



# 2022

## 中国碳中和与清洁空气 协同路径

减污降碳 协同增效

中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组

2022年12月

## 支持单位

---

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

## 引用方式

---

中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组（2022），“中国碳中和与清洁空气协同路径2022——减污降碳 协同增效”，清华大学碳中和研究院，北京，中国





# 2022

## 中国碳中和与清洁空气 协同路径

减污降碳 协同增效

# 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院长  
朱 彤 中国科学院院士 北京大学环境科学与工程学院院长

## 执行摘要

---

雷 宇 生态环境部环境规划院大气环境规划研究所所长 研究员（召集人）  
尹志聪 南京信息工程大学大气科学学院教授  
鲁 玺 清华大学环境学院教授  
张 强 清华大学地球系统科学系副系主任 教授  
宫继成 北京大学环境科学与工程学院研究员  
刘 欣 能源基金会环境管理项目主任  
蔡慈澜 清华大学地球系统科学系博士后  
中国清洁空气政策伙伴关系秘书处负责人

## 第一工作组

---

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

## 第二工作组

---

鲁 玺 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  
李晓梅 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心战略规划研究部  
气候战略理论和模型研究室主任  
张 达 清华大学能源环境经济研究所副教授  
刘 俊 北京科技大学能源与环境工程学院副教授  
吴 睿 交通运输部规划研究院环境资源所主任 高级工程师  
张少君 清华大学环境学院副教授  
胥小龙 中国建筑节能协会副总工 政策规划专委会主任



胡 姍 清华大学建筑节能研究中心助理研究员  
张 贤 科技部中国 21 世纪议程管理中心处长 研究员  
陈文会 北京化工大学讲师  
郑 博 清华大学深圳国际研究生院助理教授  
汪旭颖 生态环境部环境规划院副研究员  
张 宁 清华大学电机工程与应用电子技术系副教授  
陈 诗 清华大学环境学院博士后

### 第三工作组

---

雷 宇 生态环境部环境规划院大气环境规划研究所所长 研究员（召集人）  
蔡博峰 生态环境部环境规划院碳达峰碳中和研究中心执行主任、研究员  
冯相昭 生态环境部环境与经济政策研究中心能源环境研究部负责人 研究员  
张 昕 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心总经济师  
郑逸璇 生态环境部环境规划院副研究员  
周 剑 清华大学低碳经济研究院副院长 副教授

### 第四工作组

---

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

### 第五工作组

---

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

本报告为《中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告》的第二期，以“减污降碳 协同增效”为主题。本报告基本延续了第一期报告的主体框架，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，分析中国在走向碳中和与清洁空气协同之路上存在的障碍并提出解决思路。







# CONTENTS

## 目录

<b>执行摘要</b> .....	<b>6</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 不利气象条件变化 .....	28
2.3 气候变化 .....	31
<b>第三章 治理体系与实践</b> .....	<b>35</b>
3.1 协同治理体系建设 .....	36
3.2 协同治理经济政策 .....	38
3.3 地方实践 .....	41
<b>第四章 结构转型与治理技术</b> .....	<b>45</b>
4.1 能源结构转型 .....	46
4.2 产业结构转型 .....	49
4.3 新型电力系统 .....	56
4.4 交通结构转型 .....	58
4.5 建筑能效提升与用能结构转型 .....	60
4.6 碳捕集、利用与封存技术 .....	63
4.7 污染治理进程 .....	65
<b>第五章 大气成分源汇及减排路径</b> .....	<b>69</b>
5.1 人为源碳排放 .....	70
5.2 土地利用变化与陆地碳汇 .....	72
5.3 污染物排放及协同减排进展 .....	74
5.4 协同减排路径 .....	76
<b>第六章 健康影响与协同效益</b> .....	<b>79</b>
6.1 空气污染与健康影响 .....	80
6.2 气候变化与健康影响 .....	84
6.3 协同治理的健康收益 .....	87
<b>参考文献</b> .....	<b>89</b>

2022



CCAPP  
中国清洁空气政策伙伴关系  
China Clean Air Policy Partnership

## 执行摘要

“十四五”时期，我国生态文明建设进入了以降碳为重点战略方向、推动减污降碳协同增效、促进经济社会发展全面绿色转型、实现生态环境质量改善由量变到质变的关键时期。把实现减污降碳协同增效作为促进经济社会发展全面绿色转型的总抓手，坚持降碳、减污、扩绿、增长协同推进，已经成为从中央到地方落实新发展理念的关键点，也正在逐步成为全社会生产生活的共识。





温室气体与大气污染物排放同根同源，气候变化与大气污染之间存在明确的相互作用关系，并且都对人民健康福祉等产生显著的负面影响。因此协同推进碳减排和空气质量改善工作，既体现在治理对象、治理措施以及相关政策行动的统筹上，也体现在工作目标、工作效果的协同上。基于这一判断，我国发布实施了《减污降碳协同增效实施方案》，这一文件作为国家碳达峰碳中和“1+N”政策体系的重要组成部分，明确了以减污降碳协同增效促进经济社会发展全面绿色转型的工作重点，也专门提出到2030年，大气污染防治重点区域碳达峰与空气质量改善协同推进取得显著成效的目标，以及保障该目标所需要开展的相关任务。

为全面客观地跟踪评述我国协同气候变化应对与大气污染防治的进展，2021年起，在能源基金会和中国清洁空气政策伙伴关系（CCAPP）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联合发起了《中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告》的编写工作。以此为平台，一批大气科学、环境工程、能源工程、公共卫生、管理科学等领域的国内一线学者进行常态化的跨学科交流，共同跟踪、梳理、总结与分析我国空气污染与气候变化协同治理进程，助力形成政策制订、评价与优化的闭环，推动协同治

理政策的落地实施。

本报告为《中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告》的第二期，以“减污降碳 协同增效”为主题。本报告基本延续了第一期报告的主体框架，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，分析中国在走向碳中和与清洁空气协同之路上存在的障碍并提出解决思路。

### 共二十项指标

1. 空气质量变化

2. 不利气象条件变化

3. 气候变化

4. 协同治理体系建设

5. 协同治理经济政策

6. 地方实践

7. 能源结构转型

8. 产业结构转型

9. 新型电力系统

10. 交通结构转型

11. 建筑能效提升与用能结构转型

12. 碳捕集、利用与封存技术

13. 污染治理进程

14. 人为源碳排放

15. 土地利用变化与陆地碳汇

16. 污染物排放及协同减排进展

17. 协同减排路径

18. 空气污染与健康影响

19. 气候变化与健康影响

20. 协同治理的健康收益





# 1 空气污染与气候变化

2021年，全国及重点区域大气污染物浓度较2020年均有所下降。全国339个地级以上城市PM<sub>2.5</sub>浓度平均为30μg/m<sup>3</sup>，相比2015年下降34.8%；PM<sub>2.5</sub>年均浓度达到国家环境空气质量二级标准的城市数量上升到238个，较2020年增加26个，较2015年增长131%，显示出大气污染防治持续推进，取得显著成绩；但仍有约100个城市PM<sub>2.5</sub>年均浓度未能达标，PM<sub>2.5</sub>仍然是我国最主要的大气污染问题。339个城市O<sub>3</sub>日最大8小时平均浓度第90百分位数的均值为137μg/m<sup>3</sup>，比2020年下降0.7%；全国及重点区域的O<sub>3</sub>浓度三年滑动平均值在2017–2019年后普遍呈现持平或小幅下降态势。2021年O<sub>3</sub>浓度年评价不能达标的城市数量为50个，约为PM<sub>2.5</sub>不达标城市的一半，O<sub>3</sub>是仅次于颗粒物，对我国空气质量影响排第二位的污染物。2021年全国城市重度及以上污染天数占比1.3%，与2020年（1.2%）基本持平，较2015年（3.1%）下降58%；重污染期间PM<sub>2.5</sub>浓度大幅下降，显示重污染应对取得显著成绩。

2021年气象条件总体利好于空气质量。PM<sub>2.5</sub>气象条件评估指数分析结果显示，2021年全国平均PM<sub>2.5</sub>污染气象条件与2020年基本持平，北方总体稍有利，南方总体稍不利；京津冀及周边地区、汾渭平原、长三角地区的气象条件较有利，可使PM<sub>2.5</sub>浓度同比下降约7.8%、1.9%、0.1%，较近五年均值下降6.8%、7.2%、7.0%。O<sub>3</sub>气象条件评估指数分析结果显示，2021年5–9月全国平均O<sub>3</sub>气象条件优于近五年同期平均水平；较优的气象条

件可使京津冀及周边地区、长三角地区、汾渭平原、成渝平原2021年5–9月O<sub>3</sub>浓度同比分别下降5.9%、1.1%、1.5%、5.2%，较近5年均值分别下降5.6%、1.6%、2.7%、3.3%。

2021年，全球平均大气CO<sub>2</sub>浓度为414.7ppm，较2020年上升了2.7ppm，大气CH<sub>4</sub>浓度为1896ppb，较2020年上升17ppb。全国平均气温较常年（1981–2010年）偏高1.0℃，为1951年以来历史最高；平均降水量较常年偏多6.7%，北方降水量为历史第二多。1月–2月的东部极端冷暖转换、3月的近10年最强沙尘暴过程、7月的河南极端强降水等极端天气气候事件相继发生，显示全球气候变化背景下我国极端气候和灾害风险正在提升。随着未来全球持续变暖，不利气象条件也将增加中国东部未来发生霾或臭氧污染天气的概率，给我国持续改善空气质量带来更大挑战。

## “ PM<sub>2.5</sub> O<sub>3</sub> ”

2021年，全国339个地级以上城市PM<sub>2.5</sub>浓度平均为30μg/m<sup>3</sup>，相比2015年下降34.8%；339个城市O<sub>3</sub>日最大8小时平均浓度第90百分位数的均值为137μg/m<sup>3</sup>，比2020年下降0.7%。

## 2 治理体系与实践

中共中央政治局第二十九次集体学习和第三十六次集体学习后，全社会进一步就减污降碳协同推进统一了思想。在国家层面，2021年出台的“十四五”规划以及党中央关于碳达峰碳中和和打赢污染防治攻坚战的意见，都体现出了减污和降碳相互交融、相互协同的新要求，为如何以降碳为引领推动经济社会发展全面绿色转型、强化多污染物与温室气体协同控制，如何以减污为重要手段促进降碳目标实现提供了方向和指引。在此基础上，生态环境部门围绕减污降碳协同，在环评、监测、监管、统计等领域采取行动，完善既有的管理制度，推动将碳排放管理需求融入到生态环境管理制度中，协同治理体系逐步构建完善。

在市场机制方面，碳排放权交易市场取得突破性进展。2021年，全国碳排放权交易市场第一个履约周期顺利收官，自7月16日启动上线交易至12月31日第一履约周期结束，市场整体运行平稳，活跃度稳步提高。碳排放配额累计成交量1.79亿吨，累计成交额76.61亿元，成交均价42.85元/吨，履约完成率99.5%（按履约量计），全国碳市场作为重要的碳定价机制，促进降碳、减污、扩绿、增长有效衔接、协同增效的重要作用初步显现。与此同时，温室气体自愿减排交易进一步推动，截至2021年底，全国累计成交温室气体减排交易体系国家核证减排量（CCER）约4.4亿吨，成交额58.4亿元。上海、北京、深圳、湖北、广东等地结合地方碳市场试点积极开展碳金融产品创新探索，气候投融资试点工作正式启动。

结合国家目标和自身基础，以青岛、成都等为代表的城市在颁布实施温室气体减排和大气污染治理协同相关行动计划、推动大气污染物排放清单和温室气体排放清单融合等方面开展了创新性的工作，取得新的进展和成效。然而总体而言，我国城市空气质量改善和温室气体减排协同还存在很大进步空间。2015—2020年间，全国地级及以上城市中，仅有105个城市实现了PM<sub>2.5</sub>年均浓度和CO<sub>2</sub>排放量协同下降，共有17个城市的PM<sub>2.5</sub>年均浓度和CO<sub>2</sub>排放量均呈现升高态势，大多数城市PM<sub>2.5</sub>浓度和CO<sub>2</sub>排放量未能实现协同下降，减污降碳协同增效工作亟需在城市层面进一步推进。





### 3 结构转型与治理技术

能源结构调整方面，能源利用效率不断提升，2021年单位国内生产总值能耗同比下降2.7%，单位国内生产总值二氧化碳排放同比下降3.8%。煤炭在能源消费总量的占比降至56%，同比下降0.8%。电源结构持续优化，2021年全国发电装机约23.8亿千瓦，同比增长7.9%；水电装机、并网风电、并网太阳能、核电装机、生物质发电装机容量分别占总发电装机容量的16.5%、13.8%、12.9%、2.2%和1.6%，全口径非化石能源发电装机容量11.2亿千瓦，同比增长13.4%，首次超过煤电装机容量。

产业结构调整方面，新产业新业态新模式加速成长，2020至2021年，第二产业增加值

占比由37.8%增加至39.4%、2021年高技术制造业增加值比上年增长18.2%，占规模以上工业增加值比重从13.1%升至15.1%；新能源汽车产量同比增长152.5%，达到367.7万辆。工信部印发修订了钢铁、水泥和玻璃行业产能置换办法，国家发改委等部门联合发布《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021年版）》，推动重点领域落后产能退出，能源利用效率进一步提升。部分省份结合中央精神出台了政策文件，就产业结构优化提升、遏制“两高”项目盲目发展、发展低碳绿色产业等提出新要求。

交通结构调整方面，交通行业能效持续提升，2021年国家铁路单位运输工作量综合能耗同比下降3.9%，民航吨公里油耗较2005下降9.2%。清洁能源替代稳步推进，2021年全国新能源汽车保有量达784万辆，新车销售市场占有率达13.4%，铁路机车和机场场内车辆电动化率、机场和水运岸电使用量持续增高。运输结构逐步优化，全国铁路货运总发送量、水路货物运输量同比分别增长4.9%和8.2%；铁路旅客发送量同比增长18.5%，公路旅客运输量同比降低26.2%。城市绿色出行持续推进，城市轨道交通客运量同比增长34.9%。

建筑能效提升与用能结构转型方面，建筑用能效率进一步提高，截至2020年底，全国城镇累计建成节能建筑面积超过238亿平方米，占城镇民用建筑面积比例超过63%，超低、近零能耗建筑面积近1000万平方米；完成既有居住建筑节能改造面积5.14亿平方米、



公共建筑节能改造面积 1.85 亿平方米。建筑用能清洁化低碳化水平进一步提升，2020 年我国北方采暖建筑面积 156 亿平方米，建筑运行热力的间接碳排放为 4.5 亿吨 CO<sub>2</sub>，在北方地区集中采暖面积和采暖热需求持续增长的同时，实现单位平米的供热能耗和碳排放持续下降。农村建筑用能直接排放进一步减少，截至 2020 年底，清洁取暖试点城市的农村地区通过实施煤改气、煤改电等“热源侧”清洁化改造，清洁取暖率由 9% 提高到了约 28%。

新型电力系统建设方面，以风能、太阳能为代表的新能源电源建设持续推进，截至 2021 年底，风电、光伏发电容量双双突破 3 亿千瓦，均居世界首位。2021 年新增分布式光伏 2928 万千瓦，历史上首次超过集中式电站；累计装机突破 1 亿千瓦。预计到 2030 年，我国风光总装机容量将突破 12 亿 kW，装机占比突破 50%，发电量占比将从 2021 年的 9.5% 增长到 20%–26%。

碳捕集、利用与封存方面，各环节技术水平进步显著，化学吸收法捕集技术、CO<sub>2</sub> 制备合成气和化学品等化工利用技术、浸采采油和强化采油等地质利用技术已完成工业示范，进入商业应用阶段，总体技术水平与国际先进水平相当。示范项目持续推进，截至 2022 年 3 月，已投运 CCUS 示范项目达 39 个，建设中项目 11 个，累计注入封存 CO<sub>2</sub> 超过 200 万吨，具备捕集能力 200–300 万吨/年、注入能力 100–200 万吨/年，示范项目在整体规模、集成程度、离岸封存、工业应用等方面仍与国

“  
3.8%

能源结构调整方面，能源利用效率不断提升，2021 年单位国内生产总值能耗同比下降 2.7%，单位国内生产总值二氧化碳排放同比下降 3.8%。

际先进水平存在一定差距。

大气污染治理持续推进，重点行业超低排放改造方面，截至 2021 年底，近 10.3 亿千瓦煤电机组实现超低排放，节能改造和灵活性改造规模分别为近 9 亿千瓦和超 1 亿千瓦；1.45 亿吨钢铁产能完成全流程超低排放改造，5.36 亿吨产能正在进行中。固定源治理方面，每小时 35 蒸吨以下燃煤锅炉基本淘汰；完成挥发性有机物治理工程超过 5 万项。移动源治理方面，车用柴油、普通柴油、部分船舶用油实现“三油并轨”；2021 年 7 月 1 日起全面实施重型柴油车国六排放标准，累计淘汰黄标车和老旧机动车 2700 多万辆。面源治理方面，全国推广测土配方施肥技术应用面积超过 1.33 亿公顷；秸秆露天燃烧得到有效控制，农作物秸秆综合利用率超 88%；全国整理施工扬尘超过 23 万起；修复矿山土地约 49.6 万公顷，新增绿地超过 1600 万公顷。

## 4 大气成分源汇及减排路径

2021年全国工业、电力、交通部门二氧化碳排放分别同比增长3%、8%和12%；居民消费部门同比下降1%。第一季度全国碳排放同比出现明显反弹，随着疫情防控常态化，第一季度之后全国碳排放趋于平稳，第二和第三季度同比增长8%和2%，第四季度同比下降5%。2015–2020年间，内蒙古、河北、新疆、山西和山东五省碳排放增量贡献超过全国总增量的50%，河南、四川、重庆、北京和吉林五省碳排放呈下降态势。电力部门是2015–2020年碳排放增加的主要贡献者，17个省份的工业部门碳排放下降，部分省份交通和民用部门碳排放也有所下降。

不同模型分析均表明过去20年中国的陆地碳汇呈现增长的趋势，2010s的中国陆地碳汇较2000s增加10%–24%；2010s陆地碳汇约合9–10亿吨CO<sub>2</sub>。大规模的植树造林使我国的森林覆盖率自2000年来增长了4.83%，大幅增加了陆地生态系统的碳汇能力。中国土地利用变化自本世纪初以来始终表现为碳汇效应，总体上为先增后减的趋势，2007年基于土地利用变化形成碳汇达峰值65TgC/yr。

2015–2020年间，我国工业部门CO<sub>2</sub>减排与PM<sub>2.5</sub>污染改善呈现正协同效应，电力供热部门造成的PM<sub>2.5</sub>浓度下降59%，但碳排放增长22%，呈显著负效应，交通、民用部门造成的PM<sub>2.5</sub>浓度下降22%，但碳排放增长8%，同样呈现负效应。仅北京、重庆、河南、四川、吉林五个省（市）实现了CO<sub>2</sub>减排与



PM<sub>2.5</sub>污染改善的正协同效应；其余省份则均呈PM<sub>2.5</sub>污染改善、CO<sub>2</sub>排放上涨的趋势，其中河北、山西、内蒙古、山东等重工业省份的负协同效应尤为显著。

我国以化石燃料为主的一次能源结构决定了碳排放与大气污染具有高度同源性。通过实施温室气体与大气污染物协同减排，有望在2030年实现碳达峰的基础上，使全国主要大气污染物排放量较当前水平下降三分之一以上，推动全国PM<sub>2.5</sub>年均浓度和O<sub>3</sub>浓度年评价值将分别下降至25μg/m<sup>3</sup>和130μg/m<sup>3</sup>左右，全国空气质量达标城市比例提升至80%以上。到2060年全国实现碳中和时，PM<sub>2.5</sub>年均浓度和O<sub>3</sub>浓度年评价值将下降至10μg/m<sup>3</sup>和100μg/m<sup>3</sup>左右。不同的碳中和技术路径选择将显著影响空气质量改善效果，以可再生能源为主的碳中和路径将比以CCS为主的路径带来35%的额外空气质量改善效益。



## 5 健康影响与协同效应

我国居民的  $PM_{2.5}$ 、 $O_3$  和  $NO_2$  暴露水平持续下降，2021 年全国人口加权  $PM_{2.5}$  年均暴露浓度为  $31.2\mu g/m^3$ ，较 2020 年和 2017 年分别下降了 6.8% 和 30.3%；全国人口加权平均的  $PM_{2.5}$  浓度超标天数为 23 天，较 2017 年减少 25 天；因  $PM_{2.5}$  长期和短期暴露相关的成人过早死亡人数分别为 121 万和 6 万，2017–2021 五年间下降幅度分别为 23.9% 和 26.2%。2021 年全国人口加权的年最大 6 个月平均  $O_3$  最大 8 小时浓度相比 2020 年下降了  $3.4\mu g/m^3$ ，人口加权平均的  $O_3$  浓度超标天数为 15.7 天，较 2017 年减少 1.6 天， $O_3$  长期和短期暴露相关的成人过早死亡人数分别为 13 万和 8 万，在 2019–2021 三年间呈现下降趋势。基于不同方法得到的 2021 年全国人口加权  $NO_2$  年均暴露浓度分别

为  $20.6\mu g/m^3$  和  $23.5\mu g/m^3$ ，较 2017 年下降约 20%。

2021 年我国极端天气气候事件呈现多发强发的特点，尤其极端降水事件频发，严重威胁我国人群健康。极端降水及其引发的洪涝灾害可造成因溺水、触电、火灾和身体创伤等意外伤害导致大量人员伤亡。2021 年郑州“7·20”特大暴雨事件造成总计 1478.6 万人受灾，398 人失踪 / 死亡。极端降水事件会影响病原体的繁殖、传播和分布，暴雨洪涝后，急性出血性结膜炎、流感、肺结核、流行性脑膜炎等 11 种传染病发病率显著上升。合肥暴雨洪涝过后缺血性脑卒中和精神分裂症住院风险分别上升 4.8% 和 7.3%。此外，高温热浪、寒潮等其他我国高发的极端

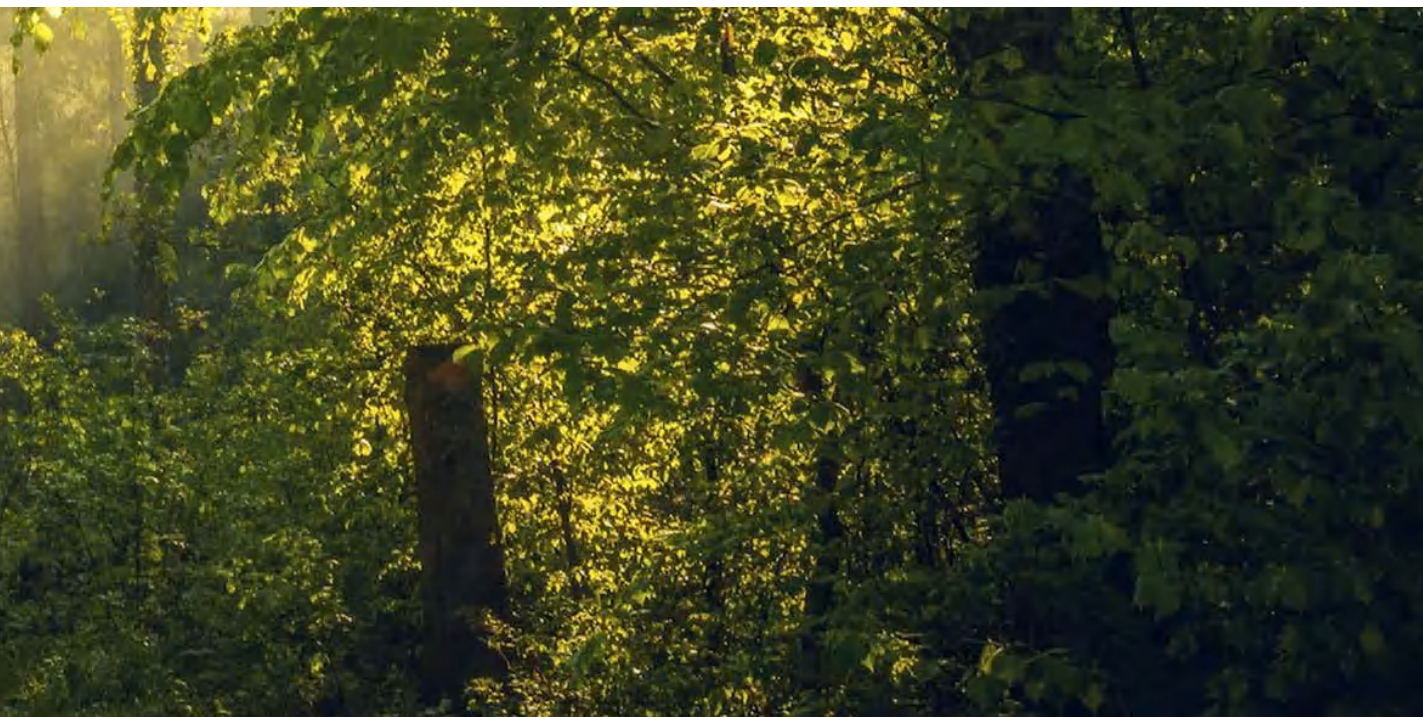


天气气候事件也会对受灾地区造成较大的健康威胁。我国多中心城市研究发现，高温热浪期间死亡风险上升了 15.7%，在过去四十年间，可以归因于热浪的死亡负担增加了 4 倍，呈现出快速增长、非线性和极端性的时间演变特征。寒潮时期人群死亡风险同样显著上升，非意外死亡风险增加 39%。

碳中和目标将给能源结构和技术更迭带来深刻变革，进而显著改善空气质量，提高健康水平。如选择可再生能源主导路径实现 2060 年碳中和目标，可避免过早死亡总人数为 2900-5000 万例。能源系统、生产侧和消费侧通过对低碳商品和服务的优化选择，都将显著减少碳排放和污染物排放，极大改善人群健康。

综上所述，在社会管理层面，我国已经开始主动构建减污降碳相互促进、协同增效的管理制度和政策体系；在技术应用层面，有利于能源、产业、交通等结构向低碳化绿色化调整的技术在加速得到应用。然而，快速经济增长和城镇化带来的能源消费增长需求在目前仍然是驱动全国二氧化碳排放量持续增加的核心因素，也是我国实现减污降碳协同增效需要应对的最大挑战。为取得更大的空气质量改善效果、收获更多的健康效益，我国必须选择以高可再生能源为主的碳中和路径，以碳中和目标推动能源结构和技术更迭、实现深刻变革，进而高质量地推动碳达峰碳中和与清洁空气目标的早日实现。

（相关参考文献未逐一列出，详见 89 页）









## 引言



近年来随着《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等一系列政策措施的实施，我国空气质量明显改善。然而，当前PM<sub>2.5</sub>污染程度仍处于高位，空气质量持续改善任务依然艰巨；同时随着污染治理进程的深入，污染物减排空间逐渐收窄，末端治理的减排难度日益增大。“双碳”战略目标的提出不仅为社会经济高水平发展指明了方向，也为统筹大气污染防治与温室气体减排提供了基本遵循，为空气质量持续改善注入了全新动能。

近年来随着《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等一系列政策措施的实施，我国空气质量明显改善。然而，当前PM<sub>2.5</sub>污染程度仍处于高位，空气质量持续改善任务依然艰巨；同时随着污染治理进程的深入，污染物减排空间逐渐收窄，末端治理的减排难度日益增大。2020年9月，习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布中国将力争2030年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。这一重大战略目标的提出不仅为社会经济高水平发展指明了方向，也为统筹大气污染防治与温室气体减排提供了基本遵循，为空气质量持续改善注入了全新动能。2022年6月，为深入贯彻落实碳达峰碳中和的决策部署，落实新发展阶段生态文明建设要求，协同推进减污降碳，实现一体谋划、一体部署、一体推进、一体考核，生态环境部等七部门联合印发《减污降碳协同增效实施方案》，明确了减污降碳协同增效工作总体部署，遵循减污降碳内在规律，强化源头治理、系统治理、综合治理，切实发挥降碳行动对生态环境质量改善的源头牵引作用，充分利用现有生态环境制度体系协同促进低碳发展，创新政策措施，优化治理路线，推动减污降碳协同增效，促进经济社会全面绿色转型，实现高质量发展。

在能源基金会支持下，由清华大学、生态环境部环境规划院、北京大学和南京信息工程大学联合发起，中国清洁空气政策伙伴关系（CCAPP）组织国内一线学者，通过构建我国空气污染与气候变化协同治理监测指标体系，编制《中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告》，跟踪、梳理、总结与分析我国空气污染

与气候变化协同治理进程，识别面临的挑战并提出解决思路，助力形成政策制定、评价与优化的闭环，推动协同治理政策的落地实施。同时，CCAPP希望通过组织报告编制工作建立长效合作机制，与有志于投身这一领域研究的青年科学家创造交流平台，推动科学家之间的交流合作以及和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。



## 2060年前

2020年9月，习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布中国将力争2030年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。

应对气候变化和治理空气污染在科学机理、目标指标、应对措施、综合效益和治理体系等方面都具有高度的协同效应。本报告以空气污染与气候变化协同治理监测指标为基础，以自然科学和社会科学深度交叉融合为导向，从空气污染与气候变化、治理体系与实践、结构转型与治理技术、大气成分源汇与减排路径、健康影响与协同效益等五个方面出发设定20项指标，通过定期追踪各项指标的进展状况，逐步建立碳中和与清洁空气协同治理理论体系，识别中国在碳中和与清洁空气协同路径上面临的挑战并提出解决思路。

## 01

### 引言

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

## 02

### 空气污染与气候变化

第二章聚焦空气污染与气候变化，通过空气质量变化、不利气象条件变化与气候变化共三项指标，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

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

## 04

### 结构转型与治理技术

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

## 05

### 大气成分源汇及减排路径

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

## 06

### 健康影响与协同效益


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

CCAPP 自 2019 年起每年编写报告总结梳理我国在气候变化与空气污染协同治理方面的进展，收获了积极反响。2022 年是第二次邀请国内顶级专家团队组织编写报告，得到了专家们的大力支持。编写过程中先后组织了八次学术沙龙，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。未来希望能继续集思广益，不断完善监测指标体系，将年度报告打造成为有影响力的品牌，为推动减污降碳协同增效贡献绵薄之力。





# 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”效果的基本监测指标，两者之间又存在着显著的相互作用。人类活动引发的全球气候变暖及其区域响应将导致极端天气气候事件增多、变强，也会加剧区域空气污染，危害人类健康。另一方面，气溶胶可以通过改变辐射强迫来影响气候系统内部反馈，并产生全球影响。因此，实时追踪全国及区域的大气污染和气候变化状况，将有助于更加科学、精准制定“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和防灾减灾的能力。



## 2.1 空气质量变化

2021年，全国339个地级及以上城市和京津冀及周边、汾渭平原、长三角、成渝地区和珠三角五个重点区域的污染物浓度相比2020年均有所下降（大气环境气象公报，2021年），其中SO<sub>2</sub>和NO<sub>2</sub>的区域年平均值全面低于国家一级标准（年均浓度：SO<sub>2</sub> ≤ 20μg/m<sup>3</sup>；NO<sub>2</sub> ≤ 40μg/m<sup>3</sup>）。除汾渭平原外，O<sub>3</sub>区域年平均值也低于国家二级标准（O<sub>3</sub>日8小时滑动平均最大值第90百分位数：O<sub>3</sub>-8H 90Per ≤ 160μg/m<sup>3</sup>）。但是，PM<sub>2.5</sub>在较多地区还未达标（年均浓度：PM<sub>2.5</sub> > 35μg/m<sup>3</sup>）。

2021年全国339个地级及以上城市PM<sub>2.5</sub>年平均浓度为30μg/m<sup>3</sup>，低于国家空气质量二级标准（35μg/m<sup>3</sup>），仍高于国家空气质量一级标准（15μg/m<sup>3</sup>），但相比2015年（45μg/m<sup>3</sup>）下降34.8%（图2-1a）。2015年至2021年，全国339个地级及以上城市大气PM<sub>2.5</sub>浓度总体呈持续下降态势，但下降情况相较之前有减缓趋势。值得注意的是，2020-2021年间，京津冀及周边、汾渭平原和长三角地区PM<sub>2.5</sub>浓度持续下降，下降程度远强于全国及其他地区；而成渝地区和珠三角地区PM<sub>2.5</sub>浓度有小幅反弹。考虑到气象条件和2020年开始的新冠疫情对我国空气质量年际变化的影响，基于污染物浓度的三年滑动平均值对空气质量的变化进行了评估。如图2-1b所示，2015-2021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呈现持续下降，显示出“十四五”阶段的第一年大气污染防治措施取得了较显著的成绩。

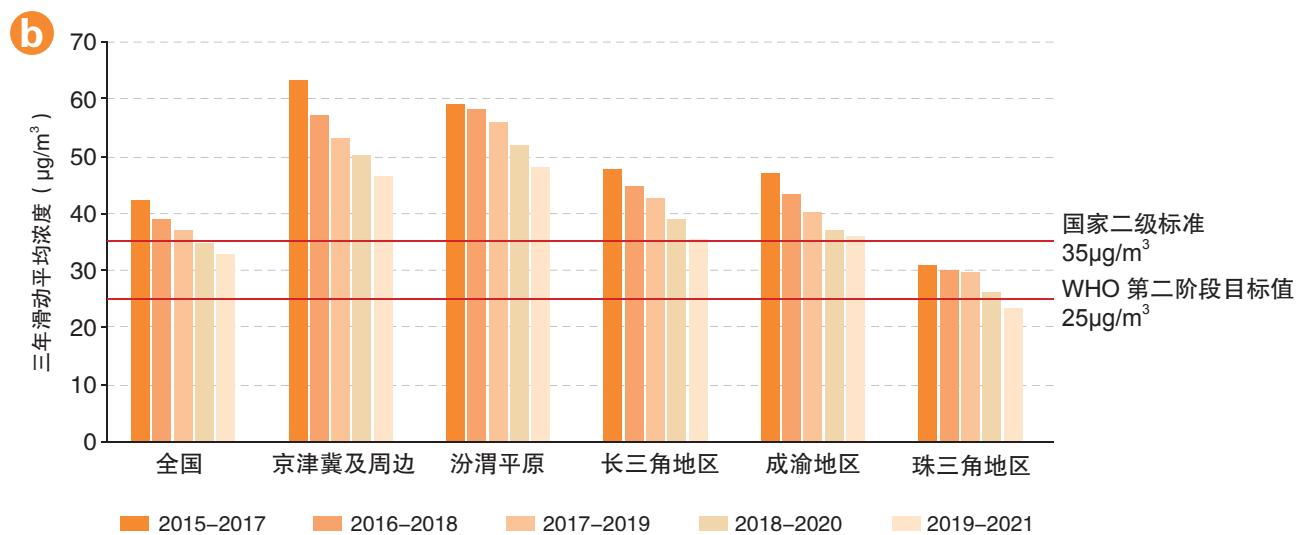
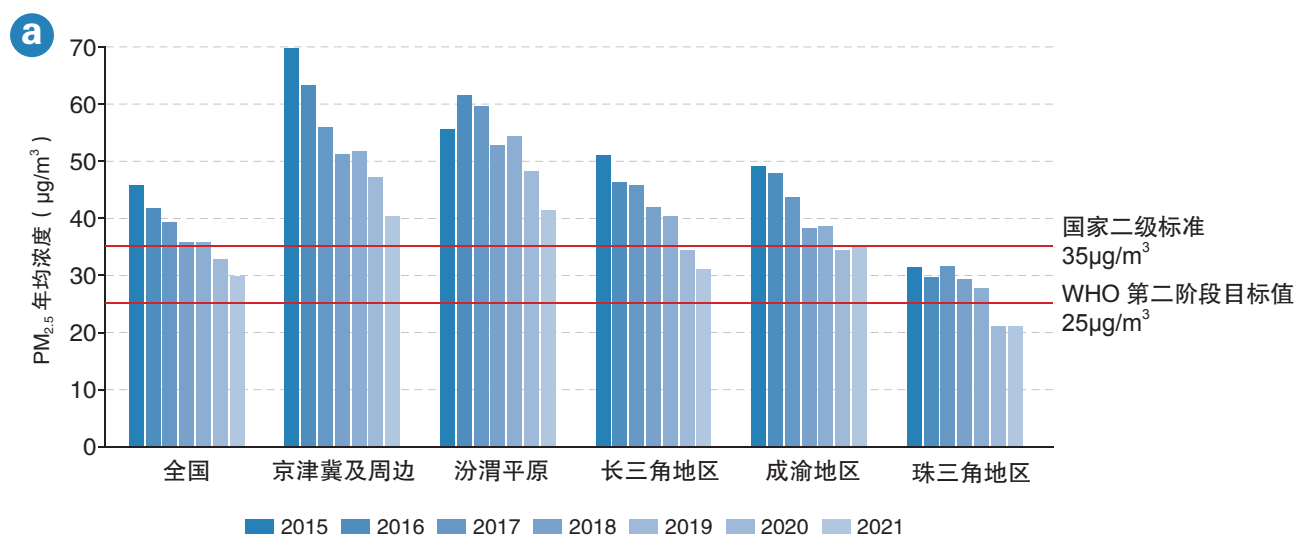
2021年全国339个地级及以上城市O<sub>3</sub>日最大8小时平均值第90百分位数浓度范围为94-197μg/m<sup>3</sup>，年平均浓度为137μg/m<sup>3</sup>，相比2020年（138μg/m<sup>3</sup>）下降了0.7%（图2-1c）。2021年臭氧年均评价价值超过国家二级标准的城市数量为50个，超标占比达14.7%。2015年至2019年全国城市大气O<sub>3</sub>浓度总体呈上升趋势，2019年后呈波动态势（图2-1c）。2021年成渝地区、京津冀及周边和长三角地区相较2020年大气O<sub>3</sub>浓度分别下降了8.5%、5.3%和0.7%；而汾渭平原和珠三角地区重点区域相较2020年分别上升2.5%和3.4%。从三年滑动平均来看（图2-1d），2015-2020年间全国及重点区域O<sub>3</sub>浓度持续上升，而2020-2021年间全国及重点区域O<sub>3</sub>浓度出现持平或者小幅度下降。

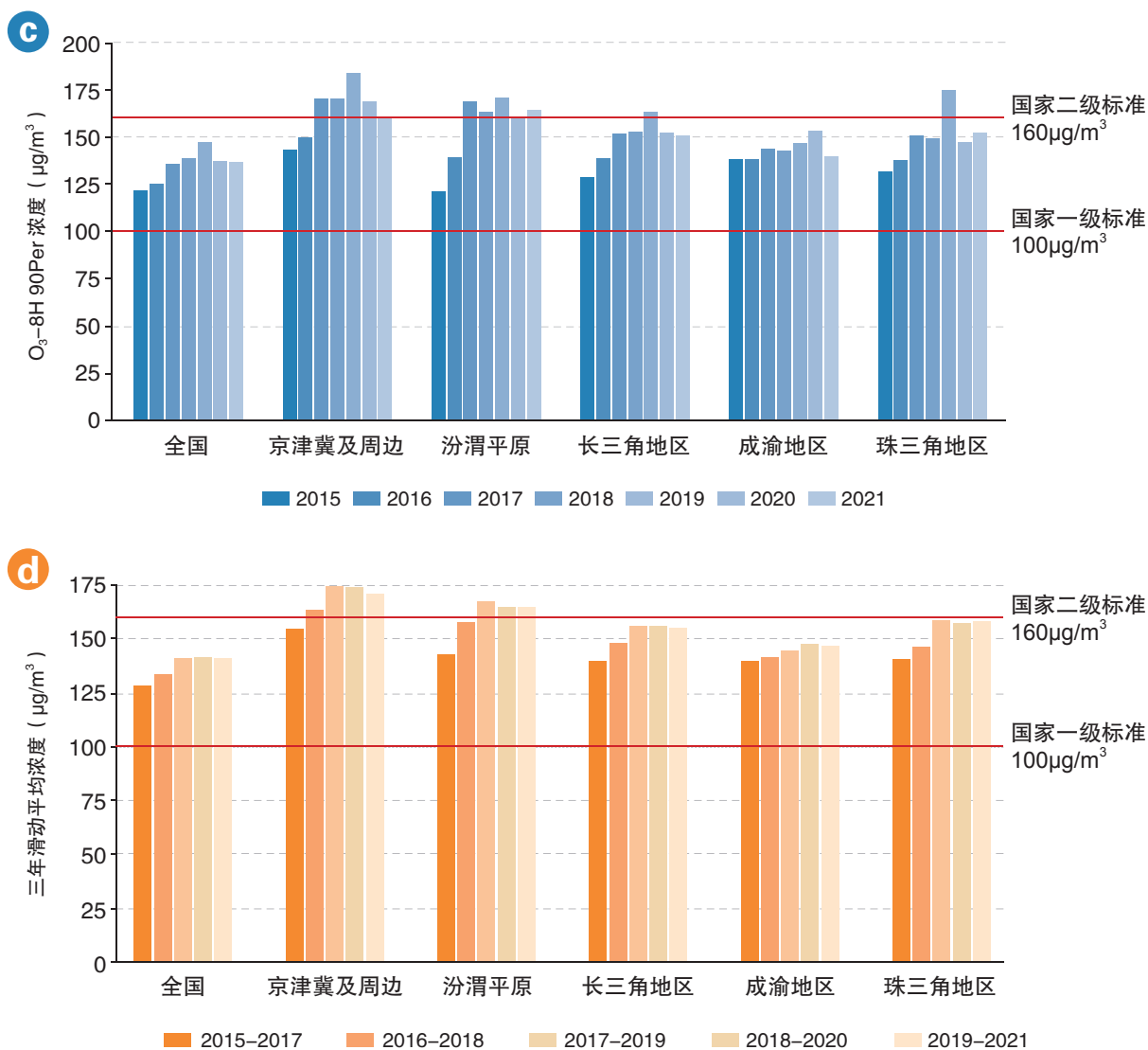


2021年全国PM<sub>2.5</sub>年均浓度低于国家二级标准(35μg/m<sup>3</sup>)的城市数量为238,相比2015年(106个城市)增长125%。在主要区域中,珠三角地区2021年所有城市均达到国家二级标准;长三角地区2021年达标城市数量为30个,相比2015年(3个)增长900%;汾渭和成渝地区达标数量与往年基本持平。若对标WHO第二阶段目标值(25μg/m<sup>3</sup>),2021年全国339个地级及以上城市PM<sub>2.5</sub>年均浓度低于WHO第二阶段目

标值的城市数量为125个城市,珠三角2021年评价全面达到WHO第二阶段目标值,京津冀及周边地区低于WHO第二阶段目标值城市数量仅有一个,汾渭平原和成渝地区各城市评价均高于WHO第二阶段目标值。

2015-2021年全国及重点区域O<sub>3</sub>-8H90Per达国家二级标准(160μg/m<sup>3</sup>)城市数呈现“V”型,2015-2019年间达标城市数量从318个下降至234个,下降26.4%,



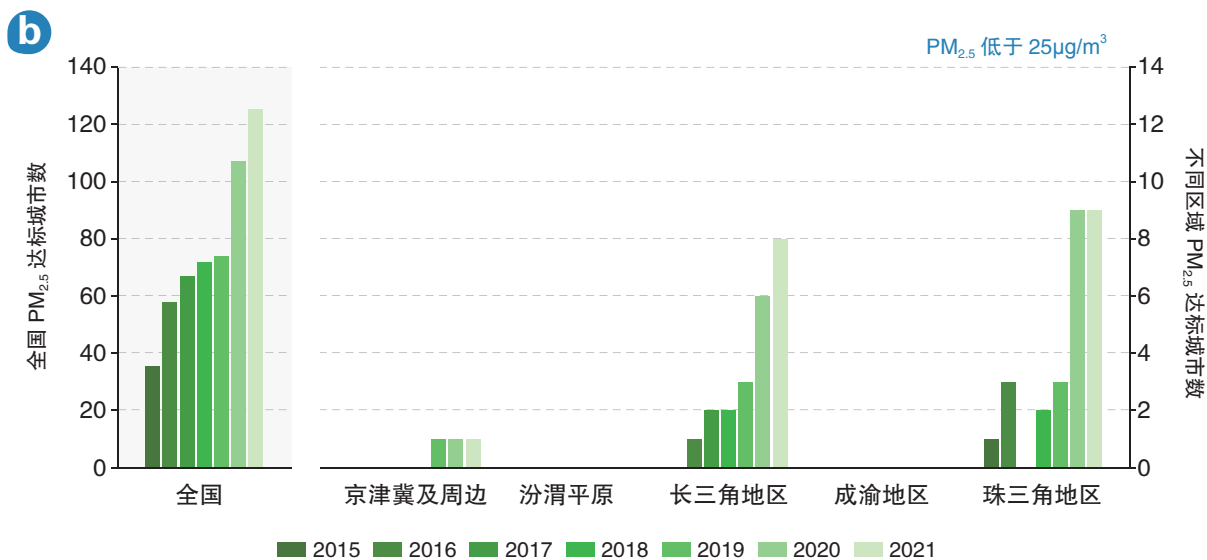
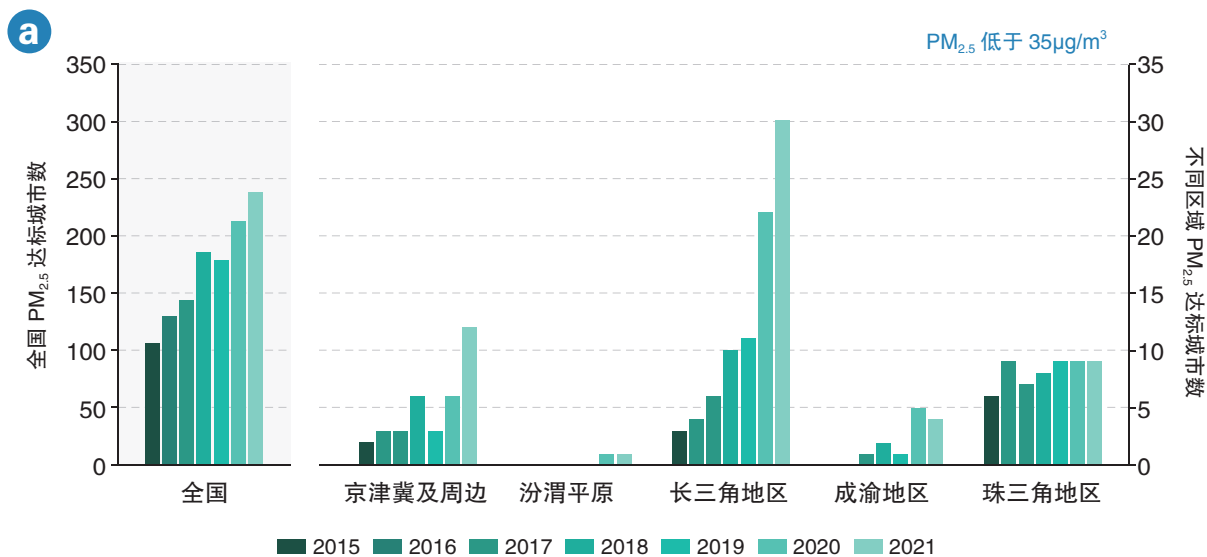


**图 2-1 2015 年至 2021 年全国及重点区域 PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub> 日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数的 (a, c) 平均浓度变化以及 (b, d) 三年滑动平均浓度**

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

2019–2021 年间，达标城市数量持续上升，2021 年全国 O<sub>3</sub>-8H 90Per 年均浓度达标的城市数量为 289 个城市。京津冀及周边和长三角地区达标城市数呈较为显著的“V”型，成渝和珠三角地区达标城市数变化不明显。

2021 年全国 339 个地级及以上城市重度及以上污染天数占比为 1.3%，与 2020 年基本持平（1.2%），相比 2015 年（3.1%）下降 58%，说明在我国大气污染治理过程中，对重度及以上污染天的控制取得了显著成效。与





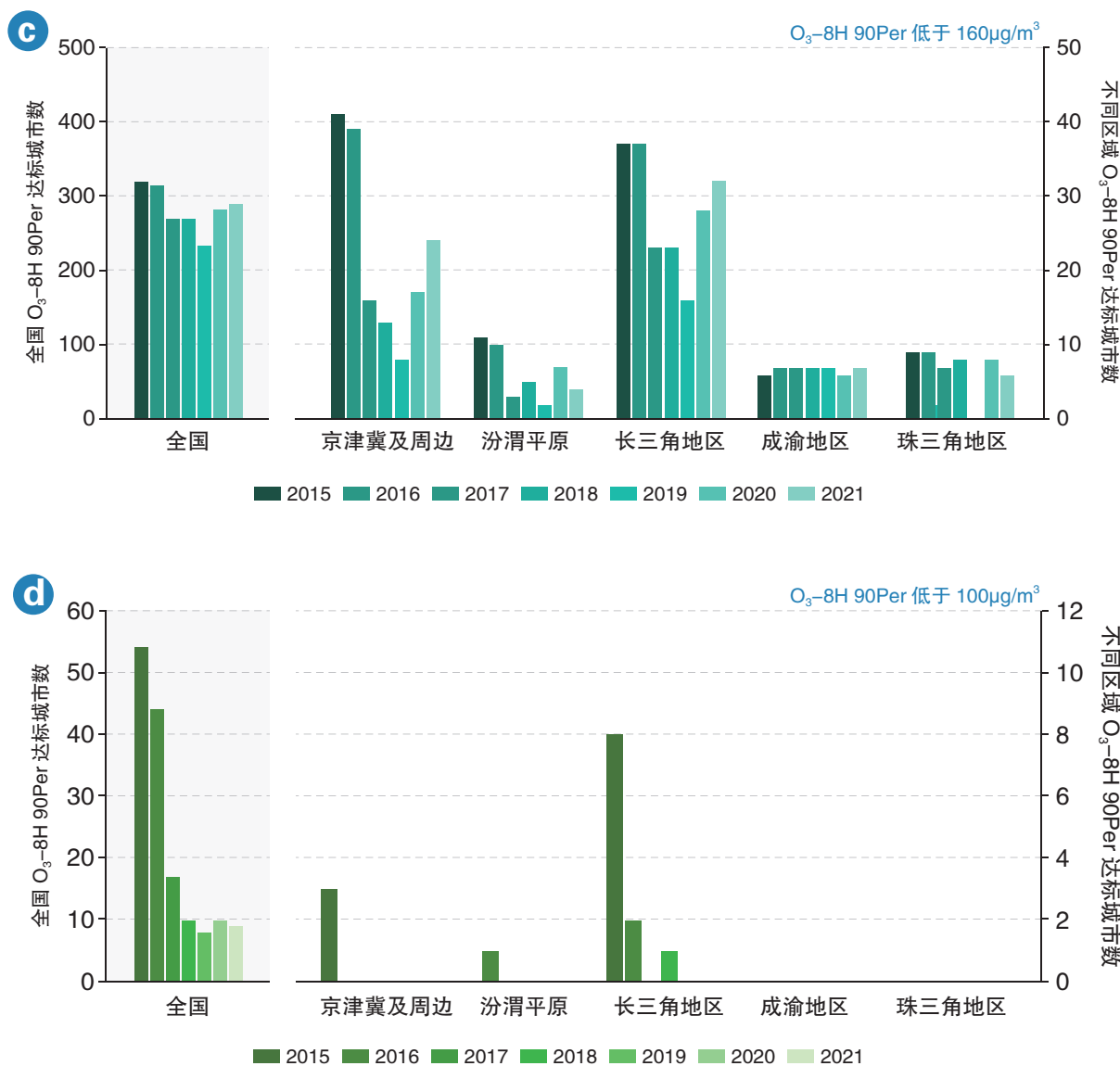


图 2-2 2015 年至 2021 年全国及重点区域 (a, b) PM<sub>2.5</sub> 年均浓度达标城市数 (PM<sub>2.5</sub> 年均浓度分别低于 35μg/m<sup>3</sup> 和 25μg/m<sup>3</sup> 的城市数量), 以及 (c, d) O<sub>3</sub> 日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数的平 年均浓度达标城市数 (O<sub>3</sub>-8H 90Per 年均浓度分别低于 160μg/m<sup>3</sup> 和 100μg/m<sup>3</sup> 的城市数量)

此同时, 重污染期间 PM<sub>2.5</sub> 浓度峰值也大幅下降。例如, 2015 年 12 月北京市的雾霾事件中, 日均 PM<sub>2.5</sub> 浓度峰值高达 486μg/m<sup>3</sup>; 尽管 2021 年 2 月北京市也发生了重污染过程, 但浓度峰值为 207μg/m<sup>3</sup>, 相比 2015 年明显下降。在重点区域中, 2021 年京津冀及周边

地区和汾渭平原仍存在 3.1% 的重度及以上污染天数, 但相比于 2015 年分别下降 70% 和 38%, 污染治理效果明显; 长三角地区和成渝地区的重度及以上污染天数分别仅占比 0.4% 和 0.2%; 珠三角地区已经连续两年无重度及以上污染。

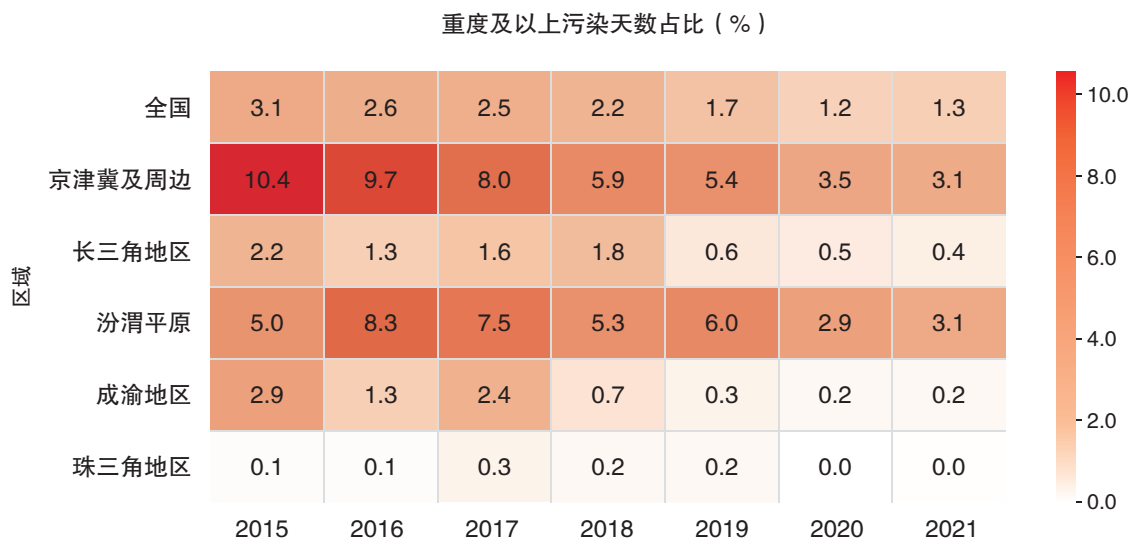


图 2-3 2015 年至 2021 年全国及重点区域重度及以上污染天数占比情况



## 2.2 不利气象条件变化

气溶胶污染物的形成、积累和扩散等与多种气象条件密切相关。PM<sub>2.5</sub> 气象条件评估指数 (EMI) 可以表征气象条件变化对 PM<sub>2.5</sub> 浓度的影响, EMI 指数值越小代表气象条件越有利于 PM<sub>2.5</sub> 浓度降低 (刘洪利等, 2018)。静稳指数则是表征重污染天气的重要指标 (张恒德等, 2017), 指数越高, 大气自净能力越弱。O<sub>3</sub> 的生成、消耗及前体物的排放, 也与气象条件密切相关 (Hu et al., 2018)。O<sub>3</sub> 气象条件评估指数能够定量表征大气辐射、气温、湿度、风等气象要素对臭氧的综合影响, 其值越高代表气象条件越有利于 O<sub>3</sub> 浓度升高。

从 2016–2021 年全国及重点区域 EMI 指数逐年变化, 2021 年全国平均 PM<sub>2.5</sub> 污染气象条件与 2020 年基本持平, 北方大部地区气象条件有利于 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降, 南方部分地区气象条件有利于 PM<sub>2.5</sub> 浓度升高 (图 2-4)。值得注意的是, 2021 年京津冀及周边、长三角和汾渭平原等地区的大气扩散条件较近 5 年平均和 2020 年均偏好, 同时这些地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度的下降程度远强于全国平均及其他地区, 这与有利的大气污染物扩散条件密切相关。就京津冀及周边地区而言, 2021 年平均气象条件可使 PM<sub>2.5</sub> 较 2020 年下降约 7.8%, 较近 5 年平均下降 6.8%; 就汾渭平原而言, 气象条件可使 PM<sub>2.5</sub> 较 2020 年下降 1.9%, 较近 5 年平均下降 7.2%; 就长三角地区而言, 气象条件可使 PM<sub>2.5</sub> 较 2020 年下降 0.1%, 较近 5 年平均下降 7.0%。2020–2021 年间, 成渝平原和珠三角地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度有小幅反弹, EMI 指数

在该地区也出现了明显的上升, 表明了不利气象条件的显著贡献。

PM<sub>2.5</sub> 重度污染一般发生在冬季静稳天气条件下 (皮冬勤等, 2019; Zhang et al., 2014)。2021 年冬季京津冀、长三角和汾渭平原等地区的静稳天气发生概率 (图略) 较 2020 年同期和近 5 年同期均偏低。相应地, 京津冀和汾渭平原地区重污染天气占比分别由 2016 年的 9.7% 和 8.3% 下降至 2021 年同样的 3.1%, 长三角地区由 1.3% 下降至 0.4%。以北京为例, 2021 年 3 月 4–14 日 (冬残奥会同期) 出现了 9 天的 PM<sub>2.5</sub> 污染天气, 其中重度污染 2 天, 中度污染 3 天, 污染天气占比 82%。该时间段内, 以南风为主, 平均风速仅为 1.9 m/s, 高湿条件 (66.2%) 加速二次反应进一步加重了污染程度。污染日的静稳指数均大于 10 (图 2-5), 不利于污染物扩散。



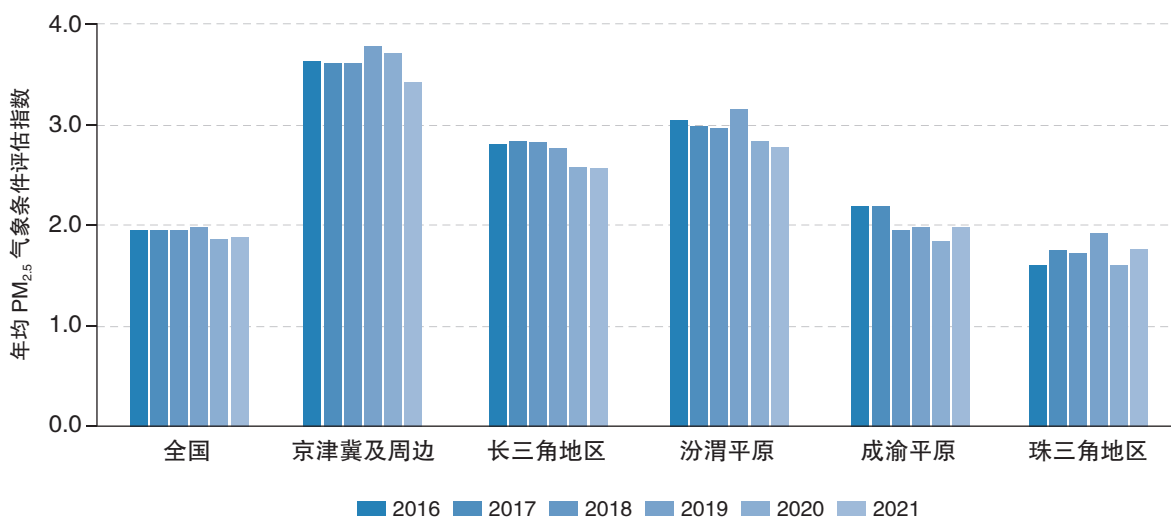


图 2-4 2016 年至 2021 年全国及重点区域 PM<sub>2.5</sub> 气象条件评估指数变化，  
图中的 PM<sub>2.5</sub> 气象条件评估指数构建方法源自：刘洪利等（2018）

从 2016 年至 2021 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，2021 年 5-9 月全国平均臭氧气象条件与 2020 年基本持平，较近 5 年同期平均下降 1.4%。京津冀等地受降水增多等影响，气象条件有利于臭氧浓度下降；我国南方大部地区受气温升高等影响气象条件有利于臭氧浓度升高（图 2-6）。具体来说，京津冀及周边地区 2021

年 5-9 月气象条件使 O<sub>3</sub> 较 2020 年同期下降 5.9%、较近 5 年同期平均下降 5.6%，其 O<sub>3</sub> 浓度在 2019 年达到最高值后连续下降，二者近三年下降趋势一致。京津冀及周边地区近三年 O<sub>3</sub> 浓度持续下降且降幅远超其他地区，这与有利的大气条件密切相关。类似地，长三角地区臭氧气象条件在 2019 年偏差，随后转好，气象条件可使 2021 年 5-9 月 O<sub>3</sub> 较 2020 年

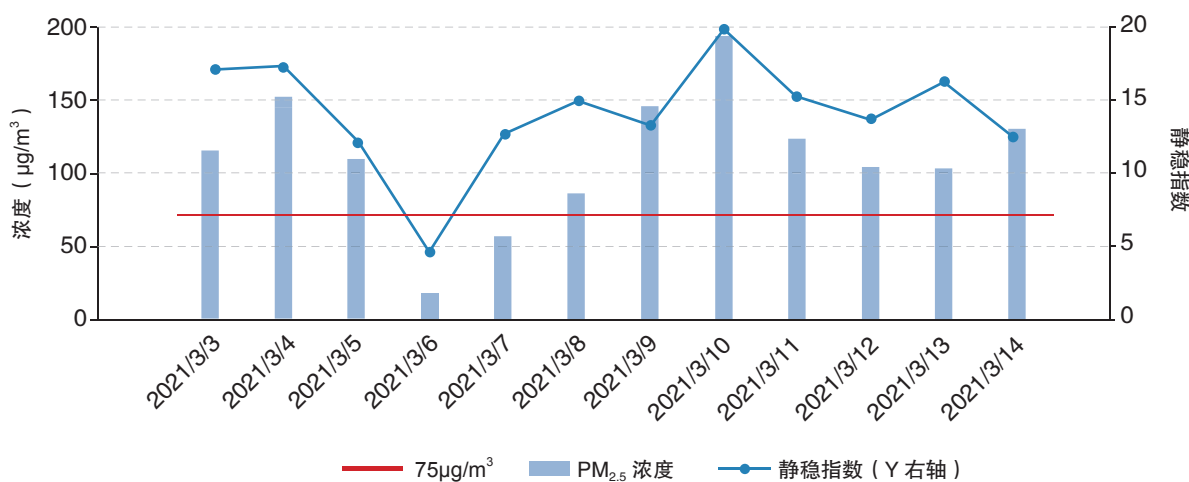


图 2-5 2021 年北京地区典型连续污染过程 PM<sub>2.5</sub> 浓度和静稳指数随时间的变化，  
图中的静稳指数构建方法源自：张恒德等（2017）

下降 1.1%，较近 5 年同期平均下降 1.6%。在汾渭平原，2021 年 5–9 月臭氧气象条件较 2020 年同期下降 1.5%、较近 5 年同期平均下降 2.7%。成渝平原臭氧气象条件在 2020 年偏差，随后转好，气象条件可使 2021 年 5–9 月 O<sub>3</sub> 较 2020 年下降 5.2%，较近 5 年同期平均下降 3.3%。2021 年，珠三角地区 O<sub>3</sub> 浓度出现小幅反弹，臭氧气象条件评估指数较 2020 年同期上升 3.4%、较近 5 年平均上升 2.7%，气象条件明显转差，对臭氧浓度升高有所贡献。

2021 年 6 月 11–13 日，北京地区为轻度–中度臭氧污染（图略），平均臭氧每日最大

8 小时浓度为 210μg/m<sup>3</sup>，12 日达到中度污染。相应地，臭氧气象指数由前期的 73 逐渐升高最高至 256。在此污染过程期间，北京市气温显著升高，13 日日均气温 30.4℃、最高温度高达 35.1℃，为本月最高；总辐射量为 24.2 MJ/m<sup>2</sup>，平均日照时数为 9 h；风速整体小于 2 m/s，且相对湿度较低，未出现降水过程。

综上所述，不利气象条件的变化对 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度上升或下降贡献明显，尤其是对重污染过程的形成有显著促进作用。在制定大气污染防治措施时需关注或预测气象条件的变化，综合规划来巩固 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度的下降趋势。

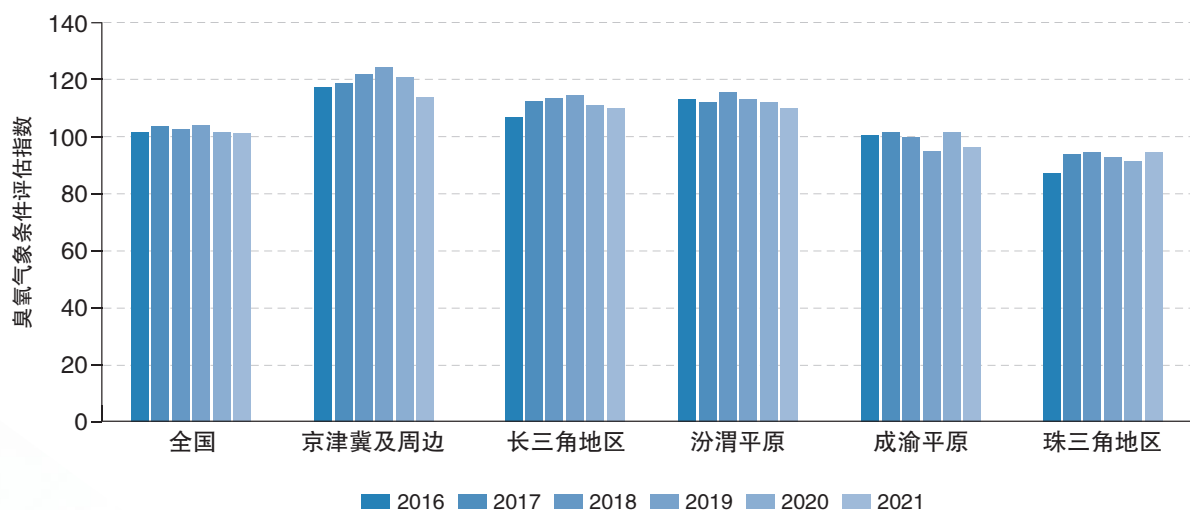


图 2-6 2016–2021 年 5–9 月全国及重点区域臭氧气象条件评估指数变化，图中的臭氧气象条件评估指数构建方法源自：Hu et al., (2018)

## 2.3 气候变化

毋庸置疑，人类活动影响已造成大气、海洋和陆地变暖。中国平均的升温速率明显高于同期全球平均，是全球气候变化的敏感区。气候变化，包括更频繁和更剧烈的极端事件，已经对自然和人类系统造成了广泛的不利影响。中国是气候变化的影响显著区之一，且不利影响已经显现，并可能在未来进一步加剧。

2021年，全球平均大气CO<sub>2</sub>浓度为414.7 ppm，较2020年上升了2.66 ppm。大气CH<sub>4</sub>浓度达到1895.7 ppb，较2020年上升了17 ppb，是1983年系统观测CH<sub>4</sub>以来最大的年际增幅。此外，N<sub>2</sub>O和SF<sub>6</sub>也较2020年分别增加了1.2和0.38 ppb（NOAA，2022）。全球人为排放继续向着使全球变暖加剧的方向行进，增大了应对气候变化的难度。适应和减缓全球气候变化的行动刻不容缓，任何延迟都将关上机会之窗，让未来的地球变得不再宜居（IPCC，2022）。

2021年，我国气候暖湿特征明显，涝重于旱。全国平均气温较常年（1981–2010年）偏高1.0℃，为1951年以来历史最高，四季气温均偏高，夏秋南方高温持续时间长。冬季北方采暖耗能普遍较常年同期减少，但夏季全国大部地区降温耗能相应较常年同期增加。全国平均降水量较常年偏多6.7%，北方降水量为历史第二多（国家气候中心，2022）。2021年，北方沙尘天气

出现早，强沙尘暴过程多（Yin et al., 2022）。2021年，全国平均大气自净能力指数为3.2吨/天/平方公里，较2001–2020年平均值偏高12.4%，较2013年偏高12.3%，大气自净能力总体偏强（国家气候中心，2022）。

2021年也是中国极端天气气候事件多发年，给各地带来了严重的灾害（图2-7）。2021年1月–2月，中国东部发生了极端冷暖转换。1月中国中东部频繁受寒潮天气影响，大部地区气温持续偏低；2月全国平均气温较常年同期偏高2.9℃，为1961年以来历史同期最高。如此强烈的冷暖转换不仅与气候系统内部变率有关（Zhang et al., 2021c），还可能与全球变化背景下北极增暖和变率增强有关。2021年，中国的沙尘天气具有发生时间早、强度强、影响范围广等特点。3月14–15日强沙尘暴过程为近10年来最强，北方多地PM<sub>10</sub>峰值浓度超过10000μg/m<sup>3</sup>，北京PM<sub>10</sub>最大浓度超过7000μg/m<sup>3</sup>。这与蒙古国生态环境恶化



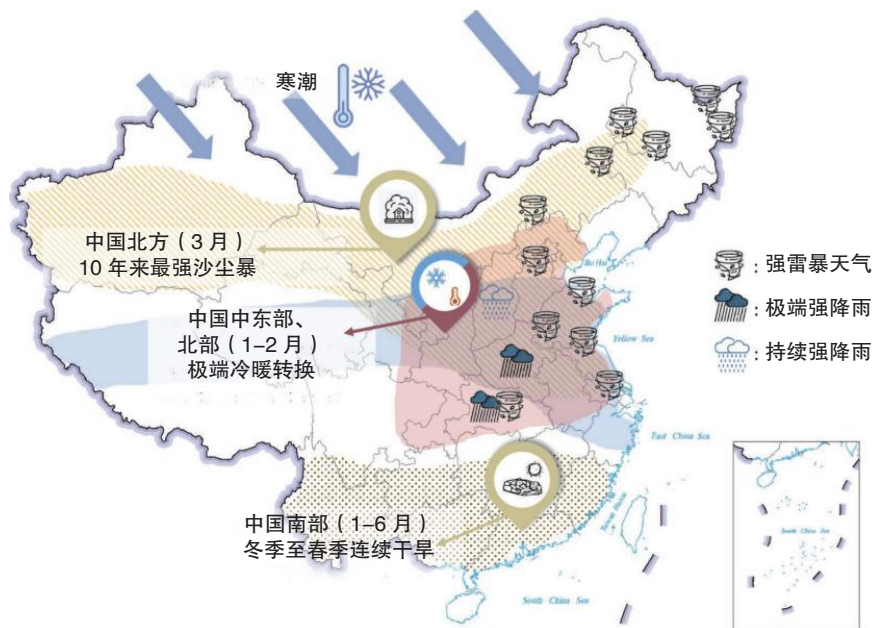


图 2-7 2021 年中国地区重大极端天气气候事件 (Zhou et al., 2022)

及其气候异常密切相关 (Yin et al., 2022)。2021 年 1-10 月, 华南地区出现连续的中等强度以上干旱, 对农业生产、森林防火、生活生产等产生了不利影响。然而, 7 月河南多地出现破纪录极端强降水事件, 郑州 1 小时最大雨强 (201.9 mm) 创下中国大陆的新纪录 (Zhou et al., 2022)。第六次 IPCC 评估报告明确指出: 从长期趋势上看, 人类活动已造成中国地区极端高温、极端干旱和强降水频率增加、强度增强, 但其对极端降水的归因在时间和空间上还存在一定的不确定性。但是, 具体到 2021 年单个极端事件是否以及能在多大程度上归因于人类活动或全球变暖还缺乏充足的研究, 气候系统内部变率所起的作用也还缺乏系统地分析。

随着未来人类活动进一步加剧, 全球遭遇极端气候灾害的风险将显著增加, 中国地区亦是如此 (IPCC, 2021)。随着未来全球碳排放的增加, 中国地区将遭遇更多强度更强的高温

热浪事件 (图 2-8a)。在高排放情景 (SSP5-8.5) 下, 近期 (2021-2040 年) 中国地区年最高温相比当前气候增加约 1.3°C, 中期 (2041-2060 年) 将增加约 2.6°C, 末期 (2081-2100 年) 将增加约 5.1°C (Zhu et al., 2021)。但如果采取严格的减排措施, 使未来排放遵循 SSP1-2.6 情景时, 到 21 世纪末期, 中国区域年最高温增加幅度将被控制在 2.0°C 以内。如果将全球增温控制在 1.5°C 时, 中国地区遭遇高温热浪灾害的风险将减少 36%-87% (Zhang et al., 2020; Zhang et al., 2021a)。但是, 未来中国区域极端最低温度增幅大于极端最高温度, 极端冷事件发生概率明显减少。

未来中国极端降水事件也很可能显著增加、强度增强 (图 2-8b)。当前“十年一遇”、“五十年一遇”等极端降水事件将变得更加频繁 (Li et al., 2021a; Xu et al., 2022)。即使在 SSP1-2.6 情景下, 到本世纪末期中国区域极端

降水发生概率相比当前气候将增加约 20%；在 SSP5-8.5 情景下将增加 60% 以上（Chen et al., 2021a）。未来全球持续增暖也将使中国区域发生干旱的风险显著增加，但如果将未来全球增温控制在 1.5°C 时，相比增温 2.0°C，中国区域干旱发生概率将减少约 9%，极端干旱发生概率将减少约 8%，尤其在中国西南地区，极端干旱的发生概率将减少约 21%（Chen et al., 2017; Chen et al., 2019a）。此外，全球碳排放增加引起的变暖也将导致中国区域未来遭遇高温干旱、暴雨洪涝、滑坡泥石流等复合型极端灾害的风险明显增加（Chen et al., 2021b; 周波涛等, 2021; 余荣等, 2021）。

同时，随着未来全球持续变暖，北极涛动增强，东亚冬季风减弱。中国东部对流层低层快速增温，静稳天气增加，这些不利气象条件都将使得中国东部未来发生霾或臭氧污染天气的概率明显增加（Cai et al., 2017; Yang et al., 2021; Wang et al., 2022a）。将气溶胶排放限定在当前水平而温室气体排放遵循 RCP8.5 情景时，到本世纪末中国 PM<sub>2.5</sub> 浓度以及污染日数相比当前气候仍明显增加（Chen et al., 2019b）。以上气象条件的变化将使得“十四五”期间基本消除重污染天气的目标面临巨大的挑战。

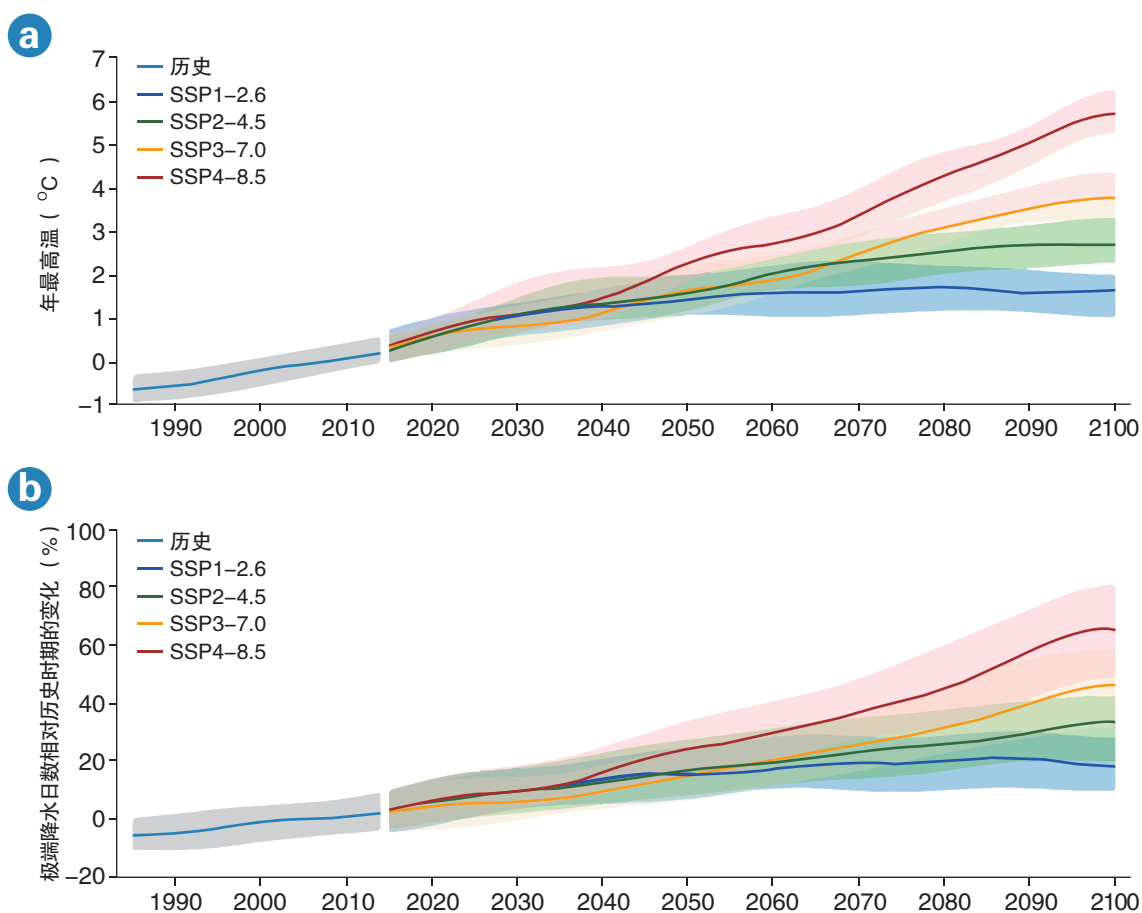


图 2-8 在不同共享社会经济路径情景下，CMIP6 多模式集合预估的中国区域 (a) 年最高温和 (b) 极端降水日数相对历史时期的变化 (Zhu et al., 2021) (Chen et al., 2021a)







The image shows a modern building facade with a green wall and a curved, metallic, ribbed structure. The green wall is composed of various plants and ferns, creating a lush, vertical garden effect. The building's structure is made of dark, metallic, ribbed panels that curve and wrap around the building. A street lamp is visible in the foreground, and a small tree is on the left side. The overall scene is a blend of nature and modern architecture.

# 治理体系与实践

实现减污降碳协同增效正在成为促进经济社会发展全面绿色转型的总抓手。进入“十四五”之后，在新发展理念的指引下，生态环境保护领域的战略规划和具体政策都逐渐将大气污染防治与温室气体减排工作进行协调统筹。本章旨在通过跟踪梳理国家协同治理体系建设进程、协同治理经济政策实施应用、地方协同工作实践及效果，描绘过去一年中国家和地方在大气污染防治与温室气体减排协同推进工作的新进展以及主要的机遇和挑战。

# 3. | 协同治理体系建设

伴随着我国进入新发展阶段，进一步深入理解、认识、实践习近平生态文明思想将在持续推动中国特色社会主义建设中发挥更加重要的作用。在这一背景下，“减污”与“降碳”的相互支撑和相互促进成为了“十四五”期间在生态环境领域贯彻新发展理念、构建新发展格局的重要体现。习近平总书记在2021年4月30日中共中央政治局第二十九次集体学习中指出“要把实现减污降碳协同增效作为促进经济社会发展全面绿色转型的总抓手”，在2022年1月24日中共中央政治局第三十六次集体学习中指出“要把‘双碳’工作纳入生态文明建设整体布局经济社会发展全局，坚持降碳、减污、扩绿、增长协同推进”。减污降碳协同治理上升成为国家经济社会发展战略全局的重要拼图。

## 协同战略规划逐步成形

在国家层面2021年以来出台的“十四五”及更长时间的战略和规划文件中，都体现出了减污和降碳相互交融、相互协同的新要求。2021年3月发布的《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》中，明确提出“协同推进减污降碳，不断改善空气、水环境质量，有效管控土壤污染风险”。2021年9月，中共中央、国务院发布《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》，其作为碳达峰碳中和“1+N”政策体系的纲领性文件，在其“指导思想”中指出要“坚定不移走生态优先、绿色低碳的高质量发展道路，确保如期实现碳达

峰、碳中和”，并要求将“有关落实情况纳入中央生态环境保护督察”。2021年11月，中共中央、国务院发布《关于深入打好污染防治攻坚战的意见》，明确提出“以实现减污降碳协同增效为总抓手”和“统筹污染治理、生态保护、应对气候变化”。2022年6月，生态环境部等7部门联合印发《减污降碳协同增效实施方案》（环综合〔2022〕42号），对“十四五”时期以及到2030年协同治理工作做出全方位多要素的部署安排，推动形成广泛的减污降碳协同增效统一战线。以上文件的出台，为如何以降碳为引领推动经济社会发展全面绿色转型、强化多污染物与温室气体协同控制，如何以减污为重要手段促进降碳目标实现提供了方向和指引。





## 协同治理制度加紧完善

管理制度的跟进是保障战略规划落地的重要前提。2021年，生态环境部以贯彻落实《关于统筹和加强应对气候变化与生态环境保护相关工作的指导意见》（环综合〔2021〕4号）为契机，围绕减污降碳协同，在环评、监测、监管、统计等领域完善既有的管理制度，推动将碳排放管理需求融入到生态环境管理制度中。

在环境影响评价方面，陆续出台了《关于加强高耗能、高排放建设项目的生态环境源头防控指导意见》（环环评〔2021〕45号）《关于开展重点行业建设项目碳排放影响评价的试点通知》（环办环评函〔2021〕346号）《关于在产业园区规划环评中开展碳排放评价试点的通知》（环办环评函〔2021〕471号）等文件，推动将温室气体管控纳入环评管理。

在环境监测方面，印发了《碳监测评估试点工作方案》（环办监测函〔2021〕435号），要求到2022年底在区域、城市和重点行业三个层面开展碳监测评估试点工作，探索建立碳监测评估的技术方法体系，为应对气候变化工作提供监测支撑。

在环境监管方面，印发了《企业温室气体排放报告核查指南（试行）》（环办气函〔2021〕130号），并在2021年10-12月组织了电力行业碳排放报告质量监督帮扶专项行动，加强对技术机构的监督管理，规范咨询、核查、监测服务行为，保障碳市场平稳健康运行。

在环境统计方面，印发实施了《排放源统计调查制度》（国统制〔2021〕18号），为同时掌握全国污染物和温室气体的排放与治理情况提供了统计方法基础。在此基础上，《排放源统计技术规定》也将火电和供热行业的温室气体纳入排放统计核算体系。



## 3.2 协同治理经济政策

经济政策是调动大气污染物和二氧化碳排放主体充分发挥主观能动性，通过实施技术和优化管理实现减排的重要手段。由于受到历史上管理部门责任分工的影响，我国与大气污染物排放和二氧化碳排放相关的经济政策相对独立、缺乏有效融合。上一年度报告中，本指标着重介绍了以大气污染物排放控制为导向的经济政策；在本年度报告中，本指标将结合 2021 年全国碳排放权交易市场启动这一背景，重点分析影响碳排放的交易政策和投融资政策。

**全国碳排放权交易市场**（以下简称全国碳市场）是应对气候变化基础制度创新，是控制碳排放的激励和约束机制，建立完善全国碳市场是推动实现我国碳达峰、碳中和的重要政策工具。

2020 年底，生态环境部启动全国碳市场第一个履约周期（2021 年 1 月 1 日 -2021 年 12 月 31 日），纳入发电行业重点排放单位 2162 家，年覆盖温室气体排放量约 45 亿吨二氧化碳，是全球覆盖温室气体排放量最大的碳排放权交易市场。

自 2021 年 7 月 16 日启动上线交易至 2021 年 12 月 31 日第一履约周期结束，全国碳市场整体运行平稳，市场活跃度稳步提高。碳排放配额累计成交量 1.79 亿吨，累计成交额 76.61 亿元，成交均价 42.85 元/吨，

其中挂牌协议交易累计成交量 3077.46 万吨（占 17.2%），成交额 14.51 亿元；大宗协议交易累计成交量 1.48 亿吨（占 82.8%），成交额 62.10 亿元。2021 年 12 月 31 日（履约日）收盘价 54.22 元/吨，较首日开盘价上涨 12.96%。

2021 年 12 月 31 日，全国碳市场第一个履约周期顺利收官，履约完成率 99.5%（按履约量计），海南、广东、上海、湖北、甘肃 5 省市重点排放单位履约完成率为 100%。全国碳市场作为控制温室气体排放政策工具、促进企业减排温室气体，加快绿色低碳转型的作用初步显现。

### 温室气体自愿减排交易市场

温室气体自愿减排交易是基于自愿减排

项目产生的减排量的交易机制，支持可再生能源、节能增效、林业碳汇等温室气体减排项目的发展，助推能源结构调整、节能和提高能效、生态保护补偿。截至 2021 年底，全国累计成交温室气体减排交易体系国家核证减排量（CCER）约 4.4 亿吨，成交额 58.4 亿元，均价 13 元/吨 CO<sub>2</sub>e，上海、广东、北京试点碳市场 CCER 成交量位居前三位。此外，全国碳市场重点排放单位累计使用 3200 余万吨 CO<sub>2</sub>e 的 CCER 进行配额清缴抵销，有效降低其配额清缴履约成本。

### 碳金融和气候投融资

随着各试点碳市场的发展，上海、北京、深圳、湖北、广东等试点碳市场积极开展碳金融产品创新探索，其中包括碳交易类的有借碳、碳债券、碳配额远期、场外期权交易、场外掉期交易、担保型 CCER 远期合约等；碳融资类的有碳基金、碳配额质押、碳配额回购融资、碳配额卖出回购、跨境碳资产回购以及 CCER 质押等。在《关于构

建绿色金融体系的指导意见》《绿色债券支持项目目录》及银行间市场推出的碳中和债券指引等文件指引下，企业、机构的碳金融创新产品主要集中于碳配额质押、碳金融组合类质押、碳信托、碳回购、碳中和债券等。

例如，就上海试点碳市场而言，2021 年 5 月上海环交所携手浦发银行，为申能碳科技有限公司落地全国首单碳排放权（上海试点碳市场排放配额，SHEA）、国家核证自愿减排量（CCER）组合质押融资。截止 2021 年底，上海试点碳市场共开展配额借碳交易 9 笔，借碳数量共计 340 万吨。2021 年 4 月 21 日，上海环交所协助中海信托股份有限公司与中海油能源发展股份有限公司签约全国首单以 CCER 为基础资产的碳中和服务信托——“中海蔚蓝 CCER 碳中和服务信托”正式成立。2021 年 4 月 27 日，上海环交所又协助华宝信托成立了 5 年期“华宝信托 ESG 系列 - 碳中和集合资金信托计划”，该计划主要投资于碳排放配额及 CCER。2020 年 12 月底推出上

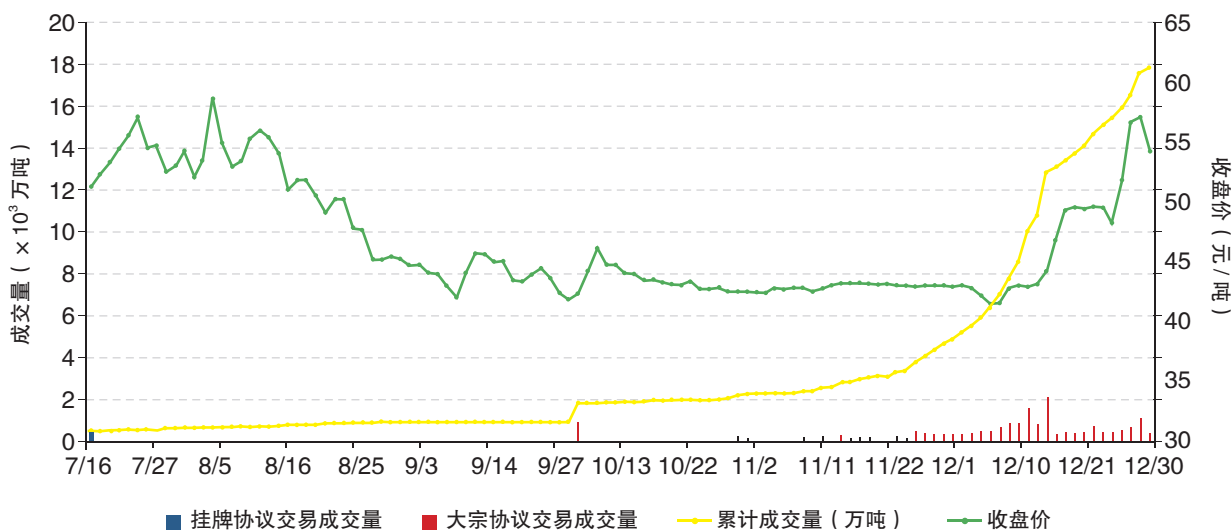


图 3-1 全国碳排放权交易市场第一履约周期市场运行情况（2021 年 7 月 16 日 -12 月 31 日）

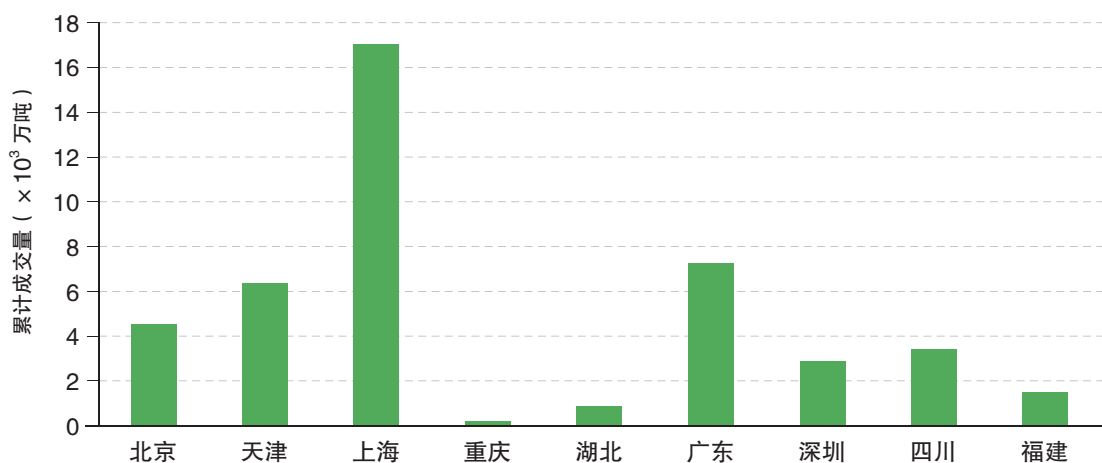


图 3-2 CCER 累计成交量 (截至 2021 年 12 月 31 日)

海碳排放配额质押登记业务，同时推出《上海碳排放配额质押登记业务规则》，至今上海环交所已与交通银行、浦发银行、中国银行、上海银行等合作，共开展碳质押业务 16 笔，融资金额超过 4100 多万，帮助企业和机构投资者解决了短期融资问题。2017 年初，上海试点碳市场开展配额远期交易，已累计成交超过 1.5 亿元（上海能源环境交易所，2022）。

以广东试点碳市场为例，截至 2022 年 4 月 24 日，累计开展广东试点碳市场碳排放权配额抵押融资业务 21 笔，抵押配额共计 507.77 万吨，融资金额 7022.52 万元；累计开展广东试点碳市场碳排放权远期交易业务开展 138 笔，累计交易碳排放权 1076.75 万吨，成交金额 1.60 亿元，其中配额远期交易 133 笔，成交配额 1048.97 万

吨，成交金额 1.58 亿元；累计开展碳排放配额托管业务开展 53 笔，累计托管配额 1870.99 万吨，累计开展碳排放配额回购业务开展 43 笔，交易 1682.96 万吨，回购业务成交金额共计 1.75 亿元（广州碳排放权交易中心，2022）。

气候投融资是积极应对气候变化、促进实现减污降碳协同增效的金融举措。2020 年 10 月，生态环境部等五部委发布了《关于促进应对气候变化投融资的指导意见》，为推动气候投融资绘制路线图。2021 年 12 月，生态环境部等 9 部委出台《气候投融资试点工作方案》，组织开展气候投融资试点，探索差异化的气候投融资体制机制、组织形式、服务方式和管理制度，形成可复制可推广的成功经验，为我国碳达峰碳中和目标的实现奠定坚实基础。



## 3.3 地方实践

城市是推进减污降碳协同治理的基本单元，是将顶层设计与实践相结合的重要载体，在我国实现减污降碳协同增效战略目标中扮演重要角色。随着国家减污降碳协同治理顶层制度设计的逐步完善，全新的政策目标及要求将为各地实现城市空气质量达标和 CO<sub>2</sub> 排放达峰“双达”工作带来新的机遇与挑战。本指标通过评价城市在协同推进空气质量达标与碳排放达峰方面的工作进展，讨论地方在减污降碳协同治理方面的形势与挑战。

在国家的引导下，部分省市先行先试，尝试推进减污降碳协同治理，取得一定成效。如青岛市颁布实施了《青岛市温室气体减排和大气污染治理协同控制三年行动计划（2021-2023年）》，通过开展体制机制融合创新行动、产业结构转型升级行动、空间要素集约发展行动、现代能源体

系创建行动、交通运输结构优化行动、新型建筑规模发展行动，推动实现减污降碳协同增效。成都市通过信息化技术推进清单融合工作，耦合大气污染物排放清单、消耗臭氧层物质（ODS）清单和温室气体排放清单，为推进减污降碳协同治理工作提供基础数据支撑。



十八大以来，随着《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的相继颁布与实施，各地持续深化大气污染治理工作，全国绝大多数城市环境空气质量显著提升，但距离蓝天白云、繁星闪烁的“美丽中国”建设目标仍有较大差距。基于中国环境监测总站发布的环境空气质量监测数据，2015–2021年间，全国PM<sub>2.5</sub>浓度均值从46μg/m<sup>3</sup>下降到30μg/m<sup>3</sup>，但2021年全国仍有35.7%的城市环境空气质量超标，29.8%的城市PM<sub>2.5</sub>年均浓度超过国家二级标准，所有城市的PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>年评价指标均无法达到世界卫生组织2021年准则值的要求。在碳排放方面，基于《中国城市二氧化碳排放数据集（2005、2010、2015、2020）》（中国城市温室气体工作组，2020），通过对城市达到峰值碳排放后排放趋势的显著性检验结果（Zhang et al., 2022a），对全国335个地级及以上城市（除儋州和三沙）的碳排放达峰状态进行评估，发现全国仅有12%的城市碳排放已经达峰，2020年这些城市合计贡献全国

碳排放总量的10%；另有16%的城市处于碳排放平台期，这些城市2020年合计贡献全国碳排放总量的17%；72%的城市碳排放量呈上升趋势，2020年合计贡献全国碳排放总量的73%。整体而言，中国城市碳达峰形势相对空气质量达标形势更为严峻，多数城市碳排放仍处上升阶段，仅有少部分城市碳排放量实现达峰或已进入平台期。

基于环境空气质量监测数据和碳排放清单数据进一步分析了我国335个地级及以上城市2015–2020年间PM<sub>2.5</sub>浓度和CO<sub>2</sub>排放量的协同变化趋势。分析结果显示，2015–2020年间仅有105个城市实现了PM<sub>2.5</sub>年均浓度和CO<sub>2</sub>排放量协同下降，占城市总数的31.3%。这些城市的PM<sub>2.5</sub>年均浓度平均下降了29%，CO<sub>2</sub>排放平均减少了23%，二者降幅相对2015–2019年的变化均有所增加。相反地，共有17个城市的PM<sub>2.5</sub>年均浓度和CO<sub>2</sub>排放量同步升高，占城市总数的5.1%。研究发现，2015–2020年间大部分城市PM<sub>2.5</sub>浓度和CO<sub>2</sub>

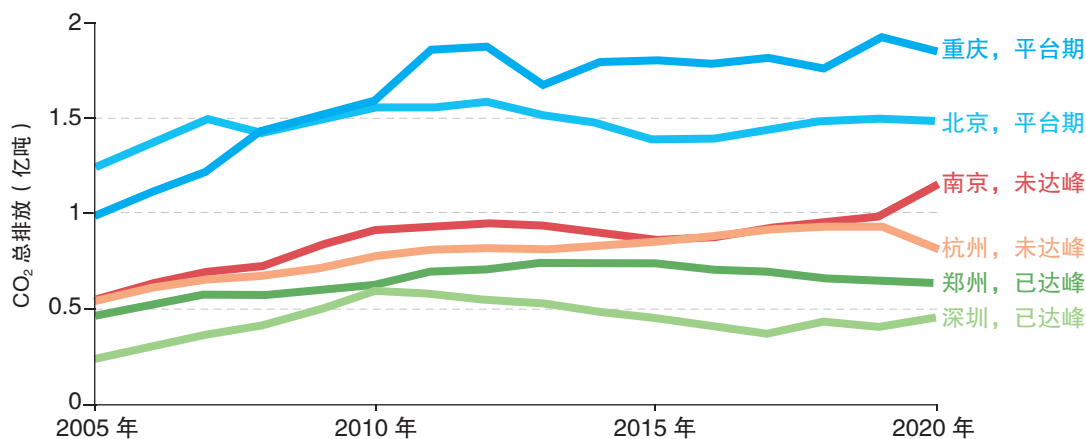


图 3-3 中国典型城市碳排放总量（直接排放 + 间接排放）趋势及碳达峰形势

排放量未能实现协同下降，减污降碳协同增效工作亟需在城市层面进一步推进。

随着国家碳达峰碳中和“1+N”政策体系的逐步完善，特别是《减污降碳协同增效实施方案》的颁布，在国家碳达峰碳中和目标及“美丽中国”建设目标的引领下，可以

预期，未来我国城市将依托精准科技支撑逐步厘清工作思路，不断完善政策制度体系，探索符合城市特色和自身发展规律的大气污染和气候变化协同治理路径，推进城市空气质量达标和碳达峰工作取得显著进展，实现减污降碳协同增效。

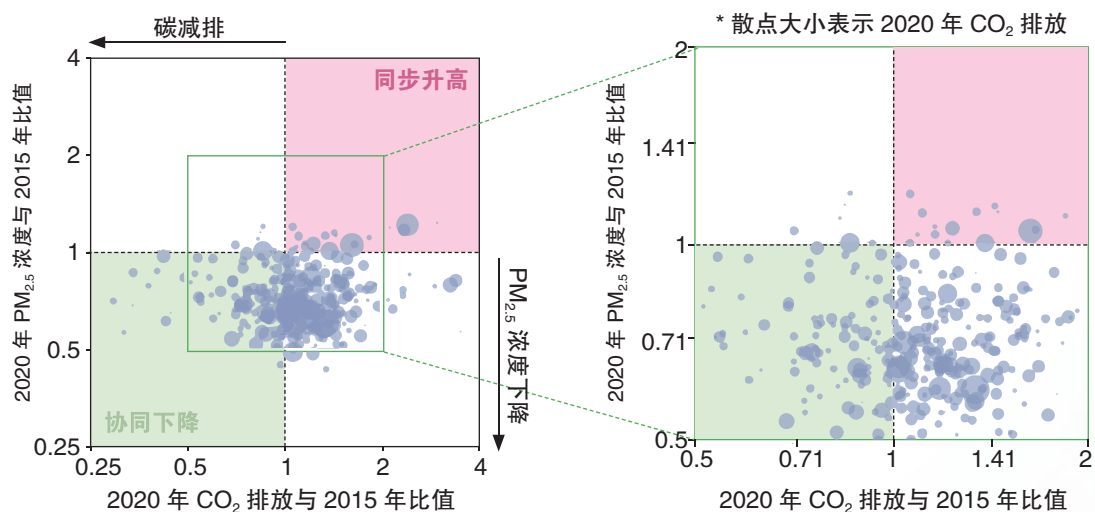


图 3-4 2015–2020 年城市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度和 CO<sub>2</sub> 排放量变化情况比较





# 结构转型与治理技术



能源、产业、交通运输结构的低碳转型以及新一代能源和减排技术的应用是实现二氧化碳和大气污染物排放量不断削减，产生空气质量改善和碳减排协同效益的根本。本章旨在逐年统计我国能源结构、产业结构、新型电力系统、交通结构、建筑能效提升与用能结构转型等转型升级进展，以及碳捕集、利用与封存技术与污染治理动态，分析在我国清洁空气协同路径中面临的障碍，为下一步工作的聚焦和攻坚提供参考。



# 4. | 能源结构转型

推动能源绿色低碳发展，构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统，是如期实现碳达峰碳中和目标的内在要求，是协同推动生态环境高质量保护和经济高质量发展的重要支撑。本指标基于“十四五”开局以来中国能源绿色低碳发展的进展数据，介绍了中国在加快构建现代能源体系的积极成效，并探讨了“十四五”期间能源高质量发展路径。

**能源利用效率不断提升。**2021年的能源消费总量达到52.4亿吨标煤，比上年增长5.2%。2021年单位国内生产总值能耗同比下降2.7%，2012年以来我国单位国内生产总值能耗累计降低30%，单位国内生产总值二氧化碳排放同比下降3.8%。单位产品综合能耗不断下降，重点耗能工业企业单位电石综合能耗下降5.3%，单位合成氨综合能耗与上年持平，吨钢综合能耗下降0.4%，单位电解铝综合能耗下降2.1%，每千瓦时火力发电标准煤耗下降0.5%（国家统计局，2022；国家统计局能源统计司，2022）。终端用能电气化水平不断提高。2021年全社会用电量8.3万亿千瓦时，同比增长10.3%，2021年能源消费弹性系数0.64，电力消费弹性系数1.27。

图4-1显示（国家能源局，2022；国家统计局，2019；国家统计局，2020；国家统计局，2021；国家统计局，2022；国家统计局能源统计司，2022），能源生产稳定增长。“顶梁柱”

和“压舱石”的煤电保障能源电力安全，2021年生产原煤40.7亿吨，比上年增长4.7%，煤炭在能源消费总量中的占比56%，比上年下降0.8个百分点，煤电发电量占全国总发电量的60%比重，以不断提升的灵活调节能力完成了70%的顶峰任务，随着煤电度电煤耗下降至约305克，清洁高效水平不断提升（国家能源局，2022）。2021年全年生产原油1.99万吨，比上年增长2.4%，生产天然气2053亿立方米，比上年增长8.2%（国家统计局，2022）。

**能源结构持续优化。**2021年全国发电装机容量约为23.8亿千瓦，同比增长7.9%。全国火电装机容量13.0亿千瓦，增长4.1%，其中煤电11.1亿千瓦，同比增长2.8%。水电装机容量3.9亿千瓦、并网风电装机容量3.3亿千瓦、并网太阳能发电装机容量3.1亿千瓦、核电装机容量5326万千瓦、生物质发电装机3798万千瓦，分别占总发电装机容量的16.5%、13.8%、12.9%、2.2%和1.6%。全口径非化石能源发电装机容量11.2亿千瓦，同

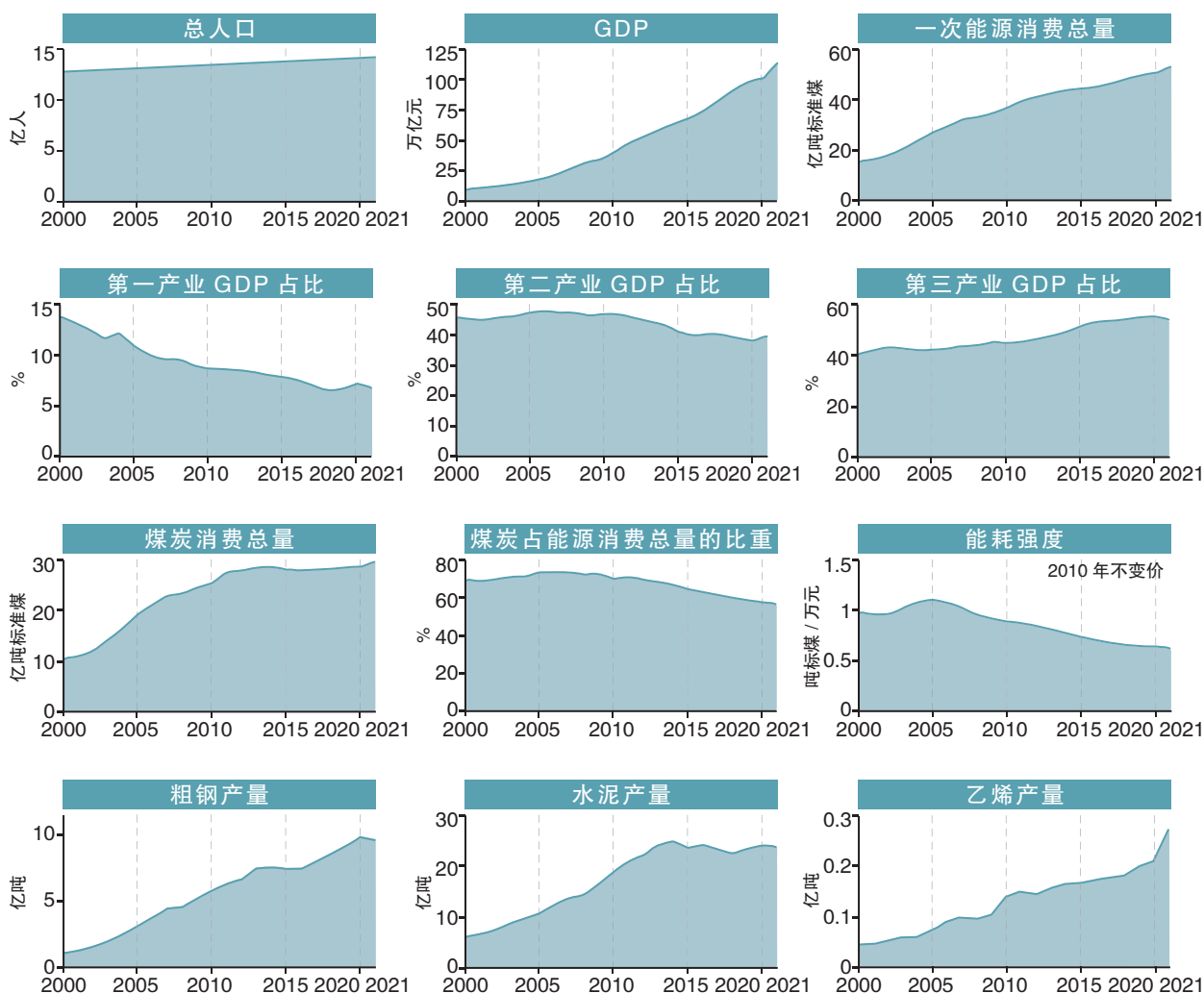


比增长 13.4%，占总装机容量比重为 47%，首次超过煤电装机容量，水电、风电、太阳能和生物质发电装机容量均稳居世界第一。

**加快推进以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地项目建设。**截至 2022 年 3 月，我国第一批 19 个省份 50 个 9705 万千瓦风光大基地项目已开工约 8500 万千瓦，第二批将主要集中在三北地区。2022 年《以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电光伏基地规

划布局方案》提出到 2030，规划建设风光基地总装机约 4.55 亿千瓦。

**加快电力结构调整。**从需求端来看，2021 年全社会用电量 8.3 万亿千瓦时，同比增长了 10.3%，较 2019 年同期增长 14.7%，两年平均增长 7.1%。随着疫情后经济的恢复，能耗的大幅度增长加剧电力紧张。从供应端来看，存在短时出力的短板，叠加冬季供暖的需求，电力需求陡然增长（周宏春，2021）。据国家气候



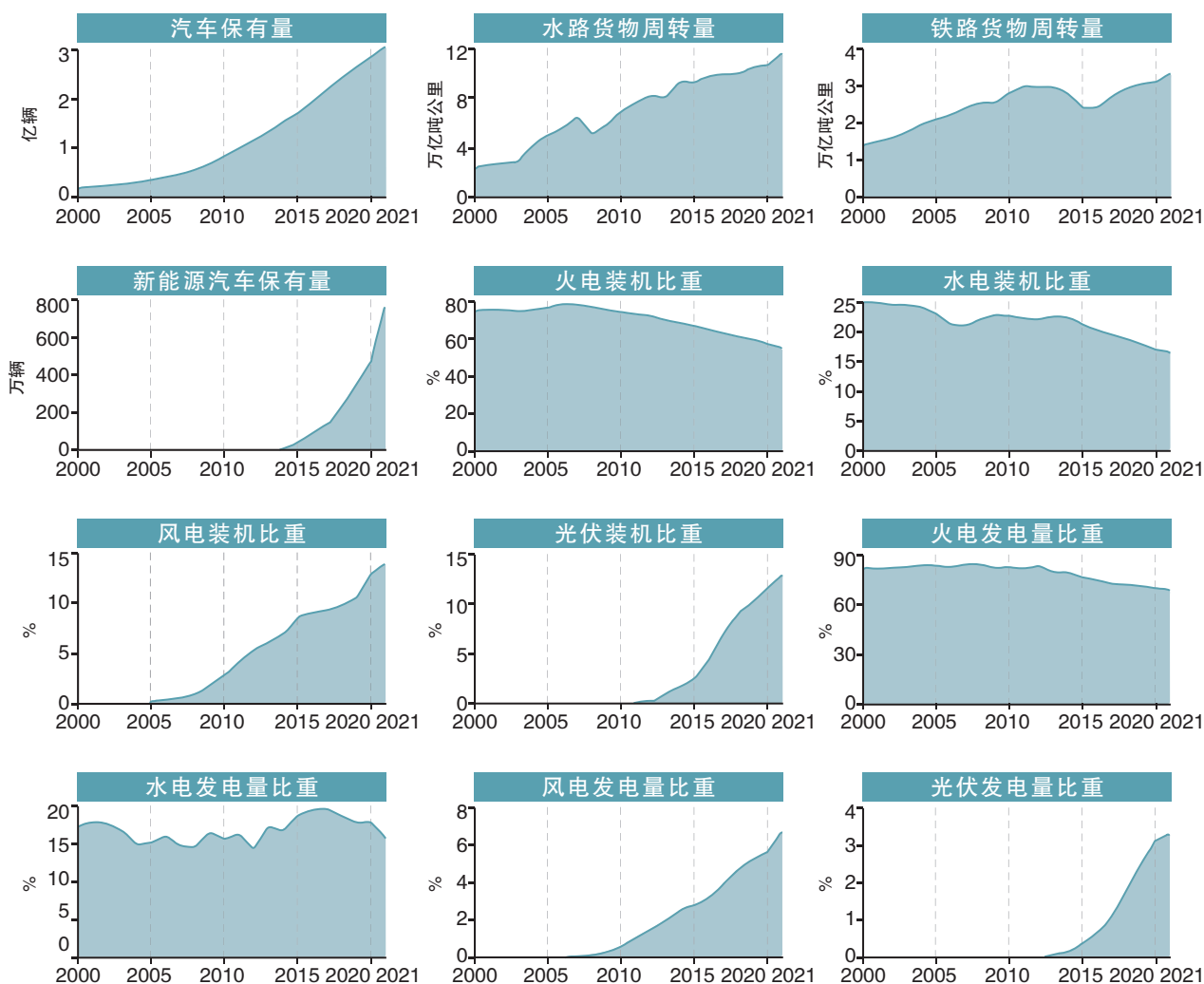


图 4-1 2000–2021 年结构转型进展

战略中心初步测算，2021 年能源活动二氧化碳排放总量同比增长 4.0%，增量达到 4 亿吨左右，约为“十三五”碳排放增量的 56%。受疫情及复杂因素影响，近期能耗和碳排放波动幅度进一步增大，减污降碳形势更为严峻。

**推动分布式光伏规模应用。**分布式光伏累计装机突破 1 亿千瓦，约占全部光伏发电并网装机容量的三分之一。2021 年新增光伏发电装机中，分布式光伏新增 2928 万千瓦，约占全部新增光伏发电装机的 55%，历史上首次超过集中式电站。整县（市、区）屋顶分布式光伏试点稳步推进，据不完全统计，2021 年全国整县

（市、区）推进屋顶分布式光伏试点累计备案容量 4623 万千瓦（国家统计局，2022）。

习近平总书记在 2021 年中央经济工作会议和中央政治局第三十六次集体学习时重点强调要立足我国能源资源禀赋，传统能源逐步退出必须建立在新能源安全可靠的替代基础上。《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》《关于促进新时代新能源高质量发展实施方案》《“十四五”现代能源体系规划》《“十四五”可再生能源发展规划》等重要政策陆续发布，更加明确了能源安全保障和绿色低碳转型并重、推动煤炭和新能源优化组合的主线。

## 4.2 产业结构转型

《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030年前碳达峰行动方案》等国家层面双碳目标指导政策对深度调整产业结构做出了重要部署,产业转型在过去一年成效明显,推动减污降碳协同增效。

### 行业进展

**新产业新业态新模式加速成长。**2020至2021年,我国国内生产总值从101.6万亿元增长至114.4万亿元,其中第一产业增加值比重由7.7%降低至7.3%,第二产业增加值由37.8%增加至39.4%,第三产业增加值由54.5%降低至53.3%(国家统计局,2021;国家统计局,2022)。高技术制造业增加值比上年增长18.2%,占规模以上工业增加值的比重从13.1%升高至15.1%,全年新能源汽车产量367.7万辆,比上年增长152.5%。

严格执行能效约束与产能置换,推动重点领域落后产能退出,大幅提升能源利用效率。工信部印发修订了钢铁、水泥和玻璃行业产能置换办法,要求大气污染防治重点区域置换比例不低于1.5:1、2:1和1.25:1,其他地区置换比例不低于1.25:1,1.5:1和1:1。水泥行业计划于2021年底和2022年底之前淘汰产能低于2000t/日和2500t/日的水泥熟料生产线。国家

发改委等部门联合发布《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平(2021年版)》,要求对钢铁、电解铝、水泥、平板玻璃、炼油、乙烯、合成氨、电石等重点行业能效低于基准水平的存量项目,限期实施改造升级,淘汰落后产能、工艺与产品。

工业领域加快低碳转型和高质量发展,力争率先实现碳达峰。2021年,国务院印发了《2030年前碳达峰行动方案》,推动工业领域绿色低碳发展,重点实施工业领域碳达峰行动。目前,钢铁行业碳达峰实施方案及碳中和技术路线图已基本成型,行业的碳达峰目标为2025年前实现碳排放达峰,到2030年钢铁行业碳排放量较峰值降低30%。生态环境部环境规划院研究显示,工业领域(含钢铁、水泥、铝冶炼、石化化工、煤化工共5个重点行业)预计将在“十四五”期间实现整体碳达峰,达峰后碳排放稳定下(严刚等,2022;汪旭颖等,2022;贺晋瑜等,2022;庞凌云等,2022;金玲等,2022;王丽娟等,2022)。

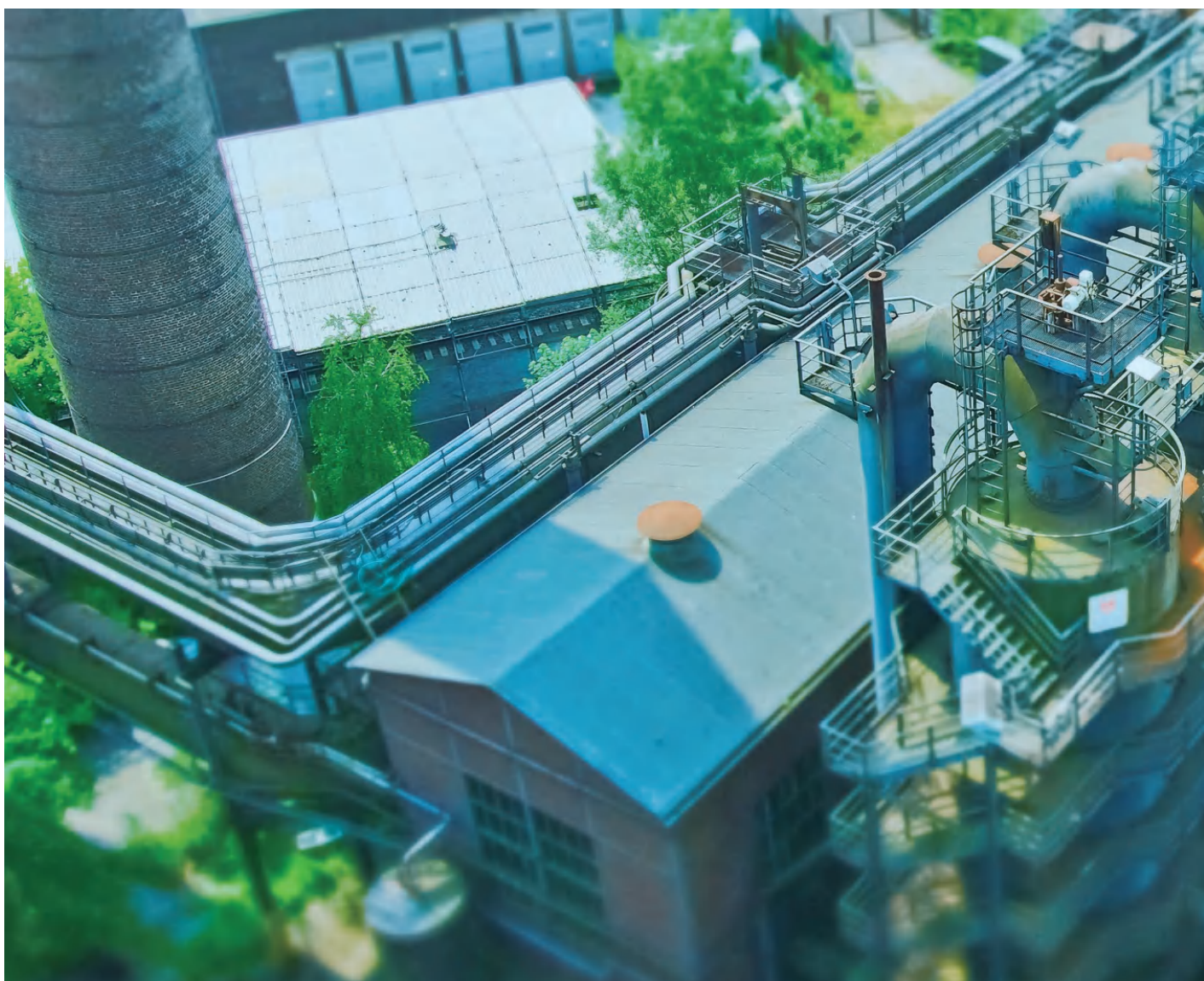


## 地方进展

2021年至2022年，各省（区、市）根据中央“意见”中提出的推动产业结构优化升级、坚决遏制高耗能高排放项目盲目发展、大力发展绿色低碳产业三项深度调整产业结构要求，陆续出台了相应的省级文件，包括统领性的双碳工作实施意见以及生态环境保护规划、能源发展规划、工业绿色发展规划等专项规划和特色产业政策等，部分代表性

政策如表1所示。这些产业政策大部分将生态环境保护目标作为重要考量因素，体现出各地方政府以产业政策推动减污降碳协同增效的趋势。

产业结构优化升级方面，具体措施包括修订产业结构调整指导目录、淘汰化解落后和过剩产能、推动传统行业绿色转型升级、推进产业链价值链向中高端发展、开展产业园区低碳化改造等。遏制“两高”项目盲目发展方面，





具体措施包括严格落实产能等量或减量置换、严禁某些行业新增产能、提高项目能耗准入标准等。发展绿色低碳产业方面，具体措施包括发展节能环保产业、清洁能源产业、战略性新兴产业，推动互联网、大数据、人工智能、第五代移动通信（5G）等新兴技术与绿色低碳产业深度融合等。

专栏 1 和专栏 2 分别以四川省和河北省为例，详细描述了地方政府如何立足自身优势制

定产业结构转型政策。四川省以双碳目标为引领，提出牢牢把握将清洁能源优势转化为高质量发展优势的着力方向，聚力发展清洁能源产业、清洁能源支撑产业和清洁能源应用产业，加快推动能源结构、产业结构战略性调整。河北省以双碳目标为导向，提出以绿色技术创新为根本动力，着力优化产业结构，实施工业企业“四个一批”工程加快产业布局优化，实施“千企绿色改造”工程推动传统产业绿色转型，培育发展绿色新兴产业。



## 专栏 1 《中共四川省委关于以实现碳达峰碳中和目标为引领推动绿色低碳优势产业高质量发展的决定》中的产业结构调整措施

政策导向	落实产业	具体措施举例
做优做强清洁能源产业	推进水风光多能互补一体化发展	立足清洁能源资源优势，强化水电主力军作用，培育风光发电新增长点，构建沿江清洁能源走廊，建设世界级优质清洁能源基地。
	规模化开发利用天然气	统筹推进常规气与非常规气开发，加快建设国家天然气（页岩气）千亿立方米级产能基地。加快规划建设天然气调峰电站项目，力争“十四五”时期新增装机容量超过400万千瓦。有序推进天然气发电替代燃煤发电。
	有序开发多类型清洁能源	积极发展氢能产业，统筹推进氢能安全生产和“制储输用”全链条发展，开展氢能运营试点示范，丰富应用场景。合理利用林草、秸秆、垃圾等开发生物质能，有序发展生物质发电。
发展壮大清洁能源支撑产业	大力发展晶硅光伏产业	发挥晶硅制造先发优势，着力健全产业链条，扩大先进产能规模，巩固行业领先地位，建设世界级晶硅光伏产业基地。推动成（都）乐（山）眉（山）晶硅光伏产业一体化发展，建设乐山“中国绿色硅谷”。
	持续做强能源装备产业	把清洁能源装备产业作为建设制造强省的重要支柱，依托“国字头”能源装备龙头企业，突出关键技术自主化、市场拓展全球化、运维服务一体化，建设国际一流的清洁能源装备制造基地。
	构建多元协同储能体系	发挥各类储能技术经济优势，统筹布局电源、电网、用户侧储能设施，提升电力系统综合调节能力。
	完善清洁能源输配体系	支持建设坚强智能电网，加快四川电网主网架提档升级，形成相对独立、互联互济的“立体双环网”主网结构。
加快发展清洁能源应用产业	促进动力电池产业发展壮大	做强基础锂盐、正负极材料，加快补齐隔膜、电解液等薄弱环节，实现锂电主辅材料产业均衡协调绿色发展。优化动力电池产业链供应链布局，围绕行业领军企业完善跨区域产业生态圈。
	推动新能源汽车产业提档升级	提升新能源汽车整车制造水平，推动整车企业与动力电池、驱动电机、电控系统等配套企业协同发展。发展氢燃料汽车，构建成渝“氢走廊”。
	推进大数据产业创新发展	构建“芯屏端软智网存”生态圈，培育全国大数据产业重要增长极。推进国家“东数西算”工程实施，建设全国一体化算力网络成渝国家枢纽节点，推动成都人工智能大数据中心、德阳天府数谷产业园、中国·雅安大数据产业园绿色发展，培育国家级数据中心集群。
	深化钒钛资源综合利用	深入推进攀西国家战略资源创新开发试验区建设，做精钒产业，做强钛产业，打造世界级钒钛产业基地，建设攀枝花“中国钒钛之都”。



## 专栏 2 《河北省“十四五”工业绿色发展规划》中的产业结构调整措施

政策导向	落实产业	具体措施举例
加快产业布局优化	实施工业企业“四个一批”工程,推动企业入园进区,全省工业企业入园率达到70%以上。聚焦8大主导产业和107个省级特色产业集群,培育一批低碳转型效果明显的先进制造业集群和县域特色产业集群。	省级以上经济(技术)开发区、高新技术产业开发区为主要平台,以区外工业企业为主体,推动淘汰关停一批、搬迁入园进区一批、就地改造提升一批、做优做强一批,调整优化产业布局,有效推进产业集聚集约发展,提升产业发展质量和效益。到2021年底,“淘汰关停一批”企业依法依规全部完成、动态清零;“搬迁入园进区一批”“就地改造提升一批”“做优做强一批”企业全部启动;到2022年底,企业“搬迁入园进区一批”“就地改造提升一批”“做优做强一批”完成50%以上;到2023年底,企业“搬迁入园进区一批”“就地改造提升一批”“做优做强一批”基本完成,到2025年,“四个一批”工程全面完成。
推动传统产业绿色转型	实施“千企绿色改造”工程,聚焦钢铁、建材、石化化工、装备、食品、医药、纺织、造纸、皮革等重点行业,发布我省制造业先进绿色低碳工艺技术装备目录,明确绿色化改造升级方向,加快实施绿色化改造,以“千企绿色改造”助力“万企转型”,努力打造传统产业绿色升级版。	实施“千企绿色改造”工程,综合考虑能耗排放总量和强度,筛选确定1000家高耗能、高排放企业,建立“千企绿色改造”项目库,对入库项目组织“工业诊所”、节能诊断服务机构,提供“一对一”入户诊断服务以及“一企一策”量身定制技改方案,明确预期目标、技术路线、推进步骤、改造期限等,瞄准低碳与碳排放、节能和能效提升、节水和能效提升、资源综合利用的关键领域和薄弱环节,采用先进适用生产技术、工艺和装备进行技术改造,创建一批能效、水效标杆企业。到2025年,实施重点绿色化改造项目1000项以上。
培育发展绿色新兴产业	新能源产业	加快风光火储互补、先进燃料电池等关键技术和智能控制系统研发及产业化,大力发展高效光伏设备、高端风电设备、智能电网装备;加速氢能产业规模化、商业化进程,大力发展风光电制氢,依托焦化、化工副产气体低成本制氢。
	新材料产业	聚焦铁基、碳基、硅基和生物基新材料等领域,重点发展先进金属材料、钒钛新材料、碳基新材料、电子信息材料、高性能复合材料、新型功能材料、绿色化工新材料等。
	储能产业	探索开展相变储能、飞轮储能、压缩空气储能、储热、储冷等技术研发和应用,推动承德钒储能以及保定镍氢、锂电混储数智能源系统项目示范。
	新能源汽车产业	突破高安全动力电池、高效驱动电机、高性能动力系统等关键技术,完善整车制造、关键零部件及相关配套产业链。
	被动式超低能耗建筑产业	打造保定全国被动式超低能耗建筑全产业链示范基地,加快规模化、标准化、品质化发展。
	绿色大数据中心	发展高密度集成高效电子信息设备、新型机房精密空调、液冷、机柜模块化等节能装备,推进张家口绿色数据产业中心建设。新建大型、超大型数据中心电能利用效率不超过1.3,到2025年,绿色数据中心电能利用效率不超过1.4,打造一批国家级绿色数据中心。



## 双碳目标下代表性省（区、市）产业结构调整相关政策与措施

2021年8月

### 《北京市“十四五”时期高精尖产业发展规划》

以智慧能源为方向，以氢能全链条创新为突破，推进新能源技术装备产业化，打造绿色智慧能源产业集群；力争到2025年绿色能源与节能环保产业实现营业收入5500亿元。

### 《上海市生态环境保护“十四五”规划》

加快产业结构调整，调整对象由高能耗、高污染、高风险项目进一步转向低技能劳动密集型、低端加工型、低效用地型企业，重点推进化工、涉重金属、一般制造业等行业布局调整。推进钢铁、石化、化工等行业改造升级，化工、医药、集成电路等行业实现清洁生产全覆盖。

### 《江苏省“十四五”制造业高质量发展规划》

推动制造业节能减排，到2025年，培育绿色园区15个、绿色工厂1000家。加快重点行业降碳，开展工业绿色低碳微电网建设，鼓励工厂、园区发展厂房光伏、分布式风电、多元储能、高效热泵、余热余压利用、智慧能源管控系统等，推进多能高效互补利用。

2021年9月

### 《天津市碳达峰碳中和促进条例》

推动冶金、化工等传统产业的高端化智能化绿色化升级，严格控制高耗能、高排放项目准入，禁止新增钢铁、水泥熟料、平板玻璃、炼化、电解铝等产能，落实国家相关产业规划要求的除外。立足全国先进制造研发基地定位，推进工业绿色升级。

### 《内蒙古自治区“十四五”生态环境保护规划》

培育战略性新兴产业，大力发展绿色产业。加快产业结构升级，严格准入条件，调整产业结构，优化产业布局，提高利用效率。从2021年起，不再审批焦炭（兰炭）、电石、聚氯乙烯（PVC）、铁合金、电解铝等新增产能项目，确需建设的，须在区内实施产能和能耗减量置换。

### 《云南省工业绿色发展“十四五”规划》

立足“特色资源”优势，建设高端绿色产业基地，发展高附加值资源精深加工业和高端新材料产业。立足“绿色能源”优势，建设绿色制造强省，打造“世界光伏之都”，深入推进绿色能源战略与绿色铝、绿色硅等先进制造业深度融合。立足“支柱产业”优势，打造国家新旧动能转换先行区。立足“生态资源”优势，打造有国际影响力的生态绿色产业新高地。

### 《陕西省“十四五”生态环境保护规划》

以钢铁、煤炭、水泥、电解铝、平板玻璃等行业为重点，依法依规淘汰落后产能。以钢铁、焦化、建材、有色、石化、化工、工业涂装、包装印刷、石油开采、农副食品加工等行业为重点，开展全流程清洁化、循环化、低碳化改造，促进传统产业绿色转型升级。全面推进绿色制造体系建设，做优做强高端智能再制造产业，到2025年底前创建绿色工厂100个，绿色园区10个，绿色供应链5条。

2021年12月

### 《河北省“十四五”工业绿色发展规划》

加快产业布局优化，实施工业企业“四个一批”工程，推动企业入园进区。推动传统产业绿色转型，实施“千企绿色改造”工程。培育发展绿色新兴产业，加快发展新能源、新材料、储能、新能源汽车、被动式超低能耗建筑、绿色大数据中心等绿色新兴产业。

### 《中共四川省委关于以实现碳达峰碳中和目标为引领推动绿色低碳优势产业高质量发展的决定》

做优做强清洁能源产业，推进水风光多能互补一体化发展，规模化开发利用天然气，有序开发多类型清洁能源。发展壮大清洁能源支撑产业，大力发展晶硅光伏产业，持续做强能源装备产业，构建多元协同储能体系，完善清洁能源输配体系。加快发展动力电池、新能源汽车、大数据、钒钛等清洁能源应用产业。



## 4.3 新型电力系统

构建以新能源为主体的新型电力系统是贯彻落实我国能源安全新战略、实现双碳目标的重大需要。大力发展新能源,在新能源安全可靠的替代基础上,传统能源逐步退出,构建新型电力系统,加快电力脱碳,推动能源清洁转型,是实现碳达峰、碳中和目标的必由之路(康重庆等,2022)。本指标基于近年来中国电力系统低碳转型方面的进展数据,介绍了中国在构建新型电力系统方面的积极成效,并对新型电力系统的特征和未来技术发展方向进行了探讨。

**新能源装机占比持续提升。**截至2021年底,我国风电、光伏发电装机容量分别为3.28、3.06亿千瓦,装机规模均居世界首位。预计到2030年,我国风光总装机容量将突破12亿千瓦,装机占比突破50%;发电量占比将从2021年的11.7%增长到20%–26%;到2060年,风光装机比重将超过75%,发电量占比预计进一步提升到约60%(张智刚等,2022)。未来40年,大力发展风电、光伏等新能源,实现煤炭从主体能源向基础能源的重大转变,促进能源电力领域脱碳,是我国实现双碳目标的关键。

**新能源消纳水平不断提高。**2021年我国平均风电利用率为96.9%,平均光伏利用率为98.2%,其中11省市的风光利用率达到100%,全年全国弃风电量206.1亿千瓦时,弃光电量67.8亿千瓦时。较2017年弃风率、弃光率分别下降了8.9%和4.2%,新能源消纳能

力显著增强。为适应新型电力系统建设和大规模高比例新能源发展需要,抽水蓄能等灵活调节性电源在电力系统中的比重将显著提升,2021年我国抽水蓄能装机达3639万千瓦,较上年增加15.6%,《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(谢小荣等,2022)。

**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,截止2021年底,全国已建成投运220千伏及以上输电线路84.3万千米,变电容量49.4亿千伏安,其中包括“十四交十六直”30个特高压工程,累计线路长度达3.58万千米,累计变电(换流)容量4.12亿千伏安,累计输送电量2.08万亿千瓦时,实现了我国能源资源大范围优化配置

( Zhuo, et al., 2022 )。在电源建设方面，除集中式新能源基地外，我国中东部地区的海上风电和陆上风光等分布式资源蕴藏巨大储量，仅海上风电可开发资源就超过 5 亿 kW，预计到 2030 年有望开发 1 亿 kW。此外，随着电能替代技术的推广，诸如电动汽车、屋顶光伏等分布式能源也将参与到电力系统的电力平衡之中。预计未来新型电力系统的结构形态将呈现出“大电源、大电网”与“分布式系统”兼容互补、交直流混联大电网、柔直电网、主动配网、微电网等多种形态并存的格局（孔力等，2022）。

新型电力系统是以新能源为供给主体、以确保能源电力安全为基本前提、绿电消费为主要目标，以坚强智能电网为枢纽平台，以源网荷储互动及多能互补为支撑，具有绿色低碳、安全可控、智慧灵活、开放互动、数字赋能、经济高效基本特征的电力系统。构建新型电力

系统将在源、网、荷、储各个环节催生大量新技术和生态，并带动一批关键共性支撑技术的快速发展（卓振宇等，2022）。在未来的 5-15 年，构建新型电力系统需要突破煤炭清洁高效灵活智能发电技术、生物质能技术、氢能技术、新型柔性交流输电技术、柔性智能配电网技术、新型储能技术、二氧化碳捕集、利用与封存技术、电力市场交易和碳排放监测技术等针对源网荷储各个环节的支撑性技术。此外，光热发电技术、核能技术、电力系统安全稳定控制与仿真技术也将成为关键突破技术。伴随着全球新一轮科技革命和产业革命的加速兴起，云计算、大数据、物联网、人工智能、5G 通信等数字化技术更快融入电力系统，加速传统电力行业业务数字化转型。加快新型电力系统相关技术的研究与应用，更将带动从材料制备、器件研发、装备研制到系统集成全产业链发展，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。



## 4.4 交通结构转型

交通运输是国民经济中的基础性、先导性、战略性产业和重要服务性行业，也是国家生态环境保护、节能减排和应对气候变化的重点领域之一。交通运输绿色低碳转型工作涉及运输装备、运输组织、交通基础设施等众多领域，做好交通运输减污降碳工作对于推动交通运输高质量发展、加快建设交通强国具有重要意义。本指标基于近年来绿色循环低碳交通运输体系的建设发展，既包括运输装备动力低碳替代、货物运输结构优化、绿色出行引导等结构和模式的转型进展，又包括能效提升、运输组织效率提升、管理强化等交通领域重要低碳任务的发展情况。

**交通行业能效持续提升。**2021年，《乘用车燃料消耗量限值》强制性国家标准（GB19578-2021）发布（工业和信息化部，2021），传统能源乘用车、插电式混合动力电动乘用车的试验工况由NEDC切换为WLTC，新车工况油耗标定将更趋近实际油耗；国家铁路单位运输工作量综合能耗4.07吨标准煤/百万换算吨公里、同比下降3.9%；我民航吨公里油耗为0.309公斤，较2005年下降9.2%（中国民用航空局，2022）。

**清洁能源替代稳步推进。**2021年，全国新能源汽车保有量达784万辆，其中纯电动汽车占81.63%；新能源汽车产销量分别完成354.5万辆和352.1万辆，同比均增长1.6倍，市场占有率达到13.4%；全国充电基础设施保有量达261.7万台、同比增长70.1%；全国铁路电

气化率73.3%，铁路电力机车1.39万台、占64.1%；全国机场场内电动车辆设备约9900台，充电设施3600个，电动车辆占比21%，机场电力、天然气、外购热力占比达到85.3%，年旅客吞吐量超过500万人次以上机场飞机APU替代设备实现“应装尽装、应用尽用”；5300余艘船舶完成受电设施改造，岸电使用电量明显提高。

**运输结构逐步优化。**《推进多式联运发展优化运输结构调整工作方案（2021-2025年）》印发。2021年，全国铁路货运总发送量47.74亿吨、同比增长4.9%，水路货物运输量82.4亿吨、同比增长8.2%；全国累计开通多式联运线路450条，港口集装箱铁水联运量完成754万标箱、同比增长9.8%；16个城市获“绿色货运配送示范城市”称号；全国铁路旅客发送



量 26.1 亿人次、同比增长 18.5%，公路旅客运输量 50.9 亿人次、同比降低 26.2%（交通运输部，2022；国家铁路局，2022）。

**绿色出行持续推进。**2021 年，“国家公交都市建设示范城市”达 33 个；全国城市公共汽车客运量 489.16 亿人次、同比增长 10.6%，城市轨道交通客运量 237.27 亿人次、同比增长 34.9%、规模已基本恢复至疫情前水平；全国已有 109 个城市开展绿色出行创建行动，北京、深圳等中心城区的绿色出行比例分别达到 74%、73.5% 左右。

**双碳管理不断强化。**2021 年，交通运输领域、公路水路行业、铁路行业、邮政快递业等

碳达峰相关政策文件全面启动研究，《绿色交通“十四五”发展规划》《“十四五”民航绿色发展专项规划》印发。《运输船舶燃油消耗量第 1 部分：海洋船舶计算方法》《电动营运货车选型技术要求》等国家和行业标准发布。

未来一段时间，应以推动交通运输高质量发展为主线，以交通运输用能结构优化为关键，持续提高运输装备能效、优化运输结构、提升运输组织效率、加强基础设施有效供给，加快形成绿色低碳运输方式。加快建设综合立体交通网，持续推进大宗货物和中长途货物运输“公转铁”“公转水”；加快推广应用新能源和清洁能源，提高燃油运输装备能效标准；全面推进公交都市建设，积极开展绿色出行创建行动。



# 4.5 建筑能效提升与用能结构转型

我国当前仍处于城镇化快速发展时期，通过建筑能效提升与用能结构转型是实现双碳与清洁空气协同目标的最重要措施，重点工作方式包括：控制增量与改善存量点面结合，全面提高建筑用能效率，降低建筑用能需求；大力推进建筑用能电气化与建筑用热零碳化，实现建筑用能清洁化低碳化；在热源侧与用户侧双侧发力，全面消除农村建筑用能直接排放。

2020 年我国建筑运行过程中的碳排放总量为 21.8 亿 tCO<sub>2</sub>，其中化石燃料在建筑中直接燃烧导致的直接碳排放占比 27%，建筑用电相关间接碳排放占比 52%，北方城镇地区建筑采暖用热相关间接碳排放占比 21%（清华大学建筑节能研究中心，2022）。当前我国仍处于城镇化快速发展时期，每年新增建筑建设规模仍然巨大，同时人民群众对建筑的健康性、功能性、舒适性要求日益提高，建筑能耗及碳排放总量、强度均呈现刚性增长趋势。通过采取建筑能效提升、建筑电气化、可再生能源应用等措施，实现建筑领域能源消费及碳排放量“增减平衡”，实现碳达峰，将付出非常艰辛的努力。

**控制增量与改善存量点面结合，全面提高建筑用能效率。**截至 2020 年底，全国城镇累计建成节能建筑面积超过 238 亿平方米，节能建筑占城镇民用建筑面积比例超过 63%，累计建设完成超低、近零能耗建筑面积近 1000 万

平方米，完成既有居住建筑节能改造面积 5.14 亿平方米、公共建筑节能改造面积 1.85 亿平方米。2021 年，住房和城乡建设部发布《建筑节能与可再生能源利用通用规范》，提出了新的节能目标，要求新建居住和公共建筑碳排放强度应分别在 2016 年的节能设计标准的基础上平均降低 40%，下一步应该通过加强设计、施工、验收等环节的监督管理，确保该本全文强制规范得到贯彻落实。同时应积极推进超低能耗建筑建设和既有建筑节能改造，一是总结借鉴部分省市的做法，采取财政资金补助、容积率奖励等激励措施，引导新建建筑建成超低能耗建筑、近零能耗建筑，二是结合城镇老旧小区改造、北方地区冬季清洁取暖等工作，持续推进既有居住建筑节能改造，三是采取合同能源管理模式，实现市场化的公共建筑节能改造，并基于能耗统计、审计、监测所获得的海量数据实施能耗限额管理、碳排放权交易，以及电力需求侧响应等工作。

**零碳电力与零碳热力双管齐下，全面实现建筑用能清洁化低碳化（江亿等，2021）。**

2020年我国建筑运行用电量为2万亿kWh，电力间接碳排放为11.3亿吨CO<sub>2</sub>。近年来建筑用电量增长造成的碳排放增加，超过了电力碳排放因子下降造成的碳排放降低，因此建筑用电间接碳排放仍然持续增长。下一步应充分发挥电力在建筑终端消费清洁性、可获得性、便利性优势，建立以电力消费为核心的建筑能源消费体系，一方面在建筑领域积极推动电能

替代，建筑采暖、炊事、生活热水等方面用能“宜电则电”，以电能替代逐步消除建筑内的二氧化碳的直接排放，同时随着电力消费比例及太阳能光伏发电消纳量的逐步上升，建筑用电波动性问题将日益突出，应积极推动以“太阳能光伏+分布式蓄电+直流建筑+柔性用电”为特征的“光储直柔”新型建筑电力系统建设（江亿，2021），使建筑成为调控电网负荷的单元，有效解决电网峰谷矛盾问题。2020年我国北方采暖建筑面积156亿平方米，建筑运

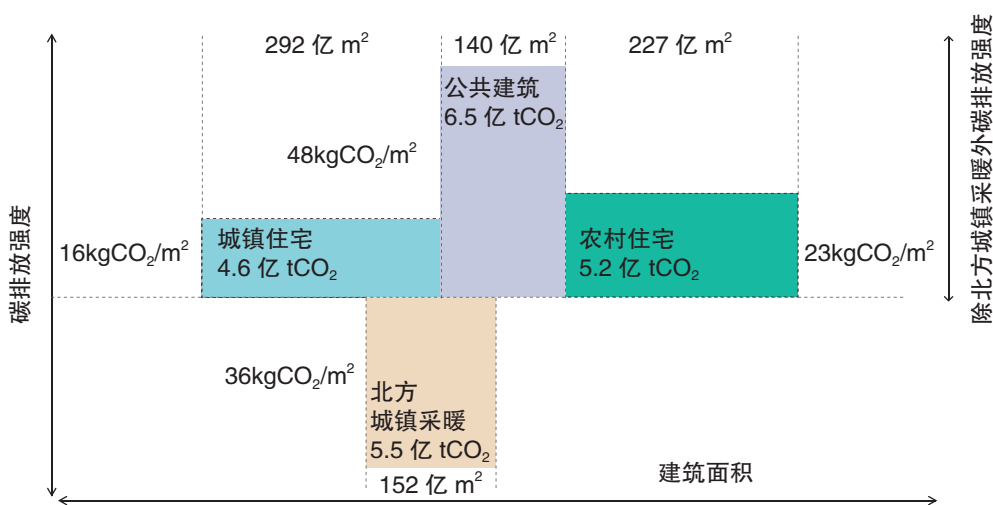


图 4-2 中国建筑运行四个分项的碳排放（2020 年）（清华大学建筑节能研究中心，2022）

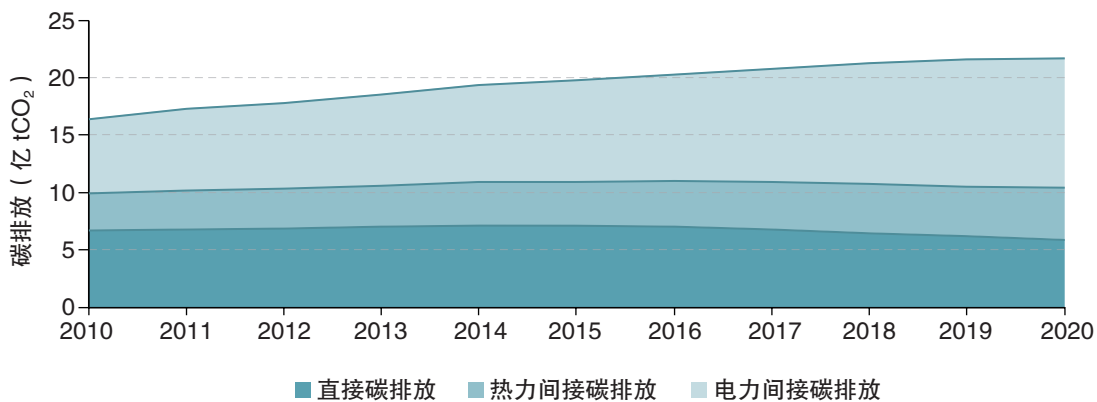


图 4-3 中国建筑运行逐年碳排放（2010-2020 年）（清华大学建筑节能研究中心，2022）



行热力的间接碳排放为 4.5 亿吨 CO<sub>2</sub>。近年北方地区集中采暖面积和采暖热需求持续增长，但单位平米的供热能耗和碳排放持续下降，北方采暖热力间接碳排放呈缓慢增长趋势。为了实现北方采暖地区的协同减排目标，应该逐步构建北方地区零碳供热系统，采集热电联产余热、工业余热、核电余热等零碳余热热源，通过大规模跨季节蓄热工程和跨区域输热网络来储存和利用余热热源，实现北方城镇地区的零碳供热。

**热源侧与用户侧双侧发力，全面消除农村建筑用能直接排放。**2020 年我国建筑直接碳排放为 6 亿吨 CO<sub>2</sub>，其中农村燃煤导致的排放占一半以上，给农村地区造成了严重的环境污染，包括大气污染、固废污染，威胁农民的身体健健康。由于我国现有建筑节能及绿色建筑的立法、

强制性标准均未覆盖广大农村地区，近年来结合农村危房改造、北方冬季清洁取暖等工作实现了部分突破，但总体上仍处于零星试点阶段。截至 2020 年底，清洁取暖试点城市农村地区通过实施煤改气、煤改电等“热源侧”清洁化改造，清洁取暖率由 9% 提高到了约 28%。在当前能源保供、保障群众温暖过冬的要求下，应通过政策设计引导广大农村地区坚持热源清洁化与建筑高效化改造同步推进（杨旭东等，2021），一方面通过加装墙体保温、阳光房、保温吊顶等节能措施，可以提高农房采暖用能效率 30% 甚至 50% 以上，另一方面应建立以屋顶式光伏为基础的农村新型能源系统（江亿等，2022），由农村屋顶光伏发电来全面支持农村的生产、生活、交通用能，可替代煤、柴油和天然气，也不使用生物质能源，从而使农村实现清洁用能，全面消除农村建筑用能直接排放。



# 4.6 碳捕集、利用与封存技术

二氧化碳捕集、利用与封存（CCUS）是目前实现大规模化石能源零排放利用的唯一技术选择，是保障高比例可再生能源电力系统稳定性和灵活性的主要技术手段，是钢铁、水泥等难以减排行业低碳转型的可行技术方案，是实现碳中和目标的托底技术保障。本指标从 CCUS 技术成熟度、成本效益、社会环境综合效益、减排需求进行了全面评估，提出了新形势下我国发展 CCUS 的建议。

二氧化碳捕集、利用与封存（CO<sub>2</sub> Capture, Utilization and Storage, CCUS）是指将 CO<sub>2</sub> 从能源利用、工业过程等排放源或空气中捕集分离，输送到适宜的场地加以利用或封存（图 4-4），最终实现 CO<sub>2</sub> 减排的技术手段（科学技术部社会发展科技司，2019），是我国实现碳达峰、碳中和目标技术组合不可或缺的重要组成部分。CCUS 技术不仅可以实现化石能源利用近零排放，促进钢铁、水泥等难减排行业深度减排，而且在保障未来零碳负碳电力系统灵活性和安全性，抵消难减排温室气体排放等方面具有重要意义。

近年来，我国 CCUS 各环节发展迅速，技术水平显著进步。化学吸收法捕集技术、CO<sub>2</sub> 制备合成气和化学品等化工利用技术、浸采采矿和强化采油等地质利用技术已完成工业示范，进入商业应用阶段。截至 2022 年 3 月，我国已投运和建设中的 CCUS 示范项目达 50 个，其中已建

成项目 39 个，累计注入封存 CO<sub>2</sub> 超过 200 万吨，具备捕集能力 200–300 万吨/年、注入能力 100–200 万吨/年（张贤等，2021）。2021 年全球处于不同阶段的商业项目增加到 135 个，每年捕集能力达 4000 万吨。北美地区依旧是全球 CCUS 部署的领先者，2021 年美国 CCUS 单项年均碳捕集规模约 241.4 万吨/年，但我国捕集规模超过 60 万吨/年的项目仅占 3.7%。与国际先进水平相比，我国 CCUS 技术总体水平相当，但在示范项目的整体规模、集成程度、离岸封存、工业应用等方面仍存在一定差距。

目前我国 CCUS 技术能耗、成本相对较高，与其他低碳技术相比竞争优势不明显。CCUS 技术的能耗及成本因排放源类型和 CO<sub>2</sub> 浓度不同有明显差异。一般来说，CO<sub>2</sub> 浓度越高，捕集能耗和成本越低。电力、水泥是我国捕集能耗和减排成本较高的行业，净减排成本分别为 300–600 元/吨 CO<sub>2</sub> 和 180–730 元/吨 CO<sub>2</sub>。

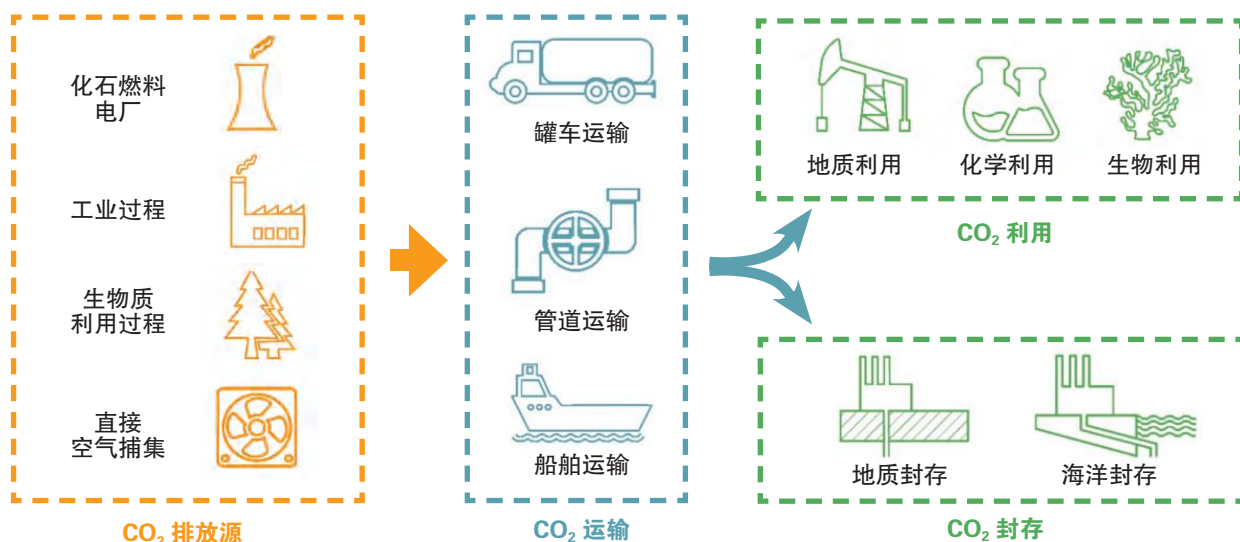


图 4-4 CCUS 技术示意图

煤化工和石油化工领域的一体化驱油示范项目具备成本优势，净减排成本最低可达到 120 元/吨  $\text{CO}_2$ （黄晶等，2021）。

尽管面临高能耗和高成本挑战，但从实现碳中和目标总成本来看，CCUS 技术具有巨大的经济社会效益。一方面，CCUS 技术可避免大量基础设施搁浅成本。我国煤电、钢铁和水泥等重点排放源现有设施运行年限不长，对其进行 CCUS 技术改造，能够在大幅降低碳排放的同时，避免已投产设施提前退役。另一方面，生物质碳捕集利用与封存（BECCS）、空气直接捕集（DAC）技术等负排放技术可有效降低实现碳中和目标的边际减排成本。此外，CCUS 技术在增加工业产值与就业机会、提高生态环境综合治理能力、解决区域发展瓶颈等方面具有协同效益。

碳中和目标下，我国 CCUS 技术减排潜力和需求巨大。从地质条件来看，松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、准葛尔盆地和塔里木盆地区域具有较好的地质利用与封存条件，具备

万亿吨级的理论封存容量。从减排需求来看，CCUS 是目前实现大规模化石能源零排放利用的唯一技术选择，也是碳中和目标下保持电力系统灵活性的主要技术手段，其中对煤电的减排贡献达到 2-5 亿吨；CCUS 是钢铁水泥等难以减排行业低碳转型的可行技术方案，贡献将达到 2.5-6.5 亿吨；CCUS 与新能源耦合的负排放技术是实现碳中和目标的托底技术保障，BECCS 的负排放贡献可达 3-6 亿吨。总体上，2060 年 CCUS 技术的减排贡献将高达 10-18 亿吨。

未来 CCUS 与能效提升、终端节能、储能、氢能等多领域多技术共同组合，将成为助力碳中和实现的重要解决方案。为推动 CCUS 技术发展与商业化应用，需要构建面向碳中和目标的 CCUS 技术体系，针对碳捕集、运输、利用、封存、监测各个环节开展核心技术攻关；推进 CCUS 全链条集成示范，加速推进 CCUS 产业化集群建设及商业化应用进程；加快 CCUS 技术管网规划布局 and 集群基础设施建设；完善财税激励政策和法律法规体系。



## 4.7 污染治理进程

2013 年以来，随着《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》《2030 年前碳达峰行动方案》的实施，中国大气污染防治工作全面快速开展，全方位实施以工业、燃煤、机动车、农业农村和扬尘等为主体的污染治理措施，管控标准和力度不断加严，成功推动了大气污染减排和协同降碳。本指标梳理筛选了中国污染治理进程中 8 项重要措施，总结了各项措施自 2013 年以来至 2021 年的政策实施进展（图 4-5），分析探讨了在“碳达峰”与“碳中和”背景下，此八项重要措施在“降碳减污”方面的潜力。

**1. 燃煤电厂超低排放改造。**2015 年起，中国针对燃煤电厂实施了大规模的超低排放改造，使燃煤电厂污染物排放达到燃气电厂水平。截至 2021 年底，近 10.3 亿千瓦煤电机组实现超低排放（生态环境部，2022），节能改造规模近 9 亿千瓦、灵活性改造规模超过 1 亿千瓦（人民日报，2022）。

**2. 非电行业深度治理。**2013 年以来，制修订水泥、石化、涂料油墨、制药等多个行业排放标准，开展工业炉窑深度治理，启动钢铁行业超低排放改造工作。截至 2021 年底，1.45 亿吨钢铁产能完成全流程超低排放改造，5.36 亿吨产能正在实施超低排放改造（生态环境部，2022）。

**3. 挥发性有机物治理。**“十三五”以来，中国 VOCs 污染防治工作得到快速推进，陆续

发布和完善了一系列行业和产品排放标准以及相关治理政策文件。截至 2020 年底，全国已完成挥发性有机物治理工程超过 5 万项。

**4. 燃煤锅炉整治。**十三五期间，中国淘汰燃煤锅炉约 10 万台（北京大学能源研究院，2021）。截至 2021 年底，每小时 35 蒸吨以下燃煤锅炉基本淘汰，现存燃煤锅炉数量仅为 2013 年的 1/50（中国环境报，2022）。

**5. 农村清洁取暖。**2017 年以来，中国大力实施北方地区冬季清洁取暖试点工作。截至 2021 年底，累计完成散煤替代 2920 万户左右（生态环境部，2021；中国环境报，2022），清洁取暖覆盖京津冀及周边地区、汾渭平原、东北、西北等地区，北方地区清洁取暖率达到 73.6%（人民网，2021）。

**6. 移动源排放管控。**逐步加严机动车排放标准，淘汰高排放车辆。2020年7月1日起，轻型车国六标准已在全国范围实施，国六标准车用汽柴油全面供应，车用柴油、普通柴油、部分船舶用油已实现“三油并轨”。2021年7月1日起，全国范围内全面实施重型柴油车国六排放标准。截至目前，累计淘汰黄标车和老旧机动车2700多万辆（生态环境部，2020）。

**7. 农业综合治理。**截至2021年底，全国推广测土配方施肥技术应用面积已超1.33亿公顷（网易新闻，2022），秸秆露天焚烧得到有效

控制，农作物秸秆综合利用率超88%（新华社，2022）。

**8. 扬尘综合治理。**2013年以来，城乡环境管理逐步加强，扬尘污染得到有效控制。截至目前，全国整治施工扬尘超过23万起；重点区域城区道路机扫率超过90%（吉林省生态环境厅，2021）；修复矿山土地约49.6万公顷，新增绿地超过1600万公顷，沿海及内河大型煤炭、矿石等干散货码头和主要交通干线、铁路物料堆场全面完成抑尘设施建设和物料传送系统封闭改造（新华网，2022）。

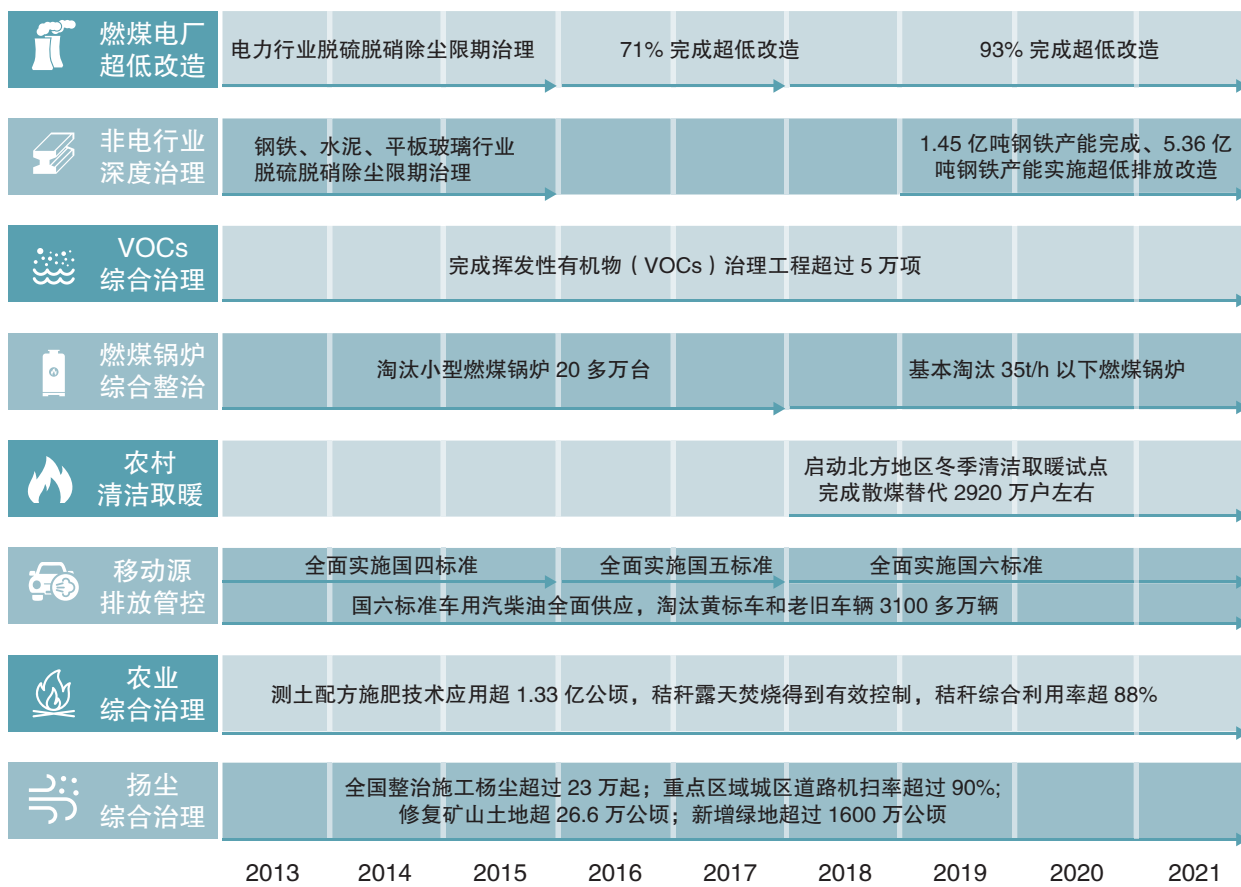


图 4-5 2013-2021 年污染治理指标进度



在碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局的大背景下，中国持续加强温室气体和大气污染物排放协同控制、加强细颗粒物和臭氧协同控制。在污染治理方面，传统工业行业和污染排放部门的末端治理减排潜力已基本挖掘殆尽，非电行业深度治理、挥发性有机物治理、移动源排放管控以及农村清洁取暖等措施有望将继续发挥较为重要的作用，尤其是对于挥发性有机物和氨气等排放量尚未进入明显下降区间的污染物应进一步采取有效减排治理措施，推进相关领域“减污降碳”协同增效。作为中国深入打好污染防治攻坚战、持续改善生态环境质量的关键五年，“十四五”将更加突出精准治污、科学治污、依法治污，以实现减污降

碳协同增效为总抓手，统筹污染治理、生态保护、应对气候变化，深入打好污染防治攻坚战。

2021年，“减污降碳协同增效”这一表述开始大量出现在国家生态文明建设、生态环境保护 and 气候变化应对的话语体系中，通过优化治理体系、促进政策合力、充分发挥有为政府和有效市场的作用、提高管理效能、降低管理成本，一体推动美丽中国目标和碳达峰碳中和目标的实现，逐渐成为全社会的共识。本章旨在追踪2021年以来在温室气体与大气污染控制协同、管理融合出台提出的新政策、新要求，在相关经济政策方面的新进展、新突破，以及地方在相关管理实践方面的新尝试、新成效。





# 大气成分源汇 及减排路径



温室气体与大气污染物同根同源，主要来自化石能源的一次燃烧过程。未来的减排重点将放在能源结构、产业结构和交通结构的转型升级，推动绿色低碳产业发展，这也是实现减污降碳的有效途径。本章主要解析了碳排放和大气污染物排放在各个行业、区域的动态变化，根据现有模型评估了过去的碳汇能力，为未来的温室气体减排和大气污染物治理提供了协同治理的路径选择。

# 5.1 人为源碳排放

碳排放变化是反映低碳发展进程的基础指标之一。本指标旨在跟踪中国二氧化碳排放的动态变化及驱动因素，分析中国碳减排进展及面临挑战。本指标中，2019年及之前的碳排放数据来源于中国碳核算数据库（Shan et al., 2018; Shan et al., 2020; CEADs, 2021），基于《中国能源统计年鉴》数据和IPCC温室气体清单指南方法核算；2020–2021年排放数据来源于全球实时碳数据库全球实时碳数据库（Liu et al., 2020; Carbon Monitor），通过发电量、工业产品产量、交通流量等动态数据测算。

与2020年相比，随着疫情的有效控制和社会经济活动恢复，2021年全国碳排放量出现反弹，其中电力和交通部门碳排放增长最为显著（同比增加8%–12%），工业碳排放小幅上涨3%，居民消费部门排放略有减少，同

比下降1%（图5-1）。

从季度动态变化看，2021年第一季度全国碳排放出现较大幅反弹，其中，国内航空、地面交通排放增长最显著，分别同比上涨58%

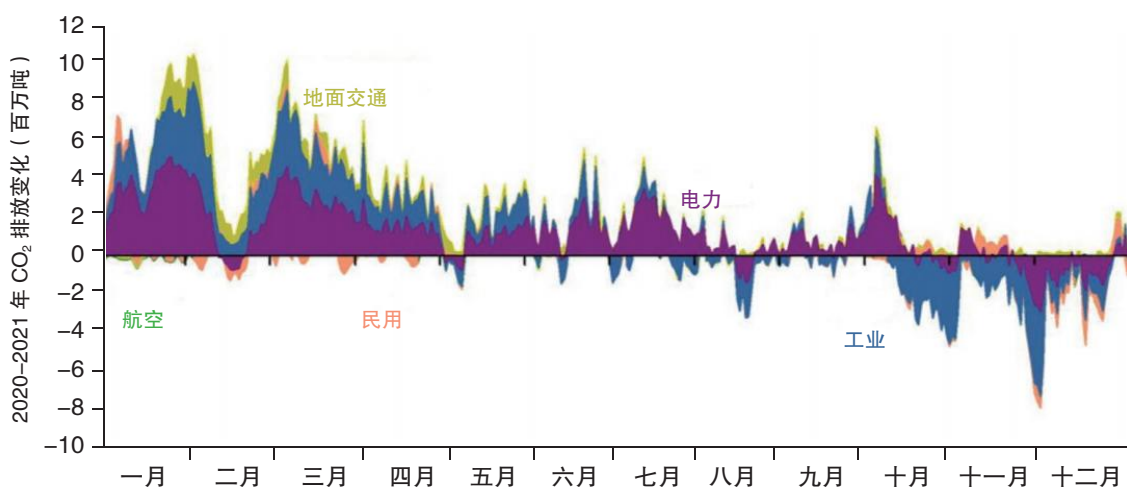


图 5-1 2020–2021 年中国二氧化碳排放量动态变化  
( Liu et al., 2020; Carbon Monitor, <http://carbonmonitor.org> )



和 38%；工业和电力部门排放则增加 21%–24%。随着疫情防控常态化，2021 年一季度之后全国碳排放趋势逐渐平稳，第二和第三季度同比增长 8% 和 2%，第四季度同比下降 5%。

分析各省自“十三五”以来的碳排放变化如图 5-2 所示。2015–2020 年间，全国多数省份、直辖市（25 个）碳排放呈增加趋势。其中内蒙古、河北、新疆、山西和山东五个省份的碳排放增量最大，贡献了全国碳排放总增量的一半以上。河南、四川、重庆、北京和吉林

五省（直辖市）的碳排放则呈下降趋势。

从行业变化看，2015–2020 年，全国除北京、上海、青海以外的绝大多数省份电力部门碳排放呈增加态势，是全国多数省份碳排放增长的主要驱动因素；而 17 个省份的工业部门碳排放下降，显示出“十三五”以来工业行业结构调整碳减排效果显著。民用和交通部门碳减排成效初显，分别有 10 个和 7 个省份排放出现下降。电力行业有效降碳、以及终端行业的进一步深度减排是各省如期实现碳达峰、碳中和目标的关键。

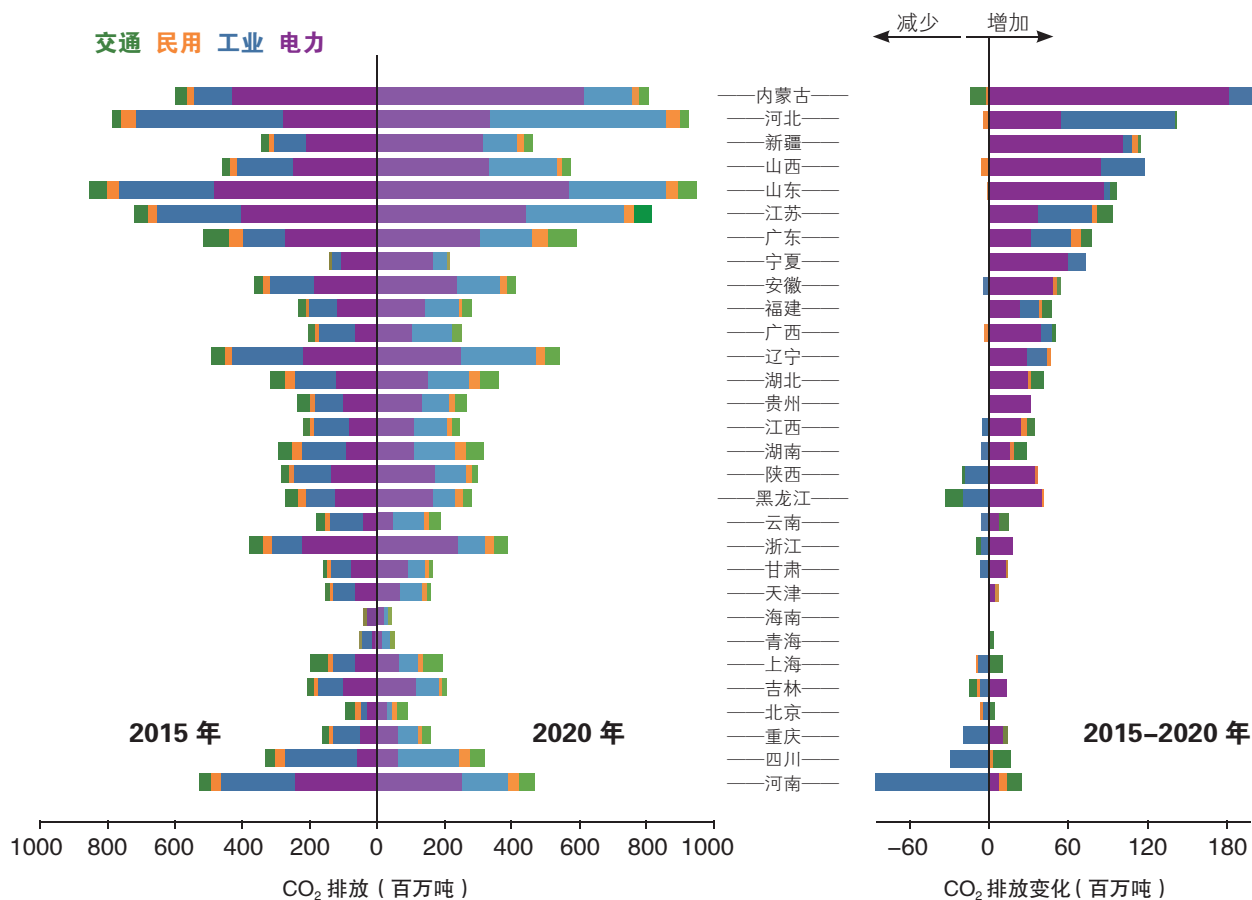


图 5-2 2015–2020 年中国分省二氧化碳排放量变化 (Shan et al., 2018; Shan et al., 2020; CEADs, 2021)

## 5.2 土地利用变化与陆地碳汇

实现“碳中和”目标需要全面考虑减少碳排放和增加碳汇两个方面，其中通过陆地生态系统碳汇能力抵消部分人为碳排放的潜力已经引起了科学界、决策者和公众前所未有的关注。本指标基于中国陆地碳汇的最新研究结果，分析了我国陆地碳汇的年代际变化及其抵消人为源碳排放比例的变化，土地利用变化对碳汇贡献的历史变化趋势及其对实现碳中和目标的潜在贡献。

准确评估国家或区域尺度的陆地生态系统碳收支需要结合自上而下（大气反演）和自下而上（调查清单、涡度通量观测、生态系统过程模型等）两大类方法（Fan et al., 1998; Wang et al., 2020）。综合两类方法的评估结果，上世纪80年代以来中国陆地碳汇平均约为  $0.24\text{PgC/yr}$  ( $0.17\text{--}0.35\text{PgC/yr}$ )（Piao et al., 2022），其中，2010s的陆地碳汇的估计在  $0.25\text{--}0.28\text{PgC/yr}$ （Wang et al., 2022b），约合9–10亿吨  $\text{CO}_2$ 。

基于2000–2019年的碳循环过程模型和大气反演模型一致表明过去20年中国的陆地碳汇呈现增长的趋势，2010s的中国陆地碳汇较2000s增加10%–24%。然而，由于人为源碳排放的快速增加，我国陆地碳汇抵消化石燃料碳排放的比例有所下降，从2000s的21–24%下降至目前的7–15%（朴世龙等，2022）。目前中国的人工林主要为中幼龄林，森林碳汇强度将随着树龄的增加而降低，如果

不加以合适的生态系统管理，预计未来中国陆地碳汇抵消的化石燃料排放的比例可能进一步下降。

森林面积的增加是中国土地利用变化的最突出特征。大规模的植树造林使我国的森林覆盖率自2000s以来增加了4.83%（当前森林覆盖率为23.04%）（国家林业和草原局，2019）。森林覆盖率的大规模提升对中国陆地生态系统的碳汇能力造成了巨大的影响，近几十年的植树造林则使中国森林生态系统成为了一个重要的碳汇（Yang et al., 2022）。根据全球碳计划中的12个动态植被模型的模拟结果（图5–3），中国在2009–2018年间由土地利用变化造成的碳收支为  $-162 \pm 145 \text{TgC/yr}$ ，这与BLUE簿记模型的估计结果相似（ $-147 \pm 139 \text{TgC/yr}$ ），但与H&N簿记模型的估计结果相差较大（ $49 \pm 10 \text{TgC/yr}$ ）（Friedlingstein et al., 2020; Hansis et al., 2015; Houghton & Nassikas, 2017）。

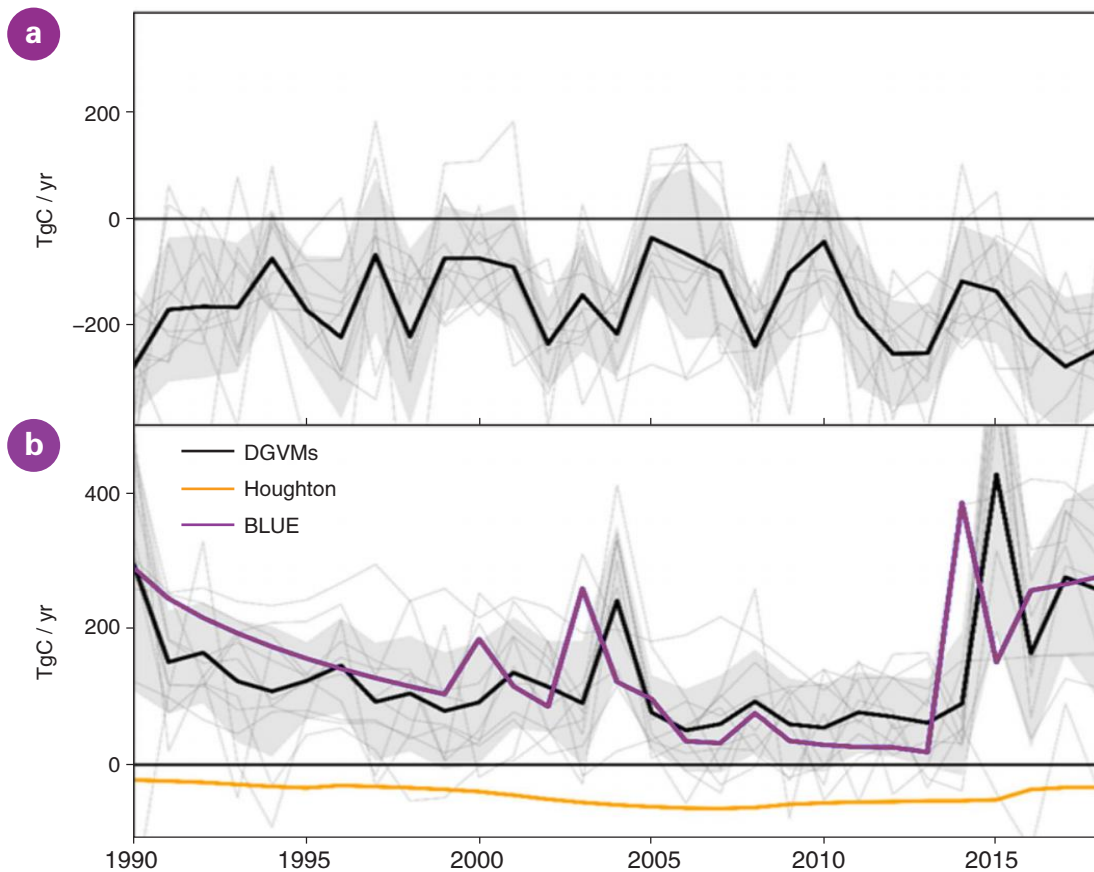


图 5-3 (a) 碳循环过程模型模拟的中国陆地碳汇

(b) 不同方法估计的中国土地利用变化碳收支

( Friedlingstein et al., 2023; Hansis et al., 2015; Houghton & Nassikas, 2017 )

灰色细线表示各不同的碳循环过程模型模拟 ( DGVM ) 的模拟结果, 黑色线为多个 DGVM 的平均值, 灰色阴影表示标准差范围; 紫色线和橙色线分别为两个簿记模型的结果 ( BLUE 和 Houghton )

由于 H&N 簿记模型使用的是联合国粮食及农业组织 ( FAO ) 的森林统计数据, 和中国森林资源清查数据 ( 国家林业和草原局, 2019 ) 更为一致, 因此 H&N 簿记模型能够更好地反映出中国近几十年来由于植树造林所形成的碳汇特征。由 H&N 簿记模型的结果可知, 中国土地利用变化自本世纪初以来始终表现为碳汇效应, 并在总体上表现出先增加后减少的趋势, 2007 年基于土地利用变化形成的碳汇达到峰值, 其值约为 65 TgC/yr。

未来碳中和状态下陆地生态系统将逐渐趋于平衡态, 碳汇能力随之下降, 其在实现“碳中和”之后能否持续并稳定地发挥碳汇功能还存在较大的不确定性。为保持陆地生态系统的持久碳汇能力, 需引入基于陆地生态系统的负排放措施, 制订科学有效的森林管理方案。同时, 进一步完善陆地生态系统碳汇的监测和核算体系对科学评估碳汇能力也至关重要。



## 5.3 污染物排放及协同减排进展

CO<sub>2</sub> 排放与大气污染具有同源性和协同效应。本指标利用中国多尺度排放清单模型（MEIC）、人为源碳排放数据（指标 5.1）、温室气体与污染物协同控制模型（GAINS），分析了十三五期间全国及各个省份的碳减排与 PM<sub>2.5</sub> 污染协同改善成效。

从全国尺度看(图 5-4)，2015–2020 年间，我国工业部门 CO<sub>2</sub> 减排与 PM<sub>2.5</sub> 污染改善呈现正协同效应，表明十三五期间工业部门的能源结构、产业结构调整措施成效显著。相反，电力供热部门碳减排与 PM<sub>2.5</sub> 改善呈显著负效应，这是由于十三五期间煤电规模持续增长，推动

电力行业碳排放不断增加；而电力行业污染物超低排放改造则推动了 PM<sub>2.5</sub> 浓度下降。随着电力行业污染末端控制的深度推进，其在下阶段的碳与污染物协同减排潜力相对有限；而供热部门污染治理仍有较大空间，结构调整的协同减排潜力有待大幅释放。

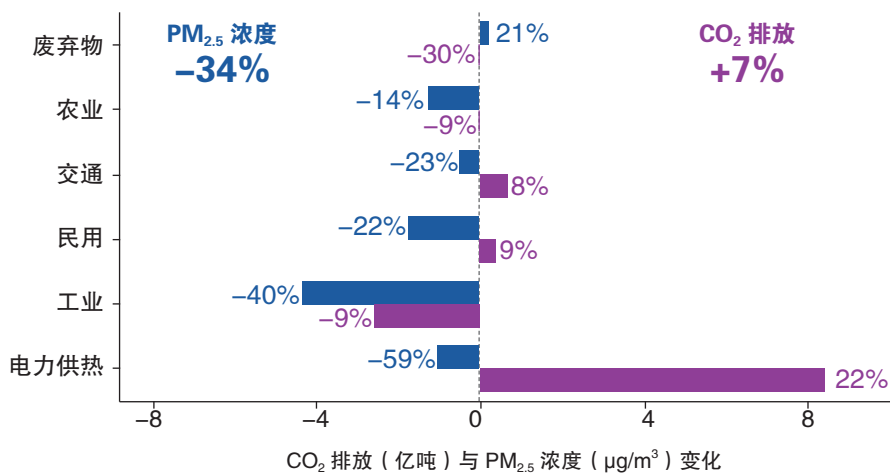


图 5-4 2015–2020 年中国 CO<sub>2</sub> 排放与 PM<sub>2.5</sub> 污染协同控制情况

对交通、民用部门，虽然十三五期间所采取的结构调整、散煤治理等转型措施初见成效，但CO<sub>2</sub>排放总体仍呈增长态势，小幅增长8%；除结构调整措施外，机动车排放标准升级、“车油路一体化”等末端治理措施的实施，使同期PM<sub>2.5</sub>浓度降低22%–23%。交通、民用部门下阶段的结构转型仍有较大的协同减排潜力。

进一步分析各省主要行业的CO<sub>2</sub>排放与PM<sub>2.5</sub>污染协同控制情况如图5-5所示，图中圆形标记的大小和颜色分别代表了2020年行业的CO<sub>2</sub>排放量和单位CO<sub>2</sub>排放导致的PM<sub>2.5</sub>浓度。从全行业看，2015–2020年间，仅北京、重庆、河南、四川、吉林五个省（市）实现了CO<sub>2</sub>减排与PM<sub>2.5</sub>污染改善的正协同效应；其余省份则均呈PM<sub>2.5</sub>污染改善、CO<sub>2</sub>排放上涨的趋势，其中河北、山西、内蒙古、山东等重

工业省份的负协同效应尤为显著。

从不同行业的协同控制情况看，各省电力供热部门普遍呈现负协同效益，PM<sub>2.5</sub>污染改善的同时CO<sub>2</sub>排放增长显著；在我国双碳目标的压力下，低碳电力系统亟待构建。主要终端部门则实现了不同程度的正向协同减排，工业部门正向协同效益最显著，超过一半省份的工业行业同时实现了碳减排与PM<sub>2.5</sub>污染改善。然而对于河北、山西、内蒙古等重工业省份，工业CO<sub>2</sub>排放则平均上涨15%，表明我国重工业行业的低碳转型仍在起步阶段，重工业经济区将面临更大的碳减排压力；该类区域在下阶段应大幅强化钢铁、化工、冶金、建材等重工业行业的低碳结构转型。对交通、民用部门，有近三分之一的省份实现了正向协同控制，初见成效的节能降耗、结构转型措施仍需进一步强化。

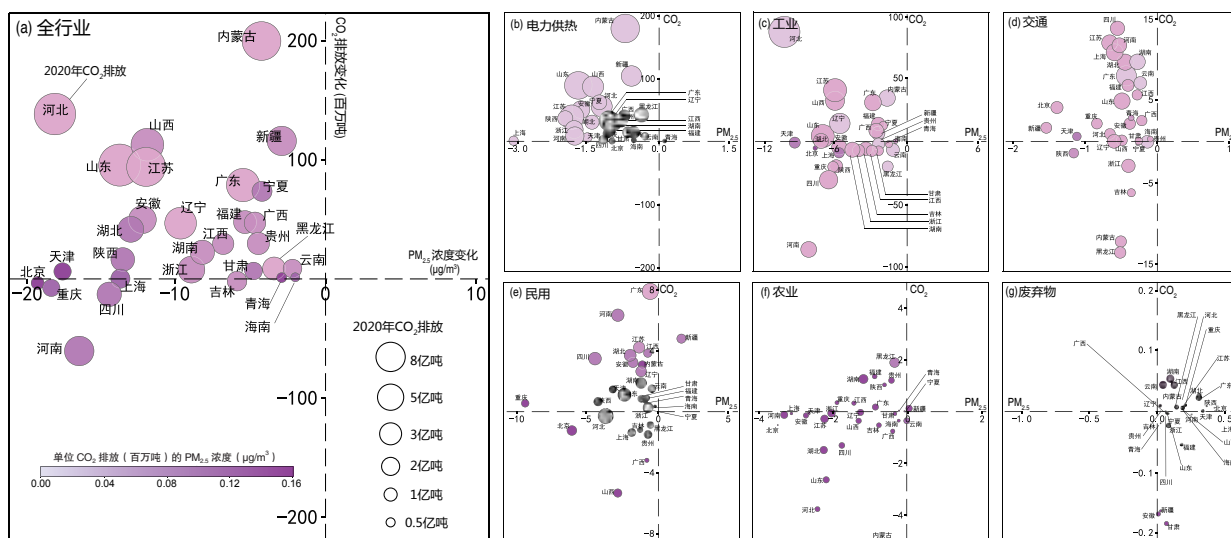


图 5-5 2015–2020 年各省 CO<sub>2</sub> 排放与 PM<sub>2.5</sub> 污染协同控制情况

## 5.4 协同减排路径

我国以化石燃料为主的一次能源结构决定了碳排放与大气污染具有高度的同源性，因此碳达峰、碳中和目标将有力推动我国大气污染物协同减排，实现空气质量的协同改善。本指标在总结分析现有研究基础上，评估了碳达峰、碳中和路径对大气污染物减排和空气质量改善的协同效益，强调了碳中和目标下的深度低碳能源转型对我国空气质量深度改善、实现世界卫生组织（WHO）空气质量指导值的关键作用。

双碳背景下，我国 CO<sub>2</sub> 排放将于 2030 年前达峰已成为基本共识，且峰值碳排放可控制在 110 亿吨左右（Liu et al., 2019; Shi et al., 2021; Tang et al., 2022）。在 2030 年前实现碳达峰的基础上，通过进一步提升可再生能源的发电比例，加速终端用能电气化转型和节能改造，可进一步推动碳排放提前达峰。实现碳达峰对推动大气污染物协同减排及空气质量达标具有显著作用：根据生态环境部环境规划院测算，碳达峰目标的实现可推动 2030 年全国主要污染物排放较当前水平下降三分之一以上，届时全国 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度和 O<sub>3</sub> 浓度年评价值（日最大 8 小时浓度均值的第 90 百分位数）将分别下降至 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  左右，全国空气质量达标城市比例提升至 80% 以上（Shi et al., 2021）。实现碳排放尽早达峰，不仅是长期碳中和目标得以顺利推进的重要阶段性目标，同时也将为我国在下一个十年打好污染防治攻坚战提供重要的驱动力和着力点（何建坤，2021）。

碳中和目标下的深度低碳能源转型是我国中长期气候环境治理、空气质量深度改善的必由之路。基于情景推演和模型测算，多项研究表明实现碳中和目标将使全国 2060 年的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度下降到 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  左右，并推动 O<sub>3</sub> 浓度年评价值下降至 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，届时将有半数以上城市的年均空气质量可达到 WHO 2005 版的空气质量指导值要求（Cheng et al., 2021b; Shi et al., 2021; Zhang et al., 2021b）。

然而，协同改善效益并非一成不变，不同的碳中和技术路径选择带来的空气质量改善协同效益具有明显差异。例如，以高可再生能源为主的碳中和路径将比以 CCS 为主的路径带来 35% 的额外空气质量改善效益（Zhang et al., 2021b）。近年来，我国风电、光伏和生物质发电等零碳技术，以及以 CCUS 为代表负碳技术的全面发展，为实现碳中和目标提供了不同的低碳、零碳、负碳技术选择；而不同的碳中和



路径将会使中国能源系统经历不同的深刻变革，进而在 2060 年形成差异化的能源产业排放源格局。将空气质量协同效益纳入碳中和技术路径选择的决策因素，将对未来中长期环境深度改善、切实保障公众健康具有关键意义。

双碳目标为我国同时应对全球气候变化与

区域空气污染的双重挑战提供了重要的历史机遇。尽早实现碳排放达峰，妥善选择以可再生能源为主导的碳中和技术路径，建立零碳能源产业系统，更有益于我国中长期空气质量的深度改善。值得强调的是，2021 年 WHO 加严了空气质量指导值，从保障公众健康角度为我国双碳路径下的空气质量协同改善提出了更高要求。







# 健康影响与协同效益



大气细颗粒物（ $PM_{2.5}$ ）、臭氧（ $O_3$ ）和二氧化氮（ $NO_2$ ）是现阶段危害我国人群健康的重要污染物。2021年我国居民的 $PM_{2.5}$ 、 $O_3$ 和 $NO_2$ 的环境暴露水平同比下降，三种污染物暴露相关的人口早亡人数相较前几年也呈现降低趋势。2021年我国极端天气气候事件呈现多发强发的特点，严重威胁了我国人群健康，造成了极大的经济损失。碳中和目标对“气候变化与空气污染物的协同治理”提出全新严格的要求，过去一年里，我们发现碳中和目标下能源结构和技术更迭发生变化，能源系统、生产侧和消费侧对低碳商品或服务进行了优化选择，在改善空气质量的同时，提升了人群的健康水平；同时，COVID-19期间实行的政策改变了能源需求，导致短期内能源消费水平降低，产生了一定的健康效益。



# 6. | 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 的污染暴露数据评估了我国居民空气污染暴露水平的变化并采用最新的暴露 - 响应关系估算了空气污染暴露相关的成人过早死亡人数，从而量化我国近年来空气污染控制的健康效益。

我国居民的 PM<sub>2.5</sub> 长期和短期暴露水平持续下降。2021 年全国人口加权平均的 PM<sub>2.5</sub> 年均暴露浓度为 31.2μg/m<sup>3</sup>，相比 2020 年和 2017 年分别下降 6.8% 和 30.3%。各重点区域的 PM<sub>2.5</sub> 年均暴露水平为 21.4–44.2μg/m<sup>3</sup>，相比 2017 年下降 29.3%–37.3%，其中，珠三角的改善最为明显，京津冀及周边地区次之。2021 年，全国约有 38% 的人口居住在年均浓度超过国家二级标准限值的地方，相比 2017 年 (68%) 减少了 30 个百分点。特别地，汾渭平原地区居住在年均浓度超标区域的人口占比显著减少，从 2020 年的 92% 下降为 67%。我国居民 PM<sub>2.5</sub> 污染短期暴露水平也有明显改善。

2021 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 75μg/m<sup>3</sup>) 为 23 天，相比 2017 年减少 25 天。

2021 年 O<sub>3</sub> 长期和短期暴露水平同样呈现下降趋势。2021 年全国人口加权平均的 O<sub>3</sub> 长

期暴露水平，即年最大 6 个月平均 O<sub>3</sub> 最大 8 小时浓度，相比于 2020 年下降了 3.4μg/m<sup>3</sup> (3%)。除珠三角外，2021 年各重点区域的 O<sub>3</sub> 长期暴露水平相比 2017 年下降 1.5%–5.1%。珠三角的 O<sub>3</sub> 长期暴露水平相比 2017 年上升 8.9%，O<sub>3</sub> 污染形势严峻。短期 O<sub>3</sub> 暴露水平在全国、京津冀及周边地区以及汾渭平原出现下降。2021 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 160μg/m<sup>3</sup>) 为 15.7 天，比 2017 年减少 1.6 天，各重点区域的人口加权平均超标天数为 11–44 天。虽然 2021 年臭氧的长期和短期暴露相比于 2017 年有所下降，但全国所有人口的 O<sub>3</sub> 长期暴露水平均超过 WHO 《全球空气质量标准指南 (2021)》限值 60μg/m<sup>3</sup>，臭氧污染仍然严重威胁我国人群健康。

随着一系列大气污染防治政策的颁布和实施，我国大气污染物 NO<sub>2</sub> 的暴露水平持续降低。卫星反演模型数据显示，2021 年我国 NO<sub>2</sub> 人口

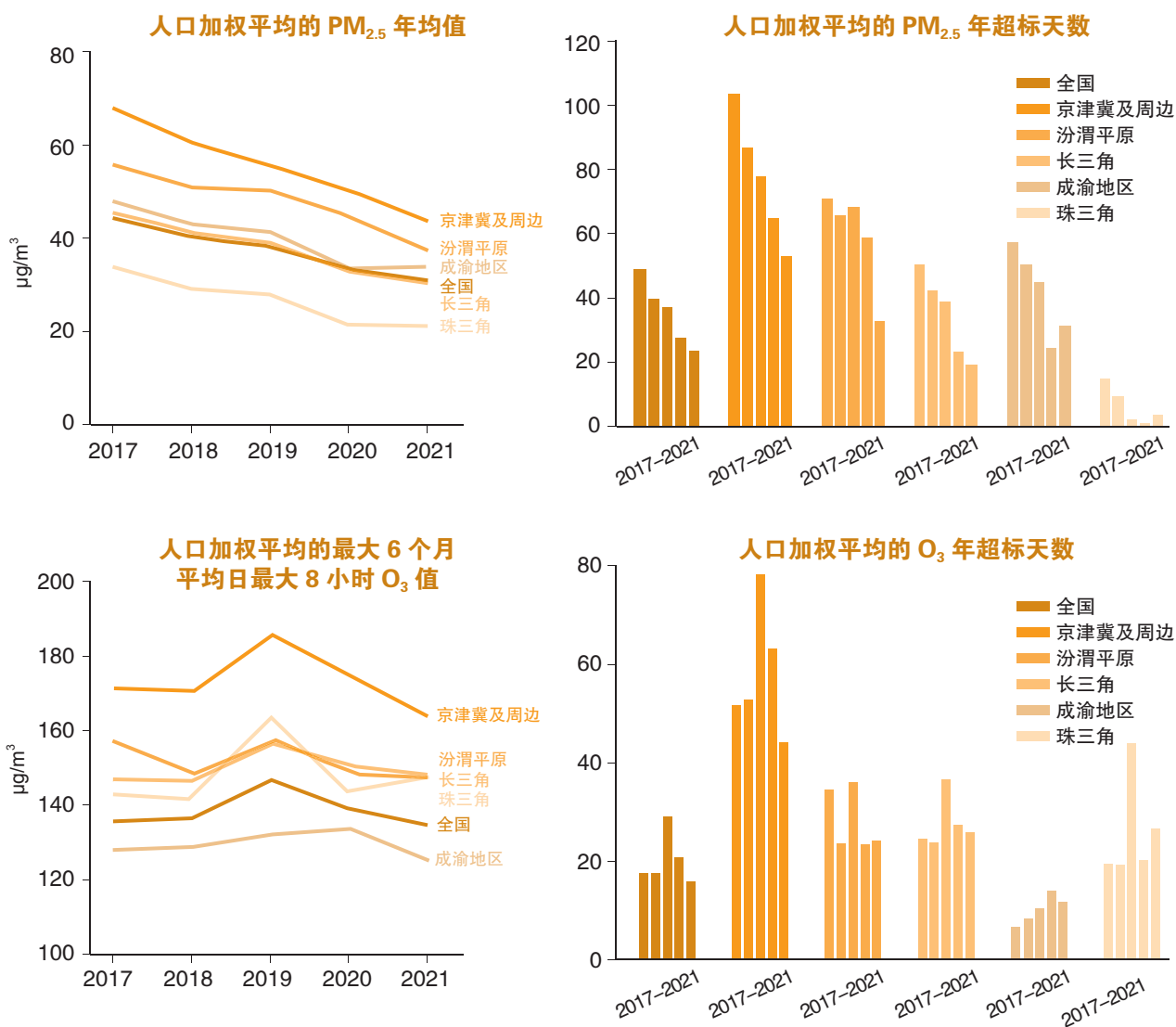


图 6-1 2017–2021 年我国 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染长期、短期暴露水平的变化

加权年均暴露浓度为 20.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相比 2020 年和 2017 年分别下降 6.0% 和 20.3%。环境空气质量国控监测站数据显示，2021 年我国 NO<sub>2</sub> 人口加权年均暴露浓度为 23.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相比 2020 年和 2017 年分别下降 2.6% 和 22.3%，但我国 NO<sub>2</sub> 长期暴露浓度仍高于 WHO 在 2021 年发布的 AQG 年均暴露基准值 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。卫星反演模型数据显示，2021 年全国重点区域 NO<sub>2</sub> 人口加权年均浓度为 19.7–30.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，相比 2017 年

下降 12.2%–21.0%。环境空气质量国控监测站数据显示，2021 年全国人口加权日均 NO<sub>2</sub> 浓度超过 AQG 日均基准值（25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ）的天数为 131 天，相比 2017 年减少 64 天。我国 NO<sub>2</sub> 的长期和短期暴露浓度均高于 AQG 基准值，NO<sub>2</sub> 仍是威胁我国居民生命健康的主要大气污染物之一。

PM<sub>2.5</sub> 长、短期暴露是危害公共健康的重要

因素，根据全球疾病负担评估研究（Murray et al., 2020），其可通过增加脑卒中、缺血性心脏病、慢性阻塞性肺部、肺癌、II型糖尿病、下呼吸道感染等疾病风险增加成人的过早死亡，通过增加早产和低出生体重儿风险增加新生儿死亡（Ghosh et al., 2021）。近年来流行病学研究表明PM<sub>2.5</sub>暴露还可能诱发其它成人和婴幼儿疾病：包括认知功能障碍（Tan et al., 2021）、慢性肾病（Li et al., 2021b）、流产和死胎（Wang et al., 2021）等。“新型”健康危害提示应持续研究PM<sub>2.5</sub>暴露的致病机制，完善暴露反应关系模型，降低相关风险评估结果的不确定性。

得益于我国PM<sub>2.5</sub>长、短期暴露水平的持续下降，相关的成人过早死亡人数显著降低，沿用Xiao et al.,（2022）研究中的数据来源和方法进行测算，2021年我国PM<sub>2.5</sub>长期和短

期暴露相关的成人过早死亡人数分别为121万（95% CI: 107 – 135万）和6万（95% CI: 4 – 8万），2017–2021五年间下降幅度分别为23.9%和26.2%，均大于2013–2017五年间下降幅度（长期：9.1%；短期：25.2%），尤其是PM<sub>2.5</sub>长期暴露相关过早死亡人数的下降增速明显，除了暴露水平持续改善，还可能的原因包括：（1）PM<sub>2.5</sub>长期暴露反应关系在低浓度段更为陡峭，相较于高浓度水平，在中低浓度水平基础上的同等暴露改善的边际效益更大；（2）人口老龄化增加了整体人群对于PM<sub>2.5</sub>的易感性，一定程度上放大了PM<sub>2.5</sub>改善相关的健康效应（Geng et al., 2021）。

部分研究表明O<sub>3</sub>暴露的健康危害独立于PM<sub>2.5</sub>暴露的健康危害，由于O<sub>3</sub>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

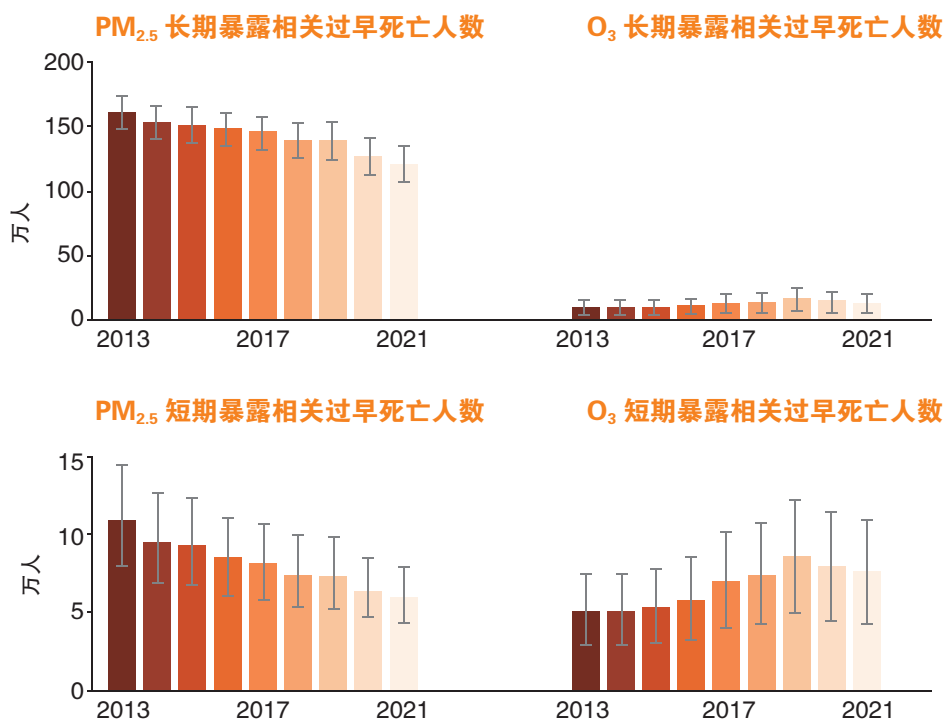


图 6-2 2013–2021 年我国归因于 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 短期与长期暴露的成人过早死亡人数



污染物之一。2021年O<sub>3</sub>长期和短期暴露相关的成人过早死亡人数分别为13万(95% CI: 6-21万)和8万(95% CI: 4-11万);相较于2019-2021三年间O<sub>3</sub>长、短期暴露相关死亡人数均呈现下降趋势。比较发现,O<sub>3</sub>短期暴露相关的过早死亡人数较PM<sub>2.5</sub>更高,即使考虑到不确定性,也与PM<sub>2.5</sub>处于同等水平。

大量队列研究比较一致地显示,NO<sub>2</sub>长期暴露可增加人群全因死亡和呼吸系统死亡风险。部分队列研究也提示,长期NO<sub>2</sub>暴露可能增加心脑血管疾病、糖尿病等疾病死亡的风险,

可增加多种慢性病的发病风险,但结果并不一致。Meta分析和全球多中心研究显示,NO<sub>2</sub>短期暴露与每日全因死亡率和心肺疾病死亡率升高有关(Meng et al., 2021, Orellano et al., 2020)。应用我国272个主要城市的暴露反应关系研究结果(Chen et al., 2018),计算得到2021年的非意外死亡人数、心血管疾病死亡人数和呼吸系统疾病死亡人数分别为4.78万(95% CI: 3.72-5.85万)、2.52万(95% CI: 1.96-3.36万)、0.46万(95% CI: 0.35-0.58万)。相较于2017-2020年,2021年NO<sub>2</sub>短期暴露相关死亡人数有下降趋势(图6-3)。

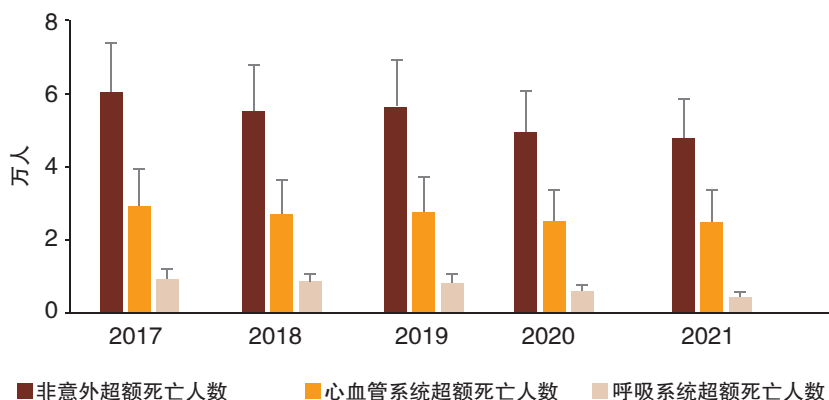


图 6-3 2017-2021 年我国归因于 NO<sub>2</sub> 短期暴露的超额死亡人数

## 6.2 气候变化与健康影响

极端天气气候事件发生频率和强度增加是气候变化影响的直接表现之一。在全球气候变化的影响下，2021年我国极端天气气候事件多发强发，高温、寒潮、洪涝、干旱、沙尘和强对流天气等事件过程多且强度大，严重威胁了人民生存环境和身体健康，给受灾地区带来了巨大的疾病负担和经济损失。其中，极端降水事件是最为频发且危害严重的极端天气气候事件。

2021年我国河南省遭遇历史特大暴雨，且多地出现极端强降水并引发严重山洪、城市内涝。长江上游、黄河中下游等流域相继发生罕见秋汛，与主汛期洪涝重叠加重了灾害影响。极端降水事件及其引发的山洪、内涝等可直接造成人员意外伤亡；同时污染清洁水源、破坏消毒设施，导致各种病原微生物和媒介生物的快速滋生，进而造成传染性疾病的暴发流行；此外，还可影响非传染性疾病发病风险，并造成短期和长期的精神心理健康影响。

极端降水及其引发的洪涝灾害可造成因溺水、触电、火灾和身体创伤等意外伤害导致大量人员伤亡。根据官方统计，1950–2020年，我国因洪涝所致的年均失踪/死亡人数为4193人（中国水旱灾害防御公报编写组，2021）。2021年郑州“7·20”特大暴雨事件更是造成总计1478.6万人受灾，398人失踪/死亡。此外，极端降水和洪涝灾害还会破坏公共设施、中断通讯设备，造成救护车无法及时救治、医

院停电延误救治等，从而间接影响脆弱人群的慢性非传染性疾病死亡风险。北京市2012年“7·21”极端降水事件的调查研究数据显示，受灾地区的非意外死亡风险总体上升了34%，其中循环系统疾病死亡风险增加达37%；事件发生的两天内，暴雨洪涝所致的全市超额死亡人数达79人（Yan et al., 2020）。

极端降水事件会影响病原体的繁殖、传播和分布，同时其引发的山洪和城市内涝会破坏城市基础设施并恶化居住环境，造成介水传染病、肠道和呼吸道传染病等发病风险增加。针对我国华南地区的相关研究显示，暴雨洪涝后，急性出血性结膜炎、流感、肺结核、流行性脑膜炎等11种传染病发病率显著上升（Ding et al., 2019）。在我国西北内陆地区，月累计降水量每增加10mm，手足口病发病风险增加20%（Huang et al., 2021b）。安徽省的研究显示，暴雨洪涝发生期间的细菌性痢疾风险上升29%，洪涝发生后的一年内感染性腹泻发

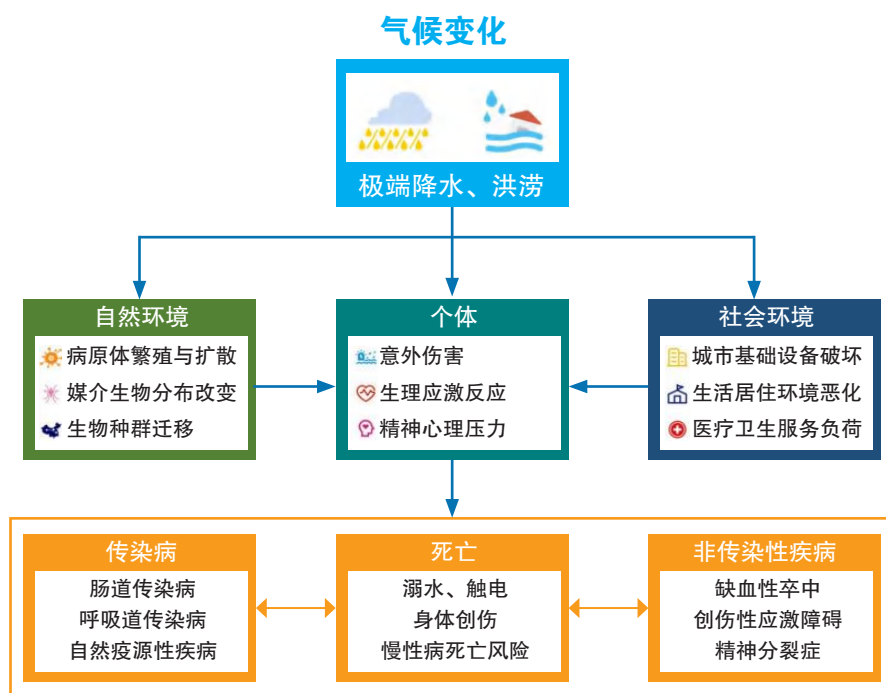


图 6-4 暴雨洪涝造成健康效应的机制路径

病风险总体上升 21% (Liao et al., 2020)。极端降水和洪涝灾害还会改变生物物种的地理分布范围，扩大某些物种的潜在分布区域，进而导致自然疫源性疾病的传播风险增加。一项包含全国 254 个城市的研究显示，在我国温带、暖温带和亚热带均观察到降水量与肾综合征出血热发病风险呈线性正相关关系 (Cao et al., 2020)。华南地区的研究表明，降水量与登革热发病风险显著相关，极端降水事件后登革热发病风险上升了 50.5% (Cheng et al., 2021a)。

当极端降水及其引发的洪涝灾害的规模超出受灾地区承受能力时，还会影响慢性非传染性疾病发病风险和精神心理健康。我国合肥极端降水后 3 到 8 天，缺血性卒中住院风险显著上升，最高增加 4.8% (Tang et al., 2020)。极端降水灾后的精神心理健康影响同样十分显

著。合肥暴雨洪涝过后的第 5 到 14 天，精神分裂症住院风险显著上升。且暴雨洪涝强度高负面健康效应越强，住院风险最高可增加 7.3% (Wei et al., 2020)。

此外，高温热浪、寒潮等其他我国高发的极端天气气候事件也会对受灾地区造成较大的健康威胁。我国多中心城市研究发现，高温热浪期间死亡风险上升了 15.7% (Sun et al., 2021)。另一项基于全国 272 个城市的研究显示，寒潮时期人群死亡风险同样显著上升，非意外死亡风险增加了 39% (Lei et al., 2022)。我国的一项全国性研究显示，中国的热浪相关死亡人数具有快速增长、非线性和极端性的时间演变特征 (Chen et al., 2022)。过去四十年间，热浪归因死亡负担增加了四倍，从 1980 年代的 3679 人上升到 2010 年代的 15500 人。另外，2010 年代的



归因死亡人数增速相较于 1980–2009 年加快了 2.8 倍。近年来，其极端性愈加显著，2013，2017，2019 年归因死亡人数均超过 2 万人。而在区域上，归因死亡负担还呈现强烈的空间异质性，华东和华中地区负担更重，特别是山东、河南、河北等省份。女性、75 岁以上的老年人、患有基础心脑血管疾病的人群是高温热浪环境下的脆弱人群，他们的健康风险更大。

面对日益频发且愈发极端化的极端天气气候事件所带来的健康威胁，一方面，完善基于人群健康效应的极端天气事件早期预警系统和应急应对体系，是人类社会主动应对气候变化下区域健康风险的有效策略。另一方面，提升减缓气候变化的行动力度，从根源上减少人为因素所致气候变化造成的极端天气气候事件，则是应对气候变化健康威胁的根本途径。



## 6.3 协同治理的健康收益

碳中和目标对“温室气体与空气污染物的协同治理”提出全新严格的要求，尤其在新型冠状病毒肺炎（COVID-19）肆虐的背景下，健康改善在短期、长期的不确定性如何衡量？本指标从碳中和目标、新冠疫情影响两大背景入手，识别生产与消费侧减排潜力、预测人群健康改善效益，为碳减排与空气污染协同治理提供重要的科学建议。

碳中和目标将给能源结构和技术更迭带来深刻变革，显著改善空气污染，提升健康水平。考虑到实现碳中和目标的多种能源技术路径，2035年和2060年的PM<sub>2.5</sub>浓度分别达到18.7–23μg/m<sup>3</sup>、6.1–11μg/m<sup>3</sup>（Zhang et al., 2021b; Shi et al., 2021）。如果我国将健康协同效益纳入气候政策制定，需选择更多依靠发展可再生能源的碳中和途径，避免过度依赖负排放技术：2060年可再生能源主导路径的PM<sub>2.5</sub>浓度降为6.1μg/m<sup>3</sup>，可避免的过早死亡人数为2900–5000万例（Zhang et al., 2021b）。

能源系统、生产侧和消费侧通过对低碳商品或服务的优化选择，将会显著减少碳减排和污染物排放，极大改善人群健康。如果2030年我国电力结构中，煤炭被可再生能源或天然气能源完全替代，最多可以避免17137–24220例过早死亡（Scott et al., 2021）；考虑到现存电厂的提前退役，可大幅避免

77200例过早死亡（Tong et al., 2021）。农业的开放式生物质燃烧会释放大量的颗粒物和气态污染物，影响当地的空气质量和人群健康。通过实施秸秆焚烧禁令，全国PM<sub>2.5</sub>总排放量下降46.9%，避免的过早死亡人数达到4256人（Huang et al., 2021a）。同时，农产品贸易隐含的污染物贡献也不容忽视，我国东部的PM<sub>2.5</sub>大约有1–2μg/m<sup>3</sup>由生产出口食品时的NH<sub>3</sub>排放贡献，导致26.3万人的过早死亡（Ma et al., 2021）。当居民倾向于选择素食、节约食物及增加步行与自行车出行等可持续方案时，到2040年，我国每年因饮食和运动因素分别可避免的过早死亡人数最多可达到281.0万和80.9万人（Hamilton et al., 2021）。

COVID-19期间实行的政策改变了能源需求，导致短期内能源消费水平降低，为居民提供了一个“获得清洁空气”的机会。COVID-19封锁期间，我国278个城市的室外



PM<sub>2.5</sub> 浓度下降 1.22–7.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$  不等，全国总可避免过早死亡为 5.4–50.8 万例，其中河南和山东最为显著，分别避免 1161 和 1019 的过早死亡（Qi et al., 2022; Li et al., 2021c; Bai et al., 2022）；封锁期后的防疫政策反馈出正面的公共卫生效益，居民行为的改变可以避免

29.3 万例的过早死亡（Qi et al., 2022）。由于室外活动受到限制以及家用燃料用于烹饪和取暖的增加，室内颗粒物暴露显著增加，PM<sub>2.5</sub> 浓度增加 5.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，导致 609–2860 例的过早死亡（Zhang et al., 2022b）。



# 参考文献

- Bai, H., Gao, W., Zhang, Y., & Wang, L. (2022). Assessment of health benefit of PM<sub>2.5</sub> reduction during COVID-19 lockdown in China and separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology. *Journal of Environmental Sciences*, 115, 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.01.022>
- Cai, W., Li, K., Liao, H., Wang, H., & Wu, L. (2017). Weather conditions conducive to Beijing severe haze more frequent under climate change. *Nature Climate Change*, 7 (4), 257–262. <https://doi.org/10.1038/nclimate3249>
- Cao, L., Huo, X., Xiang, J., Lu, L., Liu, X., Song, X., Jia, C., & Liu, Q. (2020). Interactions and marginal effects of meteorological factors on haemorrhagic fever with renal syndrome in different climate zones: Evidence from 254 cities of China. *Science of The Total Environment*, 721, 137564. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137564>
- Chen, H., & Sun, J. (2017). Anthropogenic warming has caused hot droughts more frequently in China. *Journal of Hydrology*, 544, 306–318. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.044>
- Chen, H., & Sun, J. (2019a). Increased population exposure to extreme droughts in China due to 0.5°C of additional warming. *Environmental Research Letters*, 14 (6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab072e>
- Chen, H., Wang, H., Sun, J., Xu, Y., & Yin, Z. (2019b). Anthropogenic fine particulate matter pollution will be exacerbated in eastern China due to 21st century GHG warming. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19 (1), 233–243. <https://doi.org/10.5194/acp-19-233-2019>
- Chen, H., & Sun, J. (2021a). Significant increase of the global population exposure to increased precipitation extremes in the future. *Earth's Future*, 9 (9). <https://doi.org/10.1029/2020ef001941>
- Chen, H., Zhao, L., Dong, W., Cheng, L., Cai, W., Yang, J., Bao, J., Liang, X.-Z., Hajat, S., Gong, P., Liang, W., & Huang, C. (2022). Spatiotemporal variation of mortality burden attributable to heatwaves in China, 1979–2020. *Science Bulletin*, 67 (13), 1340–1344. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2022.05.006>
- Chen, R., Yin, P., Meng, X., Wang, L., Liu, C., Niu, Y., et al. (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>

- Chen, Y., Liao, Z., Shi, Y., Tian, Y., & Zhai, P. ( 2021b ) . Detectable increases in sequential flood-heatwave events across China during 1961–2018. *Geophysical Research Letters*, 48 ( 6 ) . <https://doi.org/10.1029/2021gl092549>
- Cheng, J., Bambrick, H., Yakob, L., Devine, G., Frentiu, F. D., Williams, G., Li, Z., Yang, W., & Hu, W. ( 2021a ) . Extreme weather conditions and dengue outbreak in Guangdong, China: Spatial heterogeneity based on climate variability. *Environmental Research*, 196, 110900. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.110900>
- Cheng, J., Tong, D., Zhang, Q., Liu, Y., Lei, Y., Yan, G., Yan, L., Yu, S., Cui, et al. ( 2021b ) . Pathways of China's PM<sub>2.5</sub> air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality. *National Science Review*, 8 ( 12 ) , nwab078. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab078>
- Ding, G., Li, X., Li, X., Zhang, B., Jiang, B., Li, D., Xing, W., Liu, Q., Liu, X., & Hou, H. ( 2019 ) . A time–trend ecological study for identifying flood–sensitive infectious diseases in Guangxi, China from 2005 to 2012. *Environmental Research*, 176, 108577. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.108577>
- Fan, S., Gloor, M., Mahlman, J., Pacala, S., Sarmiento, J., Takahashi, T., & Tans, P. ( 1998 ) . A large terrestrial carbon sink in North America implied by atmospheric and oceanic carbon dioxide data and models. *Science*, 282, 442. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.282.5388.442>
- Friedlingstein, P., O'Sullivan, M., Jones, M. W., Andrew, R. M., Hauck, J., Olsen, A., Peters, G. P., et al. ( 2020 ) . Global Carbon Budget 2020. *Earth System Science Data*, 12 ( 4 ) , 3269–3340. <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- Geng, G., Zheng, Y., Zhang, Q., Xue, T., Zhao, H., Tong, D., Zheng, B., Li, M., Liu, F., Hong, C., He, K., & Davis, S. J. ( 2021 ) . Drivers of PM<sub>2.5</sub> air pollution deaths in China 2002–2017. *Nature Geoscience*, 14 ( 9 ) , 645–650. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00792-3>
- Ghosh, R., Causey, K., Burkart, K., Wozniak, S., Cohen, A., & Brauer, M. ( 2021 ) . Ambient and household PM<sub>2.5</sub> pollution and adverse perinatal outcomes: A meta–regression and analysis of attributable global burden for 204 countries and territories. *PLoS Med*, 18 ( 9 ) , e1003718. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003718>
- Hamilton, I., Kennard, H., McGushin, A., Hoggund–Isaksson, L., et al. ( 2021 ) . The public health implications of the Paris Agreement: a modelling study. *Lancet Planet Health*, 5 ( 2 ) , e74–e83. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30249-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30249-7)
- Hansis, E., Davis, S. J., & Pongratz, J. ( 2015 ) . Relevance of methodological choices for accounting of land use change carbon fluxes. *Global Biogeochemical Cycles*, 29 ( 8 ) , 1230–1246. <https://doi.org/10.1002/2014gb004997>
- Houghton, R. A., & Nassikas, A. A. ( 2017 ) . Global and regional fluxes of carbon from land use

- and land cover change 1850–2015. *Global Biogeochemical Cycles*, 31 ( 3 ) , 456–472. <https://doi.org/10.1002/2016gb005546>
- Hu, J., Li, Y., Zhao, T., Liu, J., Hu, X. M., Liu, D., Jiang, Y., Xu, J., & Chang, L. ( 2018 ) . An important mechanism of regional O<sub>3</sub> transport for summer smog over the Yangtze River Delta in eastern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18 ( 22 ) , 16239–16251. <https://doi.org/10.5194/acp-18-16239-2018>
- Huang, L., Zhu, Y., Wang, Q., Zhu, A., Liu, Z., Wang, Y., Allen, D. T., & Li, L. ( 2021a ) . Assessment of the effects of straw burning bans in China: Emissions, air quality, and health impacts. *Science of the Total Environment*, 789, 147935. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147935>
- Huang, R., Wei, J., Li, Z., Gao, Z., Mahe, M., & Cao, W. ( 2021b ) . Spatial–temporal mapping and risk factors for hand foot and mouth disease in northwestern inland China. *PLoS Negl Trop Dis*, 15 ( 3 ) , e0009210. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0009210>
- IPCC. ( 2021 ) . Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson–Delmotte, V., P. Zhai., A. Pirani., S.L. Connors., C. P é an., S. Berger., N. Caud., Y. Chen., L. Goldfarb., M.I. Gomis., M. Huang., K. Leitzell., E. Lonnoy., J.B.R. Matthews., T.K. Maycock., T. Waterfield., O. Yelekçi., R. Yu., & B. Zhou ( eds. ) ]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. ( 2022 ) . Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.–O. Pörtner., D.C. Roberts., M. Tignor., E.S. Poloczanska., K. Mintenbeck., A. Aleg r í a., M. Craig., S. Langsdorf., S. L öschke., V. Möller., A. Okem., & B. Rama ( eds. ) ]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Lei, J., Chen, R., Yin, P., Meng, X., Zhang, L., Liu, C., Qiu, Y., Ji, J. S., Kan, H., & Zhou, M. ( 2022 ) . Association between cold spells and mortality risk and burden: a nationwide study in China. *Environmental Health Perspectives*, 130 ( 2 ) , 27006. <https://doi.org/10.1289/EHP9284>
- Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., & Wehner, M. ( 2021a ) . Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models. *Journal of Climate*, 34 ( 9 ) , 3441–3460. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-1013.1>
- Li, G., Huang, J., Wang, J., Zhao, M., Liu, Y., Guo, X., Wu, S., & Zhang, L. ( 2021b ) . Long–term exposure to ambient PM<sub>2.5</sub> and increased risk of CKD prevalence in China. *Journal of the American Society of Nephrology*, 32 ( 2 ) , 448–458. <https://doi.org/10.1681/ASN.2020040517>
- Li, Y., Shiyuan, L., Ling, H., Ziyi, L., Yonghui, Z., Li, L., Yangjun, W., & Kangjuan, L. ( 2021c ) . The



- casual effects of COVID-19 lockdown on air quality and short-term health impacts in China. *Environmental Pollution*, 290, 117988. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117988>
- Liao, W., Wu, J., Yang, L., Benmarhnia, T., Liang, X. Z., Murtugudde, R., Sapkota, A., Ma, W., Zhong, S., & Huang, C. (2020). Detecting the net effect of flooding on infectious diarrheal disease in Anhui Province, China: a quasi-experimental study. *Environmental Research Letters*, 15 (12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abccf5>
- Liu, J.-Y., Fujimori, S., Takahashi, K., Hasegawa, T., Wu, W., Takakura, J. y., & Masui, T. (2019). Identifying trade-offs and co-benefits of climate policies in China to align policies with SDGs and achieve the 2°C goal. *Environmental Research Letters*, 14 (12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab59c4>
- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., et al. (2020). Near-real-time monitoring of global CO<sub>2</sub> emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. *Nature Communications*, 11 (1), 5172. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>
- Ma, R., Li, K., Guo, Y., Zhang, B., Zhao, X., Linder, S., Guan, C., Chen, G., Gan, Y., & Meng, J. (2021). Mitigation potential of global ammonia emissions and related health impacts in the trade network. *Nature Communication*, 12 (1), 6308. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25854-3>
- Meng, X., Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., et al. (2021). Short term associations of ambient nitrogen dioxide with daily total, cardiovascular, and respiratory mortality: multilocation analysis in 398 cities. *BMJ*, 372, n534. <https://doi.org/10.1136/bmj.n534>
- Murray CJL, A. A., Zheng P, Abbafati C, Abbas KM, Abbasi-Kangevari M. (2020). Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*, 396 (10258), 1223-1249. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
- NOAA. (2022). Increase in atmospheric methane set another record during 2021. <https://www.noaa.gov/news-release/increase-in-atmospheric-methane-set-another-record-during-2021>
- Orellano, P., Reynoso, J., Quaranta, N., Bardach, A., & Ciapponi, A. (2020). Short-term exposure to particulate matter PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, nitrogen dioxide NO<sub>2</sub>, and ozone O<sub>3</sub> and all-cause and cause-specific mortality: Systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 142, 105876. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105876>
- Qi, J., Zhang, D., Zhang, X., Takana, T., Pan, Y., Yin, P., Liu, J., Liu, S., Gao, G. F., He, G., & Zhou, M. (2022). Short- and medium-term impacts of strict anti-contagion policies on non-COVID-19 mortality in China. *Nature Human Behaviour*, 6 (1), 55-63. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01189-3>
- Scott, M., Sander, R., Nemet, G., & Patz, J. (2021). Improving human health in China through

- alternative energy. *Front Public Health*, 9, 613517. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.613517>
- Shan, Y., Guan, D., Zheng, H., Ou, J., Li, Y., Meng, J., Mi, Z., Liu, Z., & Zhang, Q. (2018). China CO<sub>2</sub> emission accounts 1997–2015. *Scientific Data*, 5, 170201. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.201>
- Shan, Y., Huang, Q., Guan, D., & Hubacek, K. (2020). China CO<sub>2</sub> emission accounts 2016–2017. *Scientific Data*, 7 ( 1 ) . <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0393-y>
- Shi, X., Zheng, Y., Lei, Y., Xue, W., Yan, G., Liu, X., Cai, B., Tong, D., & Wang, J. (2021). Air quality benefits of achieving carbon neutrality in China. *Science of The Total Environment*, 795, 148784. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148784>
- Sun, Z., Chen, C., Yan, M., Shi, W., Wang, J., Ban, J., Sun, Q., He, M. Z., & Li, T. (2021). Heat wave characteristics, mortality and effect modification by temperature zones: a time–series study in 130 counties of China. *International Journal of Epidemiology*, 49 ( 6 ) , 1813–1822. <https://doi.org/10.1093/ije/dyaa104>
- Tan, J., Li, N., Wang, X., Chen, G., Yan, L., Wang, L., Zhao, Y., Li, S., & Guo, Y. (2021). Associations of particulate matter with dementia and mild cognitive impairment in China: A multicenter cross–sectional study. *Innovation ( Camb )*, 2 ( 3 ) , 100147. <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100147>
- Tang, C., Liu, X., He, Y., Gao, J., Xu, Z., Duan, J., Yi, W., Wei, Q., Pan, R., Song, S., & Su, H. (2020). Association between extreme precipitation and ischemic stroke in Hefei, China: Hospitalization risk and disease burden. *Science of The Total Environment*, 732, 139272. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139272>
- Tang, R., Zhao, J., Liu, Y., Huang, X., Zhang, Y., Zhou, D., Ding, A., Nielsen, C. P., & Wang, H. (2022). Air quality and health co–benefits of China's carbon dioxide emissions peaking before 2030. *Nature Communication*, 13 ( 1 ) , 1008. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28672-3>
- Tong, D., Geng, G., Zhang, Q., Cheng, J., Qin, X., Hong, C., He, K., & Davis, S. (2021). Health co–benefits of climate change mitigation depend on strategic power plant retirements and pollution controls. *Nature Climate Change*, 11, 1077–1083. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01216-1>
- Wang, H., Li, J., Liu, H., Guo, F., Xue, T., Guan, T., & Li, J. (2021). Association of maternal exposure to ambient particulate pollution with incident spontaneous pregnancy loss. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 224, 112653. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112653>
- Wang, J., Feng, L., Palmer, P., Liu, Y., Fang, S., Bösch, H., et al. (2020). Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 586, 720–723. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2849-9>

- Wang, P., Yang, Y., Li, H., Chen, L., Dang, R., Xue, D., Li, B., Tang, J., Leung, L. R., & Liao, H. ( 2022a ). North China Plain as a hot spot of ozone pollution exacerbated by extreme high temperatures. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22 ( 7 ) , 4705–4719. <https://doi.org/10.5194/acp-22-4705-2022>
- Wang, Y., Wang, X., Wang, K., Chevallier, F., Zhu, D., Lian, J., He, Y., Tian, H., Li, J., Zhu, J., Jeong, S., & Canadell, J. G. ( 2022b ). The size of the land carbon sink in China. *Nature*, 603 ( 7901 ) , E7–E9. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04255-y>
- Wei, Q., Zhang, X., Yi, W., Pan, R., Gao, J., Duan, J., Xu, Z., Cheng, Q., Bai, L., Zhang, Y., & Su, H. ( 2020 ). Association between floods and hospital admissions for schizophrenia in Hefei, China: The lag effects of degrees of floods and time variation. *Science of The Total Environment*, 698, 134179. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134179>
- Xiao, Q., Geng, G., Xue, T., Liu, S., Cai, C., He, K., & Zhang, Q. ( 2022 ). Tracking PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> pollution and the related health burden in China 2013–2020. *Environ Sci Technol*, 56 ( 11 ) , 6922–6932. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04548>
- Xu, H., Chen, H., & Wang, H. ( 2022 ). Detectable human influence on changes in precipitation extremes across China. *Earth's Future*, 10 ( 2 ) . <https://doi.org/10.1029/2021ef002409>
- Yan, M., Wilson, A., Peel, J. L., Magzamen, S., Sun, Q., Li, T., & Anderson, G. B. ( 2020 ). Community-wide mortality rates in Beijing, China, during the July 2012 flood compared with unexposed periods. *Epidemiology*, 31 ( 3 ) , 319–326. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000001182>
- Yang, Y., Shi, Y., Sun, W., Chang, J., Zhu, J., Chen, L., Wang, X., et al. ( 2022 ). Terrestrial carbon sinks in China and around the world and their contribution to carbon neutrality. *Science China: Life Science*, 65 ( 5 ) , 861–895. <https://doi.org/10.1007/s11427-021-2045-5>
- Yang, Y., Zhou, Y., Li, K., Wang, H., Ren, L., Zeng, L., Li, H., Wang, P., Li, B., & Liao, H. ( 2021 ). Atmospheric circulation patterns conducive to severe haze in Eastern China have shifted under climate change. *Geophysical Research Letters*, 48 ( 23 ) . <https://doi.org/10.1029/2021gl095011>
- Yin, Z., Wan, Y., Zhang, Y., & Wang, H. ( 2022 ). Why super sandstorm 2021 in North China? *National Science Review*, 9 ( 3 ) , 119–127. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab165>
- Zhang, G., Zeng, G., Iyakaremye, V., & You, Q. ( 2020 ). Regional changes in extreme heat events in China under stabilized 1.5°C and 2.0°C global warming. *Advances in Climate Change Research*, 11 ( 3 ) , 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2020.08.003>
- Zhang, G., Zeng, G., Yang, X., & Jiang, Z. ( 2021a ). Future changes in extreme high temperature over China at 1.5°C – 5°C Global Warming Based on CMIP6 Simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38 ( 2 ) , 253–267. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-0182-8>
- Zhang, L., Wu, P., Niu, M., Zheng, Y., Wang, J., Dong, G., Zhang, Z., Xie, Z., Du, M., Jiang, H., Liu, H., Cao, L., Pang, L., Lv, C., Lei, Y., Cai, B., Zhu, Y. ( 2022a ). A systematic assessment of



- city-level climate change mitigation and air quality improvement in China. *Science of The Total Environment*, 839, 156274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156274>
- Zhang, R., Li, Q., & Zhang, R. (2014). Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013. *Science China Earth Sciences*, 57 (1), 26–35. <https://doi.org/10.1007/s11430-013-4774-3>
- Zhang, S., An, K., Li, J., Weng, Y., Zhang, S., Wang, S., Cai, W., Wang, C., & Gong, P. (2021b). Incorporating health co-benefits into technology pathways to achieve China's 2060 carbon neutrality goal: a modelling study. *Lancet Planet Health*, 5 (11), e808–e817. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(21\)00252-7](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(21)00252-7)
- Zhang, Y., Yin, Z., Wang, H., & He, S. (2021c). 2020/21 record-breaking cold waves in east of China enhanced by the 'Warm Arctic–Cold Siberia' pattern. *Environmental Research Letters*, 16 (9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac1f46>
- Zhang, Y., Zhao, B., Jiang, Y., Xing, J., Sahu, S. K., Zheng, H., et al. (2022b). Non-negligible contributions to human health from increased household air pollution exposure during the COVID-19 lockdown in China. *Environment International*, 158, 106918. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106918>
- Zhou, T., Zhang, W., Zhang, L., Clark, R., Qian, C., Zhang, Q., Qiu, H., Jiang, J., & Zhang, X. (2022). 2021: A year of unprecedented climate extremes in Eastern Asia, North America, and Europe. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39 (10), 1598–1607. <https://doi.org/10.1007/s00376-022-2063-9>
- Zhu, H., Jiang, Z., & Li, L. (2021). Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6. *Science Bulletin*, 66 (24), 2528–2537. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.07.026>
- Zhuo, Z., Du, E., Zhang, N. et al. (2022). Cost increase in the electricity supply to achieve carbon neutrality in China. *Nature Communication*, 13, 3172. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30747-0>
- 北京大学能源研究院. (2021). 中国散煤综合治理研究报告 2021. Retrieved from <https://hist.pku.edu.cn/docs//2021-11/d584da0a5fd64e149bf7b2458d3c9080.pdf>
- CEADs. (2021). China Emission Accounts & Datasets. Retrieved from <https://www.ceads.net>
- 《乘用车燃料消耗量限值》(GB19578-2021). Retrieved from [http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/23/content\\_5588420.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/23/content_5588420.htm)
- 广州碳排放权交易中心. (2022). 碳金融发展报告.
- 国家林业和草原局. (2019). 中国森林资源报告 (2014–2018), 北京: 中国林业出版社.
- 国家能源局. (2022). 国家能源局 2022 年一季度网上新闻发布会. Retrieved from: [http://www.nea.gov.cn/2022-01/28/c\\_1310445390.htm](http://www.nea.gov.cn/2022-01/28/c_1310445390.htm)

- 国家气候中心 . ( 2022 ) . 中国气候公报 ( 2021 ) . 北京 .
- 国家铁路局 . ( 2022 ) . 2021 年铁道统计公报 . Retrieved from <https://www.mot.gov.cn/tongjishuju/tielu/202205/P020220507531780768964.pdf>
- 国家统计局 . ( 2019 ) . 中国统计年鉴 2019 . 北京 : 中国统计出版社 .
- 国家统计局 . ( 2020 ) . 中国统计年鉴 2020 . 北京 : 中国统计出版社 .
- 国家统计局 . ( 2021 ) . 中国统计年鉴 2021 . 北京 : 中国统计出版社 .
- 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 . Retrieved from: [http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/28/content\\_5589283.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/28/content_5589283.htm)
- 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 . Retrieved from: [http://www.gov.cn/xinwen/2022-02/28/content\\_5676015.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2022-02/28/content_5676015.htm)
- 国家统计局能源统计司 . ( 2022 ) . 中国能源统计年鉴 2022 . 北京 : 中国统计出版社 .
- 何建坤 . ( 2021 ) . 碳达峰碳中和目标导向下能源和经济的低碳转型 . 环境经济研究 , 1 , 1-9 . <https://doi.org/10.19511/j.cnki.jee.2021.01.001>
- 贺晋瑜, 何捷, 王郁涛, 范永斌, 石红卫, 蔡博峰, & 严刚 . ( 2022 ) . 中国水泥行业二氧化碳排放达峰路径研究 . 环境科学研究 , 35 ( 2 ) , 347-355 . <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.19>
- 黄晶, 陈其针, 仲平, 等 . ( 2021 ) . 中国碳捕集利用与封存技术评估报告 . 北京 : 科学出版社 .
- 吉林省生态环境厅 . ( 2021 ) . “十三五”空气质量约束性指标超额完成 . Retrieved from [http://sthjt.jl.gov.cn/zwzx/qghb/202103/t20210301\\_7953233.html](http://sthjt.jl.gov.cn/zwzx/qghb/202103/t20210301_7953233.html)
- 江亿 . ( 2021 ) . 光储直柔 - 助力实现零碳电力的新型建筑配电系统 . 暖通空调 , 51 ( 10 ) : 1-12 .
- 江亿, 胡姗 . ( 2021 ) . 中国建筑部门实现碳中和的路径 . 暖通空调 , 51 ( 05 ) : 1-13 .
- 江亿, 胡姗 . ( 2022 ) . 屋顶光伏为基础的农村新型能源系统战略研究 . 气候变化研究进展 , 18 ( 03 ) , 272-282 . <https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2022.024>
- 交通运输部 . ( 2022 ) . 2021 年交通运输行业发展统计公报 . Retrieved from [https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524\\_3656659.html](https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202205/t20220524_3656659.html)
- 金玲, 郝成亮, 吴立新, 徐鑫, 刘文革, 陈潇君, 严刚, 张泽宸, & 张鸿宇 . ( 2022 ) . 中国煤化工行业二氧化碳排放达峰路径研究 . 环境科学研究 , 35 ( 2 ) , 368-376 . <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.08>
- 康重庆, 杜尔顺, 李姚旺, 张宁, 陈启鑫, 郭鸿业, 王鹏 . ( 2022 ) . 新型电力系统的“碳视角” : 科学问题与研究框架 . 电网技术 , 46 ( 03 ) : 821-833 . <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2550>
- 科学技术部社会发展科技司、中国 21 世纪议程管理中心 . ( 2019 ) . 中国碳捕集利用与封存技术发展路线图 . 北京 : 科学出版社 .
- 孔力, 裴玮, 饶建业, 徐英新 . ( 2022 ) . 建设新型电力系统 促进实现碳中和 . 中国科学院院刊 , 37 ( 04 )

, 522–528. <https://doi.org/10.16418/j.issn.1000-3045.20220329001>

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, 371–374.

庞凌云, 翁慧, 常靖, 李永亮, 蔡博峰, 雷宇, 严刚, 等. (2022). 中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究. 环境科学研究, 35 (2), 356–367. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.26>

皮冬勤, 陈焕盛, 魏巍, 王文丁, 肖林鸿, 张稳定, 吴剑斌, 李健军, 晏平仲. (2019). 京津冀一次重污染过程的成因和来源. 中国环境科学, 39 (5), 1899–1908. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2019.0225>

朴世龙, 岳超, 丁金枝, & 郭正堂. (2022). 试论陆地生态系统碳汇在“碳中和”目标中的作用. 中国科学: 地球科学, 52 (7), 1419–1426. <https://doi.org/10.1360/SSTe-2022-0011>

清华大学建筑节能研究中心. (2022). 中国建筑节能年度发展研究报告. 中国建筑工业出版社.

人民日报. (2022). 煤电“三改联动”正当时. Retrieved from <https://www.cet.com.cn/nypd/yw/3282850.shtml>

人民网. (2021). 良好生态增进民生福祉 (绿色家园). Retrieved from <http://gz.people.com.cn/n2/2022/0605/c344124-35301113.html>

上海能源环境交易所. (2022). 碳金融进展情况报告.

生态环境部. (2020). 我国大气污染治理成效得到国际社会广泛赞誉. Retrieved from <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1683570050042889465&wfr=spider&for=pc>

生态环境部. (2021). 生态环境部介绍大气污染防治工作情况等并答问. Retrieved from [http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/25/content\\_5588903.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-02/25/content_5588903.htm)

生态环境部. (2022). 低碳十年 绿色发展. Retrieved from [https://m.thepaper.cn/baijiahao\\_18606698](https://m.thepaper.cn/baijiahao_18606698)

生态环境部. (2022). 国务院关于 2021 年度环境状况 and 环境保护目标完成情况的报告——2022 年 4 月 18 日在第十三届全国人民代表大会常务委员会第三十四次会议上. Retrieved from <https://mp.weixin.qq.com/s/91SBU7j300o-wZ866z6HBw>

王丽娟, 邵朱强, 熊慧, 李丹, 杨富强, & 严刚. (2022). 中国铝冶炼行业二氧化碳排放达峰路径研究. 环境科学研究, 35 (2), 377–384. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.18>

汪旭颖, 李冰, 吕晨, 管志杰, 蔡博峰, 雷宇, & 严刚. (2022). 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究. 环境科学研究, 35 (2), 339–346. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.11>

网易新闻. (2022). 跟随行业“风向标”, 抓住特定功能肥新机遇. Retrieved from <https://www.163.com/dy/article/H9UI0PJS0514ALKP.html>

谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 赵伟, 徐鹏, 李浩志. (2022). 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望. 中国电机工程学报: 1–12. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220025>



- 新华社. (2022). 瞭望·治国理政纪事 藏粮于地藏粮于技端牢中国饭碗. Retrieved from <https://www.163.com/dy/article/H9OT7KJO0534A4RJ.html>
- 新华网. (2022). 2021 年我国造林种草 666.67 万公顷 治理沙化石漠化土地 144 万公顷. Retrieved from [http://www.chinapeace.gov.cn/chinapeace/c100007/2022-03/14/content\\_12605880.shtml](http://www.chinapeace.gov.cn/chinapeace/c100007/2022-03/14/content_12605880.shtml)
- 严刚, 郑逸璇, 王雪松, 李冰, 何捷, 邵朱强, 李永亮, 吴立新, 丁焰, 徐伟, 李新, 蔡博峰, 陈潇君, 宋晓晖, 王倩, 雷宇, & 王金南. (2022). 基于重点行业领域的我国碳排放达峰路径研究. 环境科学研究, 35 (2), 309–319. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2021.11.13>
- 杨旭东, 单明, 邢永杰, 聂亚洲, 刘彦青, 丁星利, 马荣江, & 江亿. (2021). 我国北方农村清洁取暖适宜模式研究 – 基于河南省鹤壁市和山东省商河县的实践. 环境与可持续发展, 46 (03), 67–74. <https://doi.org/10.19758/j.cnki.issn1673-288x.202103012>
- 余荣, & 翟盘茂. (2021) 关于复合型极端事件的新认识和启示. 大气科学学报, 44 (5), 645–649. <https://doi.org/10.13878/j.cnki.dqkxxb.20210824006>
- 张恒德, 张碧辉, 吕梦瑶, & 安林昌. (2017) 北京地区静稳天气综合指数的初步构建及其在环境气象中的应用. 气象, 43 (8), 998–1004. <https://doi.org/998-1003.10.7519/j.issn.1000-0526.2017.08.010>
- 张贤, 李阳, 马乔等. (2021). 我国碳捕集利用与封存技术发展研究. 中国工程科学, 23 (6), 70–80. <https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2021.06.004>
- 张智刚, 康重庆. (2022). 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望. 中国电机工程学, 42 (08) : 2806–2819. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.220467>
- 中国城市温室气体工作组. (2020). 中国城市二氧化碳排放和大气污染物数据集 (2020). 北京: 生态环境部环境规划院.
- 中国环境报. (2022). 推动空气质量持续改善. Retrieved from <http://eco.cri.cn/20220315/e208d2f4-1299-a3b5-f110-1239c2fcf5f0.html>
- 中国民用航空局. (2022). 2021 年民航行业发展统计公报. Retrieved from [http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202205/t20220518\\_213297.html](http://www.caac.gov.cn/XXGK/XXGK/TJSJ/202205/t20220518_213297.html)
- 中国水旱灾害防御公报编写组. (2021). 《中国水旱灾害防御公报 2020》概要. 中国防汛抗旱, 31 (11), 26–32. <https://doi.org/10.16867/j.issn.1673-9264.2021323>
- 周波涛, & 钱进. (2021). IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化. 气候变化研究进展, 17 (6), 713–718. <https://doi.org/10.12006/j.issn.1673-1719.2021.167>
- 周宏春. (2021). 拉闸限电的影响及其对我们的启示. 中国商界, 11, 36–37.
- 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 李浩志, 康重庆. (2021). 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战. 电力系统自动化, 45 (09), 171–191. <https://doi.org/10.7500/AEPS20200922001>

## 报告编辑团队

---

蔡慈澜 清华大学地球系统科学系博士后

中国清洁空气政策伙伴关系秘书处负责人

孙 茹 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处传播经理

刘媛媛 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处项目官员

李姝慧 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处传播官员

乔心远 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处传播专员

2022

中国碳中和与清洁空气  
协同路径