

# 中国碳中和与清洁空气 协同路径2025

“十四五”盘点——加快绿色低碳转型，持续改善空气质量



## 支持单位

---

清华大学碳中和研究院  
北京大学环境科学与工程学院  
生态环境部环境规划院  
南京信息工程大学大气科学学院  
清华大学地球系统科学系  
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 (2025), “中国碳中和与清洁空气协同路径 2025——‘十四五’盘点——加快绿色低碳转型, 持续改善空气质量”, 清华大学碳中和研究院, 北京, 中国

插图来源: *pexels, unsplash* 网站; 封面图素材: AI 生成

# 中国碳中和与清洁空气协同路径 年度报告（2025）

“十四五”盘点——加快绿色低碳转型，持续改善空气质量



# 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

鲁 奎 清华大学碳中和研究院院长助理、清华大学环境学院教授  
(2025年度报告总召集人)

尹志聪 南京信息工程大学大气科学学院副院长、教授

雷 宇 生态环境部环境规划院大气环境规划研究所所长  
碳达峰碳中和研究中心主任

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院长聘副教授、研究员  
环境健康系系主任

刘 欣 能源基金会环境管理项目主任

蔡慈澜 清洁空气政策伙伴关系 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

王慧丽 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心高级工程师

张 立 江苏大学环境与安全工程学院资格教授

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

冀云卿 生态环境部环境规划院生态环境管理与政策研究所高级工程师

钱煜坤 生态环境部对外合作与交流中心工程师

刘 欣 能源基金会环境管理项目主任

张西雅 能源基金会环境管理项目主管

毛博阳 能源基金会环境管理项目主管

## 第三工作组

---

鲁 瑕 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 国家建筑绿色低碳技术创新中心总工程师

胡 娣 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

余扬昊 清华大学电机工程与应用电子技术系博士后

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 / 长聘副教授

覃 栎 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院长聘副教授、研究员

环境健康系系主任（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

李涵涵 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教授

## 咨询专家

---

张世秋 北京大学环境科学与工程学院教授

蒋莉萍 国网能源研究院国网三级顾问、教授级高级工程师

王书肖 清华大学环境学院教授

段小丽 北京科技大学能源与环境工程学院副院长、教授

孙 颖 国家气候中心首席科学家

许艳玲 生态环境部环境规划院研究员

王 克 中国人民大学生态环境学院教授

陈 丹 北京大学能源研究院气候变化与能源转型项目副主任、研究员

## 报告编辑团队

---

蔡慈澜 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

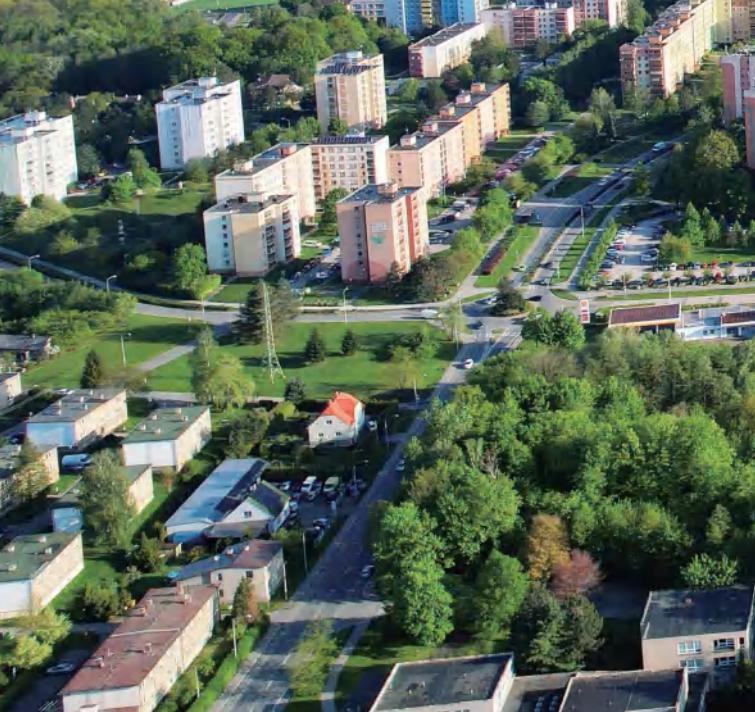
王福权 清洁空气政策伙伴关系秘书处项目经理

尹 宇 清洁空气政策伙伴关系秘书处传播经理

赵烨轩 清洁空气政策伙伴关系秘书处项目官员

俞柯冰 清洁空气政策伙伴关系秘书处传播专员

本报告为《中国碳中和与清洁空气协同路径》年度报告第五期，以“‘十四五’盘点——加快绿色低碳转型，持续改善空气质量”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

<b>摘要</b> .....	<b>8</b>
<b>第一章 引言</b> .....	<b>17</b>
<b>第二章 空气污染与气候变化</b> .....	<b>21</b>
2.1 空气质量变化 .....	22
2.2 气候变化与极端天气气候 .....	29
2.3 大气中的温室气体 .....	32
<b>第三章 治理体系与实践</b> .....	<b>39</b>
3.1 协同治理体系建设 .....	40
3.2 协同治理政策 .....	43
3.3 地方实践 .....	46
<b>第四章 结构转型与治理技术</b> .....	<b>49</b>
4.1 能源结构转型 .....	50
4.2 产业结构转型 .....	56
4.3 交通结构转型 .....	61
4.4 建筑能源系统低碳转型 .....	63
4.5 碳捕集利用与封存技术 .....	67
4.6 新型电力系统 .....	70
4.7 污染去除技术提质增效 .....	73
<b>第五章 大气成分源汇及减排路径</b> .....	<b>77</b>
5.1 人为源碳排放 .....	78
5.2 土地利用变化与陆地碳汇 .....	81
5.3 污染物排放及协同减排进展 .....	83
5.4 协同减排路径 .....	86
<b>第六章 健康影响与协同效益</b> .....	<b>89</b>
6.1 空气污染与健康影响 .....	90
6.2 气候变化与健康影响 .....	95
6.3 协同治理的健康效益 .....	97
<b>参考文献</b> .....	<b>99</b>

2025



## 摘要

“十四五”期间，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，但成果尚不稳固，臭氧污染防控仍面临挑战。我国2035年国家自主贡献（NDC）目标的提出与深化，为全球气候治理注入了新动力。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，协同推进降碳、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。科学评估碳中和与清洁空气协同路径的进展与挑战，不仅是履行国际承诺的必然要求，更是推动国内高质量发展、构建现代化环境治理体系的核心支撑。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。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》系列报告的编写工作。本报告是第五期年度报告，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，在跟踪评估“十四五”进展的基础上，分析了当前协同治理面临的关键问题，并从治理体系、结构转型、技术革新、健康效益等维度提出面向“十五五”的政策建议，以深化碳中和与清洁空气的协同路径，为实现2035年NDC目标奠定坚实基础。

## 空气污染与气候变化 2

- 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

## 治理体系与实践 3

- 协同治理体系建设
- 协同治理政策
- 地方实践

## 结构转型与治理技术 4

- 能源结构转型
- 产业结构转型
- 交通结构转型
- 建筑能源系统低碳转型
- 碳捕集利用与封存技术
- 新型电力系统
- 污染去除技术提质增效

## 大气成分源汇及减排路径 5

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

## 健康影响与协同效益 6

- 空气污染与健康影响
- 气候变化与健康影响
- 协同治理的健康效益



# 1 空气污染与气候变化



2024 年，全国 339 个地级及以上城市  $PM_{2.5}$  平均浓度为  $29.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较 2020 年下降 11.2%，其中京津冀及周边和汾渭平原下降最明显。全国及各个重点区域的  $PM_{2.5}$  年均浓度的三年滑动平均呈现持续下降趋势，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。从 2020 年到 2024 年，全国气象条件评估指数呈下降趋势，表明气象条件总体有利于  $PM_{2.5}$  浓度的降低。

尽管在降低  $PM_{2.5}$  方面取得了显著成绩，但臭氧浓度却呈现波动态势。2024 年  $O_3$  日最大 8 小时平均值第 90 百分位数 ( $O_3-8\text{H } 90\text{Per}$ ) 年平均浓度为  $144 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较 2020 年 ( $138 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 增长 4.3%，汾渭平原地区增长最为显著。2024 年  $O_3-8\text{H } 90\text{Per}$  平均浓度低于  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的城市数量达标占比为 75.8%，较 2020 年占比减少 7 个百分点，臭氧污染治理仍存在较大挑战。2024 年全国臭氧气象条件评估指数相对 2020 年上升 1.45%，表明气象条件整体利于全国臭氧浓度上升，重点区域中气象条件的变化

也均有利于臭氧浓度的上升。臭氧污染加剧的主要原因是 VOCs 排放源分散导致治理效率不足，叠加热浪频发导致臭氧浓度不降反升。

2024 年，全球地表平均温度较工业革命时期 (1850—1900 年) 增暖了  $1.55^\circ\text{C} \pm 0.13^\circ\text{C}$ ，成为有记录以来最暖年份。极端天气气候事件日益频繁且呈现出新的特征，多气候灾害在不同地区同时发生，为灾害应对和管理带来了更大的挑战。大气主要温室气体仍保持显著的上升趋势，其中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  平均浓度分别达到 423.9 ppm 和 1942 ppb。

面向“十五五”时期，建议从三方面强化协同治理：一是开展极端天气与污染反馈机理研究，构建气候 - 大气耦合预警系统；二是进一步锚定重点污染区域与行业，强化气象 - 环境协同治理；三是建立跨部门数据共享平台，通过科技创新和系统治理，为 2035 年美丽中国目标实现提供系统性支撑。

## 2 治理体系与实践

协同推进降碳、减污、扩绿、增长已成为中国式现代化建设的核心任务。2024年，《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》等纲领性文件进一步明确将其作为深化生态文明体制改革的关键内容，为“十五五”时期协同治理指明方向。

在制度体系建设方面，生态环境部持续强化源头治理与系统治理，2024年完成11个省90个城市的融合清单编制，为精准解析碳排放与污染物协同关系奠定基础。治理政策层面，通过出台省级工作方案、制定50余项相关标准，构建起“自上而下”的协同治理框架；碳市场迈向法治化、规范化新阶段，碳普惠、信息披露等社会参与机制不断健全。地方实践方面，21个城市和43个园区开展减污降碳协同创新试点，形成一批典型案例，全国约21%的城市实现PM<sub>2.5</sub>达标与CO<sub>2</sub>排放达峰。

虽然减污降碳协同治理体系建设有了显著进展，但是由于不同部门核心工作目标的差异，在一些领域仍然缺乏有力的碳中和与清洁空气协同治理手段，导致二氧化碳排放控制和大气污染物排放削减力度不够协同。到2024年底，氮氧化物、挥发性有机物等污染物已提前完成“十四五”总量减排目标，但碳排放强度降低目标的完成情况与时序进度的要求仍存在差距。除此之外，推动碳中和与清洁空气协同的政策多元化尚有不足。

为此，建议“十五五”期间从四方面重点突破：加强顶层设计，在规划中统筹产业、能源、交通等关键领域政策工程；完善跨部门协调机制，形成上下联动的工作格局；强化财税金融支持，对协同项目和技术创新给予倾斜；深化试点创新，推广典型案例，形成可复制的解决方案。



### 3 结构转型与治理技术

“十四五”期间，我国结构转型与治理技术取得显著进展。2024年能源结构实现历史性转变，非化石能源消费占比首次超越石油，升至19.8%；新能源装机占总装机比重达42%，首次成为第一大电源，风电、光伏累计装机提前6年实现2030年目标。产业结构持续优化，高技术制造业增加值增长8.9%，“新三样”出口突破万亿元。交通领域绿色转型成效显著，铁路货运占比提升至9.1%，新能源汽车保有量达3140万辆，充电基础设施覆盖率达98%。治理技术方面，新型电力系统初步成型，可再生能源发电量占比超过1/3；CCUS技术实现千万吨级集群示范突破，成本竞争力增强。

然而，转型进程仍面临结构性挑战。煤炭消费占比仍超过50%，能源消费刚性增长态势未根本改变。高碳行业转型难度大，绿色氢能等关键技术尚处示范阶段。电力系统面临低碳-安全-经济“三元矛盾”，建筑领域碳排放

仍处平台期，CCUS技术仍存在成本与商业化瓶颈。

“十五五”时期是全面推进新型能源体系建设、助力如期实现碳达峰目标的关键时期，应做好“十五五”规划与2035年NDC目标统筹衔接，全面贯彻实施《中华人民共和国能源法》，锚定2030年、2035年、2060年非化石能源占比达到25%左右、30%以上、80%以上的中长期目标，以风电和太阳能发电装机争取达到36亿千瓦以上为目标为抓手，坚持集中式与分布式、陆上与海上并举，加大新能源开发力度，推动能源消费侧协同转型，在工业、交通、建筑、数据中心等重点领域大力实施可再生能源替代行动，促进新能源就地消纳。建立能耗双控向碳排放双控转型新机制，统筹能源安全和能源结构转型，为实现2035年NDC目标、“美丽中国”和中国式现代化建设提供有力保障。

## 4 大气成分源汇及减排路径

“十四五”期间，推动减污降碳协同增效已经成为我国生态文明建设的重点战略方向。为达成节能降碳目标，我国严格实施煤炭消费总量控制，积极推进清洁能源替代。期间，能源消费总量增速已经显著低于国内生产总值增速，清洁能源消费大幅增长 40.9%，煤炭消费增速放缓并在 2024 年出现下降趋势。至 2024 年，中国碳强度（单位 GDP 二氧化碳排放量）相较于 2020 年累计下降幅度约为 7.8%。

中国陆地碳汇在“十四五”期间总体保持稳定，年际增长速率略有放缓，年均净碳汇估算为  $0.28 \pm 0.05 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ，这一规模约抵消了超过 10% 的人为二氧化碳排放量。当前，土地利用和覆盖变化已成为推动我国陆地碳汇增长的首要驱动力。

《打赢蓝天保卫战三年行动计划》收官后，“十四五”期间我国虽面临末端控制潜力收窄的挑战，但主要大气污染物排放量总体仍能保持下降态势。其中，工业部门工艺过程的

碳污协同减排成效尤为突出，能够在多数省份实现  $\text{CO}_2$  排放与  $\text{PM}_{2.5}$  污染改善的正协同效益。这一成效主要得益于重点工业行业的产业结构调整以及高耗能产品市场需求与供给的同步回落。

受疫情后经济复苏牵引，政策重心向稳定增长倾斜，碳减排目标优先级有所下降。2020—2024 年间  $\text{CO}_2$  排放增长率高达 15.4%，截至 2024 年，我国距“十四五”碳强度下降目标仍有差距。从生态碳汇维度看，未来陆地碳汇稳定增长也面临多重挑战。“十四五”期间我国全行业  $\text{CO}_2$  与主要大气污染物尚未实现协同减排，面临“减污难降碳”的阶段性挑战。

随着我国大气污染治理已迈入深水期，新一轮 NDC 目标对温室气体与大气污染物协同减排提出了新要求。未来的碳中和与清洁空气协同治理逻辑，不仅需“以污促碳”转向“以碳促污”，更要将管控范围延伸至全经济范围的温室气体，形成更全面的协同治理框架。

## 5 健康影响与协同效益

空气污染与气候变化是我国人群健康面临的重大环境风险，“十四五”期间，中国在推动碳中和与清洁空气协同治理方面取得了显著成就，带来了巨大的公共健康效益。截至 2024 年，全国人口加权  $PM_{2.5}$  年均浓度降至  $30.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，与 2021 年相比降幅 2.5%，与  $PM_{2.5}$  相关的过早死亡人数自 2021 年以来下降了 3.2%。“十四五”期间，臭氧污染并未得到明显缓解，全国臭氧浓度持续在高位平台期徘徊，由此带来的健康负担每年导致超过 14.3 万人过早死亡。家庭能源结构转型对公共健康和气候变化有显著影响。

在气候变化健康影响方面，极端高温不仅显著增加心脑血管疾病住院风险，还会引发焦虑、抑郁等心理健康问题，并对认知功能产生长期影响，尤其加剧老年人群的死亡风险。洪水事件可能导致流产风险上升及亲密伴侣暴力发生率增加，高温 – 干旱复合事件也会显著提高非意外死亡风

险。为此，亟需构建个人防护、社区预警、健康服务及环境适应相结合的综合防护体系。

在碳中和目标推动下，能源清洁化虽面临一定成本压力，但其产生的健康效益在多数地区足以覆盖转型成本。因此，推动空气污染与气候变化的协同治理，特别是在居民能源领域推进清洁转型，对保障公共健康具有重要战略意义。

“十四五”期间的清洁空气行动产生了巨大的协同健康效益，然而，这种协同性并非无条件或自动实现的。持续的臭氧污染问题表明，应将单纯聚焦于减碳或减  $PM_{2.5}$  的策略转向多污染物协同控制的综合性策略。未来的政策设计必须更加注重综合性、系统性和前瞻性，强化跨部门的统筹协调，确保脱碳路径能够带来最大化的健康和环境福祉。

( 相关参考文献未逐一列出，详见第 99 页 )





## 引言



“十四五”以来，随着我国蓝天保卫战的持续推进，我国实施的一系列大气污染防治政策措施治理成效显著，虽面临末端控制潜力收窄的挑战，但主要大气污染物排放量总体仍保持下降态势。需要关注的是，臭氧污染问题在“十四五”期间仍呈现波动态势，臭氧污染控制尚未进入稳健下降通道。“双碳”目标提出五年以来，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。我国严格实施煤炭消费总量控制、积极推进清洁能源替代。碳排放强度持续下降，且在多数省份实现 $\text{CO}_2$ 减排与 $\text{PM}_{2.5}$ 污染改善的正协同效益，减污降碳协同效应持续显现。

2025年9月，我国在联合国气候变化峰会宣布了中国新一轮国家自主贡献（NDC）目标，“1+3+3”的一揽子目标明确了未来十年应对气候变化的重点任务，全面展现了我国应对气候变化的雄心与力度，标志着中国迈入了更加系统全面的低碳韧性发展新征程。不仅如此，中国共产党的二十届四中全会及“十五五”规划纲要建议稿再次明确，应“以碳达峰碳中和为牵引，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，筑牢生态安全屏障，增强绿色发展动能”。要持续深入推进污染防治攻坚和生态系统优化，加快建设新型能源体系，积极稳妥推进和实现碳达峰，加快形成绿色生产生活方式。

自2021年起，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》系列报告，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。系列报告依托空气污染与气候变化协同治理监测指标体系，坚持自然科学和社会科学深度交叉融合，围绕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五大维度，设定20项核心指标。通过持续追踪、定期评估，逐步建立碳中和与清洁空气协同治理理论体系，识别关键瓶颈并提出破解方案。本年度报告在既有指标体系和前期研究基础上，系统盘点“十四五”期间我国降碳减污协同成效，明确实现“双碳”与“美丽中国”战略目标面临的关键挑战，并面向“十五五”提出深化协同治理的建议。



# 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、协同治理政策和地方实践三项指标，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、污染物排放及协同治理进展和协同减排路径四项指标，解析中国主要大气成分历史排放变化及驱动因素，提出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。

2025年编写过程中共组织了13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，不断完善评价指标体系，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”效果的核心监测指标，实时追踪全国及区域大气污染和气候变化状况，有助于科学精准制定“碳中和”和“清洁空气”协同路径，提升国家和城市应对气候变化、大气污染防治及防灾减灾能力。2024年相较2020年全国地级及以上城市PM<sub>2.5</sub>浓度下降了11.2%，其中京津冀及周边地区、汾渭平原PM<sub>2.5</sub>浓度分别下降了17.3%和17.5%。2024年PM<sub>2.5</sub>重度及以上污染天数比率为0.6%。中国在减少PM<sub>2.5</sub>污染方面取得了持续进展，但仍待根本性好转；暖季O<sub>3</sub>浓度呈现波动上升态势，需要重点关注高温-O<sub>3</sub>耦合增强机制及其协同应对措施的研究和实践。2024年全球大气中的温室气体浓度创新高，成为有器测记录以来最热年份。

# 2.1 空气质量变化

2024 年，全国 339 个地级及以上城市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度为 29.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，较 2020 年 (33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 下降 11.2%，低于国家空气质量二级标准 (35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )，但仍高于世界卫生组织 (WHO) 第二阶段过渡目标值 (25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )。全国 O<sub>3</sub> 年均浓度为 144  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，比 2020 年 (138  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 升高 4.3%，低于国家空气质量二级标准 (160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 的城市占比为 75.8%。“十四五”期间，我国治理 PM<sub>2.5</sub> 污染方面取得了显著进展。但是暖季 O<sub>3</sub> 浓度出现上升，这可能与高温热浪事件增多有关。

## PM<sub>2.5</sub> 变化情况

2024 年全国 339 个地级及以上城市 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度为 29.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，低于国家空气质量二级标准 (35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )，仍高于 WHO 第二阶段过渡目标值 (25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )，相比于 2020 年 (33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 下降 11.2% (图 2-1a)。2020—2024 年，全国 339 个地级及以上城市大气 PM<sub>2.5</sub> 浓度总体呈下降态势，但下降趋势放缓。五个区域的趋势和全国一样，都是下降的趋势。相比于 2020 年，2024 年京津冀及周边和汾渭平原下降最明显，分别下降 17.3% 和 17.5% (图 2-1a)。2020—2024 年间，全国及各个重点区域的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度的三年滑动平均值呈现持续下降，相比 2020 年下降 15.4%，显示出“十四五”期间大气污染防治措施取得了较显著的成绩。

2024 年全国 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度低于国家空气质量二级标准 (35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 的城市数量为 252 个，比 2020 年 (212 个) 多 40 个 (图 2-1b)，在重点城市区域中，京津冀及周边和长三角地区 2024 年的达标城市数较 2020 增加最为明显 (分别增长 4 个和 9 个)；珠三角地区 2020—2024 年所有城市均达到国家空气质量二级标准；汾渭平原达标城市数与往年基本持平；成渝地区 2024 年 16 个城市达标 10 个。若对标 WHO 第二阶段过渡目标值 (25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )，2024 年全国 339 个地级及以上城市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度低于 WHO 第二阶段过渡目标值的城市数量为 113 个，比 2020 年多 13 个。2020—2024 年，珠三角 9 个城市也全部达到 WHO 第二阶段过渡目标值；长三角地区每年只有 2 个城市达到 WHO 第二阶段过渡目标值；京津冀及周边、汾渭平原和成渝地区各城市均未达到 WHO 第二阶段过渡目标值。

2024 年全国 339 个地级及以上城市  $PM_{2.5}$  重度及以上污染天数占比为 0.6%，相对 2023 年（1.1%）和 2020 年（1.1%）显著下降，

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，2024 年京津冀及周边地区仍存在 1.7% 的  $PM_{2.5}$  重度及以上污染天数，

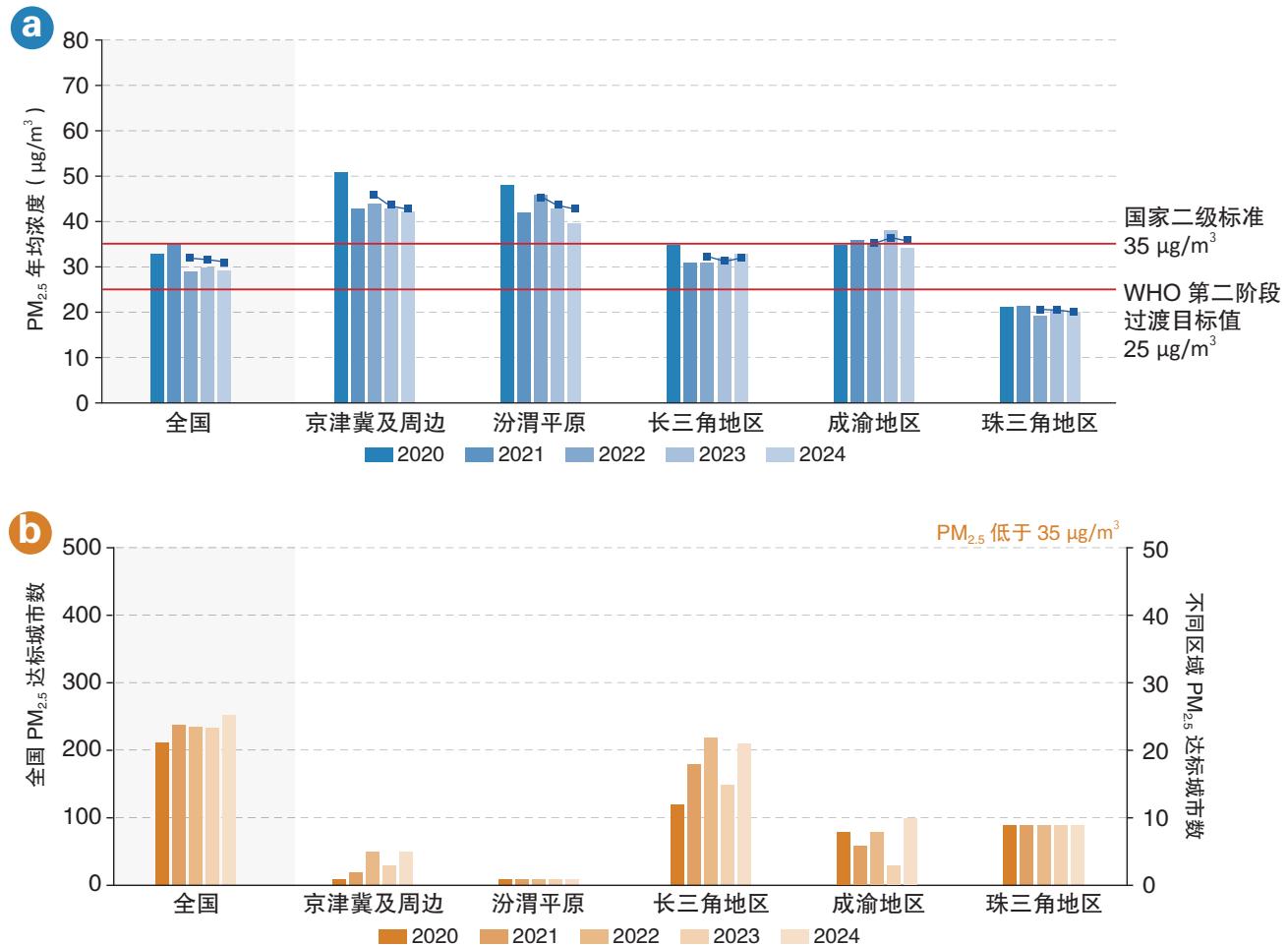


图 2-1 2020 年至 2024 年全国及重点区域年均  $PM_{2.5}$  浓度（柱状）以及三年滑动平均浓度（蓝色点线）(a);  
2015 年至 2024 年全国及重点区域  $PM_{2.5}$  年均浓度达标城市数 (b: 以  $35\mu\text{g}/\text{m}^3$  为标准)

注: 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, 沧州, 廊坊, 衡水, 定州, 山东省济南, 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, 洛阳, 平顶山, 安阳, 鹤壁, 新乡, 焦作, 濮阳, 许昌, 漯河, 三门峡, 商丘, 周口, 济源, 共 38 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, 嘉兴, 湖州, 绍兴, 舟山, 安徽省合肥, 芜湖, 蚌埠, 淮南, 马鞍山, 淮北, 滁州, 阜阳, 宿州, 六安, 亳州, 共 31 个城市。汾渭平原包含山西省太原, 阳泉, 长治, 晋城, 晋中, 运城, 临汾, 吕梁, 陕西省西安, 铜川, 宝鸡, 咸阳, 渭南, 共 13 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（注: 以上为 2023 年 11 月国务院在《空气质量持续改善行动计划》中进行的分区, 在 2024 年的公报中正式实行, 24 年以前的分区还是按照未更新前的）

但相对于 2020 年下降了约一半；汾渭平原的  $PM_{2.5}$  重度及以上污染天数占 0.6%，首次下降至 1% 以下；长三角和成渝地区的  $PM_{2.5}$  重度及以上污染天数仅占 0.4% 和 0.3%；珠三角地区近五年未出现  $PM_{2.5}$  重度及以上污染（图 2-2）。

$PM_{2.5}$  气象条件评估指数（EMI）可以表征气象条件变化对  $PM_{2.5}$  浓度的影响，EMI 指数值越大代表气象条件越有利于  $PM_{2.5}$  浓度上升，指数越低，大气自净能力越强（刘洪利等，

2018）。从 2020 到 2024 年全国及重点区域 EMI 指数逐年变化来看，2024 年全国平均  $PM_{2.5}$  污染气象条件与 2020 年相比下降 2.47%，较过去 5 年平均下降 2.58%，说明气象条件整体利于全国  $PM_{2.5}$  浓度降低（图 2-3）。在重点区域中，除成渝地区 EMI 指数相对 2020 年和过去 5 年平均值分别上升 8.02% 和 0.70%，气象条件不利于该地区  $PM_{2.5}$  浓度降低外，其余重点城市气象条件均有利于  $PM_{2.5}$  浓度降低，具体为京津冀及周边地区 EMI 指数相对 2020 年和过去 5 年平均值分别下降 8.75% 和 4.14%；汾渭平原分

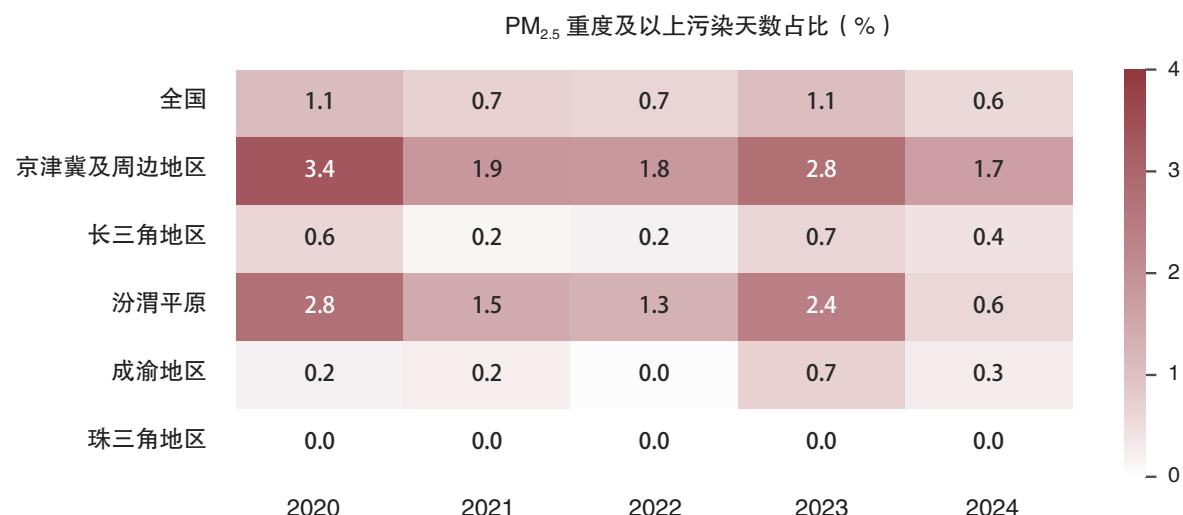


图 2-2 2020 年至 2024 年全国及重点区域  $PM_{2.5}$  重度及以上污染天数占比情况

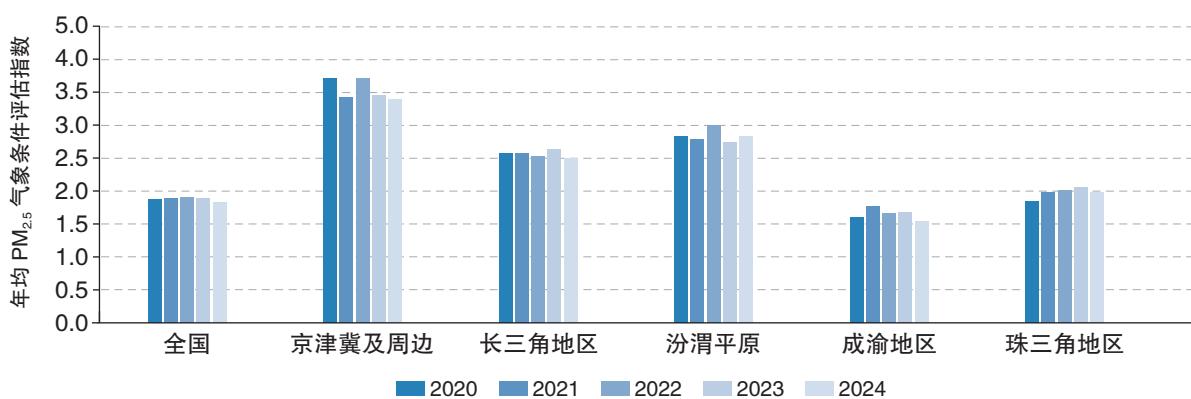


图 2-3 2020 年至 2024 年全国及重点区域 EMI 变化

注：EMI 指数数据来自国家气象中心

别下降 0.23% 和 0.41%；长三角地区分别下降 2.99% 和 2.47%；珠三角地区分别下降 3.41% 和 6.30%。

## O<sub>3</sub> 变化情况

2024 年全国 339 个地级及以上城市 O<sub>3</sub> 日最大 8 小时平均值第 90 百分位数 (O<sub>3</sub>-8H 90Per) 年平均浓度为 144  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，与 2023 年持平，较 2020 年 (138  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 增长 4.3%。2020—2024 年全国城市大气 O<sub>3</sub> 浓度呈波动

态势（图 2-4a）。2024 年，O<sub>3</sub> 浓度超过 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ （国家空气质量二级标准）的城市主要分布在京津冀及周边、汾渭平原和长三角地区。汾渭平原、长三角地区、成渝地区和珠三角地区 2024 年的大气 O<sub>3</sub> 浓度相较 2020 年分别上升了 9.32%、5.92%、5.27%、0.33%，虽然京津冀及周边 2024 年的 O<sub>3</sub> 浓度较 2020 年下降 0.56%，但没有任何城市达标国家空气质量二级标准。从三年滑动平均来看 2020—2024 年间全国及重点区域 O<sub>3</sub> 浓度处于高位，且呈现较弱的上升趋势。

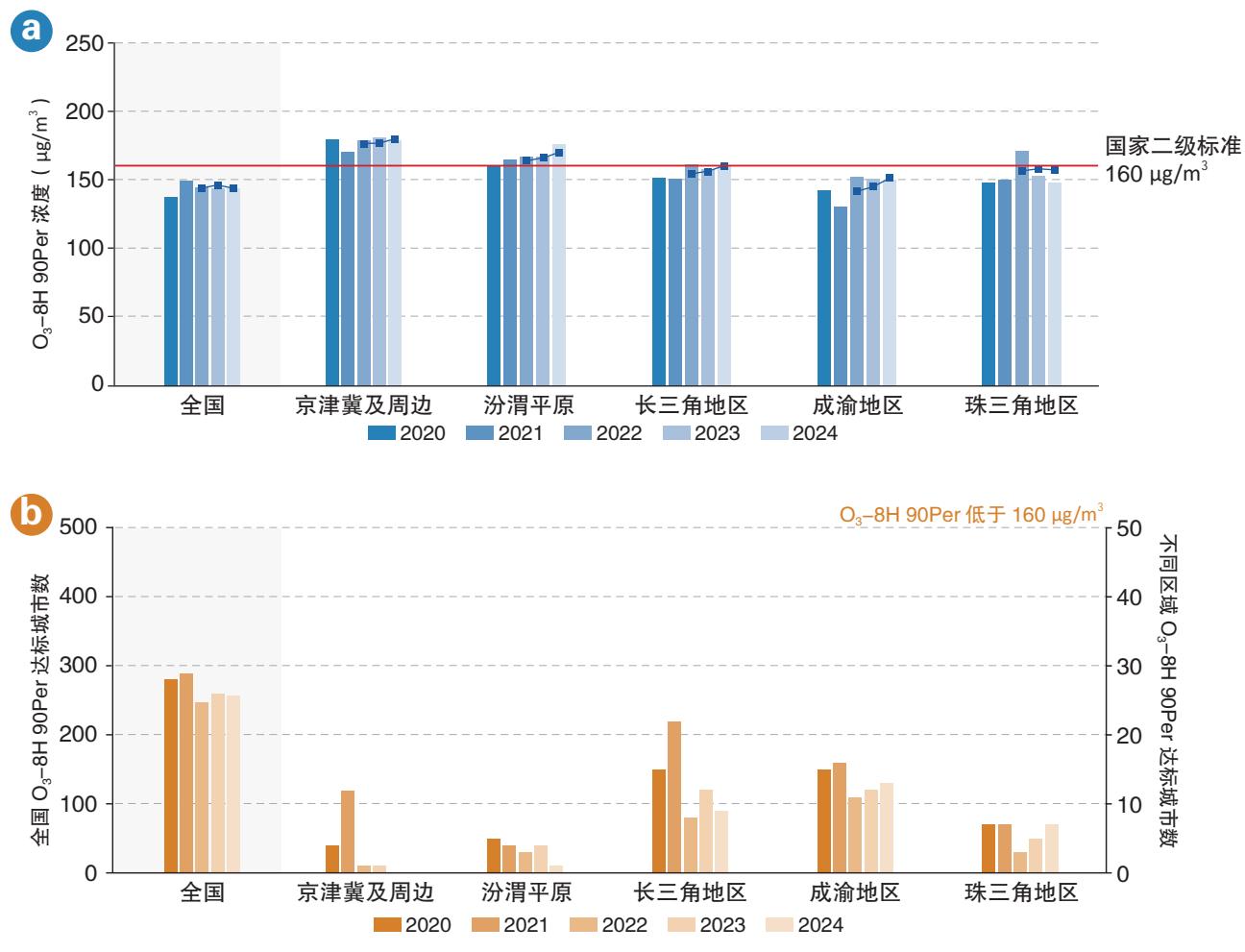


图 2-4 2020 年至 2024 年全国及重点区域 O<sub>3</sub>-8H 90Per 浓度（柱状）以及三年滑动平均浓度（蓝色点线）(a)；O<sub>3</sub> 日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数浓度达标城市数 (b: 以 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  为标准；)

2024 年  $O_3$ -8H 90Per 平均浓度低于国家空气质量二级标准 ( $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 的城市数量达标占比为 75.8%，较 2020 年占比减少 7 个百分点（图 2-4b）。2020—2024 年全国及重点区域  $O_3$ -8H 90Per 达国家空气质量二级标准城市数呈现下降趋势，重点区域如京津冀、汾渭平原、长三角大达标城市数分别减少 4 个、4 个和 6 个。由此可见“十四五”期间臭氧污染并没有得到很好地控制。可能原因包括：（1）臭氧是典型的二次污染物，由氮氧化物（ $\text{NO}_x$ ）和挥发性有机物（VOCs）在高温强光照下反应生成。尽管全国  $\text{NO}_x$  浓度整体呈下降趋势，但 VOCs 排放源分散，控制难度大，且部分区域 VOCs 减排力度不足，导致臭氧生成潜势（OFP）未有效降低。（2）全球加速变暖背景下，夏季高温热浪日数增多，高温和强辐射条件显著加速光化学反应速率，增加了臭氧的生成。

臭氧气象条件评估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臭氧光化学生成、消耗、传输扩散等一系列物理化学过程的影响。该指数与臭氧质量浓度呈线性正相关，其值越高代表气象条件越有利于  $O_3$  浓度升高。从 2020 到 2024 年 5—9 月全国及重点区域臭氧气象条件评估指数的变化来看（图 2-5），2024 年全国臭氧气象条件评估指数相对 2020 年和过去 5 年同期分别上升 1.45% 和 0.13%，说明气象条件整体有利于全国臭氧浓度上升，但在不同的重点区域，2024 年气象条件相对 2020 年和过去 5 年同期有显著差异。珠三角地区臭氧气象条件评估指数相对 2020 年上升 5.01%，但较过去 5 年同期下降 0.22%；长三角地区相对 2020 年上升 1.75%，但较过去 5 年同期下降 0.89%；汾渭平原地区相对 2020 年上升 1.45%，但较过去 5 年同期下降 0.44%；成渝地区和京津冀及周边地区相对 2020 年和过去 5 年同期均上升，其中成渝地区分别上升 4.43% 和 1.5%，京津冀及周边地区分别上升 0.52% 和 1%。

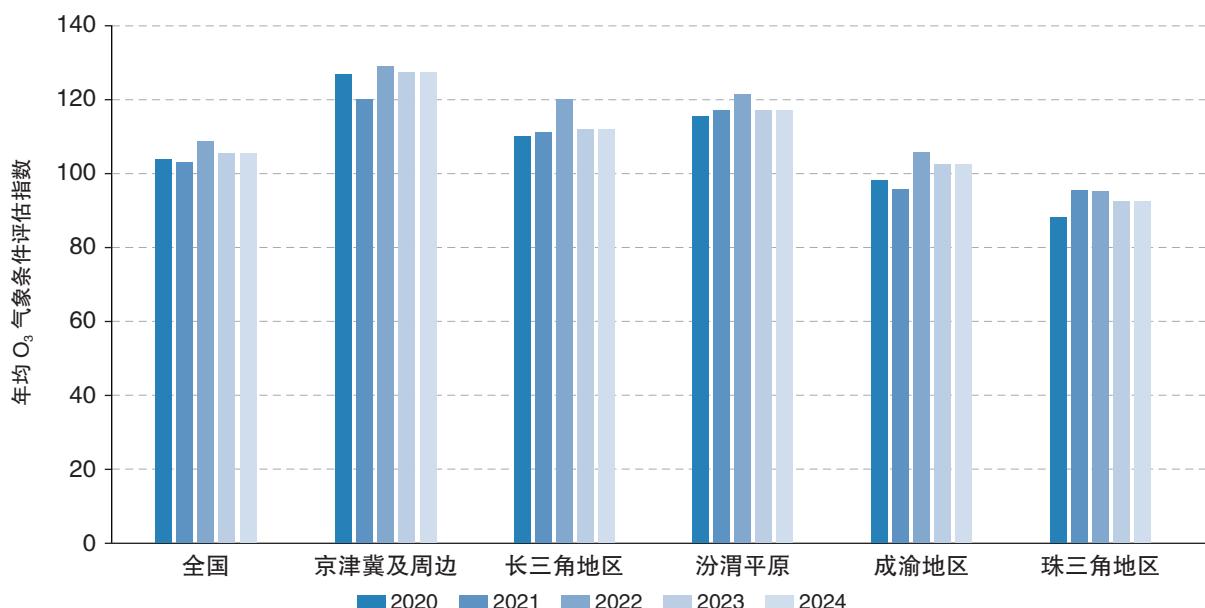


图 2-5 2020—2024 年 5—9 月全国及重点区域臭氧气象条件评估指数变化

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

2020年后，随着大气污染治理措施的深化推进，我国空气质量格局出现了明显变化。图2-6a所示为2020年和2024年全国339个城市年均PM<sub>2.5</sub>浓度的空间分布。2020年，我国PM<sub>2.5</sub>污染最严重的城市主要集中在京津冀及

周边地区和汾渭平原。经过《空气质量持续改善行动计划》的实施，2024年我国PM<sub>2.5</sub>污染进一步改善，PM<sub>2.5</sub>污染中心的整体浓度下降至50 μg/m<sup>3</sup>以下，其他重点区域如长三角、成渝地区的整体浓度同样有所下降。但是，西北地区由于受工业结构和沙尘影响，仍存在明显的PM<sub>2.5</sub>污染。

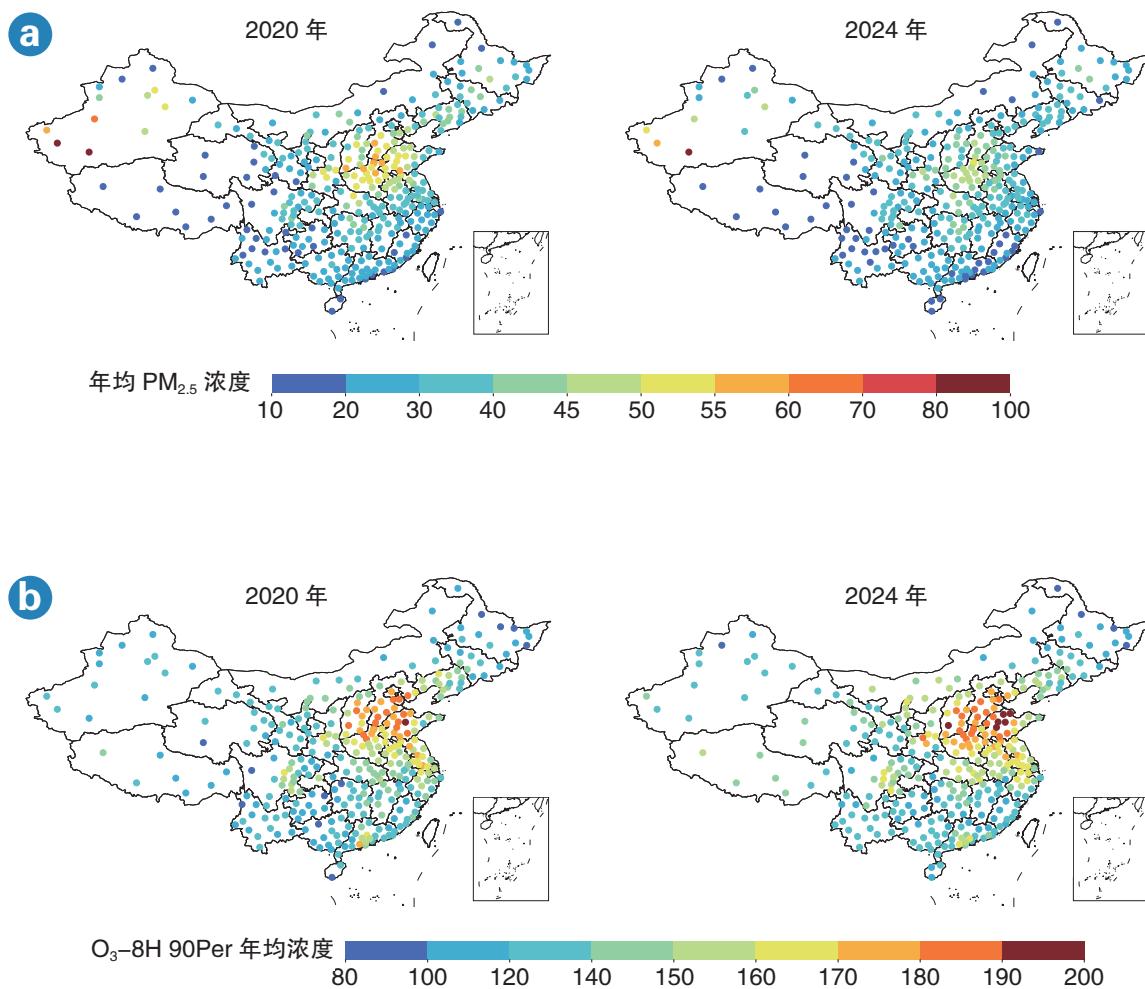


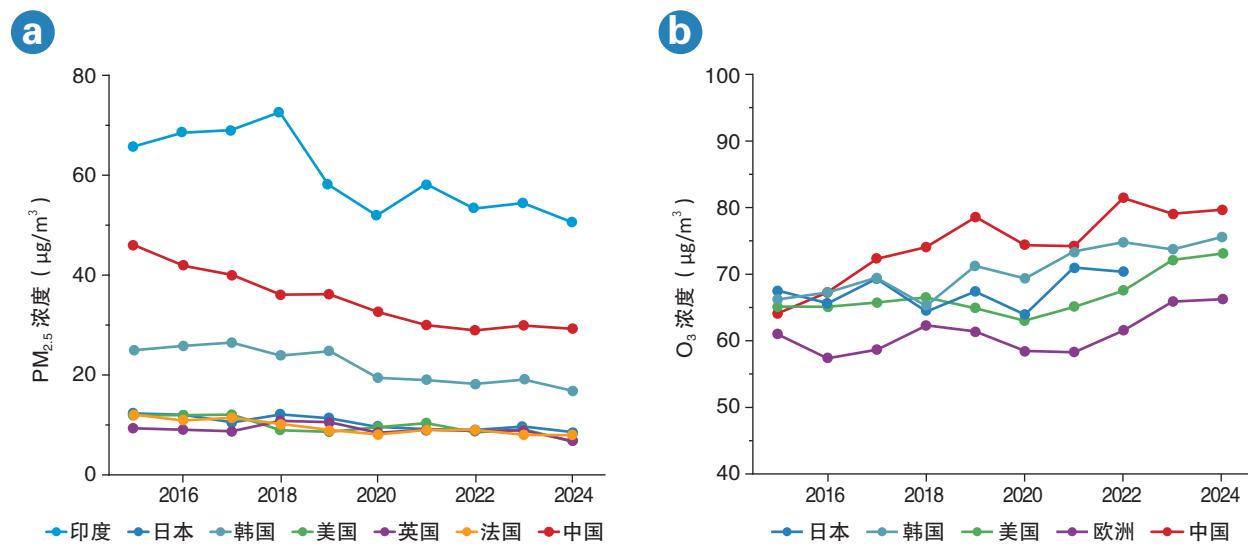
图2-6 2020年和2024年全国339个城市年均PM<sub>2.5</sub>浓度(a), O<sub>3</sub>-8H 90Per浓度(b)

注: 数据源自(中国生态环境部, 2025c)

图 2-6b 所示为 2020 年和 2024 年全国 339 城市  $O_3$ -8H 90Per 浓度的空间分布。2020 年, 我国  $O_3$  污染呈现多中心分布格局, 主要集中于京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原、成渝地区以及珠三角地区, 其中京津冀及周边地区的  $O_3$  污染最为严重。2024 年, 全国  $O_3$  污染态势加剧, 京津冀及周边地区和汾渭平原的污染程度进一步加重, 并在湖北省东部则形成了新的  $O_3$  污染中心。

2015 年至 2024 年间, 全球各国的空气质量呈现出显著的多时空变化。从图 2-7 中可以看出, 印度的  $PM_{2.5}$  浓度有所下降, 但仍保持在较高水平。中国的  $PM_{2.5}$  浓度显著下降, 从 2015 年接近  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  降至 2024 年的  $29.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 显示出中国在大气污染治理方面取得了显

著进展。相比之下, 韩国、日本、美国和英国的  $PM_{2.5}$  浓度较低且变化幅度较小。日本、美国和英国保持在  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  以下, 显示出其空气质量较为稳定。在暖季  $O_3$  浓度方面, 中国的暖季  $O_3$  平均浓度自 2015 年稳定上升, 并在 2019 年达到峰值后下降, 在 2022 年明显上升后在  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  处振荡, 在 2024 年的值为  $79.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。其他国家的  $O_3$  浓度总体变化较为平稳。中国  $O_3$  浓度逐年增加, 需关注其潜在的健康影响。总体来看, 发达国家 (如美国、欧洲、日本) 的空气质量较为稳定, 污染物浓度较低。中国在减少  $PM_{2.5}$  污染方面取得了持续进展, 但仍待根本性好转; 暖季  $O_3$  浓度的波动上升需引起重视, 尤其是高温  $-O_3$  耦合增强机制及其协同应对措施方面还需进一步研究和实践。



## 2.2 气候变化与极端天气气候

2024 年为有器测记录以来最热年份，全球年均气温较工业化前首次短暂超过 1.5℃ 阈值。虽然单年升温超过 1.5℃ 并不意味着《巴黎协议》限制升温 1.5℃ 的目标已无法实现，但也表明必须迅速采取严格的减排行动，来减缓升温速度，延缓或避免长期超过 1.5℃ 的局面。加速变暖导致极端天气的复合性特征对社会经济和环境造成严重的冲击。

2024 年，全球地表平均温度较工业革命时期（1850—1900 年）增暖了  $1.55^{\circ}\text{C} \pm 0.13^{\circ}\text{C}$ ，成为有记录以来最暖年份，也是首个超过 1.5℃ 温升目标的年份（WMO, 2025a）。尽管增温的准确估计因数据来源和处理方法不同而略有差异，但结果均表明全球升温持续加剧。人为温室气体排放持续增加是导致这一记录性升温的主要原因，其他因素诸如厄尔尼诺、东亚气溶胶减排和太阳周期等贡献较小，仅约造成  $0.23^{\circ}\text{C} \pm 0.13^{\circ}\text{C}$  的额外增暖（WMO, 2025a）。《巴黎协议》中的温升目标应该理解为长期平均值，而非单年的数据。世界气象组织（WMO）估计截至 2024 年的全球温升水平（20 年平均）最优估计值在  $1.34^{\circ}\text{C}$  至  $1.41^{\circ}\text{C}$  之间（图 2-8），均未超过 1.5℃ 温升目标。但有研究也指出，若无严格的减排措施，全球气温首次超过 1.5℃ 表明我们已极有可能进入 20 年平均升温  $1.5^{\circ}\text{C}$  时期。因此必须迅速采取严格的减排行动，来减缓升温速度，延缓甚至

避免长期超过 1.5℃ 的局面（Bevacqua et al., 2025）。

全球变暖加速背景下，极端天气气候事件日益频繁且呈现出新的特征（王会军, 2025; Zscheischler et al., 2025），其复合性特征对社会经济和环境的严重冲击引发广泛关注。2024 年，全球多地遭受复合型极端事件的影响（图 2-9）。多个灾害在不同地区同时发生，给灾害应对和应急管理带来更大的挑战。例如，2024 年海洋热浪与陆地干旱同时在多地发生，对生态系统和人类社会产生广泛影响。其中非洲南部严重旱灾导致津巴布韦进入国家灾难状态，270 万人面临严重粮食危机。先前的异常气候状态会放大后续灾害的破坏力，进而导致连锁效应加剧脆弱性。例如，2024 年南美前期高温干旱导致土壤极度干燥，结合后续强风和充足燃料，引发多地毁灭性火灾，导致智利火灾波及 4 万人，烧毁 7000 栋房屋，造成 130 余人

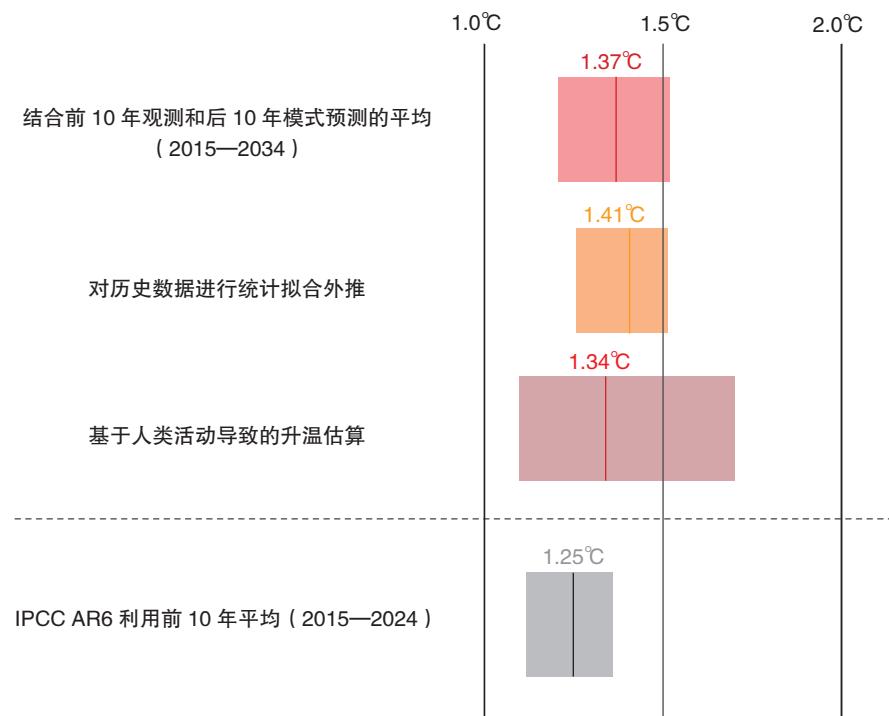


图2-8 不同方案估算的截至2024年的全球温升水平(不同颜色的柱体),并将其与IPCC第六次评估报告(IPCC AR6)采用方法的比较(灰色柱体)。每种方法的竖线表示最佳估计值,阴影表示不确定性范围

注:改绘自(WMO, 2025a)

死亡,成为智利历史上死亡人数最多的山火,也是自2010年智利地震以来最具破坏性的灾难。山火会严重削弱生态系统的碳汇功能,从而增加了大气中二氧化碳的浓度。美国和尼泊尔前期的湿土壤叠加后续强降水,引发山洪泛滥,其中美国德克萨斯瓜达卢佩河水位在45分钟内猛涨近8米,导致100余人死亡、数十人失踪,包括正在参加夏令营的儿童。一个地区接连遭遇同类或不同类灾害会显著降低应对灾害的能力。例如,2024年1月,英国接连遭受3场风暴袭击,导致人员伤亡、停电,以及公路和铁路交通严重中断。此外,全球变暖加剧了降水、风速和光照等资源条件的波动性,显著影响水电、风电和光伏发电出力。例如,干旱降低水电出力,强风损坏风机设备,持续

阴雨等高影响天气削弱光伏发电效率。低风速-低光照复合事件在变暖背景下愈发频繁,对能源供应的稳定性构成严峻挑战(Wang et al., 2025)。

中国年平均气温较常年值(1981—2010年平均)偏高1.01°C,首次超过1.0°C,为1901年以来的最暖年份(中国气象局,2025)。在气候变暖和厄尔尼诺的共同影响下,2024年中国气候状态整体偏差,多地出现破纪录的极端事件(Zhou et al., 2025)。我国夏季高温日数为12.6天,比常年同期偏多4.6天,中东部大范围持续高温事件持续时间长达74天,仅次于2022年(79天)。持续高温给人体健康、农业生产、电力供应带来不利影响,四川、重庆

电网最大负荷创历史新高，多人确诊热射病。全国平均降雨量 697.7mm，较常年同期偏多 9.0%，多地持续出现强降水、局地极端性突出。葫芦岛遭遇自有气象记录以来最强降雨，受灾人口达十余万人；“暴力梅”侵袭长江中下游，洞庭湖发生决口险情，农作物受灾面积 568.8 千公顷，损坏房屋 1.2 万间，直接经济损失 229.9 亿元。台风“摩羯”成为秋季登陆我国最强的台风，广东超过 70 万户用电受到影响。我国长江和淮河流域在夏初经历了破纪录的降

水低值，到 7 月份又经历高于平均值 2–4 倍的强降水，这种干旱到强降水的组合（旱涝急转）导致多地发生滑坡泥石流等次生灾害。2 月中东部地区出现两轮大范围低温雨雪冰冻天气过程，影响范围和强度为 2009 年以来最强，造成 10 个省 630.7 万人受灾，农作物受灾面积 734.6 千公顷。虽然 2024 年整体沙尘天气影响较轻，2 月 17–20 日西北局地还是出现了强沙尘暴和特强沙尘暴，能见度不足 50 米，给人体健康和交通出行造成不利影响。



图 2-9 2024 年全球发生的复合事件

注：改绘自 Zscheischler et al., 2025

## 2.3 大气中的温室气体

2024 年大气中温室气体浓度创新高。其中  $\text{CO}_2$  平均浓度达到  $423.9 \pm 0.2 \text{ ppm}$ ，比 2023 年增加了  $3.5 \text{ ppm}$ ，是自现代测量（1957 年）以来的最大增幅。主要是源自人类活动的持续  $\text{CO}_2$  排放和野火激增。甲烷、氧化亚氮以及六氟化硫的浓度也升至创纪录水平，分别达到了  $1942 \text{ ppb}$ 、 $338.0 \text{ ppb}$  和  $11.8 \text{ ppt}$ 。东亚地区的温室气体浓度总体高于全球水平，与该区域的工业和农业活动排放相关。

### 二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )

基于 WMO 全球大气监测网数据显示 (WMO, 2025b)，2024 年全球大气  $\text{CO}_2$  浓度持续攀升，全球地表平均  $\text{CO}_2$  浓度达到  $423.9 \text{ ppm}$ ，为工业化前（1750 年前）水平的  $152\%$ ，比 2023 年增加了  $3.5 \text{ ppm}$ （表 2-1），是自 1957 年开始现代监测以来的最

大增幅，增幅加大的原因有两个，一个是全球化石燃料排放导致的人为  $\text{CO}_2$  仍在增加；二是野火排放以及陆地与海洋  $\text{CO}_2$  吸收量减少（减少约  $16\%$ ）。基于我国温室气体观测网发现，2024 年中国人为碳排放总量相比 2023 年仅增加约  $0.6\%$ ，显著低于全球增速水平。

基于 OCO-2 卫星观测数据表明（图

**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

	$\text{CO}_2$	$\text{CH}_4$	$\text{N}_2\text{O}$
2024 年平均浓度	$423.9 \pm 0.2 \text{ ppm}$	$1942 \pm 2 \text{ ppb}$	$338.0 \pm 0.1 \text{ ppb}$
2024 年相对于 1750 年的百分比	$152\%$	$266\%$	$125\%$
2024 年相对于 2023 年的绝对增量	$3.5 \text{ ppm}$	$8 \text{ ppb}$	$1.0 \text{ ppb}$
2024 年相对 2023 年的相对增量	$0.83\%$	$0.41\%$	$0.30\%$
过去 10 年的年平均绝对增量	$2.57 \text{ ppm yr}^{-1}$	$10.6 \text{ ppb yr}^{-1}$	$1.07 \text{ ppb yr}^{-1}$

注：假设工业化革命前时期  $\text{CO}_2$  浓度为  $278.3 \text{ ppm}$ ， $\text{CH}_4$  浓度为  $729.2 \text{ ppb}$ ， $\text{N}_2\text{O}$  浓度为  $270.1 \text{ ppb}$ 。

2—10a），自2015年至2024年，全球、南北半球和我国的二氧化碳柱浓度（ $XCO_2$ ）整体呈持续上升趋势。其中，北半球中纬度地区的 $XCO_2$ 显著高于其他纬度（图2—10b），反映出该区域较强的碳排放强度。这一现象主要归因于化石燃料燃烧活动高度集中于北半球中纬度地区，相对南半球 $XCO_2$ 相对较低。与此同时，全球 $XCO_2$ 呈现出显著的年周期波动特征，夏季浓度普遍较低，这主要与该季节陆地和海洋生态系统光合作用吸收能力增强密切相关。在2015—2024年间，中国地区的 $XCO_2$ 变化趋势亦与北半球基本一致，但整体浓度水平略高于北半球平均值。

中国区域 $XCO_2$ 的空间分布特征表现出显著的区域差异（图2—10c）。高浓度区域主要分布

于华北、长三角及华南地区。三个地区人口密度大，人为生产、生活导致的排放多，其中华北不仅为我国主要产煤区域，同时也是集中供暖区域，碳排放负荷较重，因此呈现较高的二氧化碳浓度。此外，华北和长三角地区与其能源消耗总量大、工业密集度高以及交通排放频繁等因素密切相关。相比之下，新疆、西藏、青海等西部地区由于人口稀少、生态系统较为自然， $XCO_2$ 明显偏低。

2015—2024年间，中国区域 $XCO_2$ 的年均增长速率普遍处于 $2\text{--}3\text{ ppm yr}^{-1}$ 之间，整体分布较为均匀（图2—10d）。华北和长三角部分区域的增长速率略高，可能与其长期高强度的能源消耗与工业排放有关；而西部地区的平均增长速率相对较低，反映出该区域人为生产、

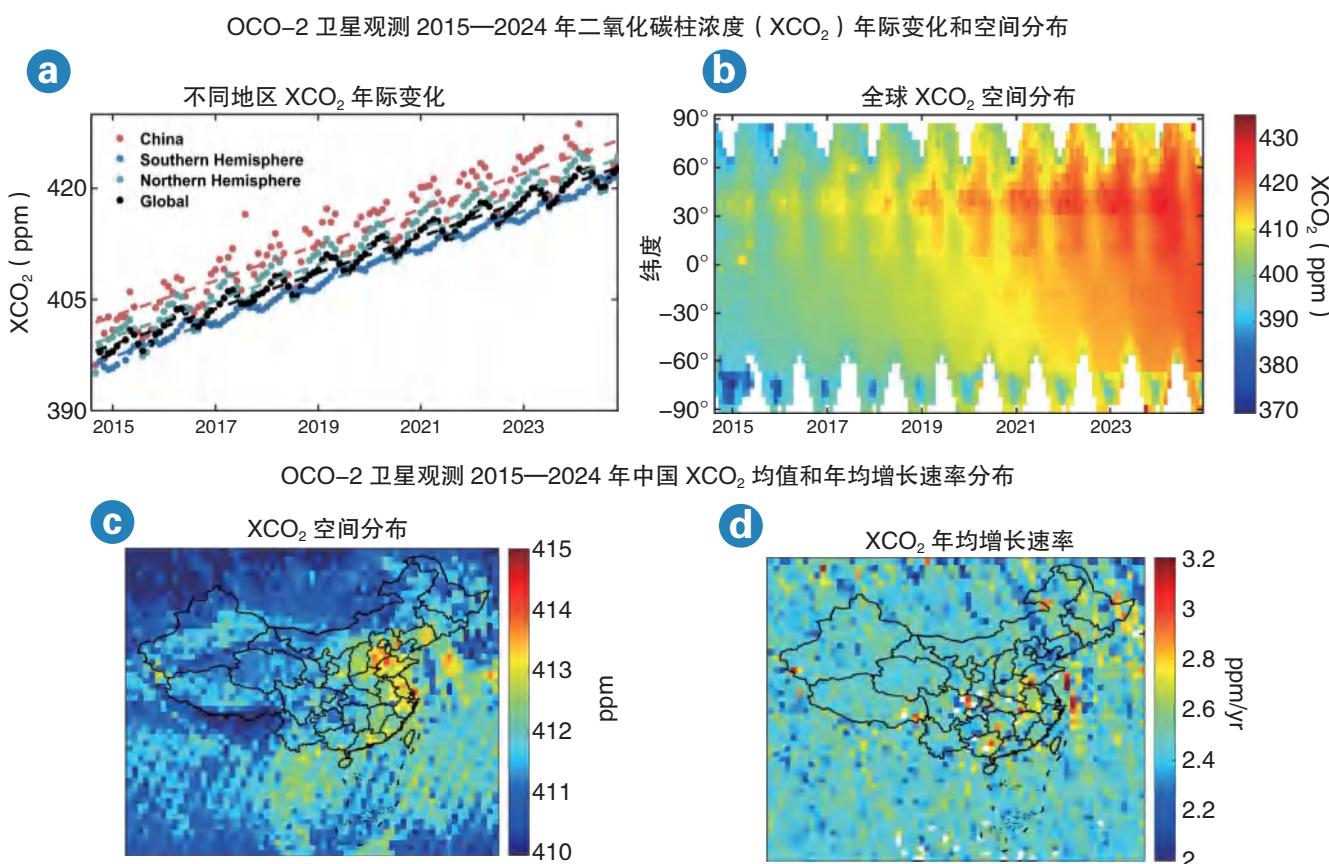


图2—10 OCO-2卫星以及GOSAT卫星观测到的(a)全球纬度平均二氧化碳浓度变化，(b)南北半球以及中国区域 $CO_2$ 的浓度变化，以及中国地区2015—2024年 $CO_2$ 浓度分布(c)以及增长速率(d)

生活对碳排放的影响较小。2020—2024 年期间中国区域  $\text{XCO}_2$  的年均增长速率普遍处于  $1\text{--}2.5 \text{ ppm yr}^{-1}$  之间，相比于 2015—2024 年的增长率大幅降低。

## 甲烷 ( $\text{CH}_4$ )

2024 年，全球大气年平均  $\text{CH}_4$  浓度达到新的高点 1942 ppb，为工业化前水平的 266%，较 2023 年增加 8 ppb，这一增幅略低于过去十年的平均增长率  $10.6 \text{ ppb yr}^{-1}$  ( 表 2-1 )，其

中 2020—2022 年的平均增速达到了  $15.2 \text{ ppb yr}^{-1}$ ，创 1984 年以来有全球系统性地面观测以来的最高值 ( 图 2-11a )，主要驱动因素包括拉尼娜现象导致的湿地面积的快速扩张，以及受新冠疫情影响导致人为排放的  $\text{NO}_x$  降低从而延长了甲烷的大气生命周期等 ( Feng et al., 2023; Peng et al., 2022; Qu et al., 2022 )。2023 年之后，全球甲烷的年均增长速率降低到  $8.6 \text{ ppb yr}^{-1}$ ，可能与全球进入厄尔尼诺年份导致赤道湿地面积显著降低相关 ( Feng et al., 2023 )。整体而言，自 2014 年以来，尽管存在较大的年

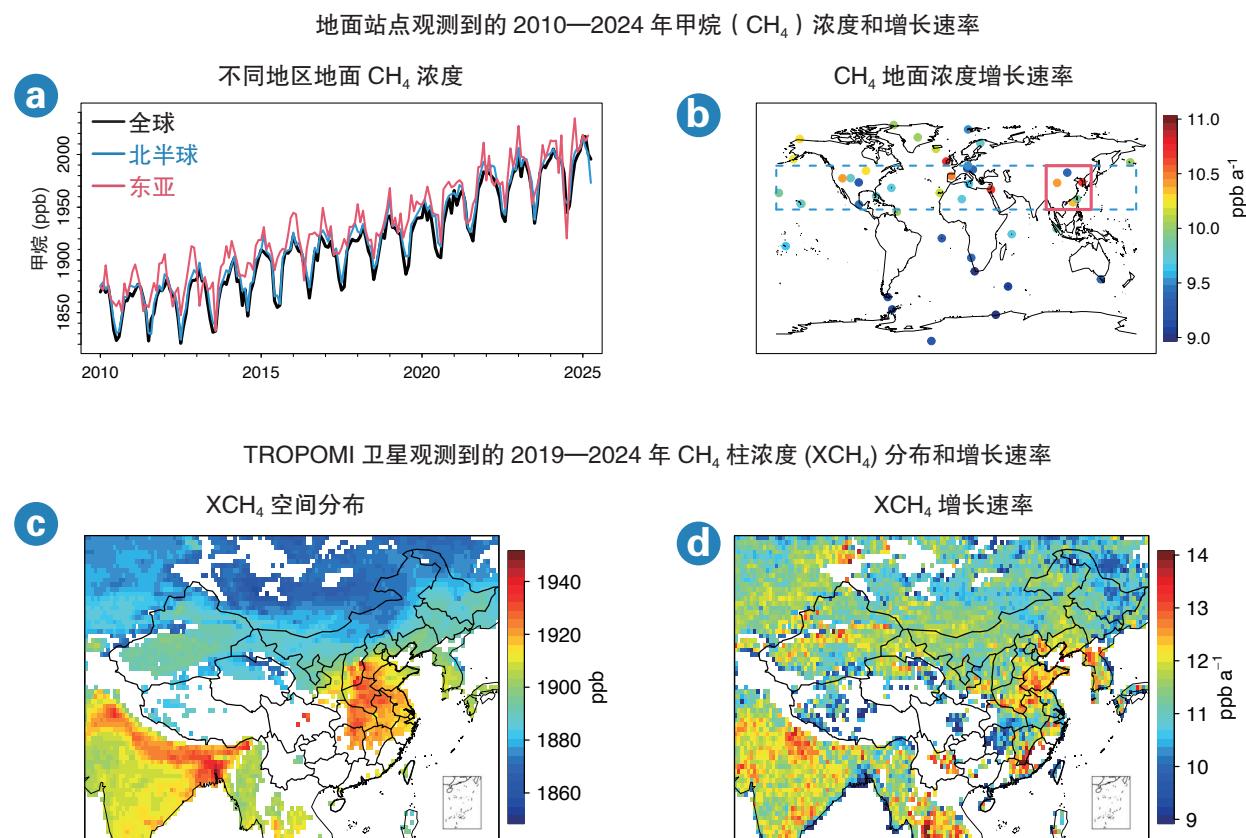


图 2-11 全球地面站点和卫星监测到  $\text{CH}_4$  浓度变化

地面站点观测到的 2010—2022 年全球、北半球以及东亚  $\text{CH}_4$  浓度变化 ( a ) 以及  $\text{CH}_4$  增长速率 ( b ) 数据来源于 <https://gml.noaa.gov/ccgg/about.html>。其中东亚地区 ( 红色框 ) 、北半球中纬度 ( 蓝色框 ) 的范围在图 ( b ) 中展示。TROPOMI 卫星观测到的东亚地区 2019—2024 年甲烷柱浓度分布 ( c ) 和增长速率 ( d )

际变率，全球甲烷的增速都维持在一个较高水平，对控制全球温升带来极大挑战。

在东亚地区，根据5个地面观测站点显示（图2-11b），2010—2024年的大气中 $\text{CH}_4$ 平均增长速率为 $9.4 \pm 0.5 \text{ ppb yr}^{-1}$ ，与全球平均增速保持一致。在夏季，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）均达到一年中最大值，但是OH自由基的氧化作用更强，导致该季节的 $\text{CH}_4$ 浓度全年最低（Saunois et al., 2019）。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区域（图2-11c）；其2019—2024年的甲烷浓度增长速率也呈现较大的地区差异性（图2-11d），在华北、南方和新疆等地区

呈现较高的增长速率（ $12\text{--}14 \text{ ppb yr}^{-1}$ ），其他区域的增长速率略低（ $9\text{--}10 \text{ ppb yr}^{-1}$ ）。尽管“十四五”期间山西地区的煤炭产量持续增长，但其甲烷浓度增速保持在平均水平，这可能与该地区实施的甲烷排放控制措施有关。

## 氧化亚氮（ $\text{N}_2\text{O}$ ）

2024年，全球平均 $\text{N}_2\text{O}$ 浓度达到338.0 ppb，为工业化前水平的125%，较2023年增加1.0 ppb，这一增量略低于过去十年的平均增长率（ $1.07 \text{ ppb yr}^{-1}$ ）（表2-1）。其增速也在2020—2022年间达到有观测以来的最高值（ $1.28 \text{ ppb yr}^{-1}$ ）（图2-12a）；东亚地区的平均增长速率为 $1.05 \pm 0.02 \text{ ppb yr}^{-1}$ ，与全球平

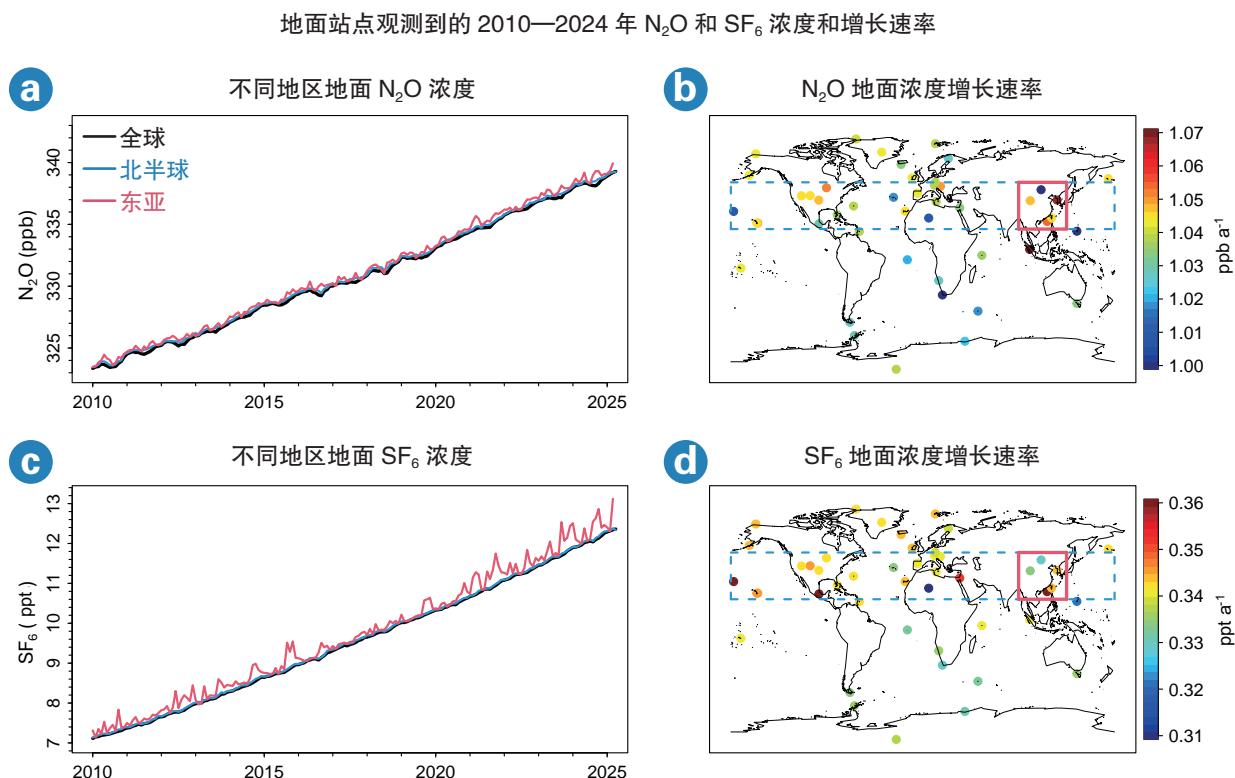


图2-12 全球地面站点观测到的全球、北半球以及东亚地区2010—2024年 $\text{N}_2\text{O}$ 和 $\text{SF}_6$ 浓度变化（a, c），以及增长速率（b, d）。其中东亚地区（红色框）、北半球中纬度（蓝色框）的范围在图（b, d）中展示

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

均增速持平。虽然夏季土壤排放也达到一年中最大值，但观测显示大气中的浓度反而下降，这主要是由于平流层低浓度  $\text{N}_2\text{O}$  向对流层的传输增强导致 (Jiang et al., 2007)。东亚地区的  $\text{N}_2\text{O}$  浓度常高于同纬度背景值，主要与工业和农业活动排放相关 (图 2-12b)。

## 六氟化硫 (SF<sub>6</sub>)

纯净的 SF<sub>6</sub> 是一种惰性气体，具有优异的热稳定性和化学稳定性，主要应用于电力设备和电子行业。受全球电气工业发展影响，全球

SF<sub>6</sub> 浓度从 2010 年的 7.04 ppt 增长到 2024 年的 11.8 ppt，年均增长速率  $0.34 \pm 0.04 \text{ ppt yr}^{-1}$  (图 2-12c)；具体而言，SF<sub>6</sub> 的增速在 2010 年是  $0.27 \text{ ppt yr}^{-1}$ ，在 2024 年是  $0.40 \text{ ppt yr}^{-1}$ 。东亚地区 2010—2024 年的平均增长速率为  $0.35 \pm 0.01 \text{ ppt yr}^{-1}$ ，略高于全球平均增速持平 (图 2-12d)。与 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 明显不同的是，因其排放几乎全部来自工业等人为源，自然源排放极低，SF<sub>6</sub> 无显著季节变化。对比东亚地区的 SF<sub>6</sub> 与全球平均或者北半球浓度，东亚地区多次出现较高浓度，反映本地工业排放的显著贡献。





# 治理体系与实践



协同推进降碳、减污、扩绿、增长已经成为中国式现代化建设的基本要求。2024年，《中共中央关于进一步全面深化改革、推进中国式现代化的决定》进一步强调协同推进降碳、减污、扩绿、增长是完善生态文明制度体系、深化生态文明体制改革的重要组成部分；《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》也重申了2030年减污降碳协同能力显著增强以及2035年减污降碳协同增效取得显著进展这两个重要目标。本章以2024年为重点，追踪我国近年来在温室气体与大气污染协同控制方面的管理研究和政策动向，以及地方在相关实践的尝试和成效，进而反映协同治理的工作进程。

# 3.1 协同治理体系建设

随着对减污降碳协同增效的认识持续深化，我国逐步构建了多部门协作、多领域发力的治理体系，推动低碳发展和空气质量改善走向深入。生态环境部作为负责生态环境保护和气候变化应对的主责部门，推进应对气候变化与生态环境保护相关职能协同、工作协同和机制协同，通过构建宏观管理框架、明确重点行业领域治理要求、改进管理工具等，逐渐推动建立完善减污降碳协同治理体系。国家发展改革委、工业和信息化部等部委在产业高质量发展、提质升级、绿色低碳发展等方案中明确行业减污降碳协同增效具体任务措施；人民银行、财政部、证监会等单位将减污降碳协同作为绿色金融重点支持方向，引导金融机构、国际资本、社会资金等支持企业开展减污降碳协同治理。

在宏观管理方面，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，从空间管理角度出发推动减污降碳协同增效。

在行业管控方面，2024年1月，生态环境部会同国家发展改革委、工业和信息化部、财政部、交通运输部联合印发《关于推进实施水泥行业超低排放的意见》《关于推进实施焦化行业超低排放的意见》，明确提出鼓励这两个行业的企业在超低排放改造时统筹开展减污降

碳协同和清洁生产改造，引导焦化产业链向高附加值精细化工产品延伸，推进清洁能源替代和现有成熟减污降碳技术应用。

在治理能力支撑方面，2024年1月，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)》，并组织11个省(市)共90个城市开展2023年融合清单编制工作，为推动大气污染物和温室气体排放的精细化解析、支撑精准高效的碳污协同管理打下基础。

在上述3方面工作之外，环境空气质量标准的提升也显著推动了温室气体的协同减排。能源基金会支持的研究表明，2012年修订和发布的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)

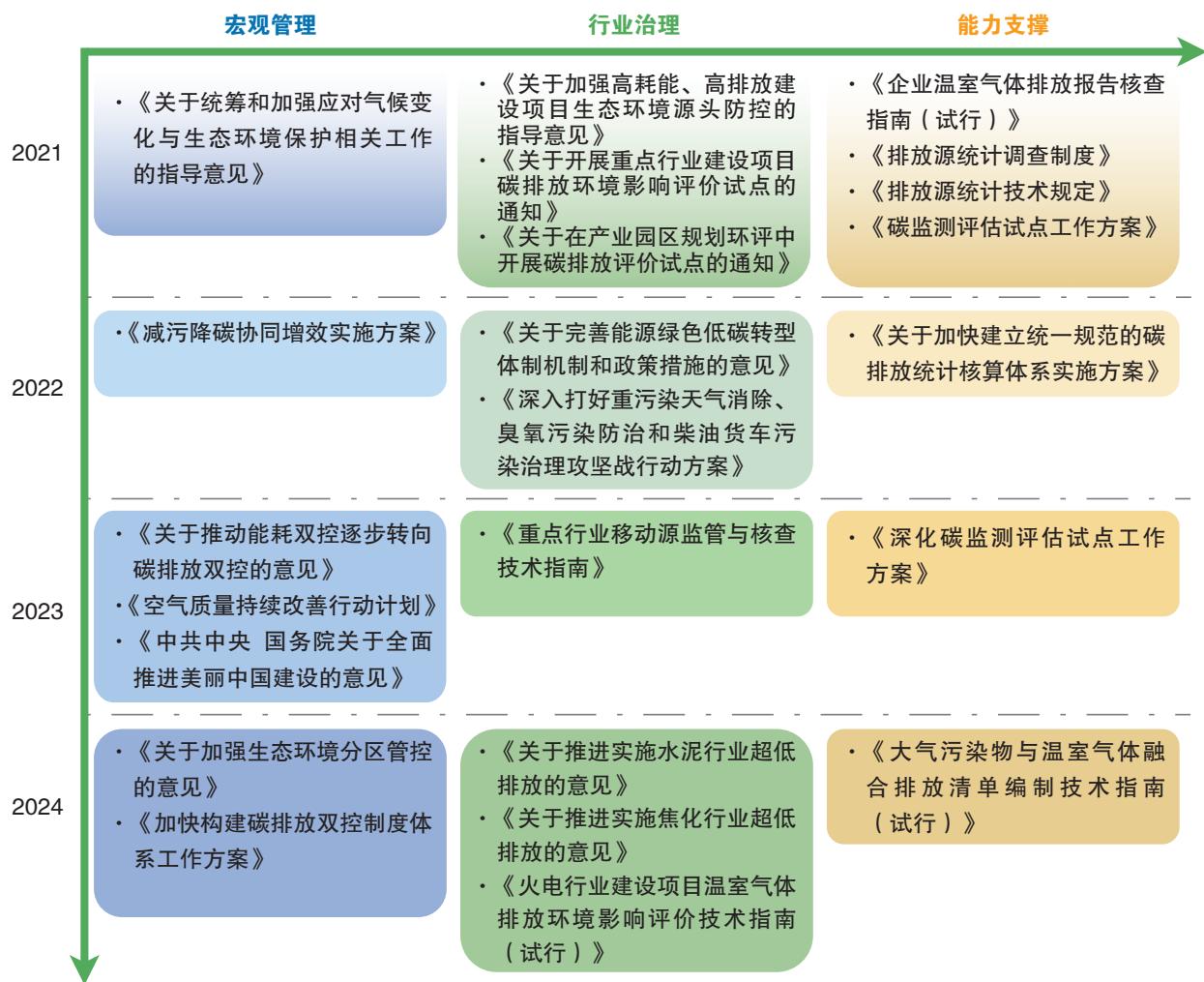


图 3-1 “十四五”以来推动减污降碳协同治理体系建设的政策文件

首次将  $PM_{2.5}$  纳入环境空气质量标准后，在推动城市空气质量快速改善的同时，带动碳减排累计超过 24 亿吨，同时推动经济发展绿色转型。但当前空气质量标准已不能匹配公众的健康需求，随着达标城市的增加，此标准对大气污染物和温室气体的减排驱动力也在下降。通过成本效益分析工具（CBA）分析结果表明，通过更新并实施更加严格的空气质量标准，中国有望在推动  $PM_{2.5}$  浓度持续下降的同时，避免数十万过早死亡，并且通过协同减排二氧化碳以及其他温室气体，在实现新一轮自主贡献目标的进程中发挥重要作用。

欧美发达国家在大气污染防治的过程中，虽然没有把减污降碳作为一个政策目标或者显性的治理手段提出来，但是逐步尝试在传统的污染治理政策框架下纳入温室气体减排要求，其部分经验对我国开展减污降碳协同增效工作具有参考借鉴价值。

欧盟的主要技术路径是在大气污染源排放管理中加入与降碳相关的技术要求。2024 年 8 月，欧盟新修订的《工业排放指令》正式生效，这一指令在工业污染物减排的基础上，提出了减少温室气体排放、促进能效提升、发展循环

经济等方面的要求。具体体现在：一是要求特定行业企业在环境管理体系中制定转型计划，明确能源利用效率提升目标，分析转型改造能否兼顾温室气体协同减排；二是要求配套文件《最佳可行技术》在认定相关技术时综合考虑温室气体减排效应；三是要求每五年审查一次《工业排放指令》与《碳排放交易指令》的协同情况，推动环境和气候政策的协同实施。

美国《清洁空气法》授权美国环境保护署监管大气污染物和温室气体排放。在此基础上，美国设计实施了一系列减污降碳协同政策。一是设置温室气体排放阈值，要求超过排放阈值

的固定源采用“最佳可行控制技术”减少污染物和温室气体排放；二是在移动源大气污染物排放标准中纳入温室气体绩效排放限值；三是对油气开采、废弃物处理等特定行业制定甲烷排放控制标准。成本效益评估在相关政策的制定过程中发挥了重要的支撑作用，如美国环保署在1999年发布的评估报告认为，1990到2010年期间《清洁空气法》产生的收益价值总额可达到约1100亿美元，而实现效益的成本只有270亿美元左右，效益是成本的4倍以上。2011的第二次评估报告显示，1990年至2020年期间，《清洁空气法》实施带来的效益估值可达2万亿美元，成本650亿，效益成本比达到30倍。



## 3.2 协同治理政策

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，推动构建减污降碳协同增效的约束激励与引导机制，从行政管理、经济激励、社会参与三个关键层面构建协同治理政策框架，通过统筹政策工具创新与应用场景拓展，形成多维度、系统性的治理合力。

### 行政管理政策方面

**加快推动碳评试点与探索。**将碳排放评估融入到环境影响评价体系中，是中国减污降碳政策发展的重要方向，它将碳约束从末端治理前置到了项目准入和规划布局的源头环节，以更低的社会成本实现环境和气候的双重效益。河北、吉林、浙江等重点地区的重点行业持续开展建设项目碳排放环境影响评价试点，点面结合落实环评制度在推动减污降碳协同增效过程中的源头预防作用。

**推动能耗双控逐步转向碳排放双控。**国务院办公厅印发《加快构建碳排放双控制度体系工作方案》，要求建立地方碳考核、行业碳管控、企业碳管理、项目碳评价、产品碳足迹等一系列配套管理机制，这意味着碳排放将成为评估地区、行业和项目发展质量的核心指标，从而倒逼政府和企业加快形成以减污降碳协同为导向的新质生产力。山西、内蒙古、江西、浙江等省(区)陆续发布了省级碳排放双控工作方案，探索调整路径。

**持续完善标准规范体系。**《产品碳足迹核算标准编制工作指引》和《温室气体产品碳足迹量化要求和指南》等国家标准的发布，为产品碳足迹标准体系建设提供指引和方向。截至2025年11月，中国已制定了超过50项减污降碳协同增效相关标准，以及覆盖水泥、钢铁等行业的20余项技术指南。这些标准规范为地方减污降碳的政府监管和企业实践提供了统一的技术方法和评价准则，提升了治理的科学性和精准性。

### 经济激励政策方面

**全国碳市场交易扩容提质。**碳市场建设迈出关键步伐，《碳排放权交易管理条例》于2024年5月1日正式施行，首次以行政法规明确核心制度。全国碳市场扩容取得实质性进展，钢铁、水泥、铝冶炼行业技术指南发布，为这些行业纳入交易体系铺路，推动行业绿色低碳转型。国家核证自愿减排(CCER)市场于2024年1月22日启动，为控排企业提供履约补充机制并引导社会资本支持绿色创新，6

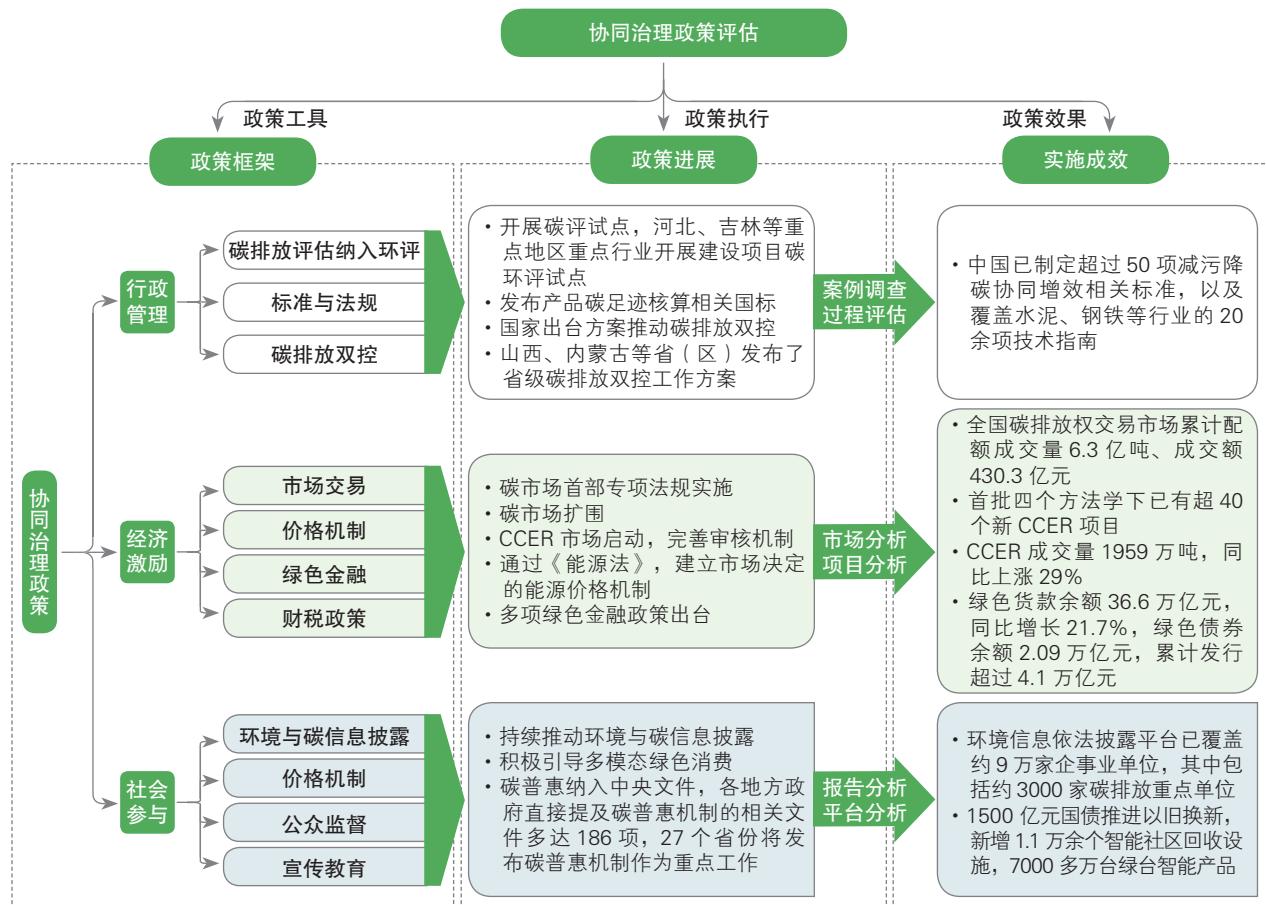


图 3-2 减污降碳协同治理政策进展评估框架

月相关审定核查机构的获批进一步完善了市场基础。

完善新能源产业发展价格机制。2024年11月8日，《中华人民共和国能源法》表决通过，该法案的核心是建立主要由市场供求、成本等因素决定的能源价格形成机制，推动新能源产业逐步摆脱对政府补贴的依赖，全面参与市场竞争。这一变化旨在通过市场化的方式筛选出真正具备成本优势和技术竞争力的企业，避免补贴退坡后行业出现大规模波动，保障减污降碳协同治理的长效性和稳健性。

强化绿色金融政策支持。以《关于进一

步强化金融支持绿色低碳发展的指导意见》《关于发挥绿色金融作用服务美丽中国建设的意见》等文件为标志，中国绿色金融顶层设计已基本完成。其核心举措包括三方面，一是建立统一的绿色与转型金融标准体系，明确“绿色”边界以引导资金精准流向；二是要求金融机构将气候风险纳入治理，通过风险评估倒逼资本流向清洁低碳资产；三是引导银行保险机构加大对“减污降碳协同”项目的支持，并搭建项目库促进政银企对接。截至2024年末，绿色贷款余额达36.6万亿元，同比增长21.7%，高于各项贷款增速14.5个百分点，绿色债券余额2.09万亿元，累计发行超4.1万亿元。

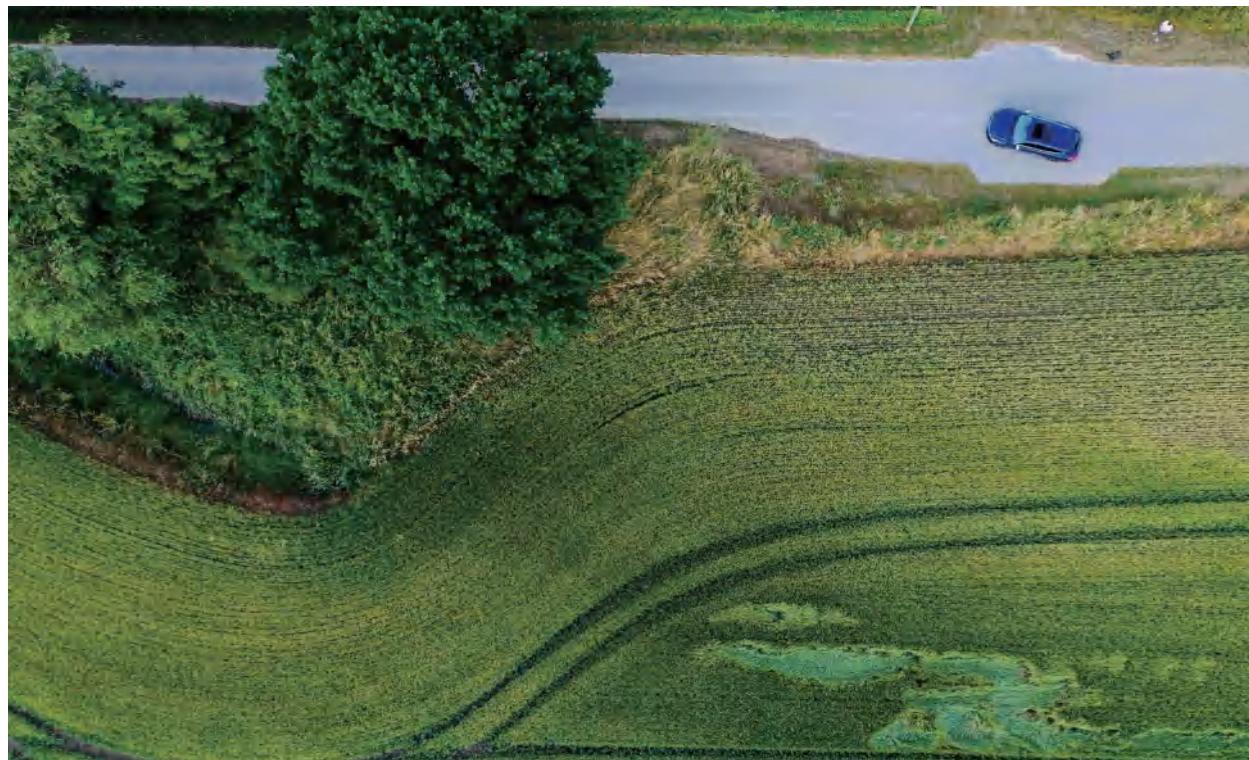
## 社会参与政策方面

**持续推动减污降碳信息披露。**生态环境部持续推动环境信息依法披露，已覆盖约 9 万家企事业单位，其中包括约 3000 家碳排放重点单位，提供了基础的环境数据透明度。财政部印发《企业可持续披露准则——基本准则( 试行 )》，要求企业董事会必须从整体上审视其污染与碳排放情况，系统性地管理其生产活动带来的所有外部成本。在投资者和公众的监督下，企业必须同时交出“减污”和“降碳”两份答卷，从而将协同治理内化为企业生存和发展的核心战略。

**积极引导多模态绿色低碳消费。**2024 年 7 月 31 日，中共中央、国务院发布《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》，从国家战略层面提出要推广绿色生活方式、加大绿色产品供给并积极扩大绿色消费。国家投入 1500 亿元超

长期特别国债，通过财政补贴、消费券等方式，推动超过 7000 万台 ( 件 ) 的绿色智能产品进入普通家庭。该政策还同步推动了后端回收体系的建设，新增了超过 1.1 万个智能社区回收设施，旨在打通从“换新”到“回收”的全链条循环，从而系统性地将减污降碳从理念倡导转变为有大规模财政支持和基础设施保障的社会实践。

**公众参与机制不断完善。**《关于全面推进美丽中国建设的意见》提出探索建立“碳普惠”等公众参与机制，“碳普惠”首次出现在中央政策文件。这一机制的核心是将公众的绿色低碳行为进行量化并给予激励，提升公众在减污降碳方面的参与感和获得感，构建起全民参与减排的社会氛围。截至 2024 年底，各地方政府直接提及碳普惠机制的相关文件多达 186 项，27 个省份将发布碳普惠机制作为重点工作，北京、深圳、上海、天津、武汉、成都等相继出台相关实施方案 ( 能链智电，2024 ) 。



## 3.3 地方实践

在 2022 年发布的《减污降碳协同增效实施方案》要求下，31 个省（自治区、直辖市）和新疆生产建设兵团出台工作方案，明确制定推动减污降碳协同增效细化措施。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》，在 21 个不同类型的城市和 43 个园区推动了减污降碳协同创新试点工作，涵盖了资源型、工业型、综合型、生态良好型等多种类型城市，以及钢铁、有色、石化、汽车、装备制造、新能源等典型产业园区。

城市层面的创新试点包括创新减污降碳协同政策体系、协同减排路径及协同管理机制、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及管理体系、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。各地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。如浙江省在全域开展减污降碳协同创新区建设，在制度创新上，首创减污降碳协同评价综合指数、标杆项目库、财政奖补、金融支持等管理机制；在科技创新上，发布污水处理、水泥行业等 8 项协同技术指南；在模式创新上，实现 11 个设区市试点全覆盖，累计建设 81 个协同试点园区、5 批 327 个协同标杆项目。

城市层面的减污降碳工作涌现了一批典型案例。以山西临汾为例，在其发布的细颗粒物

达标攻坚方案中，安排了大量基于结构调整的减排措施，包括工业行业布局优化，设备升级改造和全面退出淘汰类装备产能；能源行业降低火电供电能耗，提升新能源和清洁能源装机占比和发电占比；供热行业实施长输供热项目和推动全域清洁取暖改造；交通行业推进工业企业运输清洁化改造等。方案还提出将氢能、精品钢、新能源重卡、现代物流、文旅五大产业作为重点低碳转型产业，设计了产业规模目标，为城市提供持续的绿色低碳增长动力。方案实施后取得显著环境效果，2024 年临汾市  $PM_{2.5}$  年均浓度较 2023 年下降 13.3%，降幅在全国 168 个重点城市中排名第四。根据研究测算，方案的实施将推动减少约 640 万吨的煤炭消费和约 38 万吨的柴油消费， $CO_2$  排放量将降低约 20%。

区域性政策的减污降碳效果同样显著。中国人民大学对“十四五”期间河北省涉及减污

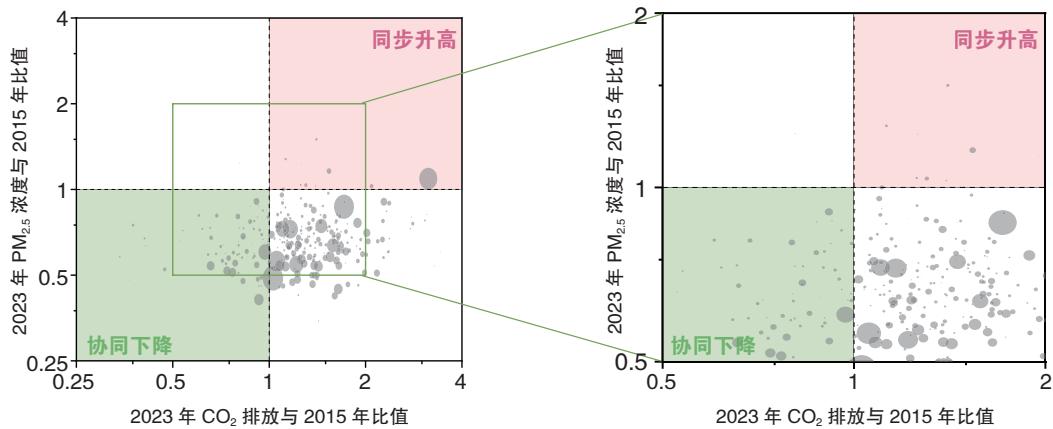


图 3-3 2015 年至 2023 年城市  $PM_{2.5}$  年均浓度和  $CO_2$  排放量变化情况比较

注：散点大小表示 2023 年  $CO_2$  排放

降碳协同增效实施的环境政策和方案开展了中期评估，系统梳理了实施的具体措施费用成本，开展了各项措施实施的环境效应、减污降碳协同效益及社会经济影响评估。结果表明，钢铁行业超低排放改造贡献最大，实现超过 70% 效益，但改造成本也很高。不同主体承担分解的成本也值得关注，如企业承担的成本占比超过 80%，家庭支出的成本集中在清洁取暖改造等。

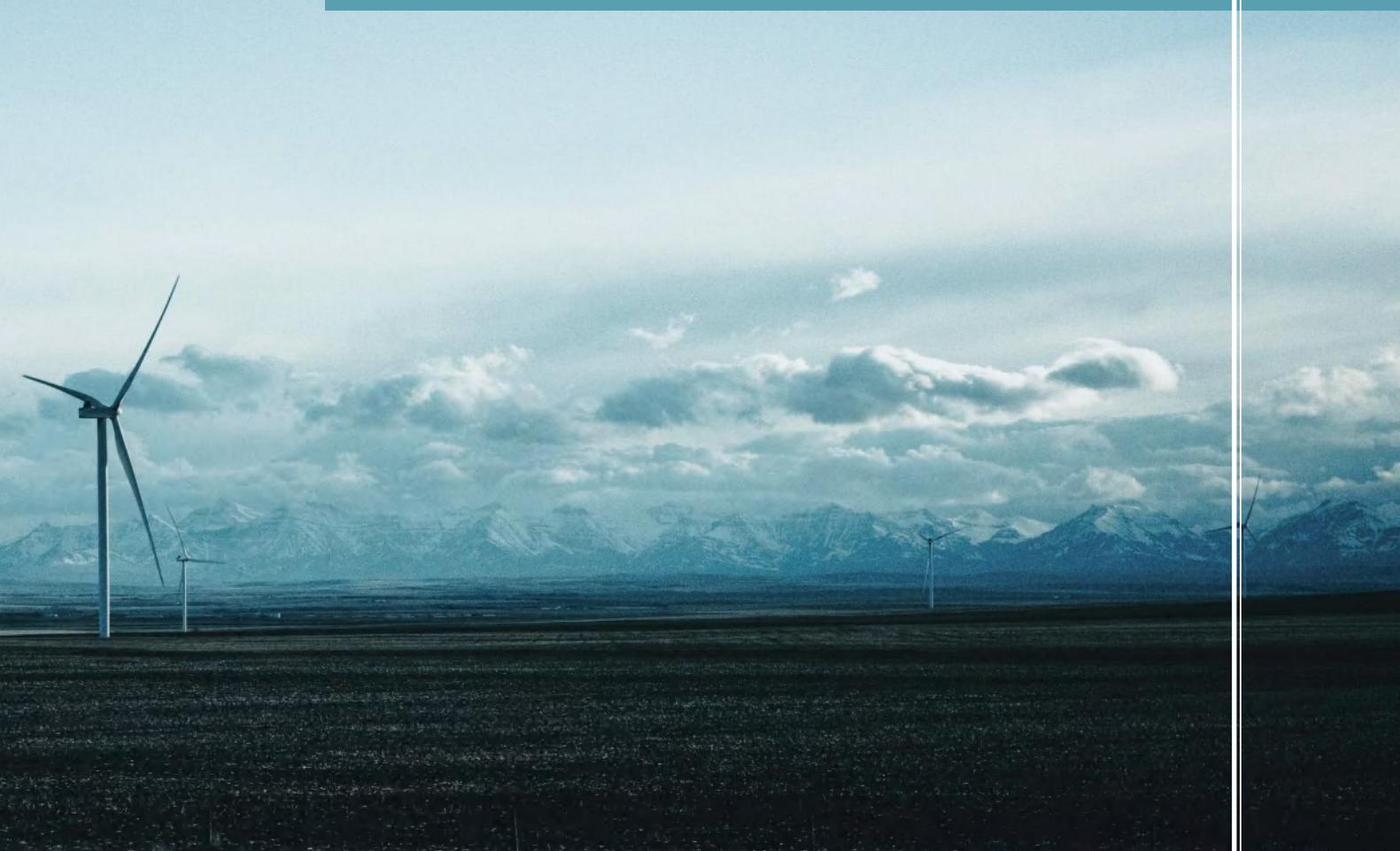
为定量表征和准确认识我国不同城市大气污染及碳排放协同控制的水平，基于中国环境监测总站发布的环境空气质量监测数据和中国城市温室气体工作组编制的《中国城市二氧化碳排放数据集》(Cai et al., 2018)，对全国 335 个地级及以上城市 2023 年  $PM_{2.5}$  浓度和  $CO_2$  排放特征进行评估。结果表明高碳排放城市呈现  $PM_{2.5}$  污染更为严重的态势：2023 年  $PM_{2.5}$  浓度年均值未达标的 112 个城市平均  $CO_2$  排放量 (5356 万吨) 比 223 个  $PM_{2.5}$  浓度达标城市平均  $CO_2$  排放总量 (3880 万吨) 高出约 38%；在  $CO_2$  排放总量高于 5000 万吨的 103

城市中， $PM_{2.5}$  浓度达标的占城市比例 (55%) 明显低于  $CO_2$  排放总量低于 5000 万吨的城市 (约占 72%)。结果还显示，当前约 29% 的城市处于碳排放达峰状态，约 13% 的城市处于碳排放平台期，剩余约 58% 的城市处于未达峰状态 (Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2024)。研究预测，如果以先达峰城市为标杆，未达峰城市遵循同类型达峰城市范式采取有效措施并获得类似的减排效果，中国的总排放量达峰时间有望提前 4 年。

对城市“双达”情况进行评估发现，截止到 2023 年，中国仅有 71 个城市实现了  $PM_{2.5}$  年均浓度达标和  $CO_2$  排放显著达峰，约占全部城市的 21%，其中有 46 个城市在先实现  $CO_2$  排放达峰后实现  $PM_{2.5}$  浓度达标。2015—2023 年间仅有 83 个城市实现了  $PM_{2.5}$  年均浓度和  $CO_2$  排放量协同下降，占城市总数的约 25%；有 12 个城市的  $PM_{2.5}$  年均浓度和  $CO_2$  排放量同步升高 (图 3-3)。特别地，2020—2023 年期间，有 63 个城市出现了  $CO_2$  排放和  $PM_{2.5}$  年均浓度的反弹，或与城市煤炭消费量快速增长相关。



# 结构转型与治理技术



“十四五”以来，中国结构转型与污染治理迈上了新台阶，并始终积极稳妥地推进碳达峰与碳中和。“十四五”期间，我国结构调整与治理技术取得了较显著的成就，但降碳减污工作的结构性、根源性挑战依然待解。面向“十五五”，我国仍需持续发力，推动结构优化与治理技术稳步升级。本章通过追踪我国在结构调整和治理技术发展情况，总结分析转型进程中的成就、机遇与挑战，为我国进一步开展降碳减污协同控制提供参考。

# 4.1 能源结构转型

2024年是习近平总书记提出“四个革命、一个合作”能源安全新战略十周年，是“十四五”规划目标任务的关键一年，习近平总书记强调，积极发展清洁能源，推动经济社会绿色低碳转型，已经成为国际社会应对全球气候变化的普遍共识。党的二十届四中全会通过的《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划的建议》首次明确在规划中提出“建设能源强国”，擘画未来五年新型能源体系建设蓝图。2025年9月24日，习近平总书记在联合国气候变化峰会上宣布了我国2035年国家自主贡献目标，为未来十年绿色低碳转型指明方向。新提出温室气体净排放下降率等指标，延续提出非化石能源消费占比、风电和太阳能装机等指标并进一步提高力度，将持续引领我国能源结构清洁低碳转型。本小节指标基于2024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特征新形势，并与全球及主要经济体能源转型进展进行了对比。

**能源结构转型提质增速。**2024年我国能源转型稳中有进，国民经济延续向好态势，支撑能源消费总量持续增长。2024年全年能源消费总量达到59.6亿吨标准煤，同比增长4.3%，能源消费弹性系数为0.86（中能传媒研究院，2025a），在2023年高基数下有小幅回落（中国石化报，2025a）。“十四五”前四年，我国能源消费增量已达到“十三五”五年增量的1.5倍（国家能源局，2025a）。能源消费结构加速向绿色低碳转型，清洁能源消费占比显著提高（春观能源，2025），煤炭消费量占能源消费总量比重为53.2%，比上年下降1.6个百分点，

非化石能源消费占比首次超越石油，上升至19.8%（国家发展改革委，2025a），比上年提高1.9个百分点，符合到2030年目标预期进度。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28.6%，上升2.2个百分点（国家统计局，2025a），为能源结构优化提供有力支撑。从地区来看，资源禀赋是驱动地区能源转型的核心主导因素，京津冀地区在政策引导下压减燃煤、能源消费结构持续改善，长三角地区面临经济与能源需求双增长的矛盾，能源基地省份面临较大转型压力。

**化石能源消费趋势分化明显。**2024年我国煤炭消费量增速放缓，同比增长1.7%，其中电力行业动力煤消耗量仍持续增长（中能传媒研究院，2025b），但增速有所下降。2024年中国新增煤电核准装机约6224万千瓦，较2023年同比减少约41.5%，是“十四五”以来煤电核准首次出现下降，但仍超“十三五”期间年度新增核准装机容量的最高值（绿色和平，2025）。受下游需求疲弱影响，建材、冶金行业煤耗下降，化工行业产量增长成为工业煤炭消费增长主要因素。石油消费达峰趋势明显，2024年原油消费量下降1.2%，由于新能源汽车保有率持续增长和LNG重卡加速发展，交通用油“双轮替代”持续提速，成品油消费由升转降，其中汽、柴油消费量分别同比下降1.1%、5.4%，仅航煤消费逐步回归，同比增长13.2%。炼油企业开工率同比下降3.9个百分点至75%（中石油经研院，2025），炼油规模增长接近尾声（中国石化报，2025b）。预计“十五五”期间煤炭、石油消费量将达到峰值。天然气消费量增长7.3%，城市燃气需求持续增长，工业用气需求多点释放，发电用

气量波动性较大，增量主要来自新机组投运（中能传媒研究院，2025c）。

**能源效率提升速度回升。**2024年5月，国务院印发《2024—2025年节能降碳行动方案》（以下简称《方案》），制定钢铁、炼油、合成氨等7个行业节能降碳专项行动计划，推动能耗强度和碳强度持续降低（国务院，2024）。2024年，全国万元国内生产总值能耗比上年下降3.8%，

“十四五”前四年累计降低11.6%，达到规划目标时序进度要求（求是网，2025）。2024年重点耗能工业企业单位电石综合能耗同比下降0.8%，单位合成氨综合能耗同比下降1.2%，吨钢综合能耗同比下降0.1%，单位电解铝综合能耗同比下降0.2%，每千瓦时火力发电标准煤耗同比下降0.2%。相比于2020年，我国主要高耗能行业能效标杆产能比“十三五”末提高6个百分点（国家发展改革委，2025b），电石、合成氨、电解铝行业单位产品综合能耗分别下降8.3%、1.1%、2.8%，每千瓦时火力发电标准煤耗累计降低1.1%，规模以上工业单位增加值能耗持续降低（国家发展改革委，2025c）。



## 电力消费呈高速增长和多元化趋势。

“十四五”以来，在电气化率提升、高耗电产业快速发展和高温事件频发的影响下，我国用电需求保持强劲增长。2024年全国发电量超10万亿千瓦时，全社会用电量为9.85万亿千瓦时，同比增长6.8%，增速比2023年提高0.1个百分点，高于过去8年平均增速（中国电力报，2025），比GDP增速高近1.8个百分点，电力消费弹性系数约为1.36，创“十四五”以来新高，反映出我国经济发展对能源的依赖程度持续加深。从结构上看，以电动汽车等“新三样”为代表的先进制造业，以及以人工智能、大数据等为代表的数字产业，共同带动了我国用电需求的快速增长，2024年我国新能源整车制造用电量同比增长34.3%，互联网和相关服务用电量同比增长20.5%，电力需求呈现多元化趋势。目前我国终端用能中，电能比重已经达到30%左右。按照2020年不变价格计算，2024年每千瓦时全社会用电量创造的GDP约为12.4元，

较2020年减少0.7元。

**新能源已成为新增装机发电主体。**新能源发电装机持续保持高速增长势头，已完成从增量主体向存量主体过渡。风光发电跃升发展，重大水电项目有序推进，核电在运在建规模升至世界第一（国家能源局，2024）。2024年，全国可再生能源发电新增装机3.73亿千瓦，同比增长23%，约占电力新增装机的86%（国家能源局，2025b）。风电和太阳能发电累计装机达到14.1亿千瓦，提前6年多完成我国2030年国家自主贡献中的“风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上”目标，新一轮国家自主贡献目标中提出了“风电和太阳能发电总装机容量达到2020年的6倍以上、力争达到36亿千瓦”目标，预计到2035年中国风电、太阳能发电总装机容量将大幅超过全球当前风电、太阳能发电总装机容量总和。截至2024年底，新能源发电装机容量达到14.5亿千瓦，占



全国总装机的 42%，首次超越火电装机规模成为第一大电源。新能源发电量同样保持高速增长，在总发电量中占比突破 18%，已成为电量增量主体。2024 年，我国新能源发电量 1.84 万亿千瓦时，同比增长约 25%，对发电量增长的贡献率超过 60%，占总发电量的 18.5%，同比提高近 3 个百分点（国网能源研究院，2025）。规模以上工业水电、核电、风电和太阳能发电占比提高到 32.6%，接近三分之一。全国已建成投运新型储能 7376 万千瓦，装机规模占全球总装机比例超过 40%（国家能源局，2025a）

#### 《能源法》明确绿色低碳转型战略导向。

2025 年 1 月 1 日，经十四届全国人大常委会第十二次会议审议通过的《中华人民共和国能源

法》（以下简称“《能源法》”）开始实施（中国政府网，2024a）。通过立法明确了我国能源战略，突出加快能源绿色低碳发展的战略导向，赋予可再生能源优先开发地位，实行非化石能源开发利用中长期发展目标制度，将 2030 年非化石能源占比达到 25% 左右、2060 年达到 80% 以上，上升为有法律约束力的制度（中国政府网，2024b）。《能源法》提出促进各类可再生能源多元开发利用，强调因地制宜，明确支持风能、太阳能、生物质能、地热能、海洋能等协同发展明确，首次将氢能纳入能源管理制度框架。同时提出促进可再生能源电力消纳与消费，通过设定消费最低比重目标、完善消纳保障机制、构建新型电力系统及绿色消费促进机制，系统性破解高比例消纳瓶颈，对我国可再生能源高比例发展发挥了战略引领作用。

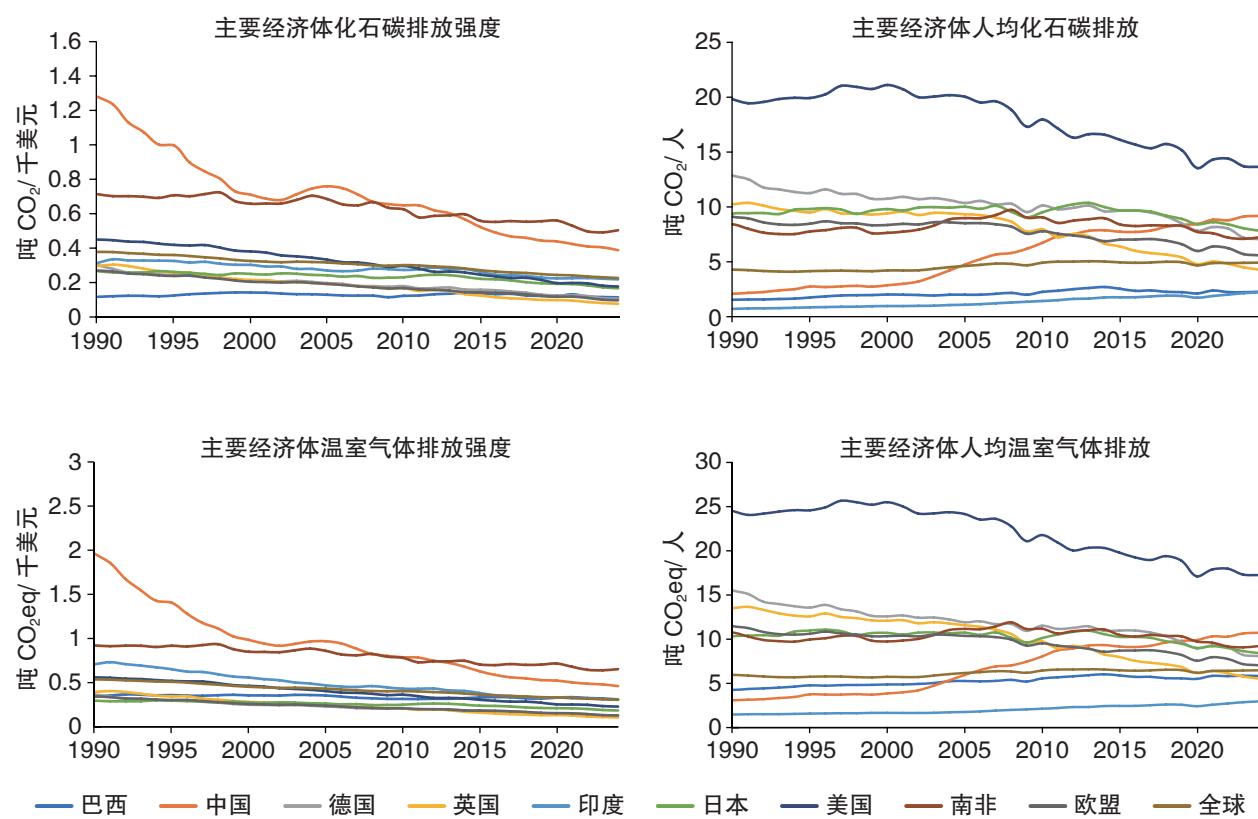


图 4-1 主要经济体温室气体与化石能源碳排放情况

引领全球清洁转型与能源结构困局并存。从全球来看,2024年全球能源需求增加2.2%,快于过去十年的平均水平,尽管风能和太阳能增幅接近能源需求总量增幅的9倍,化石能源需求依然保持了1%以上的增长、其中天然气需求增幅高达2.5% (Energy Institute, 2025)。全球能源相关二氧化碳同比增长0.8%,增速持续放缓,增量主要来自中国、印度等发展中国家(图4-1)。能源转型虽然仍在推进,但无序性也更加明显。全球能源转型指数(ETI)同比上升1.1% (WEF,

2025),为过去3年平均增速的2倍,反映了全球能源转型进程的加速复苏。中国排名全球第12位,亚洲第1位,创历史新高。我国清洁能源投资占全球近40%,风光新增装机占全球新增风光装机总量的75%,电动汽车销量占全球近2/3,是全球能源转型最大引擎,但同时我国在全球煤炭消费中的占比达到58%(图4-2),创历史新高,2024年新增煤电94.5GW,占全球新增总量的93%。人均排放量达发达经济体1.16倍,逼近全球均值两倍(IEA, 2025)。

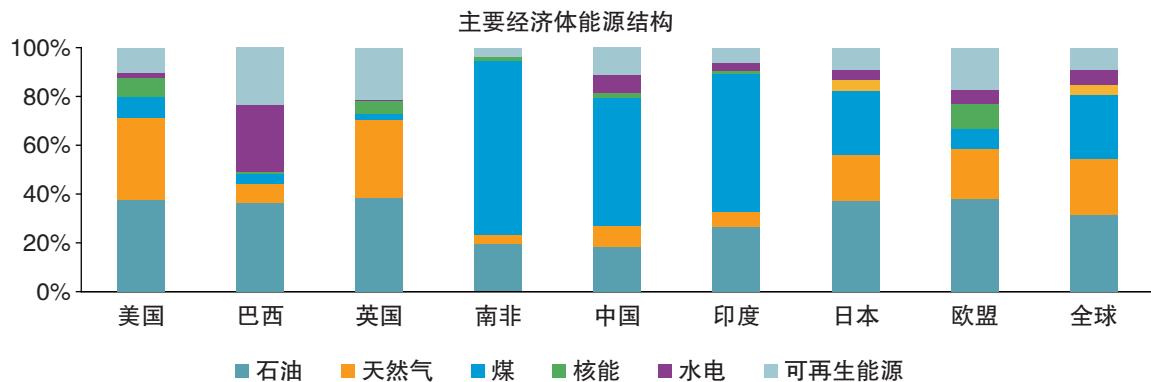
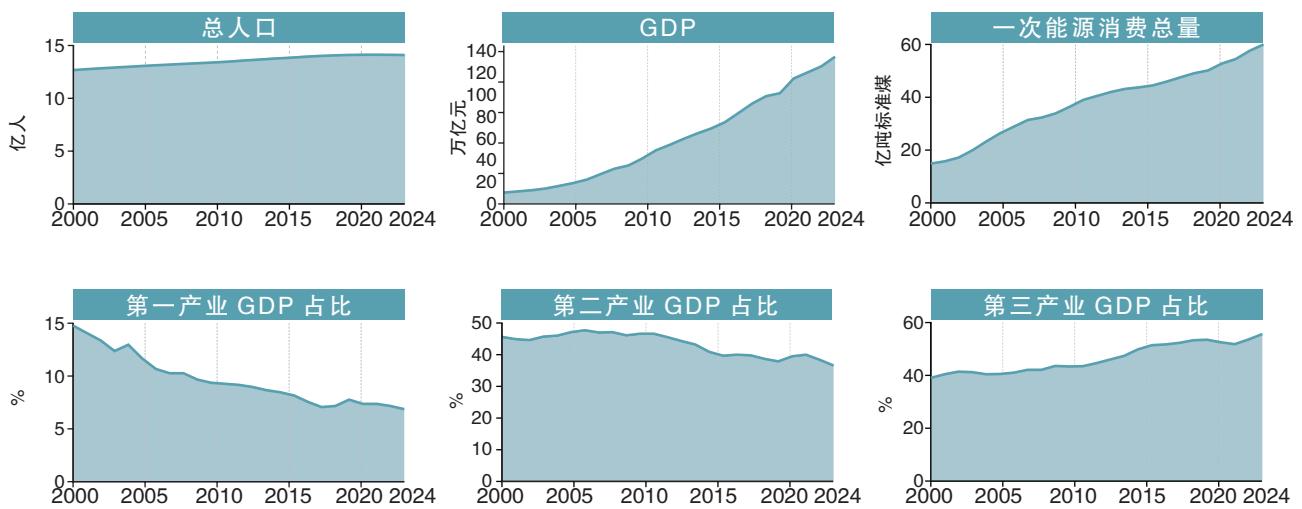


图4-2 主要经济体2024年能源结构



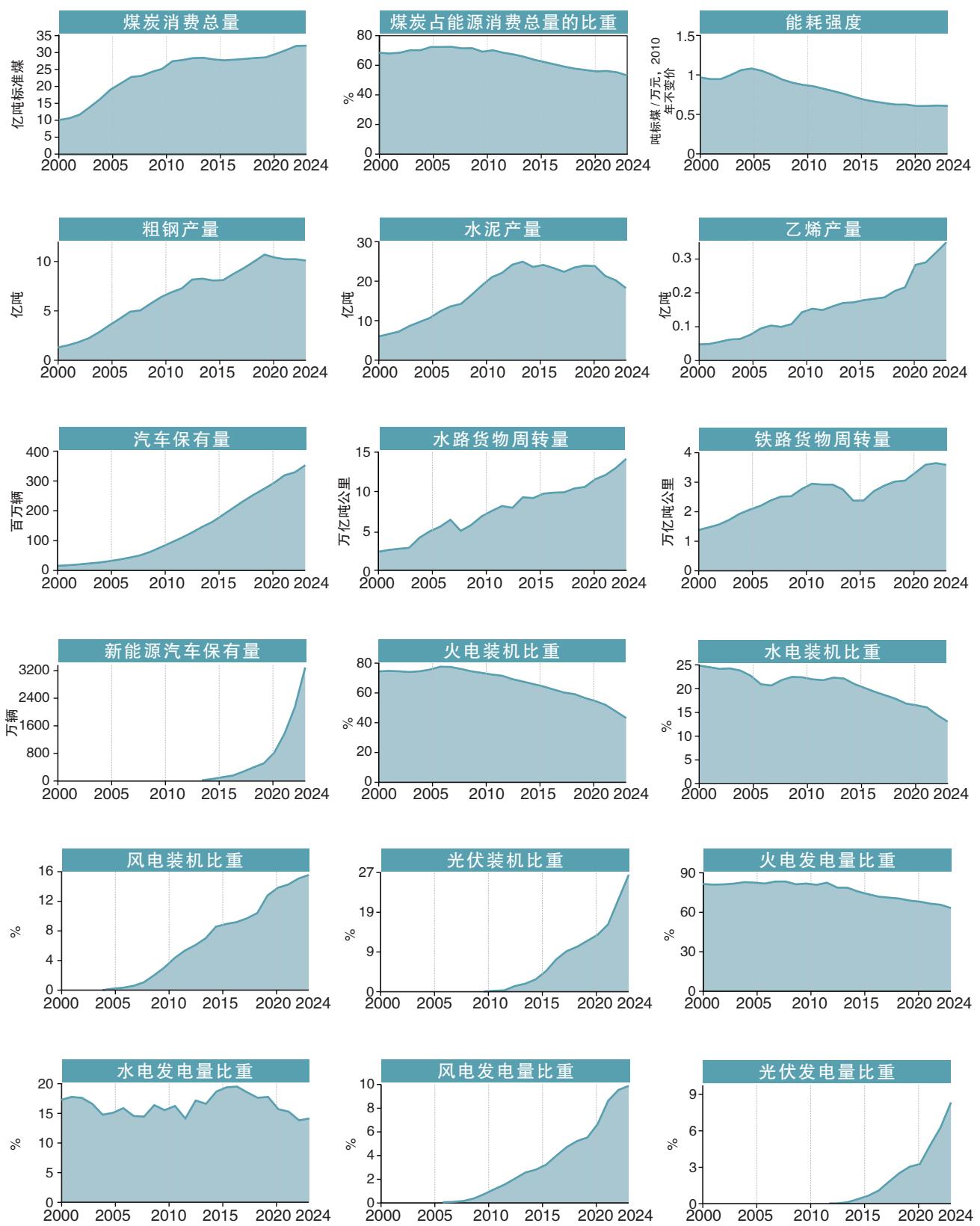


图 4-3 2000 年至 2024 年我国结构转型进展

## 4.2 产业结构转型

2024年我国在加快培育新动能、推动重点行业节能降碳和强化制造业数字化智能化方面取得了显著成效。战略性新兴产业快速壮大，为经济高质量发展提供了持续动能；重点行业绿色技术改造扎实推进，循环利用水平不断提高，为实现“双碳”目标打下坚实基础；制造业数字化率和质量基础持续提升，有力推动了产业向高端化、智能化迈进。随着中央和各部委密集出台涉及新质生产力、绿色低碳、数字协同等多项政策，产业结构不断优化，发展韧性和国际竞争力显著增强，为加快构建现代化产业体系、推动中国式现代化进程提供了坚实保障。

### 行业进展

**加快培育壮大新动能，推动战略性新兴产业快速发展。**2024年，我国围绕高技术制造业、数字经济、新能源、新材料等重点领域加快布局，推动新质生产力加速集聚。2023至2024年，我国国内生产总值从126.1万亿元增长至134.9万亿元，比上年增长5.0%。高技术制造业增加值增长8.9%，新能源汽车、集成电路、工业机器人产品产量分别增长38.7%、22.2%、14.2%（国家统计局，2024, 2025b）。新能源汽车、锂电池、光伏产品“新三样”年出口突破万亿元大关，充分体现了中国制造业在全球产业链供应链中的绿色低碳竞争优势，有效拓展外贸新空间。中共中央《进一步全面深化推进中国式现代化的决定》明确提出构建有利于新质生产力发展的体制机制，推动更多要素资源向战略性新兴产业集中集聚，不断增

强经济发展的内生动力与潜在增量（新华社，2024）。区域差异化表现方面，长三角在半导体、新材料、生物医药等领域持续集聚高端要素，形成新质生产力发展的核心引擎；珠三角以数字经济为牵引，加速推进智能终端、新一代信息技术等产业规模化升级；而京津冀依托科技创新资源优势，大力推进商业航天、人工智能等未来产业培育。不同区域在新动能发展中的侧重点差异明显，为全国产业结构转型提供了多样化路径。

**深化重点行业节能降碳与循环利用，促进绿色制造体系升级。**2024年，国家持续强化重点领域绿色低碳转型，发布《绿色低碳转型产业指导目录（2024年版）》和《绿色技术推广目录（2024年版）》，细化氢能、绿色物流、先进节能设备等关键方向，推动绿色技术加速落地。钢铁、化工、建材等重点行业节能降碳

项目加快实施，全国重点行业单位能耗同比下降 2.5%，能源利用效率稳步提升；其数字化升级也在加速推进，进一步增强了节能降碳和生产效率提升的空间。钢铁企业普遍建立能源管理系统与智能调度平台，能耗监控实现实时化；建材企业在熟料煅烧、窑炉控制等关键环节实施智能优化，提高了产品质量稳定性；化工企业加快智能传感设备和工业互联网平台部署，推动关键反应过程可视化和安全可控化。在大型石化、钢铁、采矿企业中，AI 辅助生产调优、无人化物流、智能巡检机器人等技术加速普及，传统行业的智能化水平和运营效率明显提升。发改委、生态环境部等部门出台多项再生资源管理办法，促进废钢、废有色金属高效回收利用，有效推动产业链绿色化、闭环化，为实现碳达峰碳中和目标奠定坚实基础。

**强化数字化和质量基础，推动制造业智能化高端化迈进。**2024 年，聚焦制造强国建设和数字化转型，工业和信息化部牵头发布《加快推动制造业绿色化发展的指导意见》及年度绿色制造名单，全国新增 1382 家绿色工厂、123 家绿色园区，为制造业高端化提供示范引领。工业企业数字化研发设计工具普及率提升至 92%，关键工序数控化率达 72%，进一步强化产品设计与生产环节智能协同。生态环境部推动的“1+N”新质生产力配套政策系统完善排放标准、循环监管和园区差别化管控措施，推动制造业在智能化、质量化水平上持续突破，为保持全球产业链供应链竞争力注入新动能。

值得强调的是，传统行业仍是我国制造业体系的重要支柱，其绿色化和数字化转型不仅减少了高耗能产业的碳排放，也在装备升级、节能技术创新、再生资源利用等方面形成了新动能，为产业链供应链稳定和“双碳”目标实

现提供了坚实支撑。传统产业的高端化、智能化、集群化发展，正成为我国现代化产业体系建设的关键环节之一。

与此同时，放眼国际，全球绿色低碳和数字化转型同样步伐加快。2024 年，全球电动汽车销量达到约 1710 万辆，同比增长超 25%。其中，中国贡献显著，2024 年销售约 1,100 万辆，约占全球销量的 65%；美国增长约 10%，欧洲略有放缓（-3%）（RhoMotion, 2025）。全球光伏装机容量增至 2TW，全年新增 655GW。值得注意的是，全球太阳能装机容量分布不均且高度集中，中国集中了新增装机容量的 55%，排名第二和第三的美国和印度仅占新增太阳能装机容量的 8% 和 5%（SolarPower Europe, 2025）。半导体行业加快复苏，2025 年 5 月全球芯片月销售额达到 590 亿美元，同比增长 19.8%，其中亚太地区增速领跑（SIA, 2025）。国际能源署数据显示，2024 年全球清洁能源投资接近 2 万亿美元，创历史新高，占能源总投资的三分之一以上。制造业领域，欧美主要经济体智能化和数字化技术应用持续提速，工业 AI 和机器学习渗透率超过 30%，助推产业链绿色化、高效化不断深化（Eurostat, 2025）。这些积极进展为全球经济注入更多确定性，也为我国加快培育战略性新兴产业、壮大新质生产力营造了更加有利的国际环境。

## 地方进展

发展绿色低碳转型产业是协同推进降碳减污扩绿增长、实现“双碳”目标的重要手段，包括传统产业绿色转型和新兴低碳产业发展。在传统产业绿色转型方面，聚焦钢铁、有色金属、石化化工和建材等重点行业，深挖传统产业绿色低碳发展潜力，推动传统产业扩绿增效。传

统产业大省正加速推动重点行业绿色转型，如河北作为钢铁强省，公布全国首个绿色低碳钢材地方标准《绿色低碳钢材产品评价导则》，加快打造现代化钢铁产业；山东省出台《山东省建设绿色低碳高质量发展先行区三年行动计划（2023—2025年）》，以形成绿色低碳生产生活方式作为主攻方向，聚焦冶金、化工、轻工、建材、纺织服装、机械装备等六大优势产业，推动生产工艺革命、产品精深加工和绿色低碳转型。

在新兴低碳产业发展方面，各省（区、市）陆续出台相关文件，支持以光伏和新能源汽车产业为代表的新兴低碳产业发展，包括产业高

质量发展方案、分布式光伏发展行动方案、新能源汽车充电设施建设政策措施等，部分代表性政策如表1、表2所示。产业高质量发展方案主要包含提升产业创新能力、打造产业链、优化产业布局、完善保障措施四个方面。提升产业创新能力方面，具体措施包括支持核心技术攻关，建设协同创新平台，强调科技成果转化等；打造产业链方面，具体措施包括打造产业制造聚集区，支持招引关键配套环节企业等；优化产业布局方面，具体措施包括推动重点区域协调发展、加强统筹规划、推动跨区域协同合作等；完善保障措施方面，具体措施包括加强金融支持、强化人才引育等。

表4-1 代表性省（区、市）光伏产业发展相关政策措施

省（区、市）	产业结构调整相关措施亮点
 安徽	2024年4月，《支持先进光伏和新型储能产业集群高质量发展若干政策》围绕提升先进光伏和新型储能产业核心竞争力，支持龙头企业牵头，联合上下游企业、高校、科研院所等开展产业链协同创新，重点支持关键核心技术产业化、强链补链延链、重大技术装备攻关等。支持先进光伏和新型储能示范应用，重点围绕光伏建筑一体化、农光复合利用、智能微电网、虚拟电厂、低碳园区、共享储能等方面，打造一批技术领先、应用前景良好、可复制推广性高、产业带动性强的创新应用场景。
 广东	2024年5月，《广东省推进分布式光伏高质量发展行动方案》加快推进绿色低碳产业园建设，新规划建设的各类园区要同步规划、配套建设分布式光伏；鼓励利用大型住宅区屋顶资源开发分布式光伏，探索建筑光伏一体化建设，开展建筑光伏一体化试点示范。推动适用于源网荷储、光储充一体化等综合应用场景的新型储能产品研发制造和先进产品示范应用；推动先进光伏产品和技术纳入省应用场景清单，加大光伏技术产品供需对接。
 陕西	2024年7月，《关于进一步推动分布式光伏发电项目高质量发展的通知》有序推进租赁（出租）方式的户用光伏项目，结合配电网可开放容量情况进行开发建设，全力做好户用自然人分布式光伏接入。积极推动工商业屋顶分布式光伏发展，支持采用“自发自用，余量上网”建设模式，减小公共电网运行压力，降低企业用能成本、扩大绿电消费。鼓励各级政府牵头，推动利用党政机关、学校、医院、市政、文化、体育设施、政府投资的厂房等公共建筑建设屋顶分布式光伏电站。
 山东	2024年7月，《山东省光伏产业高质量发展行动方案》聚焦绿色低碳需求、前沿技术驱动和未来发展战略支撑，优化产业发展布局，加快核心技术攻关，推进重点项目建设，拓宽市场应用空间。提升光伏产业高端化、智能化、绿色化、融合化发展水平，加快形成新质生产力，打造光伏产业发展高地。鼓励光伏生产企业构建绿色制造体系，推动光伏组件回收利用技术研发及产业化应用。

表 4-2 代表性省（区、市）新能源汽车产业发展相关政策措施

省（区、市）	产业结构调整相关措施亮点
	<p><b>浙江</b></p> <p>2023年1月，《浙江省加快新能源汽车产业发展行动方案》积极培育一批新能源整车头部企业，支持企业优化生产布局，提升产销规模，增加高端新能源车型供给。制定汽车产业调整优化和整改方案，指导整车企业制定新能源汽车发展战略规划，鼓励传统燃油汽车企业调整产品结构，充分利用现有产能发展新能源汽车，有效提升产能利用率水平。加快新能源汽车品牌建设，加大品牌宣传和推广力度，打造具有国际知名度的浙产新能源汽车品牌。</p>
	<p><b>山东</b></p> <p>2023年12月，《山东省新能源汽车产业高质量发展行动计划》以建设绿色低碳高质量发展先行区为总抓手，以打造乘用车竞争新优势、巩固商用车领先地位为目标，以融合创新与协同推进为路径，统筹产能利用，优化产业布局，突破关键核心技术，打造特色优势品牌，完善基础设施，着力培育“车—能—路—云”融合发展的产业生态，提升全产业链竞争水平，全面推动我省新能源汽车产业高质量发展。</p>
	<p><b>四川</b></p> <p>2024年3月，《支持新能源与智能网联汽车产业高质量发展若干政策措施》支持各市（州）加大新能源与智能网联汽车重点项目引育力度；推进新能源与智能网联汽车产业规模以上工业企业智能化改造、数字化转型全覆盖；支持电机电控、传感器、智能网联、动力电池、燃料电池等关键零部件企业增强配套能力和竞争力；推进产业集群化发展，支持围绕新能源与智能网联整车及关键零部件等领域加强技术攻关。</p>
	<p><b>吉林</b></p> <p>2024年5月，《吉林省新能源和智能网联汽车产业高质量发展行动方案》开展核心技术攻关，灵活运用“竞争择优”“揭榜挂帅”“军令状”等形式，挖掘优势创新主体，深入激发创新活力，促进重大成果产出，助力解决新能源和智能网联汽车产业发展的关键技术难题。培育创新型骨干企业，加大对新能源和智能网联汽车企业上市、产业链协同创新、技术改造、科技攻关等方面推进力度；推动“专精特新”中小企业发展，打造国内汽车行业细分领域领军型企业。</p>
	<p><b>河南</b></p> <p>2024年7月，《支持新能源汽车产业链培育壮大若干措施》优先支持新能源汽车企业申报国家级智能制造示范工厂、省级智能工厂/车间，优先支持符合条件的技术改造项目纳入省技术改造资金支持范围；鼓励金融机构在以汽车及零部件为主导产业的开发区设立服务新能源汽车产业发展的特色网点、特色事业部及专业团队等，支持设立并发放新能源汽车专项贷款；鼓励银行对乘用车消费贷款实行零首付。</p>
	<p><b>北京</b></p> <p>2024年8月，《本市加快推进新能源汽车超级充电站建设实施方案》按照超快结合、适度超前，政府引导、市场主导，节约资源、鼓励共享，创新融合、安全高效的原则，加快推进超充站建设。遴选优质企业与充电设施、停车管理、物业服务等企业合作，加快推进高质量超充网络建设。建立全市超充站用电保障机制，开展超充站大功率负荷特性对区域配电网影响研究，统筹协调超充站接入过程中重点难点问题，优化电力扩容审批机制，满足超充站用电需求。</p>
	<p><b>新疆</b></p> <p>2024年8月，《关于加快构建自治区高质量充电基础设施体系的实施方案》结合电动汽车发展趋势，适度超前安排充电基础设施建设，在总量规模、结构功能、建设空间等方面留有裕度，更好满足不同领域、不同场景充电需求。结合区域发展特点、充（换）电需求，分区域、分场景，有序推进不同类型充电设施建设，支持“油气氢电服”等综合供能服务站建设，服务新能源汽车各场景应用。</p>

其中，以山东省和浙江省为例。山东省为推动省内光伏产业提质增效，支撑全省绿色低碳高质量发展，制定《山东省光伏产业高质量发展行动方案》，结合省内优势与光伏产业发展特点，提出提升光伏产业高端化、智能化、绿色化、融合化发展水平，加快形成新质生产力，打造光伏产业发展高地的发展目标。该方案涵盖光伏硅片降本增效、光伏电池迭代升级、光伏组件提质发展、光伏配套不断完善与光伏应用跨界融合五个领域，提出实施产业创新引导工程、产业布局优化工程、支撑载体提升工程、智能光伏推广工程与产业生态完善工程五个重点任务；同时，该方案提出加强统筹协调、

加大政策支持、深化行业服务，以保障光伏产业健康有序地发展。浙江省为加快推动新能源汽车产业发展，制定《浙江省加快新能源产业发展行动方案》，结合省内实际，以“集群化培育、规模化提升、智能化赋能、绿色化转型、国际化发展”为发展主线，着力打造国内领先的新能源汽车应用示范区、具有国际竞争力的新能源汽车智造高地和有影响力的新能源汽车产业生态引领区。该方案提出促进产量规模加速提升、提升全产业链条供给能力、促进产业集聚引领发展、推动产业链与创新链深度融合、持续完善产业发展环境五个重点任务，全面推动新能源汽车产业的高质量发展。



## 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，也是实现“双碳”目标和推动空气质量持续改善的关键领域。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。“十四五”以来，我国交通运输在服务保障国家现代化建设中快速发展绿色低碳转型取得积极成效，交通基础设施绿色化建设水平显著提高，低碳交通装备加快推广应用，客货运输结构持续优化。

**运输结构持续优化。**2024年，全国营业性货运总量约完成568.75亿吨、同比增长3.9%，其中铁路货运量占比提升至9.1%，水路占比17.3%；全国集装箱多式联运量达1.25亿标箱、同比增长15.6%，其中铁水联运增长16.5%；铁路煤炭运输量达28.24亿吨、同比增长1.5%，铁路集装箱运量达9.14亿吨、同比增长15.5%；铁路专用线加快向重点港口、厂矿和园区延伸，沿海港口和长江干线主要港口铁路进港率已超90%，“最后一公里”瓶颈逐步打通，综合运输网络衔接水平进一步提高（交通运输部，2025；国家铁路局，2025）。

**绿色出行持续推进。**2024年，全国城市公共汽电车客运量386.70亿人次、同比增长1.6%；城市轨道交通客运量322.09亿人次、同比增长9.6%；城市轨道交通运营线路326条、运营里程10923.8公里；全国铁路旅客发送量

43.12亿人次、同比增长11.9%（交通运输部，2025；国家铁路局，2025）。

**清洁运输装备推广提速。**2024年，全国新能源汽车保有量达3140万辆、占汽车总量的8.9%；新能源乘用车销量1105万辆、同比增长40.2%、占乘用车国内销量48.9%，新能源商用车销量53.2万辆、同比增长28.9%、占商用车国内销量17.9%；全国铁路电力机车1.47万台、占65.3%；民航系统开启可持续航空燃料（SAF）应用试点，首批12个航班完成生物航油加注试飞，涵盖C919等国产飞机，形成覆盖机场、航空公司、航油供应链的协同网络；交通运输装备大规模更新有序推进，低排放和新能源替代与高排放淘汰协同开展，拆解老旧船舶2500艘，新建了一批大型化、标准化、专业化、清洁化的船舶（中国民用航空局，2025；交通运输部，2025）。

**绿色交通基础设施加快建设。**2024年，全国累计建成各类充电桩1281.8万台，同比增加近五成，其中高速公路服务区建成充电桩3.5万台，覆盖率达98%，基本实现主要高速公路沿线充电设施全覆盖；在重卡运营集中的地区，重卡专用换电站布局加快；铁路电气化水平持续提升，电气化率稳定在75%以上，运营能效进一步优化；民航领域飞机APU替代设施使用率稳定在95%以上，机场能源清洁化保持较高水平，电力、天然气、外购热力占比达到90.8%，太阳能、地热能等清洁能源占比约1%；内河和沿海港口岸电供电能力提升，长江经济带船舶靠港使用岸电基本实现常态化、用电量达到1.9亿度；交通基础设施的电气化、智能化水平的提高，为运输全过程减污降碳提供了坚实支撑（国家能源局，2025c；国家铁路局，2025）。

**政策机制和管理制度不断健全。**2024年，国家和地方密集出台一系列绿色交通政策文件，包括《推动铁路行业低碳发展实施方案》《交通运输大规模设备更新行动方案》《交通物流降本提质增效行动计划（2024—2026年）》等。在政策试点方面，交通运输部启动第一批绿色低碳交通强国建设专项试点，工信部等八部门联合启动公共领域车辆电动化先行区试点，国家发改委发布第一批绿色低碳先进技术示范项目清单。支持政策方面，新能源车辆购置税减免政策延续，工矿企业超低排放清洁运输政策深化。政策协同、财政支持和市场机制“三位一体”的管理框架初

步形成，为绿色转型奠定了制度基础。

展望“十五五”，各地空气质量治理均已进入以交通排放控制为主的新阶段，交通相关污染物亟需大幅减排，交通碳减排工作亟需加大力度以支撑国家碳达峰目标如期实现。从交通排放来看，传统燃油交通工具存量规模依然巨大，氮氧化物排放仍处于高位，交通排放对PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>复合污染的贡献持续上升，京津冀区域、长三角地区、晋陕蒙煤炭主产区等地均需统筹协同推动“公转铁”“公转水”与“油转电”“交通基础设施乘风启曜行动”“零碳运输走廊建设”等工作。

下一步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，积极稳妥推动新能源清洁能源交通工具规模化应用，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。重点推进五项任务：一是聚焦能源结构优化，提升电力、可再生燃料等清洁能源在交通终端的占比；二是加快老旧装备更新替代，开展“车船机”设备更新和标准提升；三是强化运输组织效率，推动多式联运发展，提升系统减排能力；四是持续完善绿色基础设施，扩大充电、换电、加氢、绿色燃料加注等网络规模；五是推进政策创新和制度集成，构建监测统计、标准规范和绩效评价一体化的治理体系。

## 4.4 建筑能源系统低碳转型

2025 年 7 月，中央城市工作会议指出，我国城镇化正从快速增长期转向稳定发展期，城市发展正从大规模增量扩张阶段转向存量提质增效为主的阶段，我国的建筑节能低碳工作也全面由关注新建转向注重既有管理。建筑的绿色低碳转型，全面深入地影响人民的生活和公共服务水平，会议强调应推动减污降碳扩绿协同增效，着力建设绿色低碳的美丽城市和安全可靠的韧性城市，也进一步凸显城市中服务建筑运行的各项基础设施配套建设及绿色低碳运行的重要性。当前我国建筑运行碳排放处于缓慢增长的平台期和实现达峰目标的关键期，能源结构转型的重点工作应高度关注建筑用热低碳转型，包括建筑节能改造、老旧供热管网改造升级、高效热源替代及余热资源利用等方面；同时进一步加速各项分散用热的电气化转型，实现直接碳排放的加速下降。

2023 年我国建筑运行过程中的 CO<sub>2</sub> 排放为 22 亿吨，其中直接碳排放维持下降趋势，占比 19%。2022 年我国建筑运行用电量显著增加，超过 2.5 万亿千瓦时，电力间接碳排放增长至 13.5 亿吨 CO<sub>2</sub>，占比 61%。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，2023 年占比 20%。

建筑运行碳排放同时受建筑运行能耗和建筑用能结构与能源转换水平的影响，对比各领域的碳排放总量和强度可以发现：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，但是我国的碳排放强度却高于法国、瑞典等国。虽然法国、瑞典的建筑用能强度比中国高，但由于低碳的能源结构（法国以核电为主，瑞典以水电为主），所以仍然实现了建筑领域的低碳目标。对比从 2002 年到 2022 年各国建筑运行碳排放的变化趋势，可以发现各国呈现不同的历史趋势：（1）第一类包括美国、加拿大、德国、英国、法国等，得益于人均和单位面积能耗的降低和用能电气化转型，使得建筑运行碳排放总量、人均碳排放、单位面积碳排放均呈下降趋势。（2）第二类的代表国家是韩国和日本，近 20 年其碳排放总量增加、人均碳排放增加，但单位面积碳排放减

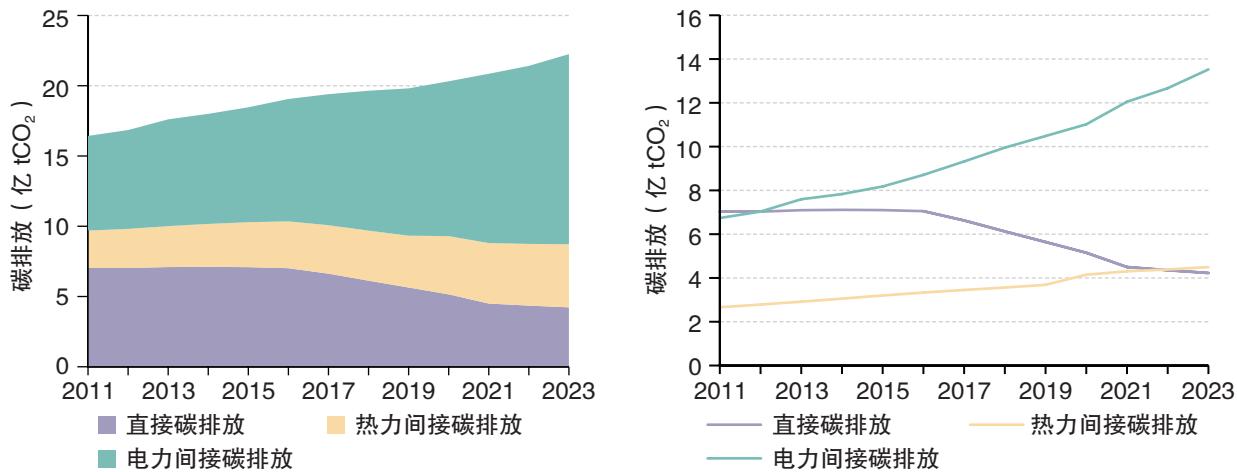


图 4-4 中国建筑运行逐年碳排放（2011 年至 2023 年）

小。主要原因是这些国家建筑面积仍有增长，但人口基本已经饱和甚至负增长，所以出现人均碳排放、单位面积碳排放变化趋势不一致的现象。（3）第三类的代表国家是中国和印度，近 20 年碳排放总量、人均碳排放和单位面积碳

排放均呈增长趋势。近 20 年中国和印度均处于高速发展阶段，用能强度也在不断增长，为了尽早实现碳达峰，中国、印度等发展中国家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。

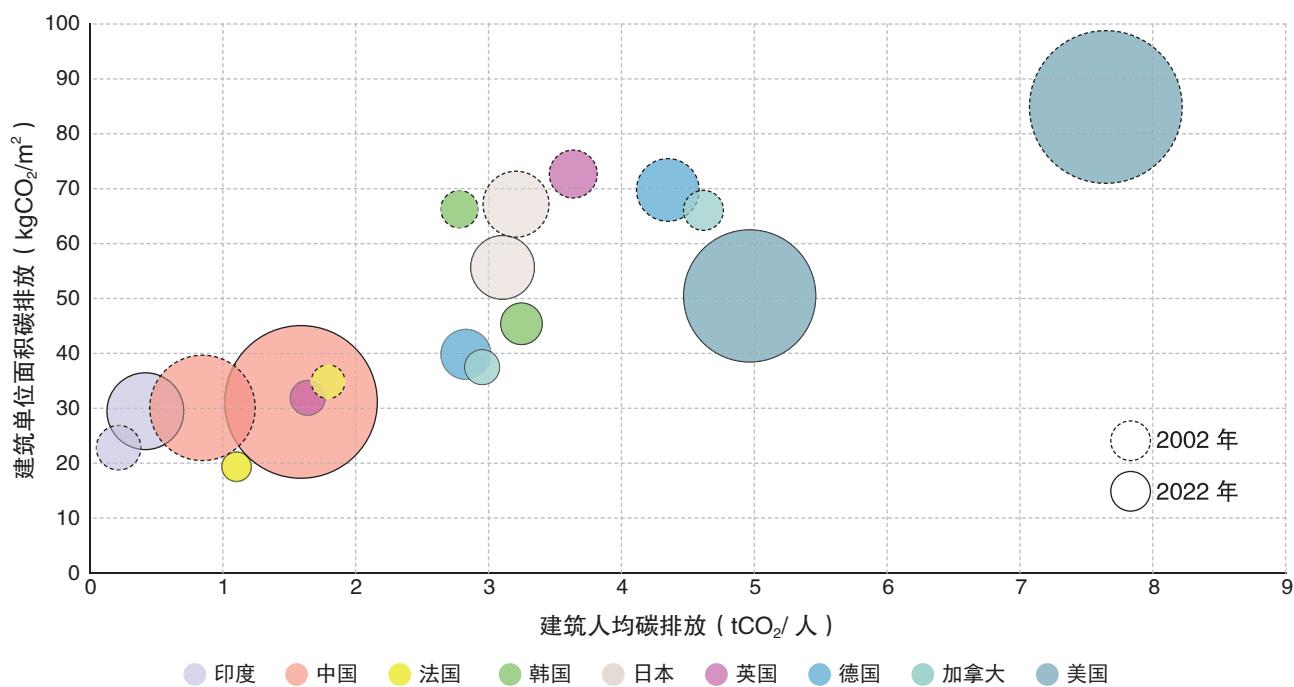


图 4-5 中外建筑运行碳排放对比（2002 年至 2022 年）

注：圆圈大小表示碳排放量

实现碳达峰碳中和目标是一个系统工程，仅靠某一行业单兵突进难以实现，建筑作为能源消费及碳排放大户，之前一直以用户侧节能为主，致力于提高建筑节能性能，而在“双碳”目标背景下，建筑的功能定位将发生重大变化，不仅需要继续做好“用”的节能，还需要利用巨量的建筑表皮空间资源，做好太阳能光伏发电的“产”，需要做好建筑用能负荷柔性，保障新型电力系统安全性灵活性的“调”，需要利用电动汽车、建筑热惰性、热容量及各类用能设备，实现电力及冷热的“储”。建筑将逐步具备“用、产、调、储”四位一体功能，成为城乡新型能源系统的重要枢纽，对我国碳达峰碳中和整体工作产生重大影响。

同时，按照党中央、国务院的决策部署，要尽快建立能耗双控向碳排放双控全面转型新机制，健全地方碳考核、行业碳管控、企业碳管理、项目碳评价、产品碳足迹等政策制度和管理机制。推动建筑领域行业碳管控，需要在工作重点及工作方法上进行创新，工作重点方面，我国城镇新建建筑节能标准要求已处于国际前列，北京、山东等地的地方标准对建筑围护结构热工性能要求已比美日德等国同气候区高5%—10%，同时我国城镇化进程已进入下半场，新建建筑规模逐年下降，而我国城乡既有建筑已经超过700亿平方米，广大农村地区建筑更是缺乏节能要求。下一阶段，建筑节能性能提升重点应从新建建筑转向既有建筑，从城镇转向农村，结合城市更新战略系统推进。

2025年7月，在中央城市工作会议上，习近平总书记强调，要以城市更新为主线推动，标志着我国城市工作正式进入更新时代。截至2023年底，我国已有400多个城市成立了城市更新工作领导小组，且自2024年起，中央财政

将支持试点城市开展城市更新示范工作，每个城市补助总额最高可达12亿元。因此，在国家大力建设以可再生能源为核心的新型电力系统背景下，建筑行业若能以城市更新为契机，系统性推进绿色低碳转型，必将起到事半功倍的作用，具体来讲，有以下几方面内容：

**一、新建建筑与既有建筑并重，分类分区推动建筑节能。**一是推动城镇新建建筑严格执行《建筑与可再生能源利用通用规范》，因地制宜发展超低能耗建筑，重点提高建筑门窗等关键部品节能性能要求；二是结合城市更新行动，全面推动既有居住建筑节能改造，按照居民采暖、空调、通风等需求，推广实施适应性的改造技术路线；三是推动公共建筑能效提升行动，引导各地分类制定公共建筑用能（用电）限额指标，实行用能分级管理制度，持续推动公共建筑用能监测、节能调适、节能改造；四是结合以旧换新和设备更新政策，引导居民在更换门窗、空调、壁挂炉等部品及设备时，采购高能效产品。

**二、空间管控与要素管控并重，推动城乡建设绿色转型。**一是按照住房城乡建设部系统推进好房子、好小区、好社区、好城区“四好”建设要求，积极开展绿色低碳示范城市、绿色生态城区、高品质绿色建筑等不同空间层级示范；二是加大绿色建材推广力度，持续扩大绿色建材评价标识种类，加快政府采购支持绿色建材促进建筑品质提升试点城市建设，积极推广新型节能保温材料，以及纤维类、生物基建筑材料研发与推广；三是加强绿色建造、智能建造，持续推动装配式建筑、装配式内装，积极推广竹木结构建筑。

**三、增光增热与减煤减气并重，加快消除建筑直接排放。**一是推动各省市开展可再生能

源资源普查，摸清建筑、公共绿地、旧工业用地等空间的太阳能、空气热、地热、工商业余热资源潜力，推进光伏和热泵的“应装尽装”及余热零碳供暖；二是加快推进建筑全面电气化，引导新建公共建筑进行全电气化设计，区分不同气候区、不同建筑类型的采暖、生活热水、炊事等用能需求，加快推动建筑电能替代，聚焦青年人外卖、老年人助餐等需求，试点建设多样化、便捷化的全电气化“无油烟”社区食堂，加速消除建筑现场化石能源消费。积极推动热泵等高效用电设备，加速建筑用电设备智能群控、建筑－电动汽车－配电网协同等技术应用，提高建筑柔性用电能力。

**四、制度创新与技术创新并重，驱动绿色低碳转型升级。**一是抓紧研究建筑领域落实碳排放总量强度双控的评价考核制度，建立自上而下的碳排放目标分解、考核机制，研究建立建筑碳排放活动数据与排放因子数据统计、监测制度，开展基于数据的建筑碳排放核算、碳排放标识、建筑产品碳足迹管理办法研究；二是面向“双碳”目标开展城乡建设绿色低碳转型重大科技需求提炼，力争立项国家重点研发计划，突破系列共性、关键技术，利用技术公告、技术目录等形式，推广绿色低碳新技术、新产品，

淘汰落后技术产品，开展零碳园区及零碳建筑、高品质绿色建筑、建筑电气化等方面示范工程建设，以及“光储直柔”建筑、建筑空调负荷需求侧响应、建筑电力动态因子调节等一批跨行业创新技术的示范应用。

**五、财政奖励与金融扶持并重，探索灵活多元激励机制。**一是充分利用加力扩围实施“两新”政策，更大力度支持“两重”项目的契机，会同有关部门研究将建筑绿色低碳重点项目、先进技术示范、既有建筑节能低碳改造、高效设备产品推广等纳入支持范围；二是总结青岛、湖州等地经验，推动绿色金融更广范围、更大力度支持建筑绿色低碳转型工作，修订完善绿色信贷指引，建立建筑绿色低碳项目征集、评价、入库等工作，并及时推送金融管理部门，消除信贷需求与金融风控信息差；三是创新建筑碳交易机制，打包区域内建筑节能改造、分布式光伏光热等减排量以CCER方式参与碳交易，探索城市“个人行为碳账本”，探索建筑内用能行为碳计量、评价及配套奖励机制；四是试点推动建筑动态电力碳排放因子与峰谷电价相结合的电力需求侧非中断负荷、常态化响应机制，探索BVG多向充放电价格激励模式。

# 4.5 碳捕集利用与封存技术

我国碳捕集利用与封存（CCUS）技术持续取得积极进展，各环节、全链条技术不断突破，带动项目成本与能耗持续下降，百万吨级系列重大示范工程已相继落地并稳定运行。多项顶层设计与支持政策密集出台，相关技术规范、安全标准及监管框架正加速构建完善，为CCUS技术的规模化、产业化发展提供了坚实保障。

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，碳移除与集成优化技术有待进一步提升。在捕集技术方面，工艺不断向低能耗、低成本方向更新迭代，新一代高效低能耗捕集溶剂、吸附材料及膜分离技术加速涌现。例如，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/t CO<sub>2</sub>降至2.4 GJ/t CO<sub>2</sub>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，CO<sub>2</sub>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，生物质能碳捕集、直接空气捕集相关碳移除技术，以及全流程集成优化技术与国际先进水平相比仍存在一定差距。

我国CCUS示范项目在项目数量、建设规模、陆海建设领域都取得重要的里程碑。全国已投运及规划建设中的CCUS示范项目已超过100个。目前，CCUS示范项目规模覆盖10万吨级、50万吨级、百万吨级和千万吨级，多个百万吨级项目正在建设，新疆油田、长三角等多个千万吨级项目已进入前期可研阶段。同时，我国CCUS示范项目集群化发展趋势显著，中海油、埃克森美孚和壳牌正在推进广东省大亚湾集群，中国石化与壳牌、中国宝武、巴斯夫签署合作备忘录，将在华东地区共同启动中国首个开放式千万吨级CCUS项目，相比之下，国内尚未有商业化BECCS与DACCs示范项目建成，亟需加快相关中试验证和示范工程建设。中国CCUS示范项目技术规模与行业应用正取得重要进展，2024年1月，中国联合水泥公司在山东青州投产的水泥行业氧燃料燃烧项目成为全球水泥行业最大CCUS项目。位于甘肃正宁的华能陇东燃煤电厂CCUS项目正在推进建设，也将成为全球最大的燃煤电厂CCUS项目。

中国 CCUS 示范项目不仅在建设规模上取得了重要里程碑，在场地选址也获得了重大突破，大亚湾集群是中国首个海上二氧化碳捕集利用及封存项目，据报道，2025 年，恩平 15-1 油田碳封存项目累计封存二氧化碳突破 1 亿立方米，标志着我国海上二氧化碳封存技术、装备和工程能力日渐成熟。同样，在全球范围内，CCUS 项目数量和捕集规模也正迅速增长。根据 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（中国 CCUS 示范项目超 100 个），捕集能力约 4.2 亿吨/年（中国捕集能力约 940 万吨/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提高，我国 CCUS 技术成本总体处于全球低位水平，碳移除技术成本有待进一步降低。当前，我国 CCUS 技术面临较高成本挑战，且与其他减排技术竞争优势尚不明显，短期发展阻力较

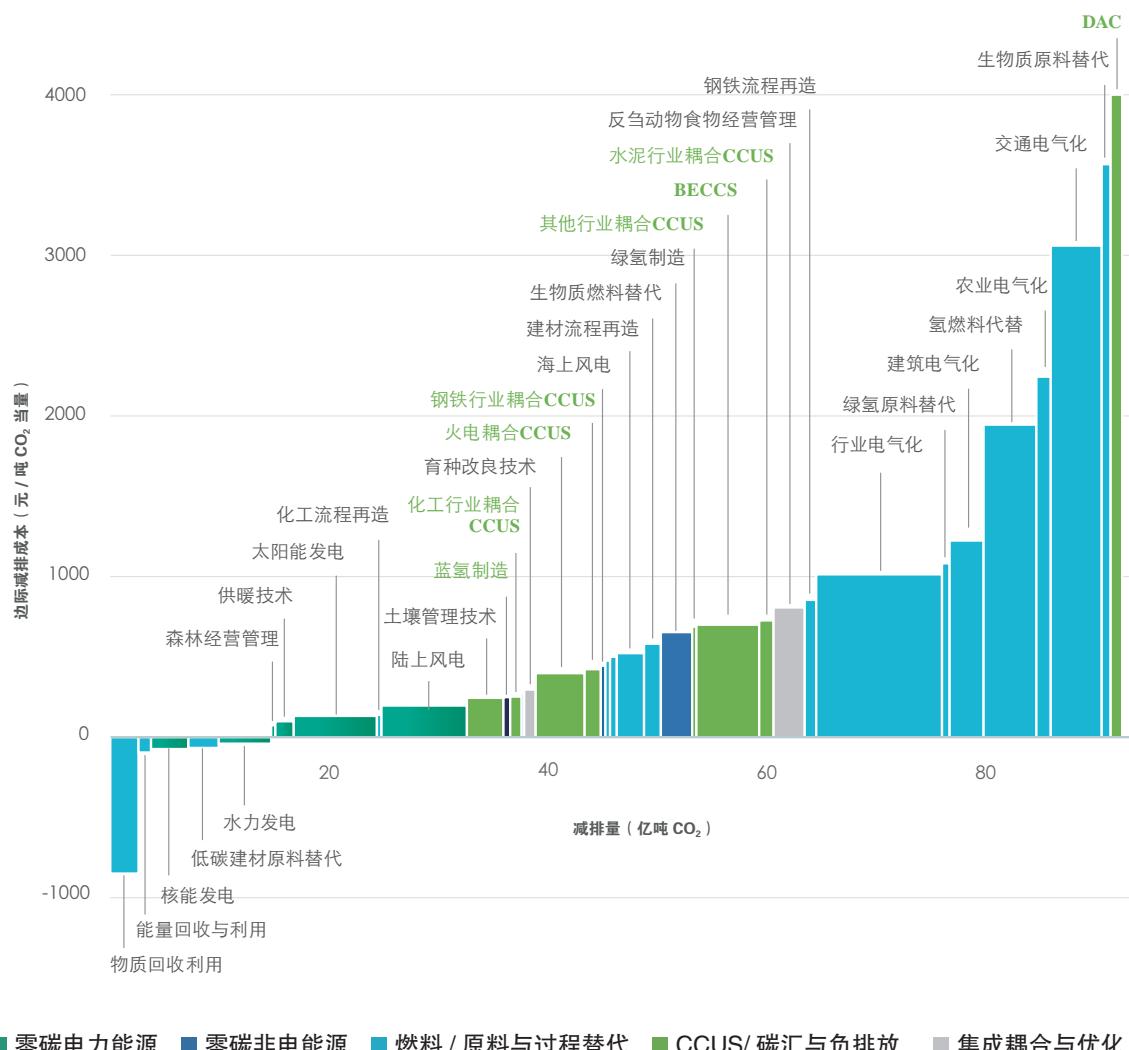


图 4-6 CCUS 与主要低碳技术边际减排成本对比

（中国二氧化碳捕集利用与封存（CCUS）年度报告（2023））（张贤等，2023）

大。但与国外 CCUS 技术成本相比，中国具有一定的成本优势。在难减排行业中，电力、钢铁和水泥行业碳捕集成本分别为 200–400 元 / 吨、300–400 元 / 吨和 220–305 元 / 吨，整体要低于国外碳捕集成本水平，主要得益于我国较低的人工成本和规模化的项目经验。我国碳移除技术（生物质能碳捕集、直接空气捕集）成本处于全球中低位水平，且下降趋势相较于 CCUS 技术更为显著，例如，直接空气捕集成本在过去十余年从超过 4000 元 / 吨 CO<sub>2</sub> 降低至当前约 1000–1500 元 / 吨 CO<sub>2</sub>。

我国相继颁布了战略规划、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，我国累计发布 CCUS 政策相关文件多达 90 余条，在“双碳”目标提出后呈现爆发性增长。在发展纲要方面，《碳达峰碳中和行动方案》和《“十四五”现代能源体系规划》明确将 CCUS 作为能源绿色低碳转型的核心技术路径之一，强调其在煤炭、天然气和水泥等高排放行业的应用潜力。2024 年，国务院在《关于加快经济社会发展全面绿色转型的意见》中再次强调要“加快关键技术研发，聚焦能源绿色低碳转型、二氧化碳捕集利用与封存，统筹强化核心技术攻关”，不仅凸显了政策引领的持续力度，还为 CCUS

注入更强的执行力，推动其从实验室向工业规模的跃进。在标准法规方面，我国在“十四五”期间 CCUS 标准制定上进展明显，现有 7 项国家标准和 25 项行业标准。例如，《国家标准化发展纲要》《进一步强化碳达峰碳中和标准计量体系建设行动方案(2024—2025 年)》《完善碳排放统计核算体系工作方案》等方向性文件明确了未来标准体系构建路径，《二氧化碳地质利用与封存项目监测范围确定技术指南》等各技术链条标准的相继出台为 CCUS 项目标准体系构建提供了具体方案。总体来看，我国 CCUS 标准分布不均衡、体系不完善的问题仍然存在，具体表现为：基础标准缺失导致 CCUS 项目边界不清、产业发展不规范；量化核查监测国家标准缺位、管理标准不足制约了绿色金融等支持政策的有效落地。在路线图方面，中国正在编制《中国碳捕集、利用与封存 (CCUS) 技术发展路线图》，进一步详细规划技术研发、示范与商业化推广的阶段性目标与关键路径。未来应重点从三方面推进完善标准体系布局：一是优先制定碳运输、封存和监测核查等薄弱环节的国家标准；二是加快 CCUS 碳减排核算方法学开发和试点示范；三是推进量化核查标准制定，支撑 CCUS 项目纳入自愿减排机制。



# 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，增加新能源发电容量，推动能源清洁转型，是实现碳达峰、碳中和目标的必由之路。本小节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。**2024年，全国发电量达到10.09万亿千瓦时，突破10万亿大关，同比增长6.7%（国家统计局，2025a）。其中，风光发电量达1.84万亿千瓦时，同比增长25.2%，约占全部发电量的18.2%；水电发电量1.42万亿千瓦时，同比增长10.9%，约占全部发电量的14.1%；火电发电量6.37万亿千瓦时，同比增长1.7%，约占全部发电量63.2%；核电发电量4509亿千瓦时，同比增长3.7%，约占全部发电量4.5%（中国电力企业联合会，2025）。总可再生能源发电量达3.46万亿千瓦时，超过全社会用电量的1/3（国家能源局，2025d）。发电装机容量保持快速增长，截至2024年底，全国发电总装机达33.5亿千瓦，同比增长14.6%。

**可再生能源装机占比持续提升。**截至2024年底，全国可再生能源装机达18.5亿千瓦，占

全国发电总装机比例超过55%。其中，水电装机4.36亿千瓦，风电装机5.2亿千瓦，太阳能发电装机8.9亿千瓦。可再生能源装机已连续多年稳居世界第一，截至2024年底，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达到41.6%，是美国可再生能源装机的4.3倍，欧盟可再生能源总装机的2.6倍（IRENA, 2025）。2024年全国可再生能源新增发电装机容量3.73亿千瓦，占全国新增发电装机的86%，约占全球新增可再生能源装机的64%，超过世界其他国家的总和。国家加快建设大型风电光伏基地，实施“千乡万村驭风行动”“千家万户沐光行动”，集中式与分布式并举开发风电和太阳能发电资源，2024年新能源新增装机超3.6亿千瓦，超过美国的风光累计装机容量，超过欧盟风光装机总容量的2/3。根据国家能源局印发的《2025年能源工作指导意见》，2025年新增新能源发电装机规模将保持2亿千

瓦以上（国家能源局，2025d）。随着电源结构的持续优化、清洁能源发电量快速增长，2024年全国电力平均碳足迹因子为 $0.5777\text{ kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$ ，较2023年下降了6.9%（生态环境部，2025a）。

**新能源消纳水平保持稳定。**2024年我国平均风电利用率为95.9%，平均光伏发电利用率为96.8%，均保持在95%以上（国家能源局，2025b）。随着新能源发电装机的快速增长，我国积极应对新能源消纳压力，在提升电力系统灵活调节能力、构建新能源消纳长效机制等方面取得了显著进展，新能源消纳水平保持稳定。在灵活调节资源方面，我国积极开发建设抽水蓄能，同时大力开展先进压缩空气储能、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，灵活调节性电源的装机容量显著提升。截至2024年底，我国新型储能装机7376万千瓦，抽水蓄能累计装机容量达5869万千瓦，同比增长超15%（水电水利规划设计总院，2025）。《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，进一步提升系统新能源消纳能力（国家能源局，2021）。根据国家发改委、能源局联合印发的《关于促进新能源消纳和调控的指导意见》，到2030年，基本建立协同高效的多层次新能源消纳调控体系，满足全国每年新增2亿千瓦以上新能源合理消纳需求，助力实现碳达峰目标（国家发展改革委，2025d）。

**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，截至2024年底，全国新增220千伏及以上输电线路

长度3.23万公里，新增220千伏及以上变电设备容量（交流）3.21万千伏安。2024年，全国完成跨区输送电量0.9万亿千瓦时，完成跨省输送电量2.0万亿千瓦时，实现了我国能源资源大范围优化配置。

新型电力系统是以新能源为供给主体、以确保能源电力安全为基本前提、绿电消费为主要目标，以坚强智能电网为枢纽平台，以源网荷储互动及多能互补为支撑，具有清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能基本特征的电力系统。未来新型电力系统中，风光电量占比将达到70%，各类型火电承担调峰调频和提供惯量的重要任务，因此，相较于火电现阶段退坡的方案，先建后退将是更优的减排转型路径。高比例新能源的强波动性与不确定性将给电力保供带来挑战，需要进一步完善容量补偿机制，合理评估新能源及灵活性资源对电力充裕度的贡献，完善低碳—充裕—经济协同的源网荷储一体化规划思路，实现新型电力系统转型式发展。为了实现源荷互动，未来系统中将需要更高比例的灵活性资源，包括新型储能，源侧的气电、生物质、CSP（光热发电）以及需求侧的虚拟电厂、电动汽车、智能建筑等灵活性资源。在未来的5—15年，随着大规模

“西电东送、北电南送”输电工程与配套大型可再生能源基地的开发建设，需要进一步突破柔性交直流输电技术、电力电子装备构网技术、大型可再生能源发电及外送工程规划技术、电力系统安全稳定控制与仿真技术等针对性关键技术。构建新型电力系统还需要突破煤炭清洁高效灵活智能发电技术、生物质能技术、CCUS技术、氢能技术、新型储能技术、柔性智能配电网技术、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 2024 年底，我国生物质能发电装机容量累计达 4597 万千瓦，已连续六年位居世界第一，预计未来将作为重要的灵活性资源对构建新型电力系统进行支撑。此外，新一轮国家自主贡献指出，到 2035 年，全国碳排放权交易市场覆盖主要高排放行业，新型电力系统的电力市场改革与电碳协同机制将成为碳市场扩围的关键支撑。

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、大模型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》《空气质量持续改善行动计划》等系列政策文件的先后出台，中国大气污染防治工作全面加速开展，推动全国及重点区域环境空气质量取得了明显改善。2024年，是《空气质量持续改善行动计划》实施的第一年，也是完成“十四五”目标任务的关键之年。为持续深入打好蓝天保卫战，中国政府在这一年加强大气环境管理系统性部署，指导各省（区、市）出台具体实施方案，落实落细大气质量改善的路线图、时间表和任务书，在各大气污染防治领域开展了大量工作。结合近年来我国大气污染防治工作的实施进展，本指标从固定源深度治理、VOCs综合治理、燃煤锅炉综合整治、农村清洁取暖、移动源排放管控、农业综合治理、扬尘综合治理和消耗臭氧层物质管理8个方面对2024年中国大气污染治理进程进行梳理。

**固定源深度治理。**2015年以来，中国先后启动了燃煤电厂、钢铁行业、水泥行业、焦化行业的超低排放改造工作。截至2024年底，全国达到超低排放限值的煤电机组占比已超过95%，现役煤电机组大气污染物排放已普遍达到气电排放水平；累计完成8.93亿吨粗钢产能全流程超低排放改造或重点工程改造，占全国粗钢总产能约80%；8400万吨焦化产能完成全流程超低排放改造，3.4亿吨水泥熟料产能完成有组织排放改造。在推进超低排放改造的同时，中国不断加快推进各类污染物排放标准制修订工作，加强重点行业关键环节标准迭代。2024年，完成《炼焦化学工业大气污染物排放标准》等15项标准规范制修订（生态环境

部，2025b；证券时报网，2025；生态环境部，2025c）。

**挥发性有机物治理。**“十三五”以来，中国VOCs污染防治工作得到快速推进，陆续发布和完善了一系列行业和产品排放标准以及相关治理政策文件。截至2023年底，累计完成8.5万个挥发性有机物（VOCs）突出问题整改。2024年，组织排查挥发性有机物（VOCs）重点企业2.35万家，完成问题整改3万余个（生态环境部，2024；生态环境部，2025c）。

**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，每小时



图 4-7 2013 年至 2024 年污染治理指标进度

35 蒸吨以下燃煤锅炉基本淘汰。2024 年，中国启动燃煤锅炉超低排放改造，对大气污染防治重点区域保留的燃煤锅炉、其他地区 65 蒸吨 / 小时及以上燃煤锅炉以及全国燃煤自备电厂推进超低排放改造工作。截至 2024 年底，全国已完成 2000 余台燃煤锅炉超低排放改造（中国环境报，2022；生态环境部，2024；生态环境部，2025b）。

**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。2024 年，全年完成散煤治理 200 万户，累计完成散煤治理已达 4100 万户（生态环境部，2025c）。

**移动源排放管控。**“公转铁、公转水”加速落地：2024 年铁路、水路货运量分别增长 2.8% 和 4.7%，累计建成并开通铁路专用线 530 条。道路移动源治理：累计淘汰高排放车近 5000 万辆；新能源汽车销量占比超 40%，连续 10 年全球第一；国五及以上车辆保有量已达 53%。对 7 家企业 13 款车型实施排放召回，涉及 28 万辆；开展检验机构专项整治，查处 3790 家、刑事立案 155 起。非道路移动源治理：截至 2024 年底，累计编码登记工程机械 433.5 万台，国四机械远程联网 82.4 万台；重点区域、航线、港口岸电常态化使用；机场非道路机械和场内车辆电动化水平全球领先（生态环境部，2025b；生态环境部，2025c）。

**农业综合治理。**全国深入实施化肥减量行动。2024年全国农用化肥施用总量4988万吨，较2020年降低5.0%；三大粮食作物（水稻、小麦、玉米）化肥利用率达42.6%，测土配方施肥技术覆盖率超过90%。饲料粮占比降至59.5%，畜禽粪污综合利用率达到79.4%，畜禽粪污资源化利用整县推进，粪肥替代化肥比例超30%。持续深入实施秸秆综合利用行动，全国秸秆综合利用率超过88%，秸秆肥料化、饲料化、能源化、基料化、原料化利用率分别为57.6%、20.7%、8.3%、0.7%和0.8%（人民日报，2025；农业农村部，2024）。

**扬尘综合治理。**全国各地通过加速地方立法、强化跨部门协作、明确精细化管控要求、推进科技智慧监控等方式，持续深化城市扬尘综合治理。同时，加快城乡绿化美化，打造美丽城市和美丽乡村。截至2024年底，城市建成区绿化覆盖率达43.32%，城市人均公园绿地面积达到15.65平方米，村庄绿化覆盖率达到32.01%。科学开展大规模国土绿化行动：绿化面积超1亿亩，包括造林6669万亩、种草改良4836万亩，其中，治理沙化石漠化土地3683万亩。森林覆盖率超过25%，森林蓄积量超200亿立方米。矿山生态修复提质增效。新修订的《中华人民共和国矿产资源法》首次设立“矿区生态修复”专章，明确矿山企业主体责任，系统性重构修复治理体系，配套发布4项国家标准，填补生产矿山生态修复标准空白。截至2024年年底，全国累计修复历史遗留废弃矿山33.33万公顷（国家林业和草原局政府网，2025；自然资源部信息中心，2025）。

**消耗臭氧层物质管理。**中国自加入公约和议定书以来，始终维护和践行多边主义，秉持人类命运共同体理念，深度参与全球保护臭氧层行动，坚定履行负责任大国的承诺，不断分享中国经验、提供中国方案、作出中国贡献。2024年，中国首次实施氢氟碳化物配额管理，明确我国氢氟碳化物生产和使用基线分别是18.53亿吨和9.05亿吨二氧化碳当量；制定《中国履行〈关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书〉国家方案（2025—2030年）》，修订《消耗臭氧层物质进出口管理办法》（生态环境部，2025c）。

2013年以来，随着一系列重大减排工程和综合治理措施的实施，中国大气污染物排放量已实现大幅削减，推动大气环境质量改善取得举世瞩目的成就。但从大气污染形势看，我国结构性、根源性、趋势性压力依然突出，产业结构依然呈现高耗能、高排放特征，能源消费仍将刚性增长。中国的大气污染治理已进入深水区，主要大气污染物协同减排难度大，与此同时超标排放、环保设施不正常运行、低效失效等问题仍亟待解决。如何以加快发展方式绿色转型、推动能源产业运输三大结构调整优化为方向，聚焦碳污协同减排重点行业和领域，强化标准引领、制度创新和综合施策，更好发挥有为政府和有效市场作用，加大源头减排、结构减排和科技减排力度，将是未来污染治理措施层面进一步挖掘减排空间的重要锚点。



# 大气成分源汇 及减排路径



“十四五”期间，推动减污降碳协同增效已经成为我国生态文明建设的重点战略方向。科学把握污染防治与气候治理的整体性，统筹多领域减排，是协同推进美丽中国建设与“双碳”目标实现的重要要求。本章将追踪“十四五”期间全国及区域社会经济发展与碳强度目标达成情况，研判碳减排进展与面临挑战；评估陆地碳汇的时序演变驱动因素以及森林管理对未来碳汇潜力的影响；量化CO<sub>2</sub>与主要大气污染物的排放变化，剖析各省份 – 行业碳排放和细颗粒物污染演变的差异化特征；评估公正转型在协同治理中的作用与机制，揭示资源禀赋和产业结构等因素对区域成本效益不平等的影响。

# 5.1 人为源碳排放

碳排放变化是反映区域低碳发展进程的基础指标之一。本指标旨在跟踪“十四五”期间中国二氧化碳排放的动态变化，分析中国及区域碳减排进展及面临挑战。本指标中，2020—2024年国家社会经济发展及碳强度达成情况主要来自国家统计年鉴（国家统计局，2021—2025）和国民经济和社会发展统计公报（国家统计局，2021, 2022, 2023, 2024, 2025a），分省份碳排放数据来源于多尺度排放清单模型MEIC（meicmodel.org.cn）。区域碳强度达成程度主要基于MEIC模型和国家统计局分省份国内生产总值计算获取；“十四五”期间分省份碳强度目标根据区域碳达峰实施方案和区域发展规划获取。

2021年3月，《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》明确提出中国“十四五”节能降碳目标，即单位国内生产总值能源消耗和二氧化碳排放分别降低13.5%、18%（新华社，2021）。为实现该目标，中国在保障国内生产总值合理增长的基础上，严格实施煤炭消费总量控制，稳步提升天然气生产与供应能力，积极推进清洁能源替代，加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系（国家发展改革委，2023）。图5-1（a）展示了2020—2024年期间中国社会经济发展情况和能源消费碳排放情况。能源消费总量增速（19.7%）低于国内生产总值增速（24.0%），与此同时，能源消费结构转型效果显著，清洁能源消费大幅增长（40.9%），煤炭消费增速放缓并在2024年出现下降趋势。中国能源结构正向清洁化、低碳化方向转变，但现阶段煤炭

仍是主要能源，2020—2024年间二氧化碳排放增长15.4%，使“十四五”碳减排目标的实现面临较大压力。

图5-1（b）展示了2020—2024年碳强度变化情况，“十四五”期间碳减排路径受新冠疫情的影响十分明显。2020—2021年间的疫情开始和蔓延，社会经济生产活动阶段性放缓，碳排放强度出现明显下降，降幅达到3.8%。但随着疫情持续，促进经济复苏与平稳运行成为政策关注的重点，碳减排目标的优先级有所下降；2022年中国碳强度下降幅度仅为0.8%，而2023年则基本持平。截至2024年，中国碳强度相较于2020年累计下降幅度约为7.8%，距离“十四五”碳强度下降目标仍存在约10.2个百分点的差距。2025年作为“十四五”的收官之年，减排压力将进一步凸显，如果无法在

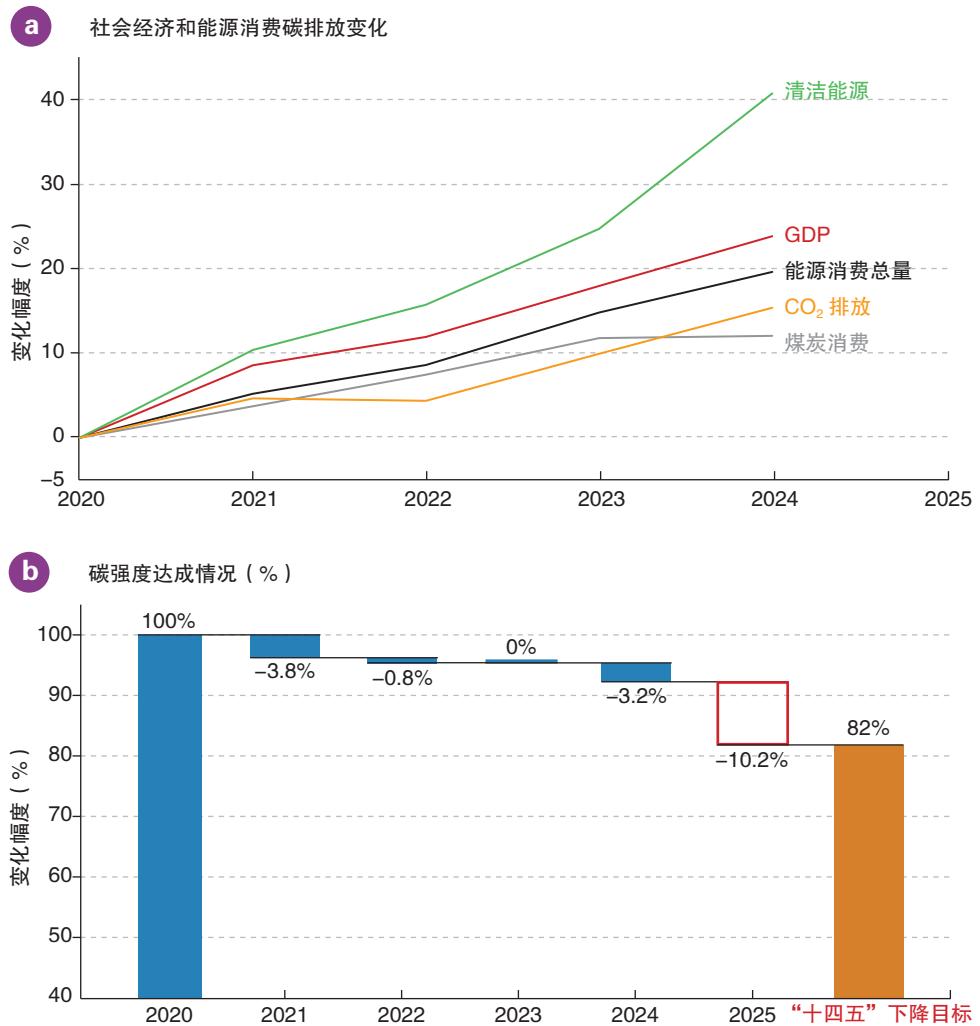


图 5-1 2020 年至 2024 年期间中国社会经济发展情况和碳强度达成情况

碳强度达成情况主要基于中华人民共和国国民经济和社会发展统计公报年度报告核算

最后一年实现碳强度大幅度下降，整体减排目标的实现将面临较大挑战。

“十四五”期间，各省份及直辖市也分别制定了本地区碳减排目标和实施方案。其中，大多数省份、直辖市（共计 20 个）设定了“确保完成国家下达目标”的概括性目标（本报告假设该目标与国家目标一致，即到 2025 年碳强度较 2020 年下降 18%），也有部分区域设定了更为明确的区域碳强度下降目标。山东、广东、江西、河南和河北制定了高于国家的碳强度下降目标，即到 2025 年分别下降 20.5%、

20.5%、19.5%、19.5% 和 19%。黑龙江、宁夏和新疆结合本地发展阶段和实际需求，将碳强度下降目标调整为 16%、16% 和 12%。图 5-2 (a) 展示了 2020—2023 年中国各区域碳强度目标达成情况。截至 2023 年，全国多数省市碳排放强度均呈现不同程度下降，但区域间进展差异显著。湖南、云南两省提前完成“十四五”下达的碳强度下降目标（18%），并分别超过目标 0.3%，0.8%；河北、内蒙古、辽宁、吉林、山东、海南、四川和贵州等省（区）的碳减排目标完成进度已超过一半，减排工作取得阶段性成效。然而，上海、浙江、广东、

陕西和青海的碳强度在此期间不降反升，削弱了其对国家整体减排目标实现的贡献。

各省对实现国家“十四五”碳减排目标的贡献程度，不仅取决于其碳强度降幅，也与其经济规模密切相关。排放总量规模较大的省份，其碳强度下降对全国整体碳减排目标的实现具有更为显著的拉动作用（Wang et al., 2025b; Yu et al., 2023）。图 5-2（b）展示了 2020—2023 年中

国各区域对实现全国碳强度下降目标的贡献。尽管湖南、云南已提前达成减排目标，但由于其经济体量相对有限，对全国整体目标实现的贡献程度仍显不足。相较而言，浙江、广东、陕西、山西、江苏、安徽、河南、湖北和新疆等省（区）碳减排进程较为缓慢，但其排放总量较大，对国家碳减排目标实现进程的负面影响较为明显。这些区域能否有效推进减排，将是全国整体“十四五”碳强度下降目标实现的关键。

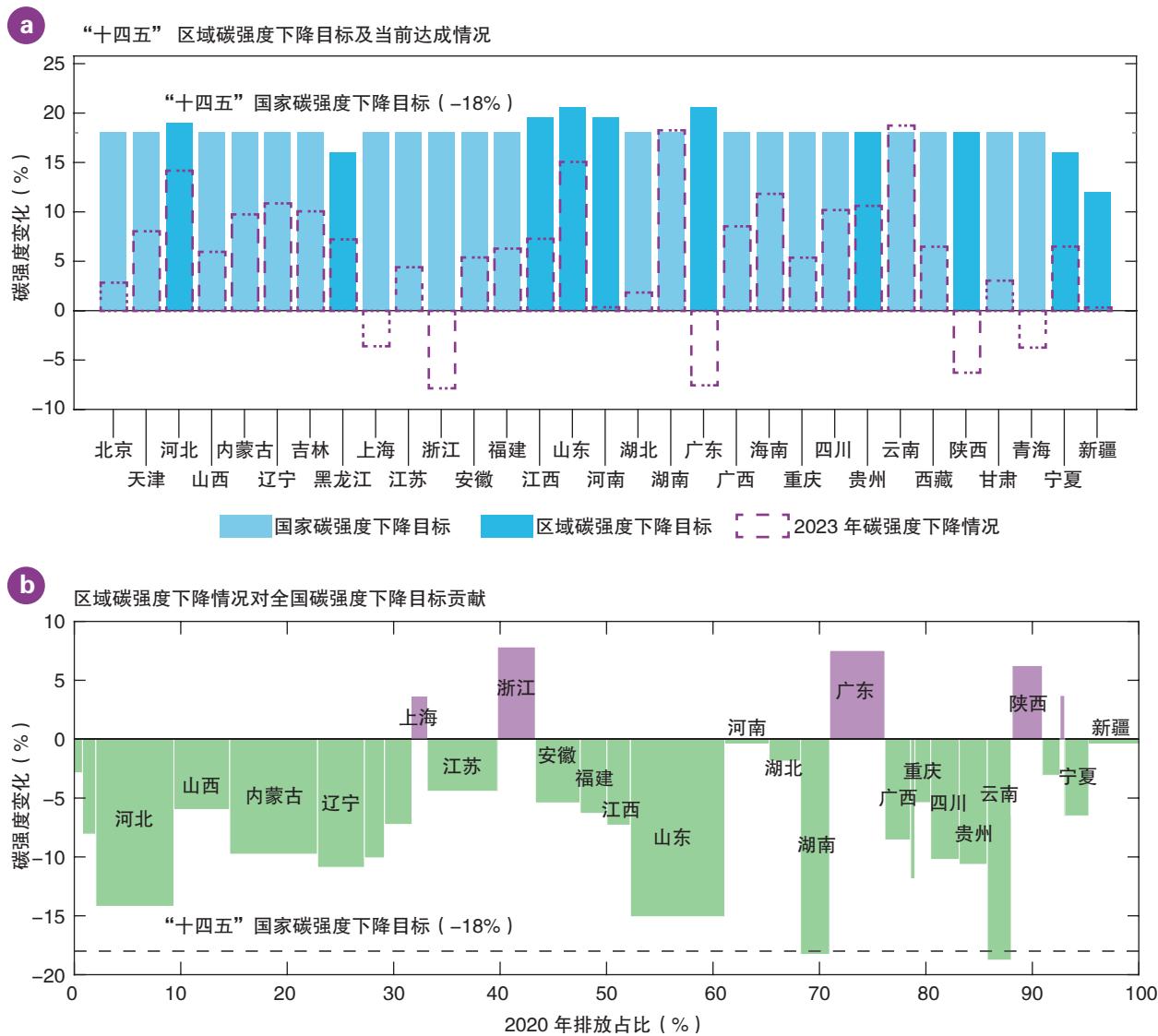


图 5-2 2020 年至 2023 年中国各区域碳强度目标完成情况及其对全国碳强度下降目标贡献（a）；

图中 2023 年碳强度下降目标主要根据 2020 和 2023 年 MEIC 分省数据和不变价区域生产总值核算（b）

## 5.2 土地利用变化与陆地碳汇

陆地生态系统在调节全球碳循环中发挥着关键作用，部分抵消了人为碳排放。持续巩固和提升陆地碳汇能力，是我国碳达峰十大行动之一。本指标基于最新观测数据和模拟研究，系统评估了我国陆地碳汇的时序演变特征及主要驱动因素，并重点分析了森林管理对未来碳汇潜力的影响。

过去 70 年间，中国森林生态系统实现了从净碳排放源向持续增强的碳吸收汇的显著转变 (Yang et al., 2022)，其中以造林和森林恢复为主导的土地利用和覆盖变化是陆地碳汇的主要来源 (Yu et al., 2022)。根据中国陆地碳收支 (CLCB1.0) 项目整合的多模型模拟结果，2014 至 2023 年间，中国陆地生态系统的年均净碳汇

估算为  $0.28 \pm 0.05 \text{ Pg C yr}^{-1}$  (Xia et al., 2025) (图 5-3)。“十四五”以来，中国陆地碳汇总体保持稳定，但年际增长速率有所放缓 (图 5-3)。自 1990 年代起，土地利用变化带来的碳汇效应持续增强，并自 2014 年起超过了大气二氧化碳施肥效应，成为陆地碳汇增长的首要驱动力 (Xia et al., 2025)。在 2001—2020 年期间，土地

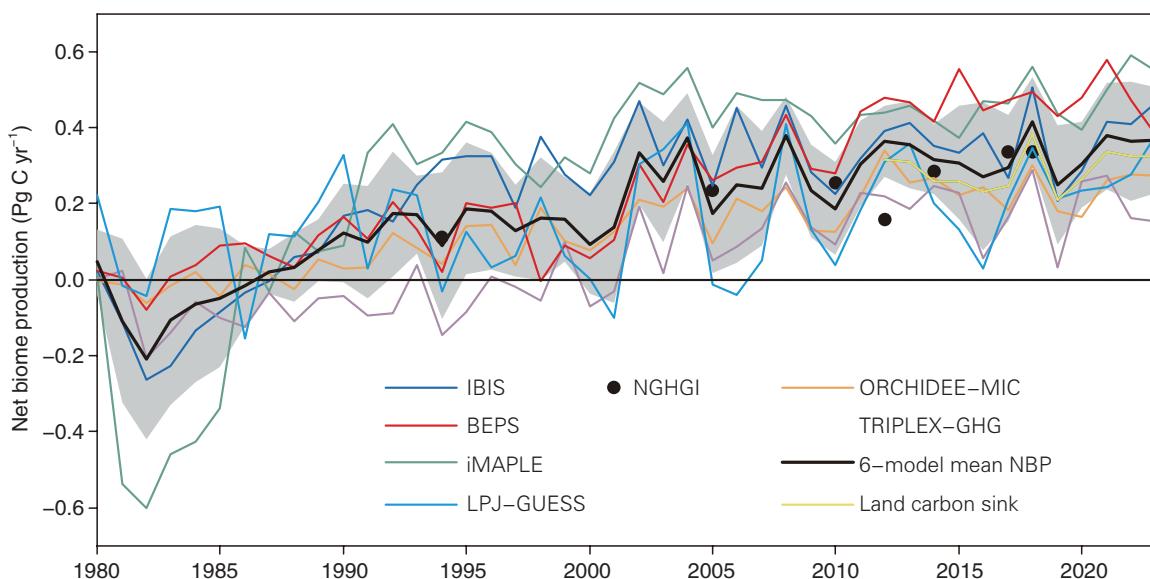


图 5-3 1980 年至 2023 中国陆地碳汇动态变化

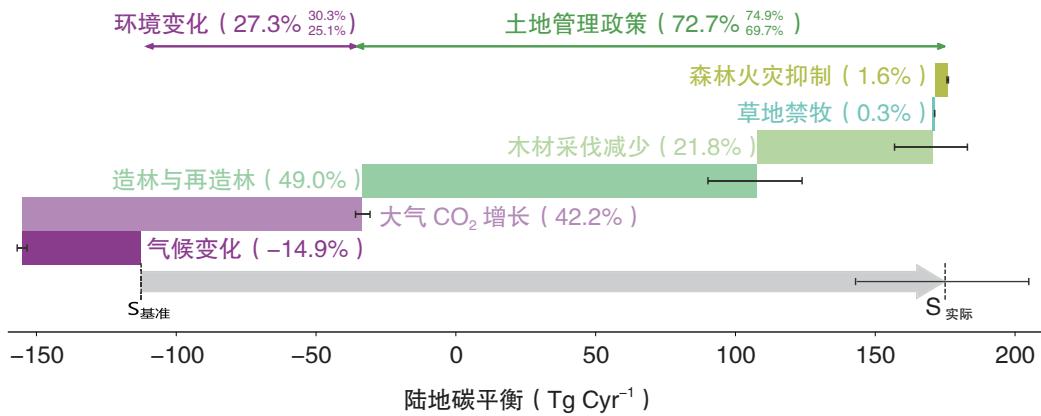


图 5-4 中国陆地碳平衡各驱动因子贡献

利用变化贡献的年均陆地碳汇达到约  $0.14 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ，主要来源包括生态工程推动下的森林面积扩张，以及大面积新造林进入快速生长阶段所带来的碳汇积累 (Wang et al., 2024; Zhu et al., 2025)。2023 年自然资源部会同国家发展改革委等多部门联合发布了《生态系统碳汇能力巩固提升实施方案》，提出在 2025 年前建立与国际接轨的碳汇计量监测体系，并完成全国碳储量本底调查。这一举措不仅有助于提升碳汇核算的科学性与可比性，也将为碳市场机制建设和气候政策制定提供坚实支撑。随着地面观测网络的不断拓展以及遥感平台时空分辨率的显著提升，多源观测数据的融合与多模型集合方法正成为提高碳汇估算精度的重要手段 (Wang et al., 2025c)。

21 世纪以来，生态恢复工程一直是我国陆地碳汇增长的主要驱动力 (Liao et al., 2024; Yue et al., 2024) (图 5-4)，未成熟人工林的碳汇能力强于老龄林使得我国当前陆地碳汇强度数倍于全球陆地生态系统的平均值 (Xia et al., 2025)。未来，在气候变化和森林老龄化等挑战下，如何通过科学的森林经营管理手段保

持碳汇稳定增长，成为政策制定的关键方向 (Liu et al., 2024a)。研究表明，若不加以干预，当前主要造林树种的栖息地适宜性将因气候变暖而在 2060 年前下降 12.1%–42.9% (Zhang et al., 2025)，同时次生林老化也将削弱固碳能力。若科学优化造林时间、提升树种适地性选择，并改进采伐管理，则 2025—2060 年可累计固碳  $3822.6 \text{ Tg C}$ ，较无管理情景提升 28.7% (Zhang et al., 2025)。目前，我国森林管理政策严格限制林木的生产性采伐，这虽有助于保护森林的生态功能，但也可能带来政治、贸易及资源配置等方面的潜在风险 (Li et al., 2025b)。同时，若忽视采伐行为对森林年龄结构的影响，可能导致碳汇峰值提前 10–30 年 (Yu et al., 2024)。相应研究表明，若优化砍伐策略以更好匹配国内木材需求，2020—2060 年间森林生物量碳汇可达  $0.225 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ，较延续当前砍伐模式提升 12%，并使 2060 年森林碳储量增加约 4.79% (Li et al., 2025b)。因此，未来应积极推进“智慧采伐”策略，在保障木材供给的同时强化森林碳汇功能，从而提升我国陆地碳汇对碳中和目标的支撑能力。

## 5.3 污染物排放及协同减排进展

$\text{CO}_2$  排放与大气污染具有同源性和协同效应。本指标依托多尺度排放清单模型 (MEIC) 和清风大模型 (Clean Air)，从能源类型与行业部门两个维度系统分析了我国“十四五”期间  $\text{CO}_2$  与主要大气污染物的排放变化，剖析各省份 - 行业碳排放和细颗粒物污染演变的差异化特征。同时，梳理了我国结构转型与末端控制带来的减排效果，展望了未来协同治理的重点领域与政策发力方向。

“十四五”以来，我国全行业  $\text{CO}_2$  与主要大气污染物尚未实现协同排放（图 5-5 a）。但从重点污染物看，截至 2024 年， $\text{NO}_x$ 、 $\text{VOCs}$

排放量较 2020 年分别下降 9%、10%，已接近完成《“十四五”节能减排综合工作方案》中两类污染物的约束性指标。在行业层面，仅工

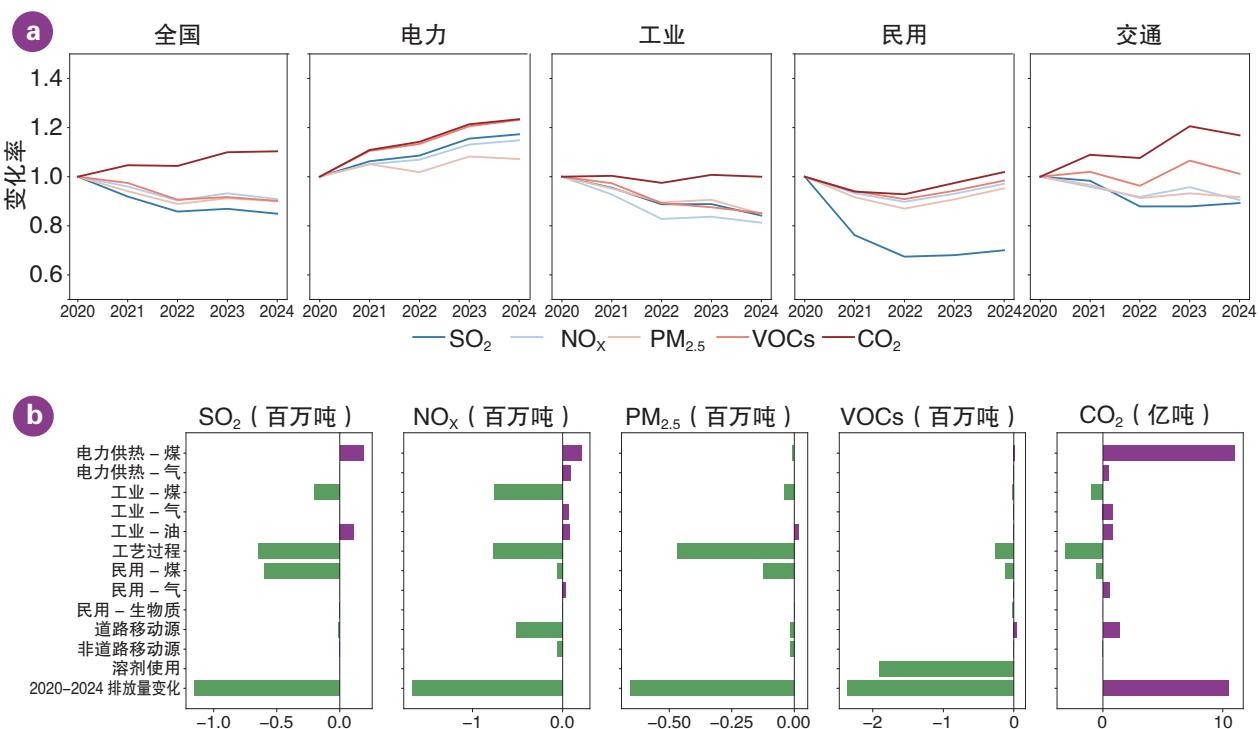


图 5-5 “十四五”期间分部门与分行业大气污染物和  $\text{CO}_2$  排放变化

业部门整体实现协同减排，其中工艺过程贡献最为突出（图 5-5 a），CO<sub>2</sub> 排放下降 22%（约 3.1 亿吨），是“十四五”期间我国 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 等主要污染物减排的重要驱动力。与此同时，民用散煤替代、工业电炉钢推进等措施的组合实施，使工业燃煤与民用燃煤过程在“十四五”期间呈现明显的碳污协同减排效应。相比之下，受煤电装机规模持续扩大和供热煤耗上升影响，电力与供热行业的末端治理减排空间趋于收窄，电力与供热燃煤碳污排放仍呈现“双增长”趋势。作为“十四五”期间主要的 NO<sub>x</sub>（占比 17%）和 VOCs（占比 16%）排放源，交通部门的道路移动源排放 NO<sub>x</sub> 减排 15%，VOCs 增加 1%。货运车辆电动化已在一定程度上削弱了道路货运规模增长对疫情后排放反弹的压力，但鉴于我国机动车保有量仍在

持续增长，未来道路移动源的协同减排潜力仍需进一步挖掘。

从省尺度看，“十四五”期间受疫情后经济回暖和生产复苏影响，我国各省份 CO<sub>2</sub> 减排与 PM<sub>2.5</sub> 浓度贡献下降的协同效应总体偏弱。仅有湖南、云南这两个省份实现了 CO<sub>2</sub> 减排与 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降的正协同效应。其余大部分省份则面临“减污难降碳”的阶段性挑战，呈现出 PM<sub>2.5</sub> 污染有所改善，但 CO<sub>2</sub> 排放却呈上涨态势，其中河北、河南、山西、山东等重工业大省的负协同效应尤为明显。值得注意的是，长三角地区部分省份在此期间出现了 PM<sub>2.5</sub> 浓度反弹，CO<sub>2</sub> 排放 PM<sub>2.5</sub> 浓度贡献同时上涨的趋势。

从行业角度看，“十四五”期间我国

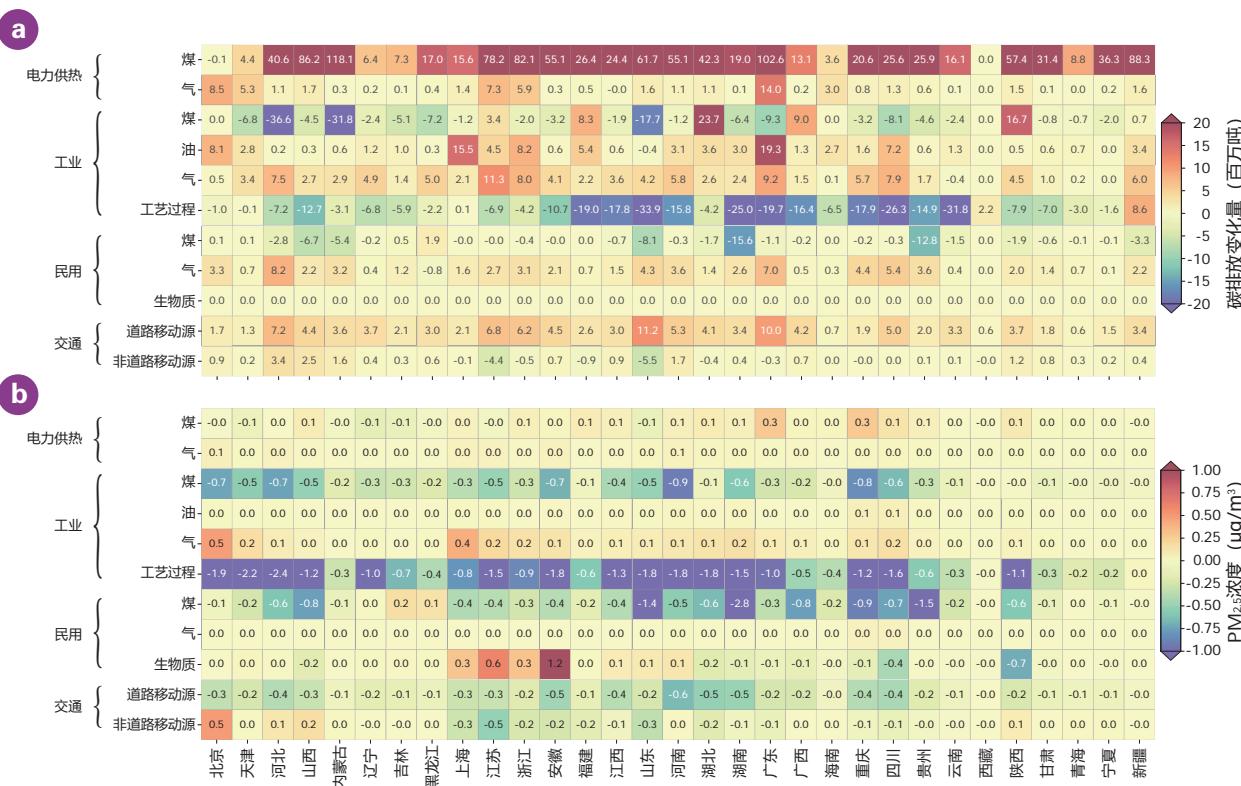


图 5-6 “十四五”期间中国分省分行业 CO<sub>2</sub> 排放量与 PM<sub>2.5</sub> 浓度贡献变化

各省份 – 部门的减污降碳成效差异显著（图 5–6）。受电力供需强劲反弹影响，近半数省份电力供热部门在燃煤过程中出现了  $\text{CO}_2$  与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度贡献同步增长，山西、广东等煤电大省排放增幅尤为突出。这一趋势表明，在末端治理潜力日趋见顶的背景下，加快能源结构转型、降低对煤电的结构性依赖已成为紧迫任务。相比之下，工业部门在同期展现出更积极的协同减排态势。尽管工业燃油和燃气过程的协同治理效果仍不明显，但工业部门燃煤和工艺过程已取得了显著进展，多数省份实现了  $\text{CO}_2$  排放与  $\text{PM}_{2.5}$  浓度贡献协同下降。例如，河北省

工业工艺过程  $\text{CO}_2$  减排量达 719.4 万吨，同时  $\text{PM}_{2.5}$  浓度贡献下降  $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ；山东省则实现  $\text{CO}_2$  减排 3387.3 万吨， $\text{PM}_{2.5}$  浓度贡献下降  $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这一成效主要得益于重点工业行业的产业结构调整以及高耗能产品市场需求与供给的同步回落。在民用和交通部门，协同治理整体仍显不足。仅部分省份在民用燃煤过程和交通非道路移动源上取得协同成效，而民用燃气过程和道路移动源的碳排放依然呈上升趋势。与此同时，民用生物质燃烧对我国颗粒物污染的贡献显著。未来仍需民用与交通部门通过能效提升和结构调整进一步释放减污降碳潜力。



## 5.4 协同减排路径

减污降碳协同治理的公平性已成为实现碳中和与清洁空气双重目标的重要保障。本指标在梳理现有研究的基础上，从省际差异与群体分布两个层面系统评估了公正转型在协同治理中的表现与影响机制，揭示了区域间因资源禀赋、产业结构和跨区域贸易差异导致的责任与收益不均，以及收入分层和能源转型路径选择对不同群体负担与健康效益的影响，为实现碳中和与空气质量改善提供公平路径支撑，确保协同治理的长期可持续性。

公平是实现碳中和与清洁空气协同治理目标的核心议题。由于中国各省在资源禀赋、产业结构和经济发展阶段上存在显著差异，减污降碳协同治理不仅关系到整体减排效果，也直接影响不同地区和群体的责任分担与效益分配。如何在历史责任、减排潜力和发展权之间取得平衡，已成为推进协同治理必须面对的重要挑战。

在省际层面，差异化控制策略能够显著改善空气质量并提升区域均衡性。到 2060 年，全国平均人口加权  $PM_{2.5}$  浓度可降至  $7 \mu g/m^3$ ， $O_3$  浓度降至 34 ppb。各省  $PM_{2.5}$  浓度方差也将同步降低 (Dong et al., 2024)。这种差异化调控不仅改善了整体空气质量，还有效缓解了排放分布的不平等。如图 5-7 所示，在碳中和与清洁空气公正转型情景下，通过严格控制上海的工业能耗和化石能源消费、缩减山东的高碳产业规模等针对性措施，排放占比与人口规模的匹配度明显提升，排放基尼系数下降至 0.37，

较基准情景降低 36.2%。此外，减排策略调整需考虑转型成本。基于公平原则的排放配额分配将减少北方省份的经济损失，并促进云南、广西等发展中省份的经济发展，可在保障公平的前提下推动协同治理 (Zhou et al., 2024)。

与此同时，减污降碳协同治理为北方省份带来了显著的健康收益 (Sun et al., 2024)。到 2050 年，北方大部分省份  $PM_{2.5}$  浓度下降超过  $2 \mu g/m^3$ ，累计避免约 5.2 万例过早死亡，占全国 70%，其中山西、河北和陕西降幅最大，而山东、河南和河北避免的死亡人数最多 (Ma et al., 2023)。但健康收益的分配并不均衡，全国健康不平等基尼系数虽由 0.10 降至 0.09，东部沿海仍维持在 0.19 的较高水平。河北和山东两省人均死亡率分别达到 0.027 和 0.018，远高于全国均值 0.012，尽管仅占东部沿海人口的 34%，却贡献了近一半的相关死亡人数 (Xu et al., 2024)。此外，跨区域贸易可能放大地区间的健康不平等。上海和江苏等发达地区通过输

入川渝的高耗能产品，到 2060 年本地  $PM_{2.5}$  浓度将分别下降 3.09 和  $0.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而四川则因污染转移面临更高的  $PM_{2.5}$  相关死亡率 (Cui et al., 2025)。不同的转型路径也会进一步影响公平性。北京和天津的“煤改气”政策可使  $PM_{2.5}$  浓度降至  $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  并避免约 2.3 万例过早死亡，但成本是生物质替代的三倍。而辽宁、黑龙江等生物质资源丰富的省份通过“煤改生物质”，虽然减排幅度略低，但单位健康收益成本仅为“煤改气”的三分之一，且惠及更多农村人口 (Liu et al., 2024b)。

在群体层面，清洁能源转型对不同收入群体的影响同样存在差异 (Wang et al., 2023)。全面替代传统固体燃料可能导致居民能源负担差距扩大，能源负担集中指数将从 -0.381 降至 -0.545，增幅高达 43%，低收入群体的压力显著加重。相比之下，以“天然气烹饪 + 电取暖”为组合的模式可将这一差异控制在 15.5% 以内，更有利於减轻社会不平等 (Jiang et al., 2024)。值得注意的是，清洁燃料的普及不仅能

够改善低收入农村群体的健康状况，尤其是减少室内  $PM_{2.5}$  暴露 (Luo et al., 2022)，还将促进农村劳动力效率提升，带动收入增长。未来，随着清洁能源的普及，中国家庭平均收入有望持续提高，农村家庭的增速将快于城市，从而推动城乡收入差距逐步缩小 (Li et al., 2025b)。

综上，从省际到群体层面的公平性问题，决定了碳中和与清洁空气协同路径的可持续性。面向“十五五”规划时期与新一轮国家自主贡献目标，中国的气候治理将从以碳强度为主的阶段性目标，转向以绝对排放量控制和涵盖全经济范围温室气体的系统性约束，减排任务更加艰巨，也对区域间的协同与公平提出了更高要求。未来应在保持降碳减污协同增效的同时，充分发挥碳市场在价格信号传导与资源优化配置中的作用，实现区域间各减排主体责任与成本的合理分担，强化跨区域、跨部门协同，避免污染与碳排放的泄漏转移，在此基础上，构建以高质量绿色发展为导向的减污降碳协同治理体系。

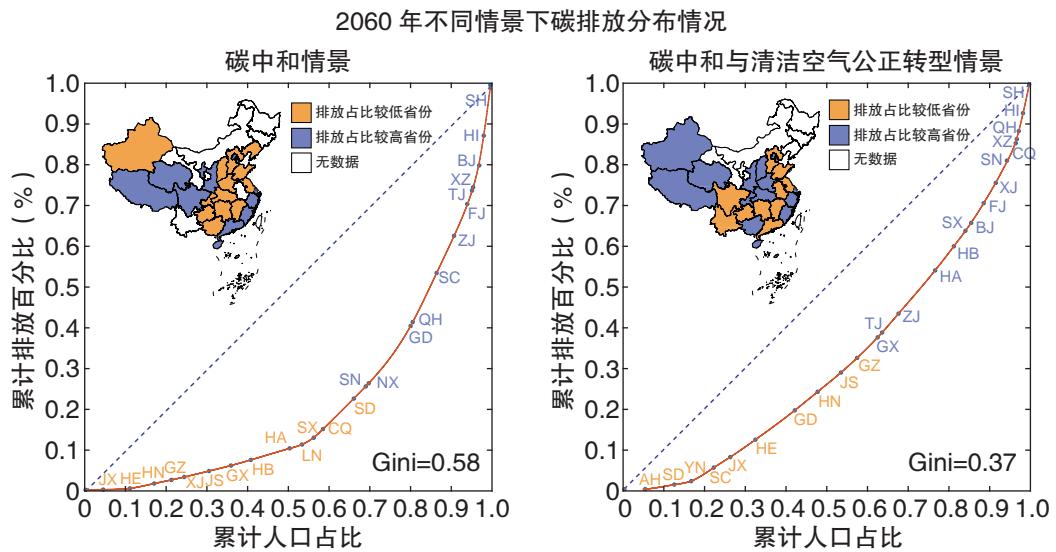


图 5-7 不同情景碳排放分布情况



# 健康影响与协同效益



本章聚焦空气污染与气候变化对我国人群的健康影响及协同治理效益。通过持续努力,2024年我国PM<sub>2.5</sub>和NO<sub>2</sub>暴露水平及相关成人早亡人数持续下降,其中PM<sub>2.5</sub>长期暴露相关的早亡人数十年间下降超35%。然而,O<sub>3</sub>暴露水平基本持平且污染事件持续构成健康威胁。同时,在全球气候变暖背景下,极端高温、洪水、干旱等极端天气事件频率和强度增加,对老年人等脆弱群体健康带来新的挑战。值得肯定的是,通过能源清洁化等协同治理措施,“十四五”期间空气质量改善获得了显著的健康收益,PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>浓度下降合计避免了约17.8万人早亡。未来,应着力实现“减污降碳-暴露降低-健康收益”的闭环,尤其要加强对高脆弱群体的保障,以保持减污降碳带来的协同健康效益。

# 6.1 空气污染与健康影响

大气细颗粒物 (PM<sub>2.5</sub>)、臭氧 (O<sub>3</sub>) 和二氧化氮 (NO<sub>2</sub>) 的长期和短期暴露均会带来不利健康效应，威胁人群健康。本指标基于 TAP 及地面监测的污染浓度数据进行人群暴露评估，量化了我国居民空气污染暴露水平的变化并估算了相关的成人过早死亡人数。2024 年我国整体的 PM<sub>2.5</sub> 及 NO<sub>2</sub> 暴露水平及相关过早死亡人数保持下降，O<sub>3</sub> 暴露水平及相关过早死亡人数相比 2023 年基本持平，O<sub>3</sub> 重污染事件依然对我国人群健康构成威胁。

我国居民的 PM<sub>2.5</sub> 长期和短期暴露水平保持下降。基于 TAP ( <http://tapdata.org.cn/> ) 的数据，2024 年全国人口加权平均的 PM<sub>2.5</sub> 年均暴露浓度为 30.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相比于 2020 年下降了 3.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (9.8%)。各重点区域的 PM<sub>2.5</sub> 年均暴露水平为 20.3–42.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相比 2020 年下降 4.4% (成渝地区) 到 16.2% (京津冀及周边地区)。2024 年，全国约有 34.4% 的人口居住在 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度超过国家二级标准限值的地方，相比于 2020 年减少了九个百分点。与 2020 年相比，汾渭平原居住在年均浓度超标区域的人口占比降低最为显著，从 2020 年的 91.9% 降低到 70.6%。京津冀及周边地区仍然有超过 90% 的人口居住在 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度超标地区，提示虽然京津冀及周边地区的整体 PM<sub>2.5</sub> 水平保持下降，但大气污染仍然是需要重点关注的环境问题。我国居民 PM<sub>2.5</sub> 污染短期暴露水平也有明显改善。2024 年全国人口加权平均的 PM<sub>2.5</sub> 污染超标天数 (即日均 PM<sub>2.5</sub> 浓度

大于 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ) 为 20.8 天，相比 2020 年减少超过 7 天。

2024 年 O<sub>3</sub> 长期和短期暴露水平相比于 2020 年基本持平。2024 年全国人口加权平均的 O<sub>3</sub> 长期暴露水平 (113.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )，O<sub>3</sub> 暖季峰值 (即年最大 6 个月平均 O<sub>3</sub> 最大 8 小时浓度)，相比于 2020 年 (113.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 基本一致。长三角 2024 年 O<sub>3</sub> 长期暴露水平相比 2020 年下降 3.0%，但汾渭平原 O<sub>3</sub> 长期暴露水平升高了 4.8%，在重点区域中增长最为显著。相比于 2020 年，短期 O<sub>3</sub> 暴露水平在汾渭平原及成渝地区出现上升，但在其他重点区域均呈现下降趋势。2024 年人口加权平均的 O<sub>3</sub> 污染超标天数 (即日最大 8 小时 O<sub>3</sub> 浓度大于 160  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ) 为 19.7 天，比 2020 年 (20.6 天) 减少约 1 天；各重点区域的人口加权平均超标天数为 15.4–59.2 天。臭氧污染仍持续威胁我国居民健康。

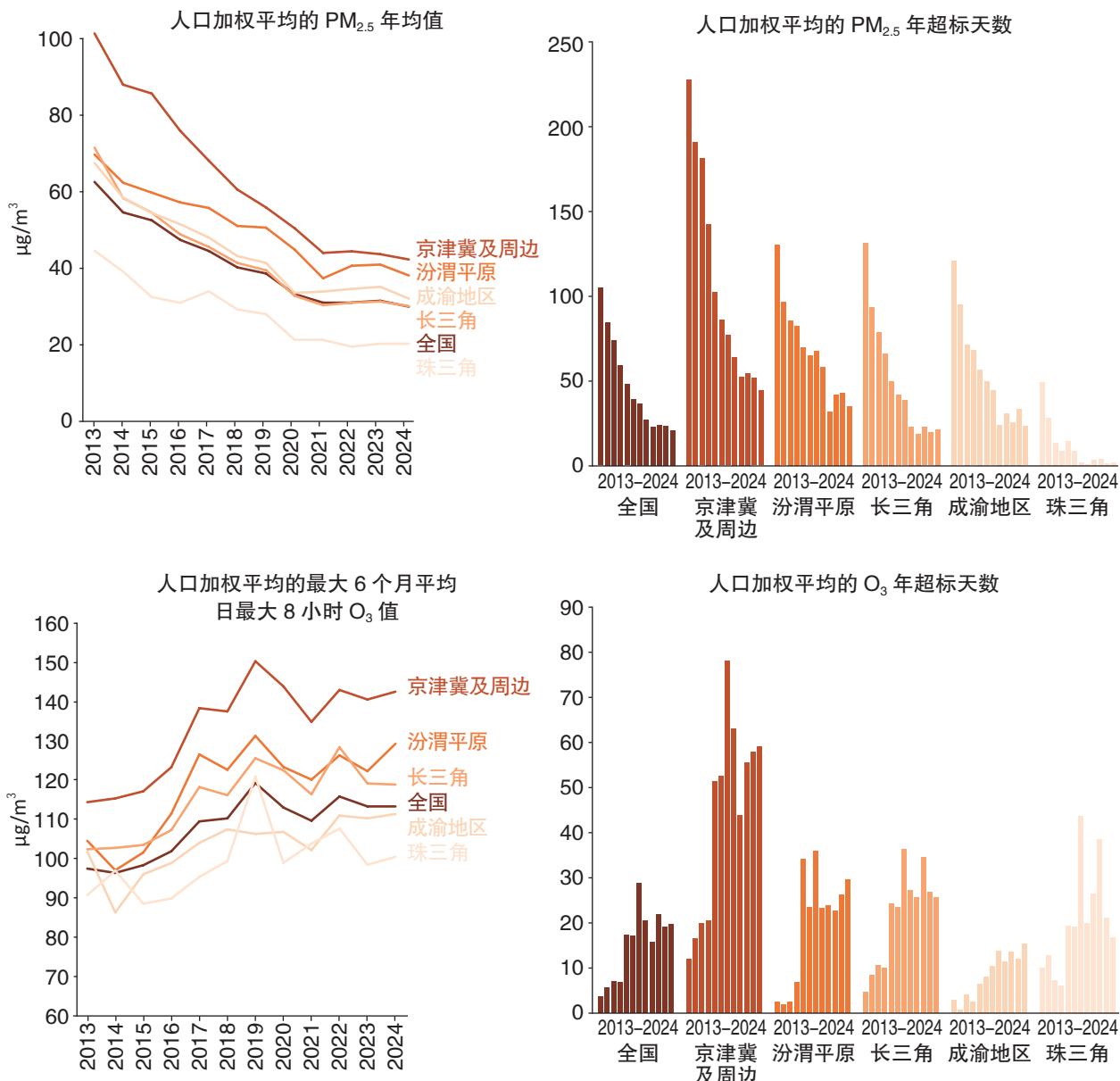


图 6-1 2013 年至 2024 年我国  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{O}_3$  污染长期、短期暴露水平的变化。2024 年全国及各重点地区的  $\text{PM}_{2.5}$  长期和短期暴露相比于 2020 年显著下降,  $\text{O}_3$  长期和短期暴露相比于 2020 年基本持平

$\text{PM}_{2.5}$  是危害公众健康的重要环境污染物, 根据全球疾病负担评估研究 (Brauer et al., 2024),  $\text{PM}_{2.5}$  可升高脑卒中、缺血性心脏病、慢性阻塞性肺病、肺癌、二型糖尿病、下呼吸道感染等疾病风险, 进而增加成人的过早死亡。得益于我国  $\text{PM}_{2.5}$  暴露水平的持续下降, 相关的成人早亡人数显著降低 (图 6-2)。沿用以往

研究中的数据来源和方法进行测算 (Xiao et al., 2022), 2024 年我国  $\text{PM}_{2.5}$  长期和短期暴露相关的成人过早死亡人数分别为 108 万 (95%CI: 95–121 万) 和 6 万 (95%CI: 4–8 万), 相比于 2023 年略有下降或基本持平。2015—2024 年十年间下降幅度分别为 35.5% 和 38.1%。在  $\text{PM}_{2.5}$  长期暴露相关的死亡中, 脑卒中和缺血性

心脏病为主要致死疾病，分别占归因死亡总数的 30.8% 和 29.0%（图 6-3）。

部分研究表明， $O_3$  暴露是独立于  $PM_{2.5}$  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。2024 年  $O_3$  长期和短期暴露相关的成人过早死亡人数分别为 14 万（95%CI: 6–22 万）和 8 万（95%CI: 5–12 万）（图 6-2）。虽然  $O_3$  暴露相关过早死亡的总数远小于  $PM_{2.5}$  暴露相关的过早死亡，但与  $PM_{2.5}$  相关过早死亡持续快速下降的趋势相比， $O_3$  暴露相关死亡负担并未见明显好转，相比于 2023 年，其长期和短期暴露归因的过早死亡人数仅分别降低了 0.5% 和 4.6%，且  $O_3$  短期暴露相关过早死亡人数较

$PM_{2.5}$  更高，考虑到不确定性，也至少与  $PM_{2.5}$  处于同等水平。

2024 年全国  $NO_2$  人口加权年均暴露浓度为  $21.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相比 2020 年（ $26.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）下降了 18.31%。环境空气质量国控监测站数据显示，2024 年全国人口加权日均  $NO_2$  浓度超过 AQG 日均基准值（ $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的天数为 111 天，相比 2020 年减少 66 天， $NO_2$  污染形势改善明显。在全国各个地区中，汾渭平原仍然有着最高的  $NO_2$  年均暴露浓度，其次是京津冀及周边与成渝地区，长三角与珠三角地区的浓度最低（图 6-4）。上述各区域 2024 年年均暴露浓度相比 2020 年分别下降了 10.81%、25.01%、18.15%、15.73% 和 13.87%，污染改善程度显著。

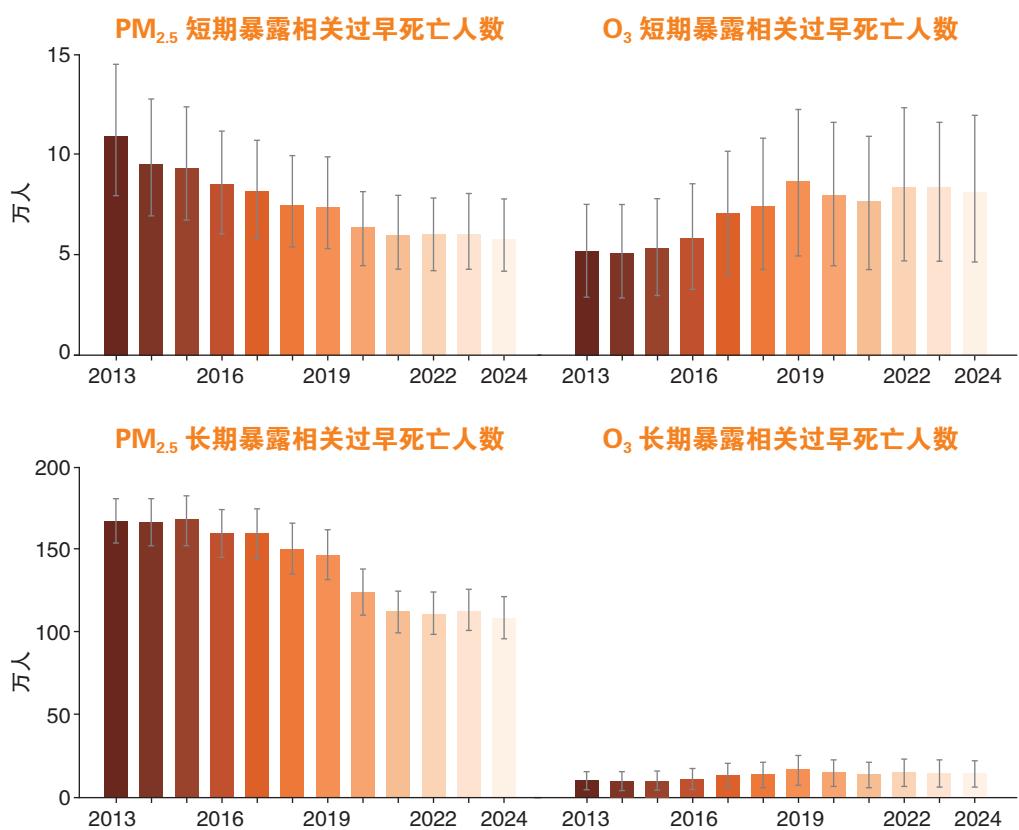


图 6-2 2013 年至 2024 年我国归因于  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  短期与长期暴露的成人过早死亡人数

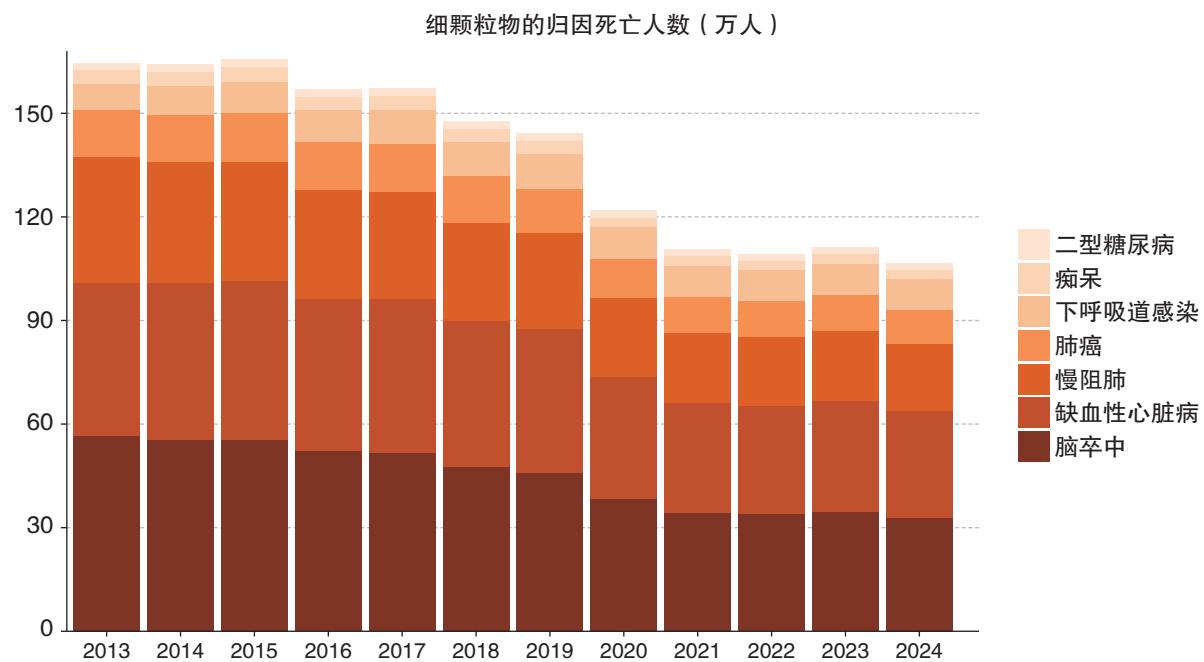


图 6-3 2013 年至 2024 年我国归因于  $PM_{2.5}$  长期暴露成人过早死亡的主要疾病类型

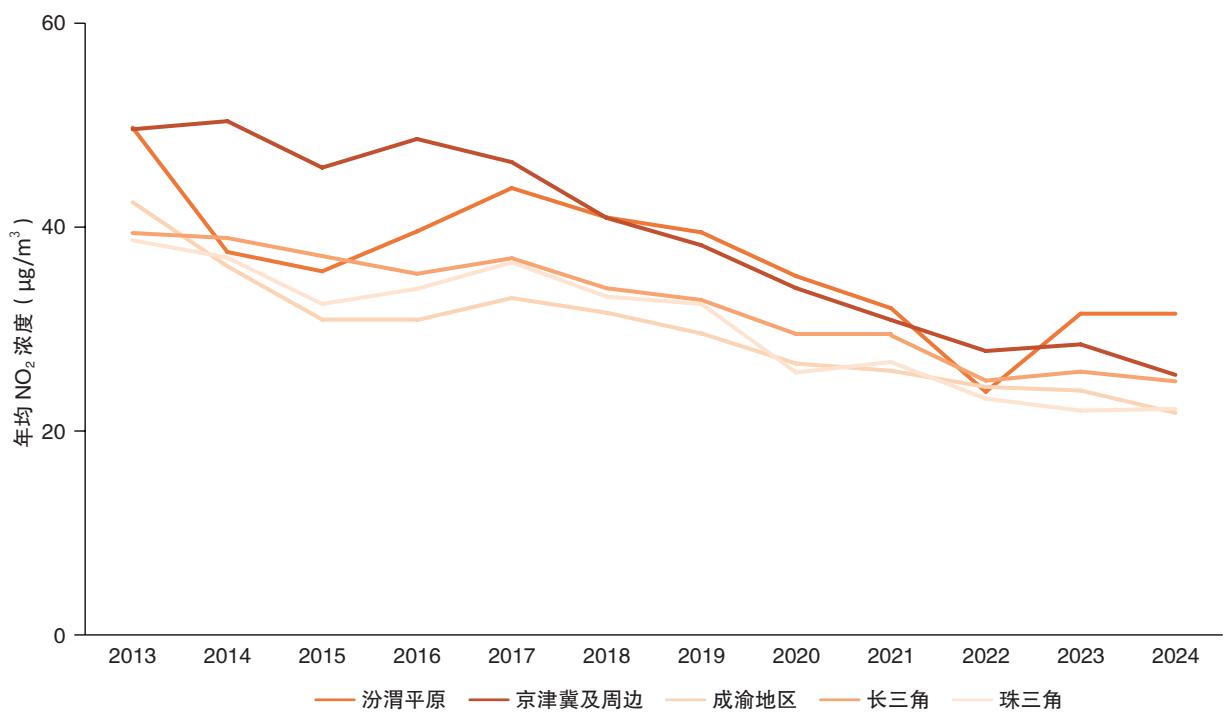


图 6-4 2013 年至 2024 年我国不同地区  $NO_2$  年均浓度变化情况

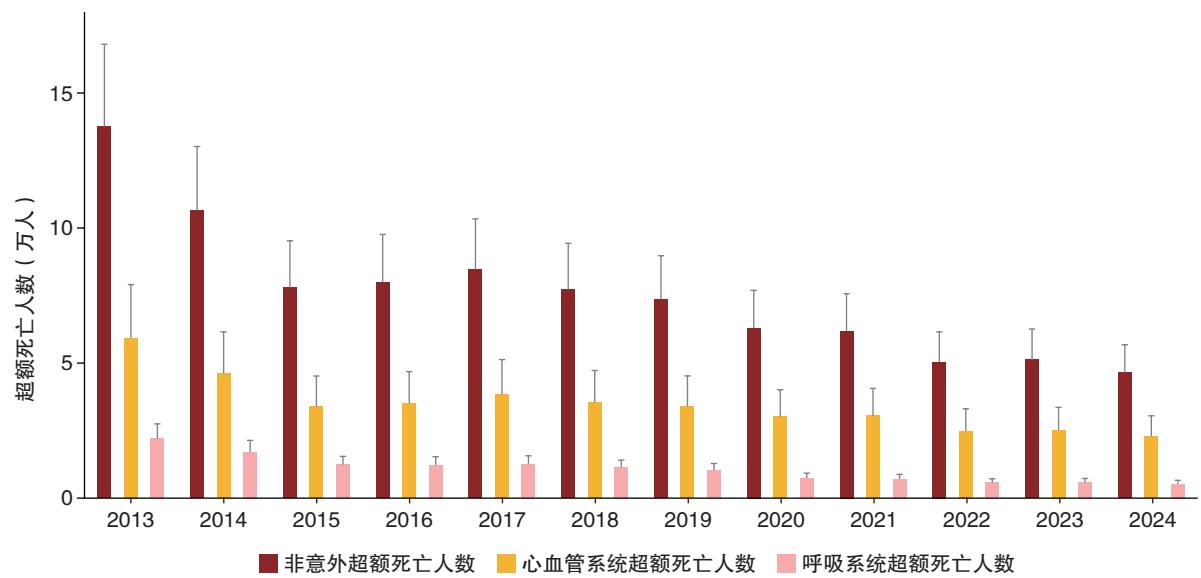


图 6-5 2013 年至 2024 年我国归因于  $\text{NO}_2$  短期暴露的超额死亡人数

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) 和 2024 年我国年均  $\text{NO}_2$  浓度水平, 计算可得 2024 年的可归因非意外死亡人数、心血管疾病死亡人数和呼吸系统疾病死亡人数分别为 4.65 万 (95% CI: 3.61~5.68 万)、2.29 万 (95% CI: 1.78~3.05 万)、0.53 万 (95% CI: 0.40~0.66 万)。相较于 2013—2020 年, 2024 年  $\text{NO}_2$  短期暴露相关死亡人数呈现进一步下

降趋势 (图 6-5)。2024 年我国女性可归因于  $\text{NO}_2$  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 2.77 万 (95% CI: 2.19~3.35 万)、1.49 万 (95% CI: 1.09~1.89 万)、0.27 万 (95% CI: 0.18~0.36 万); 而男性分别为 2.04 万 (95% CI: 1.33~2.70 万)、1.05 万 (95% CI: 0.58~1.49 万)、0.31 万 (95% CI: 0.18~0.44 万)。

## 6.2 气候变化与健康影响

气候变化是 21 世纪全球面临的健康威胁之一。气候变化通过极端天气事件频发、空气质量恶化等途径，持续增加人类的健康风险。研究表明，气候变化对公众健康的影响途径是多方面的，直接影响主要源于气候驱动的健康暴露风险，如通过温度升高、极端降水、极端天气事件、海平面上升等途径，这些因素会给人类带来健康威胁。间接影响则涉及环境和生物条件以及社会行为因素等综合作用。

世界气象组织最新数据显示，2024 年是人类有记录以来最热的一年，全球平均气温较工业化前水平高出 1.5°C 以上 (WMO, 2025a)。在这一气候变暖背景下，我国极端天气事件呈现频率倍增、强度增强的特征，已对人群健康造成严重影响。极端高温是气候变化最直接的健康威胁之一。相关研究表明，当暴露于强度大、持续时间长的极端高温事件时，缺血性卒中的住院风险增加 (Yin et al., 2025)，个人幸福感降低 (Fanglin et al., 2024)，还可能引发焦虑症和抑郁症 (Zeng et al., 2025)，同时对注意力和记忆力产生长期影响 (Weng et al., 2024)。尤其值得关注的是，长期气温变暖、短期气温波动、极端高温事件的强度增加以及持续时间的延长均会增加 65 岁以上老年人的死亡风险 (Yao et al., 2024)。鉴于老年人对不同特征气温变化的高度敏感性，需采取针对性措施，以应对人口老龄化与气温升高所带来的复合风险挑战。

除了气象因素外，我国洪水、干旱等极端天气事件发生频次的增加，也对人群健康造成显著危害。研究发现，孕期暴露于洪水环境会使流产风险增加 (He et al., 2024a)，同时导致女性遭受亲密伴侣暴力行为的概率显著上升。每增加一次洪水事件，亲密伴侣暴力发生率将增加 3.88%；每增加一天洪水暴露，该发生率将增加 0.23% (Guo et al., 2025)。而针对全国 358 个县 / 区高温 - 干旱复合事件与非意外死亡的关联的研究表明，与正常天相比，暴露于高温 - 干旱复合事件的人群非意外死亡风险增加了 17.82% (He et al., 2024b)，另有研究预测，从 2015 年到 2100 年，高温 - 干旱暴露将导致我国 65 岁及以上人群中累计出现 1188 万过早死亡病例 (Yao et al., 2024)。

综合来看，气候变化已对我国人群健康造成显著影响，必须从多个层面加强防范和应对。未来，采取有效的干预措施是减轻其健康损害的重要途径。在个人层面，应重点加强热浪期

间的基础防护，如减少高温时段户外暴露时间、穿着透气浅色衣物、保持充分补水、使用防晒用品，以及合理使用节能型降温产品。在群体层面，建议强化公众健康教育，通过公共卫生机构与医疗专业团队向社区居民普及热浪健康风险及防控知识；建立动态预警响应机制，包括发布区域性

高温健康预警、设立便民防暑中心、对独居老人等脆弱人群开展定向健康援助服务；推进环境适应性改造，实施建筑表面反光处理、城市绿地系统优化等降温基础设施升级工程。特别要针对住房条件受限或行动不便人群制定专项援助方案，确保防护措施的公平可及性。



## 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有效改善了公共健康，但居民部门能源清洁化的健康效益及风险仍存在不确定性。本指标从居民部门的气候变化与空气污染协同治理角度出发，量化城乡空气污染差异、能源转型的健康影响以及室内外污染暴露水平，以期为协同治理提供科学依据。

“十四五”以来我国在居民侧协同治理方面已经取得三个方面的积极进展：一是通过持续的清洁空气行动与清洁能源替代，进一步降低了居民的环境空气污染暴露，巩固并扩大了2013—2020年以来已经实现的健康收益（Xue et al., 2024）；二是北方地区清洁取暖改造等专项政策，显著降低采暖季PM<sub>2.5</sub>浓度和相关死亡风险，健康经济收益总体大于成本，有力支撑了“双碳”目标下的居民端能源转型（Huang et al., 2025）；三是通过多风险联防联控和易感人群保护，部分地区在缩小健康不平等方面已经取得初步成效，为后续更精细化、差异化的协同治理积累了经验（Wang et al., 2025d）。

家庭能源结构清洁化转型改善室外空气质量，带来显著健康收益，并降低了居民部门碳排放，实现了居民部门减污降碳协同治理。与2012年相比，2017年我国生物质和煤炭的消费量分别下降了45%和12%，而天然气消费量增加了204%（Shen et al., 2022）。

能源转型带来的空气质量改善显著降低了死亡率，2004—2015年间我国家庭天然气使用量增加了53%，死亡率下降了12%（Lai et al., 2025）。而随着家庭对固体燃料消费每减少1%，婴儿死亡率平均下降0.11%（Liu et al., 2025）。且能源清洁化将使我国2030年平均室内PM<sub>2.5</sub>浓度从39—43 μg/m<sup>3</sup>降至25—26 μg/m<sup>3</sup>（Meng et al., 2023）。研究显示，碳中和目标下，2060年电炊具与空气源热泵将分别满足我国农村居民94%与72%的服务需求，能源消费结构显著由生物质与煤炭向电力与天然气过渡，年均转型成本达130亿美元，但健康效益货币化后在多数省份可抵消成本（Ma et al., 2023）。“清洁取暖”是“十四五”期间居民侧协同治理的关键抓手之一。

家庭能源绿色低碳转型也显著降低了室内空气污染物，带来了协同的健康收益。由于人们大部分时间都在室内度过，室内空气污染比环境空气污染更与公共健康相关。结果显示，无供暖时室内PM<sub>2.5</sub>暴露主要由室外向室内渗

透引起，2014 年中国北方的日均  $PM_{2.5}$  浓度通常低于  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，而有供暖时室内暴露主要由燃烧固体燃料直接泄漏导致，平均浓度约为  $210 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( Meng et al., 2024 )。室内和室外  $PM_{2.5}$  浓度暴露在过早死亡方面的贡献有显著差异。室外高浓度暴露对过早死亡的贡献为 14%。而室内污染事件对过早死亡的贡献为 27%，几乎是室外高浓度暴露事件的两倍 ( Meng et al., 2024 )。同时，由于使用固体燃料的家庭室内  $PM_{2.5}$  浓度显著高于使用清洁燃料的家庭，城乡家庭之间的室内空气质量差距进一步扩大。2015 年，京津冀及周边地区城乡家庭的平均室内  $PM_{2.5}$  浓度分别为  $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，在 2020 年分别降至  $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( Meng et al., 2023 )。因此，推动居民部门能源现代化是提升室内外空气质量、改善健康和实现减污降碳协同治理的重要措施。

“十四五”以来，我国空气质量持续改善，由此带来的健康收益突出。其中， $PM_{2.5}$  浓度下降避免了约 15.5 万人过早死亡， $O_3$  浓度下降避免了约 2.3 万人过早死亡。面向“十五五”，在巩固“十四五”期间居民侧协同治理成效的基础上，应在以下几个方向进一步发力：其一，把居民清洁用能、建筑节能与室内空气质量统筹纳入减污降碳政策设计，实现“能源系统低碳—室内外暴露降低—健康水平提升”的闭环；其二，针对老年人、儿童和慢性病患者等高脆弱群体，加强精细化健康风险识别与干预，在清洁取暖、清洁炊事和极端天气应对中给予优先保障；其三，深化与碳中和情景相衔接的居民能源转型路径研究，充分利用电气化、可再生能源和智能家居等新技术，进一步放大减污降碳对健康的协同溢出效应，为建设“健康中国”和实现“双碳”目标提供坚实的居民侧支撑。



# 参考文献

- Bevacqua, E., Schleussner, C. F., & Zscheischler, J. (2025). A year above 1.5 °C signals that Earth is most probably within the 20–year period that will reach the Paris Agreement limit. *Nature Climate Change*, 15(3), 262–265. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02246-9>
- Brauer, M., Roth, G. A., Aleksandr, A. Y., et al. (2024). Global burden and strength of evidence for 88 risk factors in 204 countries and 811 subnational locations, 1990–2021: A systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2021. *The Lancet*, 403(10440), 2162–2203. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)00933-4](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)00933-4)
- 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, R., Yin, P., Meng, X., 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: Evidence from 272 Chinese cities. *Epidemiology*, 29, 482–489. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000829>
- Cui, Y., Zhang, S., Ma, X., Xu, M., & Dai, H. (2025). Co-benefit or tradeoff? The impact of inter-provincial trade–embodied pollutants on air quality and public health under climate targets in China. *Environmental Impact Assessment Review*, 115, 108050. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108050>
- Dong, J., Li, S., Sun, Y., Gong, W., Song, G., Ding, Y., Yang, J., Teng, M., Wang, R., Xing, J., Ou, Y., & Gong, W. (2024). Provincial equity and enhanced health are key drivers for China's 2060 carbon neutrality. *Journal of Cleaner Production*, 473, 143531. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143531>
- Energy Institute. (2025). *2025 statistical review of world energy*. Energy Institute. <https://www.energyinst.org/statistical-review>
- Eurostat. (2025). *Digitalisation in Europe – 2025 edition*. Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/digitalisation-2025>
- Fanglin, C. X., Zhang, Z., & Chen, Z. (2024). Extreme heat reduces individual happiness. *Climate Change Economics*, 15(2), 2340004. <https://doi.org/10.1142/S2010007823400043>
- Feng, L., Palmer, P. I., Parker, R. J., Lunt, M. F., & Bösch, H. (2023). Methane emissions are predominantly responsible for record-breaking atmospheric methane growth rates in 2020 and

2021. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 23, 4863–4880. <https://doi.org/10.5194/acp-23-4863-2023>
- Guo, Y., Zhu, Y., Fatmi, Z., Zhou, L., He, C., Bachwenkizi, J., ... Chen, R. (2025). Flood exposure and intimate partner violence in low- and middle-income countries. *Nature Water*, 3, 296–306. <https://doi.org/10.1038/s44221-025-00389-9>
- He, C., Zhu, Y., Zhou, L., Bachwenkizi, J., Schneider, A., Chen, R., & Kan, H. (2024a). Flood exposure and pregnancy loss in 33 developing countries. *Nature Communications*, 15(1), 44508. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44508-0>
- He, G., Lin, Y., Hu, J., Chen, Y., Guo, Y., Yu, M., ... Ma, W. (2024b). The trends of non-accidental mortality burden attributed to compound hot-dry events in China and its provinces in a global warming world. *Environment International*, 191, 108977. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108977>
- Huang, J., Wang, H., Liu, Z., Zhang, L., Gao, H., Wang, Z., ... Li, L. (2025). Environmental, health and economic impact assessment of clean heating renovation: Evidence from 88 cities in northern China. *Environmental Impact Assessment Review*, 115, 108023. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2025.108023>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (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* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, et al., Eds.). Cambridge University Press.
- International Energy Agency. (2025). *Global energy review 2025*. IEA. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/5b169aa1-bc88-4c96-b828-aaa50406ba80/GlobalEnergyReview2025.pdf>
- International Renewable Energy Agency. (2025). *Renewable capacity statistics 2025*. IRENA. <https://www.irena.org/Publications/2025/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2025>
- Jiang, K., Xing, R., Luo, Z., Li, Y., Wang, J., Zhang, W., Zhu, Y., Men, Y., Shen, G., & Tao, S. (2024). Unclean but affordable solid fuels effectively sustained household energy equity. *Nature Communications*, 15, 9761. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54166-5>
- Jiang, X., Ku, W. L., Shia, R., Li, Q., Elkins, J. W., Prinn, R. G., & Yung, Y. L. (2007). Seasonal cycle of N<sub>2</sub>O: Analysis of data. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(2), GB2009. <https://doi.org/10.1029/2006GB002691>
- Lai, W., Lin, L., Shen, X., & Zhou, M. (2025). Investing in a transition fuel: The remarkable decline in mortality from China's rollout of natural gas infrastructure. *Journal of Environmental Economics and Management*, 130, 103131. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2025.103131>
- Li, C., Li, M., Zhang, L., Li, Q., Zheng, H., & Feldman, M. W. (2025b). Energy-poverty-inequality SDGs: A large-scale household analysis and forecasting in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 122(11), e2408167121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2408167121>

- Li, X., Zhang, H., Shang, R., Chen, J., Wang, D., Zhu, J., Huang, H., Lin, S., Pan, B., Yuan, W., & Piao, S. (2025a). It is time to optimize forest management policy for both carbon sinks and wood harvest in China. *National Science Review*, 12. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae464>
- Liao, Z., Yue, C., He, B., Zhao, K., Ciais, P., Alkama, R., Grassi, G., Sitch, S., Chen, R., Quan, X., Xu, M., & Wang, M. (2024). Growing biomass carbon stock in China driven by expansion and conservation of woody areas. *Nature Geoscience*, 17, 1127–1134. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01569-0>
- Liu, K., Wang, K., Jia, S., Liu, Y., Liu, S., Yin, Z., & Zhang, X. (2024b). Air quality and health benefits for different heating decarbonization pathways in China. *Science of the Total Environment*, 919, 170976. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170976>
- Liu, S., Wang, H., Li, H., Yu, Z., & Luan, J. (2024a). Projections of China's forest carbon storage and sequestration and ways of their potential capacity enhancement. *Scientia Silvae Sinicae*, 60. <http://doi.org/10.11707/j.1001-7488.LYKX20230206>
- Liu, Y., Zhu, L., Liao, H., & Sun, Y. (2025). Household energy transition and its crucial role in saving infant lives in developing countries. *Journal of Environmental Management*, 375, 124259. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124259>
- Luo, Z., Shen, G., Men, Y., Zhang, W., Meng, W., Zhu, W., Meng, J., Liu, X., Cheng, Q., Jiang, K., Yun, X., Cheng, H., Xue, T., Shen, H., & Tao, S. (2022). Reduced inequality in ambient and household PM<sub>2.5</sub> exposure in China. *Environment International*, 170, 107599. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107599>
- 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, 6101. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41707-7>
- Meng, W., Cheng, Y., Shen, G., Shen, H., Su, H., & Tao, S. (2024). The long hazy tail: Analysis of the impacts and trends of severe outdoor and indoor air pollution in North China. *Environmental Science & Technology*, 58(19), 8326–8335. <https://doi.org/10.1021/acs.est.4c02778>
- Meng, W., Cheng, Y., Shen, G., Shen, H., Su, H., Zhong, Q., Yun, X., Wang, X., Chen, Y., Ma, J., & Tao, S. (2023). Costs and benefits of household fuel policies and alternative strategies in the Jing–Jin–Ji region. *Environmental Science & Technology*, 57(51), 21662–21672. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c01622>
- Peng, S., Lin, X., Thompson, R. L., Xi, Y., Liu, G., Hauglustaine, D., Lan, X., Poulter, B., Ramonet, M., Saunois, M., Yin, Y., Zhang, Z., Zheng, B., & Ciais, P. (2022). Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020. *Nature*, 612(7941), 477–482. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05447-w>
- Qu, Z., Jacob, D. J., Zhang, Y., Shen, L., Varon, D. J., Lu, X., Scarpelli, T., Bloom, A., Worden, J., & Parker, R. J. (2022). Attribution of the 2020 surge in atmospheric methane by inverse analysis of GOSAT observations. *Environmental Research Letters*, 17(9), 094003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac8754>

- RhoMotion. (2025). *Over 17 million EVs sold in 2024 – Record year*. RhoMotion. <https://rhomotion.com/news/over-17-million-evs-sold-in-2024-record-year/>
- Saunois, M., Stavert, A. R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., et al. (2020). The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data*, 12, 1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Semiconductor Industry Association. (2025). *Global semiconductor sales increase 19.8% year-to-year in May*. SIA. <https://www.semiconductors.org/global-semiconductor-sales-increase-27-0-year-to-year-in-may/>
- Shen, G., Xiong, R., Tian, Y., Luo, Z., Jiangtulu, B., Meng, W., Du, W., Meng, J., Chen, Y., Xue, B., Wang, B., Duan, Y., Duo, J., Fan, F., Huang, L., Ju, T., Liu, F., Li, S., Liu, X., ... Tao, S. (2022). Substantial transition to clean household energy mix in rural China. *National Science Review*, 9(7), nwac050. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwac050>
- SolarPower Europe. (2025). *Global market outlook for solar power 2025–2029*. SolarPower Europe. <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/global-market-outlook-for-solar-power-2025-2029>
- 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., Lu, X., Li, S., & Hao, J. (2024). Air quality, health, and equity benefits of carbon neutrality and clean air pathways in China. *Environmental Science & Technology*, 58, 15027–15037. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.3c10076>
- Wang, H., Deng, H. M., Liu, L. J., Jiang, H. D., Purohit, P., & Liang, Q. M. (2025d). Air pollution and climate change drive health inequities across China's provinces (2000–2023). *iScience*, 28(10). <http://doi.org/10.1016/j.isci.2025.113582>
- Wang, L., Liu, Y., Zhao, L., et al. (2025a). Unraveling climate change–induced compound low–solar–low–wind extremes in China. *National Science Review*, 12(1), nwae424. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwae424>
- Wang, Q., Fan, J., Kwan, M.–P., Zhou, K., Shen, G., Li, N., Wu, B., & Lin, J. (2023). Examining energy inequality under the rapid residential energy transition in China through household surveys. *Nature Energy*, 8, 251–263. <https://doi.org/10.1038/s41560-023-01193-z>
- 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., Peng, S., Ran, L., Sang, Y., Sitch, S., Takashi, M., Thompson, R. L., Wang, C., Wang, K., Wang, T., Xi, Y., Xu, L., Yan, Y., Yun, J., Zhang, Y., Zhang, Y., Zhang, Z., Zheng, B., Zhou, F., Tao, S., Canadell, J. G., & Piao, S. (2024). The greenhouse gas budget of terrestrial ecosystems in East Asia since 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 38, e2023GB007865. <https://doi.org/10.1029/2023GB007865>

- Wang, Y., Lin, M., & Zeng, H. (2025b). Spatiotemporal dynamics and drivers of multidimensional carbon emission eco-efficiency: A case study of Guangdong Province, China. *Journal of Environmental Management*, 391, 126544. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126544>
- Wang, Y., Zhang, Y., Tian, X., Wang, X., Yuan, W., Ding, J., Jiang, F., Jin, Z., Ju, W., Liang, R., Lu, X., Shen, L., Sun, S., Wang, T., Zhang, H., Zhao, M., & Piao, S. (2025c). Towards verifying and improving estimations of China's CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> budgets using atmospheric inversions. *National Science Review*, 12. <http://doi.org/10.1093/nsr/nwaf090>
- Wei, J., Li, Z., Lyapustin, A., et al. (2023). First close insight into global daily gapless 1 km PM<sub>2.5</sub> pollution, variability, and health impact. *Nature Communications*, 14, 8349. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-43862-3>
- Weng, H., Deng, L., Wang, T., Xu, H., Wu, J., Zhou, Q., ... Chen, X. (2024). Humid heat environment causes anxiety-like disorder via impairing gut microbiota and bile acid metabolism in mice. *Nature Communications*, 15(1), 5697. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49972-w>
- World Economic Forum. (2025). *Fostering effective energy transition 2025*. World Economic Forum. [https://reports.weforum.org/docs/WEF\\_Fostering\\_Effective\\_Energy\\_Transition\\_2025.pdf](https://reports.weforum.org/docs/WEF_Fostering_Effective_Energy_Transition_2025.pdf)
- World Meteorological Organization. (2025a). *State of the global climate 2024 (WMO No. 1368)*. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate-2024>
- World Meteorological Organization. (2025b). *The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2024 (WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 21)*. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/publication-series/wmo-greenhouse-gas-bulletin-no-21>
- Xia, J., Xia, X., Wang, X., Ju, W., Lin, Z., Qin, Z., Sang, Y., Yan, Y., Yuan, W., Yue, X., Zhang, H., Zhou, H., & Zhu, Q. (2025). China land carbon budget (CLCB1.0): A comprehensive estimate of the land carbon budget in China. *National Science Review*, 12. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaf052>
- Xiao, Q., Geng, G., Xue, T., et al. (2022). Tracking PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> pollution and the related health burden in China 2013–2020. *Environmental Science & Technology*, 56(11), 6922–6932. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04548>
- Xu, S., Zhang, S., Pan, Y., Liu, X., Welsch, E., Ma, X., Guo, C., & Dai, H. (2024). Health equity and synergistic abatement strategies of carbon dioxide and air pollutant emissions reduction in China's eastern coastal area. *Environmental Research Letters*, 19, 104023. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad715b>
- Xue, T., Wang, R., Wang, M., Wang, Y., Tong, D., Meng, X., ... Zhu, T. (2024). Health benefits from the rapid reduction in ambient exposure to air pollutants after China's clean air actions: Progress in efficacy and geographic equality. *National Science Review*, 11(2), nwad263. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwad263>

- Yang, Y. H., Shi, Y., Sun, W. J., Chang, J. F., Zhu, J. X., Chen, L. Y., Wang, X., Guo, Y. P., Zhang, H. T., Yu, L. F., Zhao, S. Q., Xu, K., Zhu, J. L., Shen, H. H., Wang, Y. Y., Peng, Y. F., Zhao, X., Wang, X. P., Hu, H. F., Chen, S. P., Huang, M., Wen, X. F., Wang, S. P., Zhu, B., Niu, S. L., Tang, Z. Y., Liu, L. L., & Fang, J. Y. (2022). Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. *Science China Life Sciences*, 65, 861–895. <https://doi.org/10.1007/s11427-021-2045-5>
- Yao, X., Qu, Y., Mishra, A. K., Mann, M. E., Zhang, L., Bai, C., … Wang, Q. (2025). Elderly vulnerability to temperature-related mortality risks in China. *Science Advances*, 11(1), eado5499. <https://doi.org/10.1126/sciadv.ado5499>
- Yao, X., Qu, Y., Zhang, L., Mishra, A. K., Yin, J., Ding, R., … Zhou, C. (2024). Socio-demographic factors shape mortality risk linked to compound drought–heatwave events under climate change in China. *One Earth*, 7(11), 2034–2048. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.012>
- Yin, J., Wang, S., Deng, J., Yang, N., Zhou, Z., Zhou, H., … Shi, J. (2025). Associations of heatwaves and their characteristics with ischaemic stroke hospital admissions. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-88557-5>
- Yu, B., Zhao, Z., Wei, Y.-M., Liu, L.-C., Zhao, Q., Xu, S., Kang, J.-N., & Liao, H. (2023). Approaching national climate targets in China considering the challenge of regional inequality. *Nature Communications*, 14, 8342. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-44122-0>
- Yu, Z., Ciais, P., Piao, S. L., Houghton, R. A., Lu, C. Q., Tian, H. Q., Agathokleous, E., Kattel, G. R., Sitch, S., Goll, D., Yue, X., Walker, A., Friedlingstein, P., Jain, A. K., Liu, S. R., & Zhou, G. Y. (2022). Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 13, 12. <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. (2024). Maximizing carbon sequestration potential in Chinese forests through optimal management. *Nature Communications*, 15, 3154. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47143-5>
- Yue, C., Xu, M., Ciais, P., Tao, S., Shen, H., Chang, J., Li, W., Deng, L., He, J., Leng, Y., Li, Y., Wang, J., Xu, C., Zhang, H., Zhang, P., Zhang, L., Zhao, J., Zhu, L., & Piao, S. (2024). Contributions of ecological restoration policies to China's land carbon balance. *Nature Communications*, 15, 9708. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-54100-9>
- Zeng, R., Zhao, J., Hu, Y., Chu, L., Du, S., Zheng, C., & He, C. (2025). Spatial correlations between summer ozone–heatwave dual events and residents' mental health in China. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-04930-4>
- Zhang, L., Ruan, J., Zhang, Z., Qin, Z., Lei, Z., Cai, B., … Tang, L. (2024). City-level pathways to carbon peak and neutrality in China. *Cell Reports Sustainability*, 1, 100102. <https://doi.org/10.1016/j.crsus.2024.100102>

Zhang, L., Wu, P., Niu, M., Zheng, Y., Wang, J., Dong, G., Zhang, Z., Xie, Z., Du, M., Jiang, H., & Liu, H. (2022). A systematic assessment of city-level climate change mitigation and air quality improvement in China. *Science of the Total Environment*, 856, 156274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156274>

Zhang, M., Liu, S., Luo, X., Keenan, T. F., Fu, L., Xiao, C., Zhang, Y., & Gong, P. (2025). Incorporating site suitability and carbon sequestration of tree species into China's climate-adaptive forestation. *Science Bulletin*, 70, 1834–1845. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.04.012>

Zhang, W., Xu, H., Zhong, Q., Yu, X., Ren, Y., Shen, H., Chen, Y., Ma, J., Cheng, H., Li, B., Liu, J., Wang, X., & Tao, S. (2021). Urban residential energy switching in China between 1980 and 2014 prevents 2.2 million premature deaths. *One Earth*, 4(11), 1602–1613. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.10.013>

Zhou, X., Li, Y., Xiao, C., Chen, W., Mei, M., & Wang, G. (2025). High-impact extreme weather and climate events in China: Summer 2024 overview. [Report / in preparation].

Zhou, Z., Ma, X., Zhang, S., Guo, C., Liu, X., Zhang, L., & Xie, Y. (2024). Equity-based carbon neutral plan induces cross-regional coal leakage and industrial relocation. *iScience*, 27, 109079. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109079>

Zhu, Y., Xia, X., Canadell, J. G., Piao, S., Lu, X., Mishra, U., Wang, X., Yuan, W., & Qin, Z. (2025). China's carbon sinks from land-use change underestimated. *Nature Climate Change*, 15(5), 428–435. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02341-x>

Zscheischler, J., Raymond, C., Chen, Y., et al. (2025). Compound weather and climate events in 2024. *Nature Reviews Earth & Environment*, 6(4), 240–242. <https://doi.org/10.1038/s43017-025-00657-y>

春观能源. (2025). 年终重磅：2024年全国能源形势分析与2025年展望. <https://mp.weixin.qq.com/s/mFBLUPyRFNY31Hb1csYQ5w>

国家发展和改革委员会. (2025a). 关于2024年国民经济和社会发展计划执行情况与2025年国民经济和社会发展计划草案的报告. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202503/content\\_7013429.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202503/content_7013429.htm)

国家发展和改革委员会. (2025b). 郑栅洁主任出席国新办“高质量完成‘十四五’规划”系列主题首场新闻发布会. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202503/content\\_7013429.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202503/content_7013429.htm)

国家发展和改革委员会. (2025c). “数”说节能降碳工作成效. [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzyj/jhnx/202507/t20250717\\_1399273.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/hjzyj/jhnx/202507/t20250717_1399273.html)

国家发展和改革委员会. (2025d). 国家发展改革委 国家能源局关于促进新能源消纳和调控的指导意见. [https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202511/t20251110\\_1401470.html](https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/tzgg/202511/t20251110_1401470.html)

国家林业和草原局政府网. (2025). 2024年我国完成国土绿化面积超1亿亩. 国家林业和草原局. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/zyxx/608392.jhtml>

国家能源局. (2021). 抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035年). 国家能源局. [https://zfxgk.nea.gov.cn/1310193456\\_16318589869941n.pdf](https://zfxgk.nea.gov.cn/1310193456_16318589869941n.pdf)

国家能源局. (2024). 2025年全国能源工作会议在京召开. [https://www.nea.gov.cn/2024-12/15/c\\_1310787580.htm](https://www.nea.gov.cn/2024-12/15/c_1310787580.htm)

国家能源局. (2025a). 高质量完成“十四五”规划系列主题新闻发布会，介绍“十四五”时期能源高质量发展成就. <http://www.scio.gov.cn/live/2025/37113/index.html>

国家能源局. (2025b). 2024年可再生能源并网运行情况. <https://www.nea.gov.cn/20250221/e10f363cabe3458aaf78ba4558970054/c.html>

国家能源局. (2025c). 中国新型储能发展报告(2025). [https://hbj.nea.gov.cn/xxgk/zcfg/202508/t20250804\\_285293.html](https://hbj.nea.gov.cn/xxgk/zcfg/202508/t20250804_285293.html)

国家能源局. (2025d). 国家能源局关于印发《2025年能源工作指导意见》的通知(国能发规划〔2025〕16号). 国家能源局. <https://www.nea.gov.cn/20250227/b60fb4f51097434e8c5d7ee19b423651/c.html>

国家铁路局. (2025). 2024年铁道统计公报. <https://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/202506/P020250609597950782906.pdf>

国家统计局. (2021—2025). 国家数据. 国家统计局(Ed.). <https://data.stats.gov.cn/index.html>

国家统计局. (2021). 中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报. 国家统计局, [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203\\_1901004.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901004.html)

国家统计局. (2022). 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报. 国家统计局. [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203\\_1901393.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901393.html)

国家统计局. (2023). 中华人民共和国2022年国民经济和社会发展统计公报. 国家统计局, [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228\\_1919011.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230228_1919011.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. 国家统计局, [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228\\_1947915.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html)

国家统计局. (2025a). 中华人民共和国2024年国民经济和社会发展统计公报. 国家统计局, [https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228\\_1958817.html](https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202502/t20250228_1958817.html)

国家统计局. (2025b). 赵同录：我国经济运行稳中有进 经济总量跃上新台阶. [https://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjjd2020/202501/t20250117\\_1958345.html](https://www.stats.gov.cn/xxgk/jd/sjjd2020/202501/t20250117_1958345.html)

国务院. (2024). 国务院关于印发《2024—2025年节能降碳行动方案》的通知. [https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue\\_11406/202406/content\\_6958082.html](https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11406/202406/content_6958082.html)

交通运输部. (2025). 2024年交通运输行业发展统计公报. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202506/content\\_7027415.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202506/content_7027415.htm)

国网能源研究院. (2025). 中国新能源发电分析报2025. 北极星电力网. <https://news.bjx.com.cn/html/20250729/1453212.shtml>

刘洪利, 龚山陵, 何建军, 王亚强, 张碧辉, & 张恒德. (2018). 环境气象评估指数 EMI 原理及应用. 第 35 届中国气象学会年会 S12 大气成分与天气、气候变化与环境影响暨环境气象预报及影响评估论文集 (pp. 371–374).

绿色和平. (2025). 当“风光狂奔”遇上“煤电惯性”：电力部门碳达峰倒计时. GREENPEACE 绿色和平. <https://www.greenpeace.org.cn/2025/06/05/carbon-brief-2025-q1/>

农业农村部. (2024). 2024 年全国秸秆综合利用现场推进会召开. [https://kjs.moa.gov.cn/gzdt/202406/t20240614\\_6457216.htm](https://kjs.moa.gov.cn/gzdt/202406/t20240614_6457216.htm)

农民日报. (2025). 《中国农业绿色发展报告 2024》发布农业绿色发展水平稳步提升. 中国农业科学院. <https://iarrp.caas.cn/ysdt/mtbd/91dacdf3cb8487a86bbd8fffa89a764.htm>

求是网. 白泉. (2025). 解锁绿色发展新密码. <https://www.qstheory.net/20250625/c3e2efef05634151b15a2f7f71cff6b6/c.html>

生态环境部. (2024). 关于高质量推进实施燃煤锅炉超低排放的意见(征求意见稿)的函. 生态环境部. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202406/t20240624\\_1078858.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202406/t20240624_1078858.html)

生态环境部. (2025a). 关于发布 2024 年电力碳足迹因子数据的公告. 生态环境部. [https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202510/t20251024\\_1130734.html](https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk01/202510/t20251024_1130734.html)

生态环境部. (2025b). 深化改革创新 奋力笃行实干 高质量完成“十四五”生态环境保护目标任务——在 2025 年全国生态环境保护工作会议上的工作报告. 生态环境部. [https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202501/t20250123\\_1101271.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywdt/hjywnews/202501/t20250123_1101271.shtml)

生态环境部. (2025c). 《大气司司长：蓝天不是等来的，是拼出来的！| 新闻发布会答问实录》. 生态环境部. [https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202502/t20250224\\_1102786.shtml](https://www.mee.gov.cn/ywdt/xwfb/202502/t20250224_1102786.shtml)

水电水利规划设计总院. (2025). 中国可再生能源发展报告 2024 年度. <https://www.eesia.cn/upload/files/2025/5/2fea84d6414c788d.pdf>

王会军, 孙建奇, 陈活泼, 马洁华, 段明铿. (2025). 全球变暖加速和气候极端化——2024 年中国气候研究重大进展速评. 大气科学学报, 48(1), 1–7. <http://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20250122001>

新华社. (2021). 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》, [https://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c\\_1127205564.htm](https://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c_1127205564.htm).

新华社. (2024). 中共中央关于进一步全面深化改革 推进中国式现代化的决定. <https://www.news.cn/politics/20240721/cec09ea2bde840dfb99331c48ab5523a/c.html>

张贤, 杨晓亮, 鲁玺等. (2023). 中国二氧化碳捕集利用与封存(CCUS)年度报告(2023) [R]. 中国 21 世纪议程管理中心, 全球碳捕集与封存研究院, 清华大学. <https://file.jgvogel.cn/124/upload/resources/file/421008.pdf>

证券时报网. (2025). 透过数据看“十四五”答卷：中国能源转型提“质”焕“新”. <https://www.stcn.com/article/detail/2125794.html>

- 中国电力报. 林卫斌, 林晓东. (2025). 一文速览! 2024 能源发展全景与 2025 新走向. <https://mp.weixin.qq.com/s/1N3Snygrl2T0TGCv-Cq1w>
- 中国电力企业联合会. (2025). 中国电力行业年度发展报告 2025. 中国电力企业联合会. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-346804>
- 中国环境报. (2022). 推动空气质量持续改善. 国际在线 - 生态中国. <http://eco.cri.cn/20220315/e208d2f4-1299-a3b5-f110-1239c2fcf5f0.html>
- 中国民用航空局. (2025). 2024 年民航行业发展统计公报. [https://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK\\_17/XXGK/TJSJ/202505/P020250515367555717699.pdf](https://www.caac.gov.cn/PHONE/XXGK_17/XXGK/TJSJ/202505/P020250515367555717699.pdf)
- 中国气象局. (2025). 中国气候公报 (2024). <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate>
- 中国石化新闻网. (2025a). 年度盘点系列报道之二—从 2024 到 2025: 能源行业迈向高质量发展的关键阶段. 中国石化报. [http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2025-01/13/content\\_7116251.html](http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2025-01/13/content_7116251.html)
- 中国石化新闻网. (2025b). 年度盘点系列报道之四—炼油与成品油市场跨越“拐点”. 中国石化报. [http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2025-01/22/content\\_7116968.html](http://www.sinopecnews.com.cn/xnews/content/2025-01/22/content_7116968.html)
- 中国石油集团经济技术研究院. (2025). 2024 年国内外油气行业发展报告. <http://etri.cnpc.com.cn/etri/yqhyfzbg/202502/d8cd926bb6234649b5e97eb1dbb2df0a.shtml>
- 中国政府网. (2024a). 中华人民共和国能源法. [https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202411/content\\_6985761.htm](https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202411/content_6985761.htm)
- 中国政府网. (2024b). 推动能源绿色低碳转型 国家能源局有关负责同志详解能源法任务. [https://www.gov.cn/zhengce/202412/content\\_6990614.htm](https://www.gov.cn/zhengce/202412/content_6990614.htm)
- 中能传媒能源安全新战略研究院. 邱丽静. (2025a). 年度重磅 | 中国能源大数据报告 (2025) —— 能源综合篇. 中能传媒研究院. <http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20250617/660860-2.shtml>
- 中能传媒能源安全新战略研究院. 韩继园. (2025b). 年度重磅 | 中国能源大数据报告 (2025) —— 煤炭篇. 中能传媒研究院. <https://news.bjx.com.cn/html/20250620/1447395-1.shtml>
- 中能传媒能源安全新战略研究院. 杨永明. (2025c). 中国能源大数据报告 (2025) —— 天然气篇. 中能传媒研究院. <https://news.bjx.com.cn/html/20250702/1449214.shtml>
- 自然资源部信息中心. (2025). 《2024 年中国自然资源公报》解读. 自然资源部. <https://www.forestry.gov.cn/c/www/lcdt/615214.jhtml>



# 2025

## 中国碳中和与清洁空气协同路径

“十四五”盘点——加快绿色低碳转型，持续改善空气质量

