, 张改革, 孙露娜, 徐晨曦, 郭梦婕, 崔泽琪, 何学娟, 李富柏, 宋子谦, 薄宇, & 贺克斌. (2023). 河北省 2013 ~ 2020 年大气污染治理进程中的减污降碳协同效益. *环境科学*, 44, 5431–5442. <https://doi.org/10.13227/j.hj.kx.202210097>
- 尹志聪, 霍芊伊, 麻晓晴, 张艺佳, 马小会, & 王会军. (2023). 触发 2023 年春季中国北方沙尘暴的沙源累积和天气扰动机制. *大气科学学报*, 46(3), 321–331.
- 张瑜, 孙倩, 薛进军, & 杨翠红. (2022). 减污降碳的协同效应分析及其路径探究. *中国人口·资源与环境*, 32, 1–13.
- 电力规划设计总院. (2023). 报告: 我国能源消费呈现刚性增长态势. <https://www.chinanews.com.cn/cj/2023/08-31/10070292.shtml>
- 国家发改委. (2024). 人民日报 | 更高水平更高质量做好节能降碳工作. https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/wld/zcx/lddt/202405/t20240514_1386175.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. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202302/t20230228_1919001.html
- 国家统计局. (2024). 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报. https://www.stats.gov.cn/xxgk/sjfb/tjgb2020/202402/t20240229_1947923.html

- 国家铁路局 . (2024). 2023 年铁道统计公报 . <https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/tielu/202407/P020240708579407135335.pdf>
- 国资委 . (2024). “双碳”目标下, 煤电何去何从 . http://epaper.cenews.com.cn/html/1/2024-03/21/05B/2024032105B_.pdf.pdf
- 工业和信息化部 商务部 海关总署 市场监管总局 . (2024). 2023 年度中国乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分情况公告 . https://www.miit.gov.cn/jgsj/zbys/wjfb/art/2024/art_cb9144de15c7481f83679c74ab2b5387.html
- 交通运输部 . (2024). 2023 年交通运输行业发展统计公报 . https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html
- 可再生能源专委会 (CREIA). (2024). 数说 | 2023 年我国能源电力发展情况 . <https://mp.weixin.qq.com/s/-l1ep2yV73kmvFZWubo-QQ>
- 绿色和平 . (2024). 盘点当前中国电力部门低碳转型六大趋势 | 数据解读 . <https://c.aiiz.cn/uhATej>
- 农民日报 . (2024). 我国形成秸秆多元利用新格局 . https://szb.farmer.com.cn/2024/20240514/20240514_001/20240514_001_3.htm
- 澎湃新闻 . (2023). 联合国气候大会提出的“三倍可再生能源”目标意味着什么 . https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_25701390
- 气候变化与能源转型项目 (CCETP). (2024). 2023 年煤炭消费数据解读 . https://mp.weixin.qq.com/s/GWSNRfLBO_tce6lNE613og
- 前瞻网 . (2024). 2024-2029 年中国烟气治理行业市场发展情况分析 . <https://www.163.com/dy/article/J174S3UN051480KF.html>
- 全国绿化委员会 . (2024). 2023 年中国国土绿化状况公报 . <https://www.forestry.gov.cn/c/www/gtlhbg/550046.jhtml>
- 人民网 . (2023). 提升百姓获得感和幸福感, 多地探索“绿色”清洁取暖新方式 . <http://finance.people.com.cn/n1/2023/1203/c1004-40130642.html>
- 生态环境部 . (2023a). 关于公开征求《关于推进实施水泥行业超低排放的意见 (征求意见稿)》和《关于推进实施焦化行业超低排放的意见 (征求意见稿)》意见的通知 . http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202306/t20230616_1034018.html
- 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/xwfbh/gbwxxwfbh/xwfbh/hjbhb/Document/1739106/1739106.htm>
- 生态环境部 . (2024a). 《2023 年中国生态环境状况公报》.
- 生态环境部 . (2024b). 生态环境部部长黄润秋在 2024 年全国生态环境保护工作会议上的工作报告 . http://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202401/t20240127_1064954.shtml
- 生态环境部, 工业和信息化部, 商务部, 海关总署, 市场监管总局 . (2023). 关于实施汽车国六排放标准

有关事宜的公告 . http://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk01/202305/t20230509_1029448.html

新华社 . (2023). 十年来全国能耗强度累计降低 26.4 % . https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202307/content_6890946.htm

中国环境报 . (2022). 推动空气质量持续改善 . http://epaper.cenews.com.cn/html/2022-03/15/content_74747.htm

中国科学院 . (2023). 《林火碳排放研究蓝皮书（2023）》 .

中国人大网 . (2024). 国务院关于 2023 年度环境状况和环境保护目标完成情况的报告 . http://www.npc.gov.cn/npc/c2/c30834/202404/t20240424_436701.html

中国民用航空局 . (2024). 2023 年民航行业发展统计公报 . <http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202405/P020240531700964611105.pdf>

中国气象局 . (2023). 《2022 中国温室气体公报》 .

中国气象局 . (2024). 《2023 年中国气候公报》 .

中国气象局气候变化中心 . (2024). 《中国气候变化蓝皮书（2024）》 . 科学出版社

中国电力企业联合会 . (2024). 2023 年电力行业经济运行报告 . <http://lwzb.stats.gov.cn/pub/lwzb/bztt/202405/W020240527578179924981.pdf>

中能传媒研究院 . (2024). 年度重磅 | 能源发展回顾与展望报告——油气篇 . 中能传媒研究院 . https://mp.weixin.qq.com/s/ZCrX_yZuUM4PrUAwul6WYA

自然资源部 . (2024). 2023 年中国自然资源公报 . <https://m.mnr.gov.cn/gk/tzgg/202402/P020240312701247258838.pdf>

附录

(1) PM_{2.5} 气象条件评估指数 (EMI)

PM_{2.5} 气象条件评估指数 (EMI) 是一个用于表征 PM_{2.5} 浓度变化中气象条件贡献的无量纲指标, 值越大表征气象条件越不利于近地面大气中 PM_{2.5} 的稀释与扩散 (QX/T 479—2019)。

计算公式: EMI 的计算涉及排放沉降项 (E)、传输项 (T) 和扩散项 (D) 的积分, 见公式 (1):

$$I = I(t_0) + \int_{t_0}^{t_1} (E + T + D) \cdot dt \quad (1)$$

式中:

I 为 EMI, 无量纲; t_0 为积分起始时间, 单位秒 (s); t_1 为积分终止时间, 单位为秒 (s); E 为排放沉降项, 单位为每秒 (s^{-1}), 该项中的气柱高度为 1500m; T 为传输项, 单位为每秒 (s^{-1}); D 为扩散项, 单位为每秒 (s^{-1}); t 为时间, 单位为秒 (s)。

EMI 在评估中的应用方法主要是通过设定 PM_{2.5} 年排放率不变, 考虑排放率的月际变化, 来评估不同月份或时段气象条件对 PM_{2.5} 浓度变化的贡献。

(2) O₃ 气象条件评估指数

O₃ 的生成、消耗及前体物的排放, 均与气

象条件密切相关。本文采用国家气象中心研发的 O₃ 气象条件评估指数, 该指数的定义为: 在特定时段内, 不考虑排放源的年际变化前提下, 气象要素通过影响臭氧的光化学生成及消耗、前体物及臭氧的传输与沉降等化学和物理过程, 进而对 O₃ 浓度变化所造成的影响。指数综合考虑多个相关气象要素, 能够定量反映气象条件对 O₃ 光化学生成、消耗、传输扩散等一系列物理化学过程的影响, 定量表征大气辐射、气温、湿度、风等气象要素对 O₃ 的综合影响。O₃ 气象条件评估指数与 O₃ 质量浓度呈线性正相关, 其值越高代表气象条件越有利于 O₃ 浓度升高。

O₃ 气象条件评估指数的计算是首先对单站观测数据进行统计分析, 分析不同气象要素对 O₃ 污染的影响程度和气象因子落在不同区间 O₃ 污染发生概率, 然后根据 O₃ 的化学机理、大气传输过程对气象因子分时段进行统计建模。不同区域不同站点 O₃ 的主要气象影响因子不同, 该指数产品利用客观统计方法通过单站建模构建, 适合在全国推广应用。例如长三角地区 O₃ 的主要气象影响因子为日内最高温度、海平面气压和地面风, 京津冀及周边地区 O₃ 的主要气象影响因子则为日内最高温度和海平面气压。

对于任意范围 (全国、区域、城市、站点)、任意时段的评估, 先计算单日该范围内所有站点的算术平均, 作为该范围的日值; 再计算评估时段内该范围日值的算术平均, 即为该范围在评估时段内的平均值。

报告编辑团队

- 蔡慈澜 清华大学地球系统科学系博士后
清洁空气政策伙伴关系秘书处负责人
- 孙 茹 清洁空气政策伙伴关系秘书处传播经理
- 李 菁 清洁空气政策伙伴关系秘书处项目经理
- 安秒瑞 清洁空气政策伙伴关系秘书处项目官员
- 赵烨轩 清洁空气政策伙伴关系秘书处项目官员
- 尹 宇 清洁空气政策伙伴关系秘书处传播官员
- 俞柯冰 清洁空气政策伙伴关系秘书处传播专员
- 吕欣霖 清洁空气政策伙伴关系秘书处传播专员

2024 中国碳中和与清洁空气协同路径

减污降碳推动经济绿色发展