

# 2021 中国碳中和与清洁空气 协同路径



中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组

2021年9月

## 支持单位

---

清华大学碳中和研究院

清华大学全球变化研究院

北京大学环境科学与工程学院

生态环境部环境规划院

中国清洁空气政策伙伴关系 ( CCAPP )

能源基金会

## 引用方式

---

中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组 ( 2021 ) . “中国碳中和与清洁空气协同路径2021” . 中国清洁空气政策伙伴关系, 北京, 中国.

# 2021

## 中国碳中和与清洁空气 协同路径

中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告工作组

2021年9月

# 作者列表

## 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 北京大学环境科学与工程学院院长 教授

## 执行摘要

---

张 强 清华大学地球系统科学系教授（召集人）  
尹志聪 南京信息工程大学大气科学学院教授  
鲁 玺 清华大学环境学院副教授  
宫继成 北京大学环境科学与工程学院研究员  
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  
刘 欣 能源基金会环境管理项目主任  
同 丹 清华大学地球系统科学系助理教授  
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）  
陈活泼 中国科学院大气物理研究所研究员  
耿冠楠 清华大学环境学院助理研究员  
胡建林 南京信息工程大学环境科学与工程学院教授  
马井会 上海市气象局正研级高级工程师  
王志立 中国气象科学研究院研究员

## 第二工作组

---

鲁 玺 清华大学环境学院副教授（召集人）  
柴麒敏 生态环境部国家气候战略中心战略规划部主任 研究员  
刘 俊 北京科技大学能源与环境工程学院副教授  
沈国锋 北京大学城市与环境学院助理教授  
汪旭颖 生态环境部环境规划院助理研究员  
徐洪磊 交通运输部规划研究院副院长 正高级工程师  
张 达 清华大学能源环境经济研究所副教授  
张少君 清华大学环境学院助理教授  
张 贤 科技部中国 21 世纪议程管理中心研究员  
郑 博 清华大学深圳国际研究生院助理教授

### 第三工作组

---

张 强 清华大学地球系统科学系教授（召集人）  
关大博 清华大学地球系统科学系特聘教授  
康佳宁 北京理工大学能源与环境政策研究中心博士后  
李 伟 清华大学地球系统科学系副教授  
刘 竹 清华大学地球系统科学系副教授  
同 丹 清华大学地球系统科学系助理教授  
王旭辉 北京大学城市与环境学院研究员 助理教授  
张少辉 北京航空航天大学经济管理学院副教授

### 第四工作组

---

宫继成 北京大学环境科学与工程学院研究员（召集人）  
戴瀚程 北京大学环境科学与工程学院研究员  
黄存瑞 清华大学万科公共卫生与健康学院教授  
李湉湉 中国疾病预防控制中心环境所研究员  
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

### 第五工作组

---

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气候变化与环境政策研究中心研究员  
董战峰 生态环境部环境规划院生态环境管理与政策研究所副所长 研究员  
林永生 北京师范大学经济与资源管理研究院教授  
张 炳 南京大学环境学院副院长 教授  
郑逸璇 生态环境部环境规划院助理研究员



# CONTENTS

# 目录

<b>执行摘要</b> .....	<b>2</b>
<b>第一章 引言</b> .....	<b>14</b>
<b>第二章 空气污染与天气气候条件</b> .....	<b>16</b>
2.1 空气质量变化 .....	18
2.2 不利气象条件变化 .....	22
2.3 气候变化及其对空气污染的影响 .....	24
<b>第三章 结构转型进展</b> .....	<b>26</b>
3.1 能源结构转型 .....	28
3.2 产业结构升级 .....	31
3.3 交通结构转型 .....	33
3.4 污染治理进程 .....	35
3.5 零碳负碳技术 .....	37
<b>第四章 大气成分源汇及减排路径</b> .....	<b>40</b>
4.1 人为源碳排放 .....	42
4.2 污染物排放及协同减排进展 .....	45
4.3 土地利用变化与陆地碳汇 .....	48
4.4 未来减排空间及协同路径 .....	51
<b>第五章 健康影响与协同效益</b> .....	<b>54</b>
5.1 空气污染与健康影响 .....	56
5.2 气候变化与健康影响 .....	59
5.3 协同治理的健康效益 .....	62
<b>第六章 治理体系与实践</b> .....	<b>64</b>
6.1 协同治理体系建设 .....	66
6.2 协同治理经济政策 .....	68
6.3 地方实践 .....	70
<b>参考文献</b> .....	<b>73</b>

# 执行摘要

随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的先后实施，近年来我国 PM<sub>2.5</sub> 浓度持续下降，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





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。在此基础上，生态环境部提出将以“减污降碳协同增效”为总抓手，加快推动从末端治理向源头治理转变，通过应对气候变化降低碳排放，进而从根本上解决环境污染问题，推动高质量发展。



在这一战略背景下，由清华大学、生态环境部环境规划院和北京大学联合发起，在能源基金会和中国清洁空气政策伙伴关系（CCAPP）支持下，组织国内 40 多位一线学者，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（2021）》，跟踪、梳理、总结与分析我国空气污染与气候变化协同治理进程，助力形成政策制定、评价与优化的闭环，推动协同治理政策的落地实施。

本报告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，从空气污染与天气气候条件、结构转型进展、大气成分源汇与减排路径、健康影响与协同效应、协同治理体系与实践等五个方面出发设定 18 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。



# 1 应对气候变化与治理空气污染的协同效应

温室气体和大气污染物同根同源，主要都源于化石燃料的燃烧利用过程。因此，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。

在科学机理方面，气候变化与空气污染存在着错综复杂的关联。温室气体排放导致气候变化，而气候变化导致温度、辐射、降水和风速等气象要素变化（影响污染物的生成、积累和消散），同时引起植被、沙尘、野火等自然源排放变化，进而对大气污染产生重要影响。气溶胶一方面是重要的大气污染物，另一方面气溶胶可通过改变大气辐射收支和影响云的形成而进一步影响气候系统的变化。

气候变化和空气污染都会对人群健康产生重要影响。全球气候变化导致的极端高温和复合极端事件频率上升会增加人群死亡率，气候变化造成的其他极端天气事件（如台风、暴雨等）发生频率增加也会对受灾地区带来较大的健康风险。此外，气象要素变化还可通过影响病原体和媒介生物造成传染病的传播风险，例如降水会冲刷土壤表面的病原体，导致地表水污染，增加人群对腹泻病原体的暴露。PM<sub>2.5</sub>和O<sub>3</sub>的长期暴露和短期暴露均会增加人群健康风险。PM<sub>2.5</sub>通过导致心血管、呼吸、代谢系统疾病和不良生育结局增加人群死亡风险，O<sub>3</sub>暴露则通过导致慢性阻塞性肺病增加死亡风险。另外，最新研究发现NO<sub>2</sub>短期暴露也会增加心血管及呼吸系统疾病的死亡风险。

在目标指标方面，中国提出将力争在2030年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取在2060年前实现碳中和。我国现行PM<sub>2.5</sub>空气质量年均值标准为35 μg/m<sup>3</sup>，相当于世界卫生组织（WHO）第一阶段过渡值，距离WHO指导值尚有较大距离。我国提出到2035年生态环境质量实现根本好转，美丽中国目标基本实现；到本世纪中叶，生态文明全面提升，实现生态环境领域国家治理体系和治理能力现代化。在这一目标指引下，预期未来空气质量标准将逐步提升，最终与WHO指导值接轨。

在应对措施方面，由于温室气体和大气污染物同根同源，致力于降低化石燃料消耗量的措施在减少碳排放的同时也会减少大气污染物



PM<sub>2.5</sub>

我国现行PM<sub>2.5</sub>空气质量年均值标准为35 μg/m<sup>3</sup>，相当于世界卫生组织（WHO）第一阶段过渡值，距离WHO指导值尚有较大距离。

的排放，带来空气质量改善的协同效益。在大气污染治理实践中优先选择化石能源替代、原料工艺优化、产业结构升级等源头治理措施，在减少污染物排放的同时也会带来碳减排的收益。由于行业技术水平存在较大差异，不同行业之间每单位碳排放产生的大气污染物排放量可相差一到两个数量级以上，在选择温室气体减排措施时优先考虑对污染物排放贡献大的行业，可实现更高的空气质量协同效益。

提高生态系统碳汇是实现碳中和的重要途径。在碳中和背景下，未来生态系统碳汇的增加同时意味着碳排放空间的增加和碳排放路径的变化，一些减排非常困难的行业（如钢铁、水泥、柴油车、船舶等）在碳汇增加的背景下可能将得以保留，进而影响未来空气质量。因此在规划碳减排路径时，应当考虑未来生态系统碳汇的变化对二氧化碳和污染物协同减排的影响。

在综合效益方面，协同应对气候变化和空气污染的将带来巨大的健康和经济效益。

积极应对气候变化一方面能够减少极端天气事件发生，从而带来直接的健康和经济收益；另一方面能源结构优化等降低碳排放的措施能够同时减少大气污染物的排放和减少污染治理成本，并带来可观的健康协同效益。减缓气候变化措施将改善经济结构，推动新产业发展，进而增加就业岗位；同时空气污染的改善也将使相关疾病发病率下降，劳动生产率提升。

在治理体系方面，在战略规划、法律法规、标准体系、经济政策等领域推动应对气候变化与生态环境保护相关工作的统筹融合，有助于增强大气环境管理和温室气体减排工作合力。在统计调查制度、评价管理制度、监测监管体系、督察考核制度等制度体系方面推进统筹融合，将有助于推进相关治理体系和治理能力现代化，为协同应对气候变化和空气污染打好基础支撑。选择典型城市和区域开展空气质量达标与碳排放达峰“双达”试点示范，选择重点行业开展大气污染物和温室气体协同控制试点示范，有助于为下一步全面开展协同治理提供实践经验。



## 2 空气污染与天气气候条件变化

2015–2020 年间，全国及重点区域  $PM_{2.5}$  浓度下降显著，而  $O_3$  浓度持续上升， $PM_{2.5}$  与  $O_3$  协同控制成为下一阶段大气污染治理的主要任务。2020 年全国 337 个地级以上城市  $PM_{2.5}$  浓度平均为  $33 \mu g/m^3$ ，相比 2015 年下降 28.5%；2015–2020 年间  $PM_{2.5}$  三年滑动平均浓度持续下降，显示污染治理工作取得显著成效。但  $PM_{2.5}$  污染负荷仍处于高位，全国尚有 125 个地级及以上城市不达标，秋冬季区域重污染问题依然严峻。2020 年，全国城市  $O_3$  日最大 8 小时平均值第 90 百分位数平均浓度为  $136 \mu g/m^3$ ，比 2019 年下降 8.0%，比 2015 年上升 11.1%；从三年滑动平均来看，2015–2020 年间全国及重点区域  $O_3$  浓度持续上升，成为影响城市空气质量达标天数的重要因素， $O_3$  污染问题日渐突出。

2020 年全国人群  $PM_{2.5}$  平均暴露水平（人口加权  $PM_{2.5}$  浓度）为  $33.5 \mu g/m^3$ ，相比 2015 年下降 36.6%。2020 年全国人群暴露在  $PM_{2.5}$  浓度超标的天数平均为 27 天，相比 2015 年减少 48 天。2020 年，全国人口加权平均的  $O_3$  日最大 8 小时浓度第 90 百分位数为  $139.3 \mu g/m^3$ ，相比 2015 年上升 13.8%。2020 年全国人群暴露在  $O_3$  浓度超标的天数平均为 21 天，相比 2015 年增加 14 天。

2015–2020 年间，京津冀、长三角、汾渭平原和成渝地区的气溶胶污染条件指数（PLAM）呈总体下降趋势，显示气象条件变化对  $PM_{2.5}$  污染总体偏有利。其中，四个重点

地区 2020 年气象条件与 2019 年相比分别转好 11%、13%、11% 和 5%。京津冀、汾渭平原和长三角地区 2020 年的辐射量较 2019 年均有所下降，湿度却明显上升，有利于臭氧浓度的出现年际下行波动。气候变化背景下，极端天气事件显著增加，大气扩散条件和辐射量等的变化也会影响空气污染。在气候尺度上，2020 年全国平均气温较常年偏高  $0.7^\circ C$ ，极端高温事件较常年偏多，极端低温事件偏少。2020 年西北太平洋副热带高压异常偏强，导致中国大部分地区降水异常偏多，极端降水事件明显偏多。2020 年秋季的北极海冰、太平洋海温梯度、大西洋海温、西西伯利亚雪深、中西伯利亚土壤湿度关键区的信号均偏弱，对华北冬季霾污染的影响偏中性。



2020 年，全国城市  $O_3$  日最大 8 小时平均值第 90 百分位数平均浓度为  $136 \mu g/m^3$ ，比 2019 年下降 8.0%，比 2015 年上升 11.1%。

### 3 气候变化与空气污染协同治理进展

“十三五”以来，我国积极推动节能减排工作，大力开展大气污染防治，在能源产业结构转型、协同治理体系建设和经济政策等方面取得显著进展。

能源结构调整方面，能耗强度持续下降，2020年单位国内生产总值能耗比2015年下降13.2%。2015–2020年全国煤炭消费占一次能源消费比重由63.8%下降至56.8%左右。天然气、水电、核电、风电、太阳能等清洁能源消费占一次能源比重从2015年的17.9%提高至2020年的24.3%左右。《大气污染防治行动计划》的实施有力推动了能源结构调整步伐。2013–2020年期间，全国淘汰小型燃煤锅炉30多万台，重点区域每小时35蒸吨以下燃煤锅炉基本清零；全国天然气消费量增加1600亿立方米，完成散煤治理2600万户，农村清洁取暖破题。

产业结构调整方面，新产业新业态快速增长，2015–2020年间第三产业增加值比重由50.5%提高至54.5%，高技术制造业和装备制造业占工业增加比重从2015年的11.8%和31.8%提到至2020年的13.1%和33.7%，成为引领带动产业结构优化升级的重要力量。清洁空气行动带动落后产能加速淘汰，2013–2020年间淘汰落后产能和化解过剩产能钢铁3.4亿多吨、水泥3.9亿吨、平板玻璃1.6亿重量箱、煤电机组4500万千瓦。2013至2017年，清理整顿各地“散乱污”企业约30万家。2017至2020年，进一步治理“散乱污”企业

“  
13.2%

能源结构调整方面，能耗强度持续下降，2020年单位国内生产总值能耗比2015年下降13.2%。2015–2020年全国煤炭消费占一次能源消费比重由63.8%下降至56.8%左右。天然气、水电、核电、风电、太阳能等清洁能源消费占一次能源比重从2015年的17.9%提高至2020年的24.3%左右。

约36万家，全国基本完成“散乱污”企业综合整治。

交通结构调整方面，2020年铁路货物运输总量达46亿吨，水路货物运输总量达80亿吨。到2020年底，我国新能源汽车保有量达339

万辆，高速铁路运营里程达 3.8 万公里，已覆盖近 95% 的百万以上人口城市。全国已建成港口岸电设施 5400 多套，覆盖泊位 7000 多个。2013–2020 年淘汰老旧机动车 2600 万辆，全国范围实施轻型汽车国六排放标准，全面供应国六标准车用汽柴油，推动车用柴油、普通柴油、部分船舶用油“三油并轨”，油品质量实现“三级跳”。

重大减排工程方面，截至 2020 年达到超低排放限值要求的煤电机组累计 9.5 亿千瓦，全面完成燃煤机组超低排放改造，建成世界上最大的清洁煤电体系。非电行业污染治理稳步推进，重点行业烟气排放达标率由 52% 提高到 90% 以上，6.2 亿吨粗钢产能已完成或正在开展超低排放改造。完成挥发性有机物治理工程超过 5 万项，2020 年生态环境部组织开展夏季臭氧污染防治监督帮扶行动，帮助地方发现涉 VOCs 环境问题 6.5 万个。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%，修复矿山土地超过 3 万公顷，新增绿地超过 1000 万公顷。推广全国测土配方施肥技术应用面积 1.33 亿公顷，绿色防控面积超过 0.53 亿公顷。

零碳负碳新技术发展方面，风电、光伏产业实现跨越式发展，“十三五”期间风电、光伏装机迅速增长，截至 2020 年底累计装机量分别达 2.81 亿千瓦与 2.53 亿千瓦。风电光伏运行消纳情况持续改善，2015 至 2020 年，弃风率和弃光率分别自 15% 和 10% 下降至 3% 与 2%。近 10 年来陆上风电和光伏平均度电造价分别下降 30% 和 75% 左右，“十四五”时期

将成为全面无补贴平价上网的关键时期。碳捕集利用封存技术（CCUS）取得显著进展，我国已建成 40 个 CCUS 示范项目，CO<sub>2</sub> 封存量超过 200 万吨/年。

治理体系方面，国家统筹谋划气候变化应对和大气污染防治工作，明确提出将“协同推进减污降碳”为抓手，将深入开展污染防治行动和积极应对气候变化作为持续改善环境质量的重要内容进行统筹部署。通过环境统计制度改革推动污染源大气污染物和温室气体排放量统计的衔接，研究将二氧化碳排放纳入环境影响评价相关工作内容，推动建立减污降碳源头防控的管理制度体系。在地方层面，部分省市先行先试尝试建立温室气体减排和污染防治工作的衔接机制，取得一定效果。据统计，全国已有 70 个地级及以上城市明确提出了碳排放达峰年份目标。

经济政策方面，大气污染治理防治专项资金推动了多领域减污降碳协同推进；针对可再生能源、新能源汽车、绿色建筑、生态保护等领域实施导向性资金补助政策，推动了污染物和温室气体协同减排。构造了以环境保护税为主体，以资源税为重点，以车船税、车辆购置税、消费税等税种为辅助的绿色税收体系和差别化价格政策体系。基本建立了比较完整的绿色金融体系，截至 2020 年底，中国绿色贷款余额已达 11.95 万亿元，位居世界第一。2020 年，7 个碳排放权交易试点碳市场年成交额共 21.5 亿元，碳交易年平均成交价格为 28.6 元/吨。

## 4 温室气体与大气污染物协同减排

受益于积极的节能减排政策，近年来中国人为源二氧化碳排放增速明显放缓，2013–2020年排放年均增速约为1%，远低于2002–2013年间9.6%的排放增速水平。碳排放总量持续处于高位，尽管受新冠疫情影响，我国2020年第一季度碳排放同比下降11%，但全年排放与2019年相比仍略有增加，同比增长0.5%，是2020年世界主要经济体中唯一碳排放出现增长的国家。2020年全国化石燃料燃烧和水泥生产过程排放约为100亿吨，占全球排放总量的27%。从部门构成来看，工业和电力是最主要的排放部门，分别占2020年全国排放总量的41%和38%；从燃料构成来看，2020年煤炭排放占比达75%，但近年来天然气排放总量和占比均快速增长。

自2005年国家开展SO<sub>2</sub>排放总量控制以来，中国主要大气污染物排放量的攀升势头开始被逐步遏制。2013年以来随着《大气十条》的实施，大气污染防治领域实现历史性变革，主要大气污染物排放量迅速下降。全国SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>和一次PM<sub>2.5</sub>排放量已分别于2006、2012和2006年达到峰值，2020年排放量相较峰值分别下降了77%、32%和53%。VOCs和NH<sub>3</sub>的减排是过去大气污染防治的薄弱环节，排放量长期居高难下。2017年以来VOCs和NH<sub>3</sub>排放首次出现拐点，但减排幅度较小，减排成果尚不稳固。

2013年以来大气污染防治领域实施的燃煤锅炉整治、落后产能淘汰、北方地区清洁采暖、交通结构调整等一系列结构性治理措施对CO<sub>2</sub>减排也产生了积极的协同效果。在上述措

施有力推动下，工业部门在2015–2020年间实现了CO<sub>2</sub>和大气污染物的协同减排，CO<sub>2</sub>排放量下降6%；民用部门主要大气污染物排放降低的同时CO<sub>2</sub>排放量保持基本稳定。在城市层面，全国337个地级及以上城市中，有98个城市在2015–2019年间实现了PM<sub>2.5</sub>年均浓度和CO<sub>2</sub>排放量协同下降，98个城市PM<sub>2.5</sub>浓度平均下降比例达到25.8%。

陆地生态系统碳收支估算方法包括基于碳储量变化清查方法和基于大气CO<sub>2</sub>浓度观测反演方法。综合考虑两种方法的估算结果，过去十多年我国陆地生态系统碳吸收量相当于同期化石燃料CO<sub>2</sub>排放量的4–20%。城市化、毁林造田等土地利用变化导致生态系统净碳释放，而以植树造林为代表的土地利用变化导致生态系统碳净吸收，过去十年土地利用变化的碳汇主要来自于中国的大规模植树造林行动。

“  
1%

2013–2020年二氧化碳排放年均增速约为1%，远低于2002–2013年间9.6%的排放增速水平。



## 5 协同治理的健康效益

近年来 PM<sub>2.5</sub> 污染改善带来了显著的健康效益，但 O<sub>3</sub> 污染加重导致相关健康损失增加。2020 年 PM<sub>2.5</sub> 长期和短期暴露相关的过早死亡人数分别为 139 万和 6.4 万，较 2013 年分别下降 20% 和 41%。全国人群 PM<sub>2.5</sub> 短期暴露水平及相关健康损失相较年均水平下降更为显著，体现重污染天气治理取得突出成效。与此同时，O<sub>3</sub> 污染逐渐凸显，O<sub>3</sub> 相关的疾病负担呈现增加趋势。2020 年与 O<sub>3</sub> 长期和短期暴露相关的过早死亡人数分别为 14.8 万和 8.0 万，较 2013 年分别上升 49% 和 51%。

积极应对气候变化将带来直接的健康收益。近期的一项预估我国气候变化下未来热相关死亡风险的研究发现，在 1.5°C 升温情景下，中国城市每年热相关超额死亡将比 2°C 升温情景少 2.7 万例 / 年。未来一方面气候变化会导致热浪等极端天气事件非线性增长，另一方面人口老龄化将导致热相关的超额死亡人数较当前大幅增加，因此，大幅减少温室气体排放、减缓气候变化，将会带来可观的健康收益。

气候减缓政策可以促进能源结构优化和化石能源消费下降，在降低碳排放的同时显著减少大气污染物的排放和减少污染治理成本，并带来可观的健康协同效益。有研究表明，如中国实现承诺的国家自主减排目标，2030 年可避免因 PM<sub>2.5</sub> 导致的 9.5 万例过早死亡和因臭氧导致的 5.4 万例过早死亡。如实施更严格的气候减缓政策（2°C 情景），到 2030 年可避免因 PM<sub>2.5</sub> 导致的 16 万例过早死亡，净收益可达 5300 亿美元。

“  
16% 31%

2020 年 PM<sub>2.5</sub> 长期和短期暴露相关的过早死亡人数分别为 139 万和 6.4 万，较 2015 年分别下降 20% 和 41%。

## 6 碳中和与清洁空气协同路径

气候目标推动二氧化碳排放降低并协同大气污染物减排是我国未来气候与环境治理的必然选择。在未来碳减排路径选择方面，应当综合利用资源增效减碳、能源结构降碳、工业过程脱碳、地质空间存碳、生态系统固碳和市场机制融碳等多种路径实现碳达峰与碳中和，同时充分考虑不同技术路径对大气污染减排的协同效应，将推动空气质量持续改善做为碳达峰与碳中和技术路径选择的重要约束条件，以最大限度实现“减污降碳”协同效应。

**资源增效减碳。**资源和能源的高效利用是推动温室气体和大气污染物从源头减排的关键。要加大资源回收循环利用力度，推动钢铁、铝、塑料等高耗能行业产品再生和秸秆、生活垃圾等废弃物的资源化利用；要严格控制能耗强度，建立健全用能预算等管理制度，继续深入推进工业、建筑、交通等重点领域节能，着力提升新基建能效水平。

**能源结构降碳。**改变以化石能源为主的能源结构是实现碳中和的核心途径。一方面要大幅提升风电、光伏发电规模，构建以新能源为主体的新型电力系统，同时提高电网系统灵活性，提升电网消纳可再生能源的能力；另一方面要加快终端用能电气化进程，从推动协同减排出发，优先针对污染物排放量大的行业实施电气化改造，例如加快散煤清洁化替代进程，推进运营车辆电动化等。

**工业过程脱碳。**冶金、建材和石油化工等工业过程污染物排放是当前大气污染治理的重

点，其过程碳排放也是未来减排的难点。因此应当重视上述行业的脱碳技术研发，着力突破关键技术，开发绿色低碳创新工艺，加大对氢能炼钢、氧气高炉及非高炉冶炼等绿色冶金技术，非碳酸钙熟料替代、等离子电炉等绿色水泥生产技术，以及生物基材料对传统石化基材料的替代技术的研发投入，加快示范应用及推广。

**地质空间存碳。**CCUS 和 BECCS 等碳封存技术是未来实现大规模减排和碳中和目标的关键技术。未来一段时期我国 CCUS 和 BECCS 仍处于试验示范期，应分阶段逐步实现低碳零碳或负碳技术的全流程、一体化和规模化示范，在积累经验的同时逐步促进相关技术成本下降和水平提升，为实现中长期商业化应用做好准备。

# “ “ 协同

在未来碳排放路径选择方面，应当综合利用资源增效减碳、能源结构降碳、工业过程脱碳、地质空间存碳、生态系统固碳和市场机制融碳等多种路径实现碳达峰与碳中和。

**生态系统固碳。**维持与增强陆地生态系统碳汇被认为是实现碳中和目标的重要手段。未来应当加强森林资源培育，不断增加森林面积和蓄积量，加强生态保护修复，增强草原、绿地、湖泊、湿地等自然生态系统固碳能力；同时分析未来生态系统碳汇增加对碳排放路径和协同减排路径的影响，优化协同减排路径设计。

**市场机制融碳。**应当稳步推进碳排放权交易市场机制建设，建立健全碳排放权交易市场风险管控机制，尽快出台全国碳排放权交易管理条例，为碳市场体系建设提供法律支撑。适时推动排污权交易与碳排放权交易协同管理，实现排放权交易的协同增效。开发与碳排放权相关的金融产品和服务，推动碳金融产品体系的层次性发展，整合和协调国内碳市场，强化政策协同、标准体系建设和综合示范。

基于清华大学开发的碳中和与清洁空气协同科学评估与决策支持平台（CNCAP）测算，如一方面加大源头治理力度，提升可再生能源比例，推动钢铁、水泥等高耗能产品产量尽早达峰，加快散煤清洁化替代进程，同时持续推进非电行业、柴油机和VOC重点行业污染治理工作，则在2030年实现碳达峰目标的同时，全国主要污染物相较2015年可减少29%–51%，绝大部分地区PM<sub>2.5</sub>年均浓度可达到35 μg/m<sup>3</sup>的现行环境空气质量标准，全国人群PM<sub>2.5</sub>年均暴露水平可从2015年的55 μg/m<sup>3</sup>下降到28 μg/m<sup>3</sup>，实现“减污降碳”的协同效应。

2030年之后，由于末端治理措施的减排潜

力基本耗尽，碳中和目标下的深度低碳能源转型措施将成为我国空气质量持续深度改善的动力源泉。在碳中和路径下，到2060年我国将基本完成低碳能源转型，可再生能源发电占比将达到70%以上，工业部门终端煤炭消费比例低于15%，新能源车占比达到60%以上，民用部门能源全面清洁化。2060年全国碳排放总量约为6.8亿吨左右，在当前排放水平基础上减少90%以上；全国主要污染物排放相较2015年降低65%–94%，人群PM<sub>2.5</sub>年均暴露水平达到8 μg/m<sup>3</sup>左右，全国78%的人口PM<sub>2.5</sub>年均暴露水平低于10 μg/m<sup>3</sup>，空气污染问题得到根本解决。

综上所述，以加速结构调整为主要推手促进中国碳中和目标的实现不仅可对全球《巴黎协定》温控目标的实现做出重大贡献，也有助于促进我国人群PM<sub>2.5</sub>年均暴露水平达到世界卫生组织空气质量指导值，实现中长期空气质量的根本性好转。我国下一步应当以“减污降碳协同增效”为总抓手，推动碳达峰与碳中和目标下的PM<sub>2.5</sub>与O<sub>3</sub>污染协同治理，深入发挥和提升结构调整在污染减排中的作用，加快能源清洁低碳转型，逐步构建零碳能源体系；针对“科学治污、精准治污和依法治污”的重大需求，强化科技引领和机制创新，构建碳中和与清洁空气协同的新一代大气复合污染防治技术体系；将保护人民群众健康作为气候变化与空气污染协同治理的出发点，在2030年之后加严空气质量标准并逐步与WHO相关标准接轨，引导空气质量根本改善。

（相关参考文献未逐一列出，详见73页）

# 第一章 引言

温室气体和大气污染物同根同源，主要都源于化石燃料的燃烧利用过程。随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的先后实施，近年来我国 PM<sub>2.5</sub> 浓度持续下降，空气质量明显改善。然而，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。而且我国现行 PM<sub>2.5</sub> 空气质量年均值标准相当于世界卫生组织（WHO）第一阶段过渡值，距离 WHO 指导值尚有较大距离，空气污染治理工作任重道远。

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。由于温室气体和大气污染物同根同源，致力于降低化石燃料消耗量的措施在减少碳排放的同时也会减少大气污染物的排放，带来空气质量改善的协同效益；另一方面，在大气污染治理实践中优先选择源头治理措施，在减少污染物排放的同时也会带来碳减排收益。在这一背景下，国家提出以“减污降碳协同增效”为总抓手，加快推动从末端治理向源头治理转变，通过应对气候变化降低碳排放，进而从根本上解决环境污染问题，推动高质量发展。



在能源基金会支持下，由清华大学、生态环境部环境规划院和北京大学联合发起，中国清洁空气政策伙伴关系（CCAPP）组织国内40多位一线学者，通过构建我国空气污染与气候变化协同治理监测指标体系，编制《中国碳中和与清洁空气协同路径年度报告》，跟踪、梳理、总结与分析我国空气污染与气候变化协同治理进程，识别面临的挑战并提出解决思路，助力形成政策制定、评价与优化的闭环，推动协同治理政策的落地实施。同时，CCAPP希望通过组织报告编制工作建立长效合作机制，与有志于投身这一领域研究的青年科学家创造交流平台，推动科学家之间的交流合作以及与决策者和公众之间的沟通，为推动气候变化与空气污染协同治理贡献集体智慧。

应对气候变化和治理空气污染在科学机理、目标指标、应对措施、综合效益和治理体系等方面都具有高度的协同效应。本报告以空气污染与气候变化协同治理监测指标为基础，以自然科学和社会科学深度交叉融合为导向，从空气污染与天气气候条件、结构转型进展、大气成分源汇与减排路径、健康影响与协同效应、协同治理体系与实践等五个方面出发设定18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。

本报告包括五个主要章节。第二章聚焦空气污染与天气气候条件，通过空气质量变化、不利气象条件变化与气候变化及其对空气污染

的影响共三项指标，分析气候变化与大气污染之间的相互作用。第三章针对结构转型，梳理出能源结构转型、产业结构升级、交通结构转型、污染治理进程及零碳负碳技术五项指标，追踪我国在结构转型方面的进展状况，总结经验并识别面临的障碍和挑战。第四章介绍大气成分源汇及减排路径，包括人为源碳排放、污染物排放及协同减排进展、土地利用变化与陆地碳汇和未来减排空间及协同路径四项指标，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。第五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。第六章关注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。

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。2021年是第一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，上百位专家参与了研讨和报告评审工作，初步建立了合作平台与机制。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。



# 空气污染与天气 气候条件

## 第二章

研究表明，气候变化与大气污染之间存在着相互影响：一方面，空气污染的形成、累积和消散与多种气象因素密切相关，而全球气候变暖将导致未来极端高温和静稳事件日趋频繁，也会加剧区域空气污染，威胁人类健康；另一方面，气溶胶可通过改变大气辐射收支影响气候系统，进而影响极端天气气候事件和空气质量。分析天气气候条件对空气质量的影响，将有助于更为科学精准地制定碳中和与清洁空气协同路径。

## 2.1 空气质量变化

逐年评估全国及区域大气污染物浓度水平，实时跟踪我国居民对于大气污染物的平均暴露水平是表征我国空气质量改善效果最直接的基础指标。本指标根据中国环境监测总站公布的空气质量监测数据，分析了全国及重点区域污染物浓度的逐年变化情况，并基于中国大气成分近实时追踪数据集（TAP，<http://tapdata.org/>，Geng et al., 2021; Xiao et al., 2021）提供的 10 公里分辨率的 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 浓度数据，评估了我国居民对于污染物的长期和短期暴露水平。

2020 年，全国 337 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、珠三角等五个重点区域的污染物浓度相比 2019 年均有所下降，其中 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>2</sub> 年评价价值全面达到国家二级标准，但 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 在较多地区尚未达标。

### PM<sub>2.5</sub>

2020 年全国 337 个地级及以上城市 PM<sub>2.5</sub> 年平均浓度为 33 μg/m<sup>3</sup>，低于国家空气质量二级标准（35 μg/m<sup>3</sup>），相比 2015 年（45 μg/m<sup>3</sup>）下降 28.5%（图 2-1a）。2020 年，全国 337 个地级及以上城市中 202 个城市环境空气质量达标，占比达到 59.9%；其中 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度达标城市数量为 212 个，占比达 62.9%。长三角、成渝地区的 PM<sub>2.5</sub> 浓度呈稳步下降趋势，2020 年首次达到国家空气质量

二级标准；京津冀及周边和汾渭平原的 PM<sub>2.5</sub> 浓度仍然较高，且部分年份有波动。考虑到气象条件和 2020 年新冠疫情对空气质量的年际变化影响，基于污染物浓度的三年滑动平均值对空气质量的变化进行了评估。2015~2020 年，全国及各重点区域的 PM<sub>2.5</sub> 浓度三年滑动平均值持续下降（图 2-1b），显示我国《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等大气污染防治政策取得了显著成效。

### O<sub>3</sub>

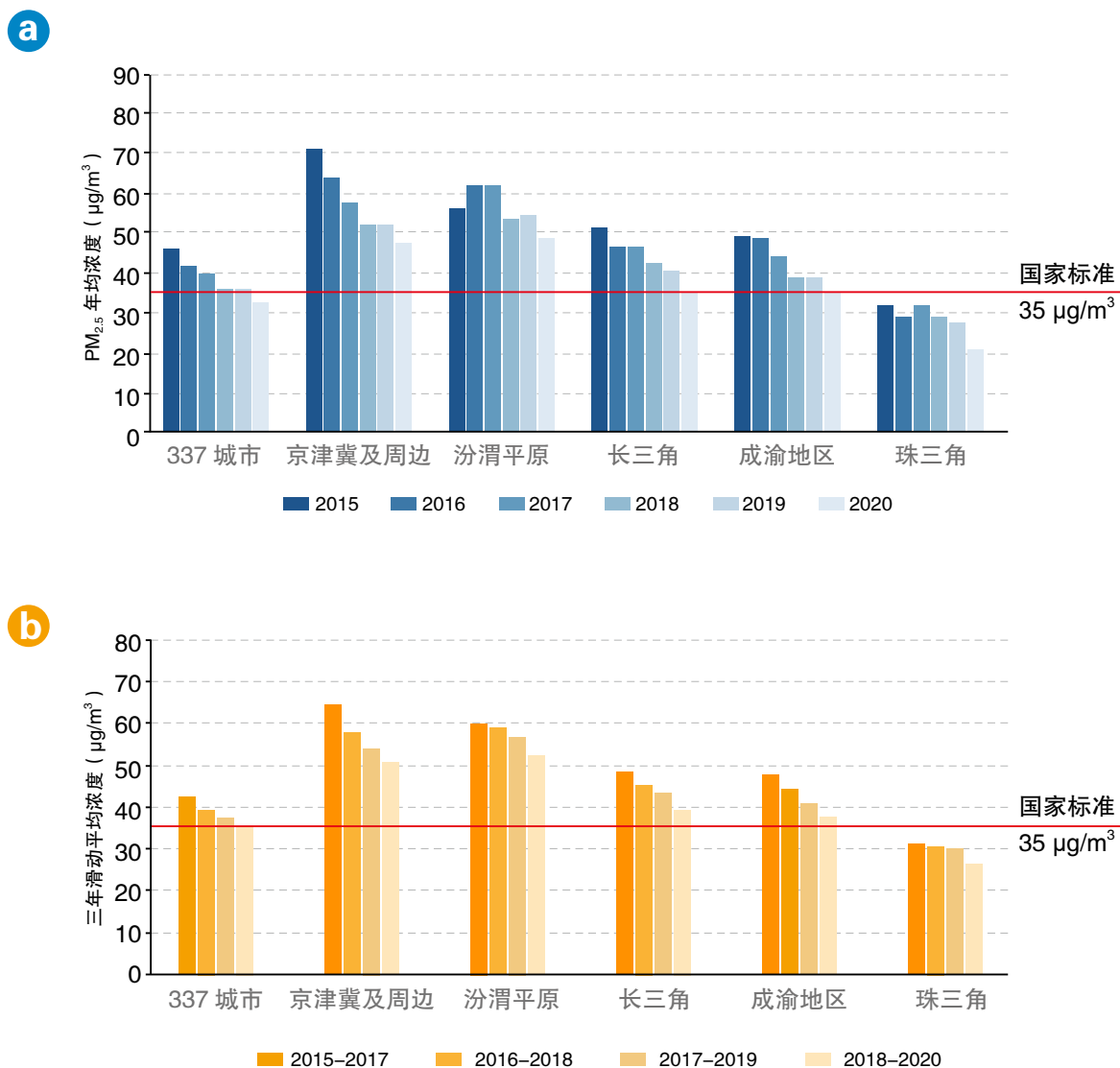
2020 年，全国 337 个地级及以上城市 O<sub>3</sub> 日最大 8 小时平均值第 90 百分位数浓度范围为 60~192 μg/m<sup>3</sup>，平均浓度为 136 μg/m<sup>3</sup>，比 2019 年下降 8.0%，比 2015 年上升 11.1%；京津冀及周边、汾渭平原、长三角、成渝地区和珠三角五个重点区域的 O<sub>3</sub> 浓度相较 2015 年



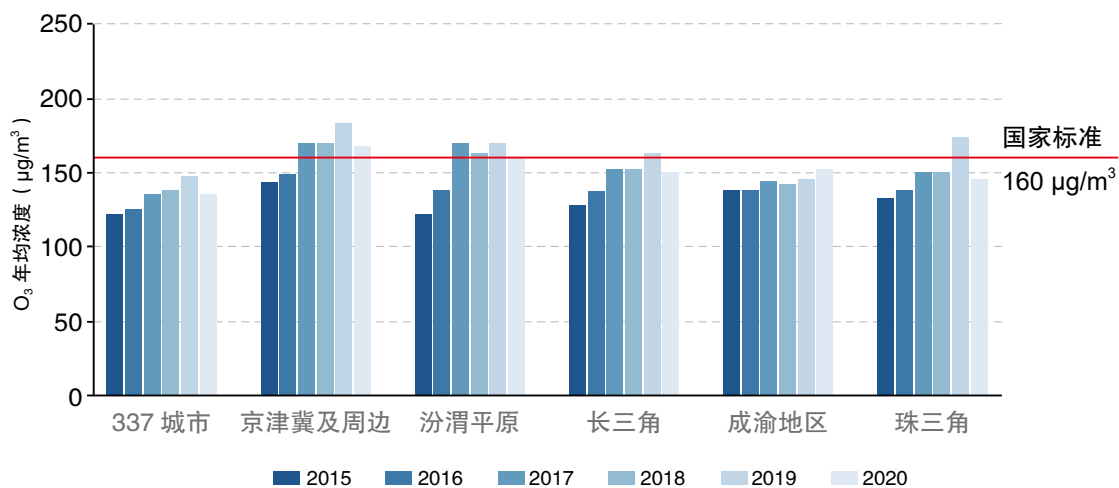
均有不同程度的上升（11.0%~32.1%）（图 2-1c）。从三年滑动平均来看，2015~2020 年间全国及重点区域 O<sub>3</sub> 浓度持续上升，O<sub>3</sub> 污染逐步加重（图 2-1d）。

空气污染的变化改变了我国居民对于污染物的长期和短期暴露水平。2020 年全国人口加权平均的 PM<sub>2.5</sub> 浓度为 33.5 μg/m<sup>3</sup>，相比

2015 年下降 36.6%。各重点区域的 PM<sub>2.5</sub> 年均暴露水平为 21.5~50.7 μg/m<sup>3</sup>，相比 2015 年下降 24.8%~42.2%，其中，京津冀及周边地区的改善最为明显，长三角地区次之。2020 年，全国约有 43% 的人居住在年均浓度超过国家标准的地方，相比 2015 年（76%）减少 43%，我国居民 PM<sub>2.5</sub> 污染慢性暴露水平显著下降。特别地，珠三角地区已实现全面达



c



d

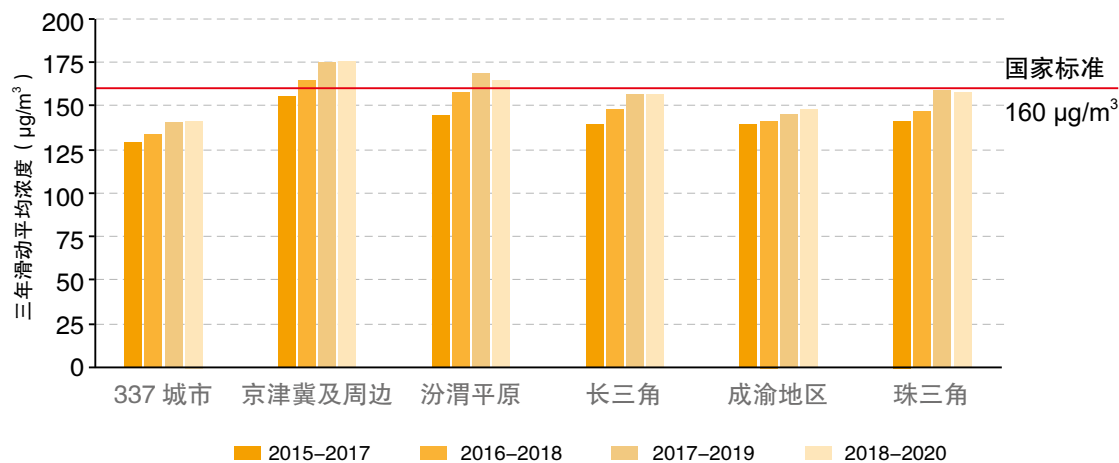


图 2-1 2015 年至 2020 年全国及重点区域 PM<sub>2.5</sub>、O<sub>3</sub> 日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数平均浓度变化，以及其三年滑动平均浓度 (a-d)

标，但京津冀及周边地区仍有 99% 的人口居住在年均浓度超标的区域，PM<sub>2.5</sub> 污染态势依然严峻。2020 年全国人口加权平均的超标天数（即日均 PM<sub>2.5</sub> 浓度大于 75 µg/m<sup>3</sup>）为 27 天，相比 2015 年减少 48 天，我国居民 PM<sub>2.5</sub> 污染

急性暴露水平也有明显改善。

O<sub>3</sub> 污染则呈现相反的态势。2020 年全国人口加权平均的 O<sub>3</sub> 最大 8 小时浓度的第 90 百分位数为 139.3 µg/m<sup>3</sup>，相比 2015 年上

涨 13.8%。各重点区域的 O<sub>3</sub> 年暴露水平相比 2015 年上升 12.2%~20.5%，京津冀及周边地区上浮最为明显，汾渭平原次之。2020 年，全国约有 22% 的人居住在全年日最大 8 小时浓度的第 90 百分位数超过国家二级标准限值 160 μg/m<sup>3</sup> 的地方，是 2015 年的约 7 倍，且

各重点区域均有不同程度的上涨。2020 年人口加权平均的超标天数（即日最大 8 小时 O<sub>3</sub> 浓度大于 160 μg/m<sup>3</sup>）为 21 天，比 2015 年多 14 天，各重点区域的人口加权平均超标天数为 14~63 天，臭氧污染问题日渐突显。

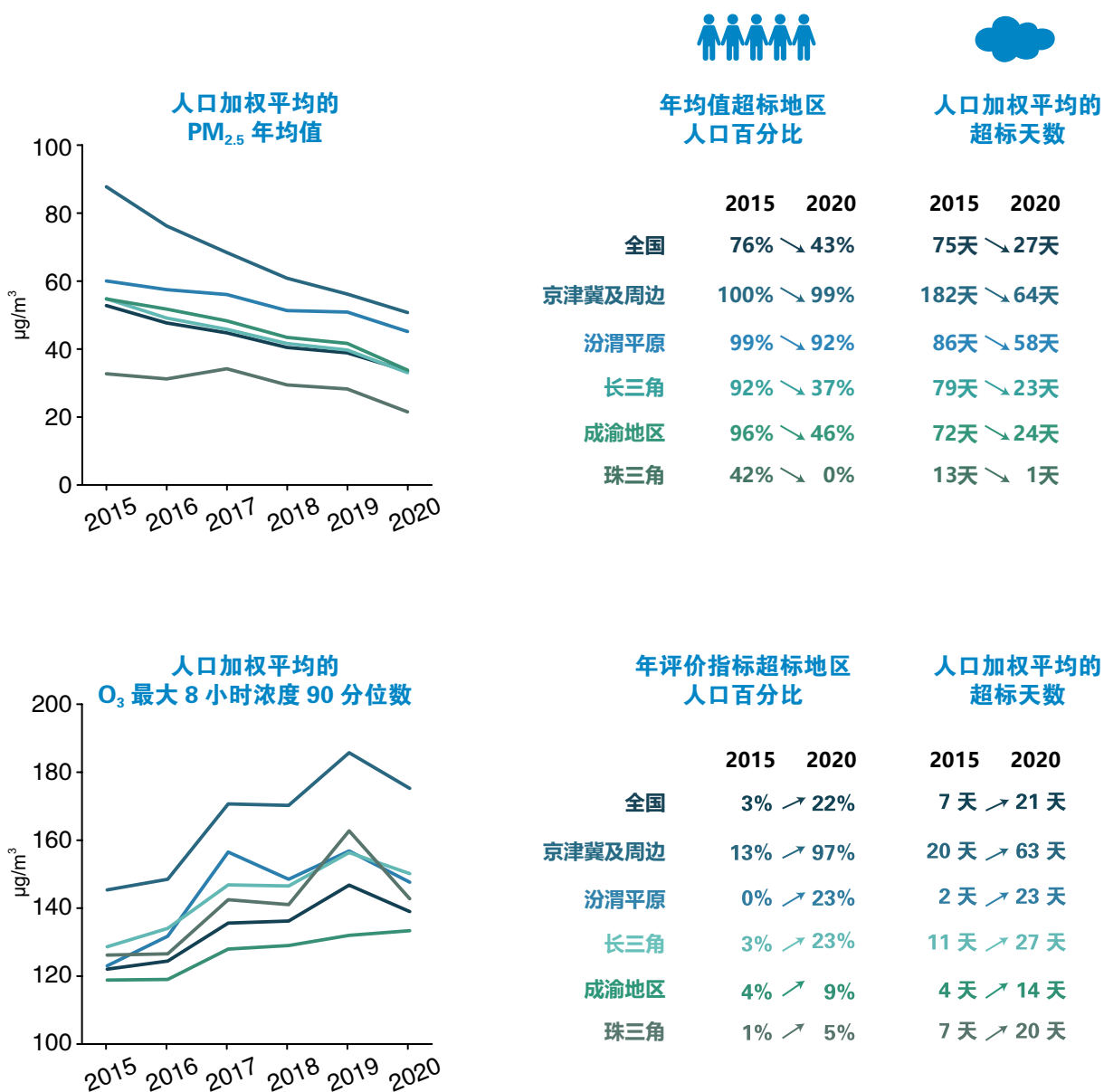


图 2-2 2015~2020 年我国 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染长期、短期暴露水平的变化

## 2.2 不利气象条件变化

空气的形成、累积和消散以及自然源排放与多种气象因素密切相关（例如风速、辐射量、湿度变化等）（Zhang et al., 2019b; He et al., 2017）。因此，分析不利气象条件对我国空气质量变化的影响将有助于更为科学精准地制定清洁空气政策。本指标利用气溶胶污染条件指数（PLAM 指数，与  $PM_{2.5}$  质量浓度呈线性正相关性）（Zhang et al., 2009, 2019b; Wang et al., 2012, 2013a），综合诊断和量化了多种气象要素对  $PM_{2.5}$  年际变化的贡献；另外，分析了我国及重点区域总辐射量和相对湿度的年际变化，定性表征了其

对近地面臭氧浓度的影响。

图 2-3 展示了 2015 年至 2020 年我国重点区域 PLAM 指数的年际变化。在京津冀地区，2015 年之后气象条件持续转好；与 2019 年相比，2020 年气象条件转好约 11%，表明在此地区 2020 年相较 2019 年的  $PM_{2.5}$  下降中有约 11% 的降幅来自气象条件的贡献。汾渭平原气象条件的变化和京津冀地区类似。在长三角地区，2015 年至 2020 年气象条件也是持续转好，与 2019 年相比，2020 年气象条件在此地区转好约 13%。在珠三角地区，自 2015 年以来 PLAM 指数值很少超过其阈值（80），且在 2017 年之后进一步转好。在成渝地区，2016 年至 2020 年不利气象条件呈现转好的趋势，与 2019 年相比，2020 年气象条件在此地区转好约 5%。

我国大气污染防治重点地区相对湿度和总

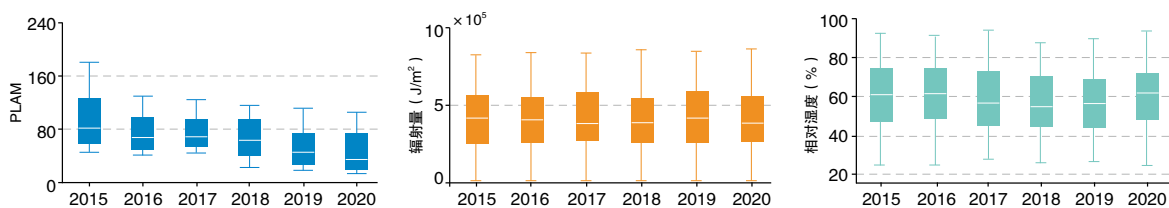
辐射量对近地面臭氧污染的年际变化有一定的影响。2015 年至 2020 年，京津冀地区的年均辐射值最高，成渝地区最低。京津冀地区 2020 年年均辐射量较 2019 年略有下降，下降幅度 3.63%，有利于臭氧浓度的改善。2015 年至 2020 年，长三角地区年辐射量呈现先上升再下降的趋势，2018 年辐射量达到最大，2020 年较 2019 年有所下降，下降幅度 8.92%。2015 年至 2020 年，珠三角地区年均辐射总体呈上升趋势，2020 年较 2019 年略有上升，上升幅度 4.03%。汾渭平原地区年均辐射量与京津冀地区变化趋势类似。在成渝地区，2018 年年均辐射量最大，2020 年较 2019 年略有下降，下降幅度 4.32%（中国气象局，2020）。

在京津冀地区，2015–2020 年相对湿度均值在 60% 左右，2020 年相对湿度较 2019 年显

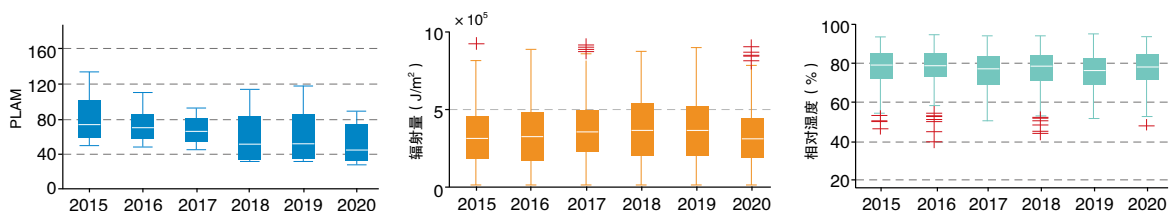
著上升，上升幅度为 8.42%。长三角地区相对湿度 2020 年较 2019 年有较为显著的上升，上升幅度为 1.91%。在珠三角地区，2015–2020 年年均相对湿度在 80% 左右，2020 年相对湿度较 2019 年略有下降，下降幅度 1.68%，

不利于臭氧浓度的降低。汾渭平原地区年均相对湿度亦有与京津冀类似的变化特征。在成渝地区，2015 年至 2020 年年均相对湿度在 80% 左右，2019–2020 年相对湿度略有下降，下降幅度为 1.14%。

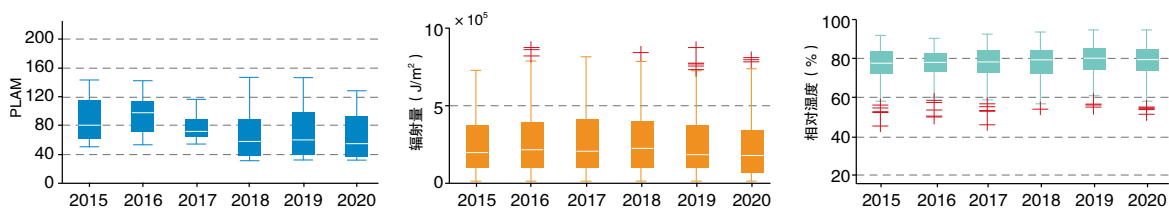
### 京津冀



### 长三角



### 成渝地区



### 珠三角

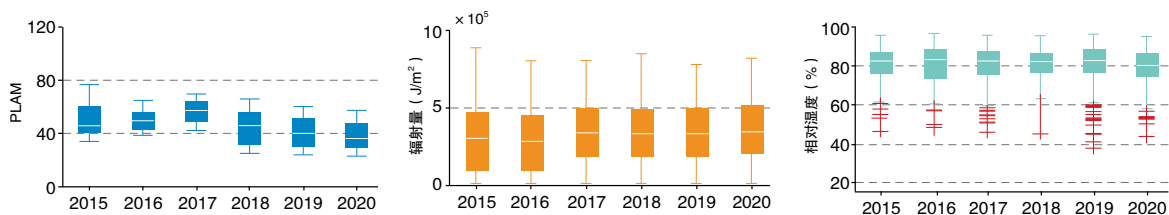


图 2-3 2015–2020 年我国污染重点地区全年的污染-气象条件指数 (PLAM)、辐射量 (J/m<sup>2</sup>) 和相对湿度 (%) 的变化

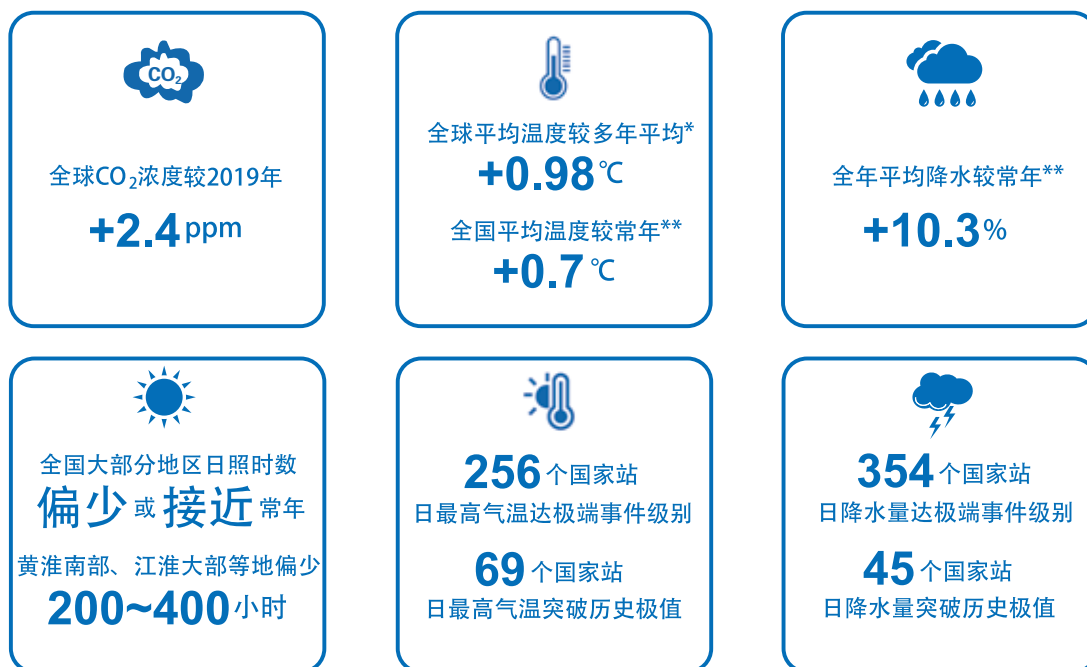
## 2.3 气候变化及其对空气污染的影响

研究表明，由气候变化直接导致的近地面气温上升和极端天气气候事件增加等问题对空气污染变化有显著影响；空气污染也与局地降水、温度和风速的瞬时到年际变化紧密相关。东亚冬季风、厄尔尼诺、北极海冰、欧亚积雪及关键区海温等大尺度气候因子异常亦会通过调整东亚大气环流影响我国空气污染的发生发展。本指标定量探讨了我国气候变化的总体趋势，总结了历史气候变化事件对我国空气污染影响的相关成果，分析了未来气候变化对我国空气质量评估工作带来的不确定性影响。

2020 年全球平均大气 CO<sub>2</sub> 浓度为 412.5ppm，较 2019 年增长 2.4ppm（图 2-4）。现有综合观测及多项关键指标显示，全球增暖趋势显著，2020 年全球平均温度较多年（1951-1980 年）平均增加约 0.98°C，是有历史记录以来的第二个暖年。中国地处东亚季风区，气候变化异常复杂。2020 年全国年平均气温较常年（1981-2010 年）偏高 0.7°C，略低于 2019 年，为 1951 年以来第八高（图 2-4）。其中浙江、江西、福建、广东创下 1961 年以来气温最高值。2020 年极端高温事件明显偏多，全国共有 256 个国家站日最高气温达到极端事件级别，其中有 69 个国家站日最高气温突破历史极值，而极端低温事件较常年偏少，但较 2019 年偏多（国家气候中心，2020）。

2020 年西北太平洋副热带高压异常偏强，导致中国大部分地区降水异常偏多，其中全国冬季降水较常年偏多 35%，夏季降水偏多 15%，年平均降水偏多 10.3%（比 2019 年偏多 7.6%）。同时，极端降水事件明显偏多，全国共有 354 个国家站日降水量达到极端事件级别，其中 45 个国家站突破历史极值。2019/2020 年，东亚冬季风明显偏弱，中国东部大部地区受南风异常控制，不利于大气污染物扩散。同时，冬季风偏弱导致大部分地区气温异常偏高，2019/2020 年冬季全国平均气温为 -2.2 °C，较常年偏高 1.2 °C。

气候变化导致的温度、降水和风速等气象要素的变化对气溶胶污染有显著影响。研究表



( \* 指 1951-1980 年, \*\* 指 1981-2010 年 )

图 2-4 2020 年 CO<sub>2</sub> 浓度和温度、降水、日照等气象要素的变化情况

明,厄尔尼诺对中国南方冬季 PM<sub>2.5</sub> 污染有一定影响 (He et al., 2019a)。2020 年中东太平洋热带海温异常偏低,出现拉尼娜现象,可能会引起华南冬季的大气扩散条件变差。秋季的北极海冰、海温、积雪等外强迫因子可以通过调控大气环流条件,影响华北地区霾发生的背景条件 (Wang et al., 2015; Yin & Wang, 2016; Zou et al., 2017)。2020 年秋季的北极海冰、太平洋海温梯度、大西洋海温、西西伯利亚雪深、中西伯利亚土壤湿度关键区的信号均偏弱,对华北冬季霾污染的影响偏中性。在主要由温室气体导致的全球变暖背景下,21 世纪末期东亚冬季风表现为减弱的趋势,中国大部分地区空气环境承载能力降低,通风条件变差,会导致霾污染加重 (Cai et al., 2017; Chen et al., 2019; Han et al., 2017)。与此同时,气溶胶变化也可通过改变大气辐射收支影响气候系统,进而影响空气质量。研究表明,我国正在实施

的一系列清洁空气行动计划将大幅削减未来大气污染物排放及气溶胶浓度,从而减弱气溶胶辐射效应,改善污染扩散条件,带来额外的空气质量改善和健康效益 (Hong et al., 2020)。

关于全球变暖背景下中国地面臭氧污染变化的大多数研究显示,21 世纪中期在气候变化和人类排放的共同作用下,温度升高、云量减少会导致中国东部地区臭氧污染表现出急剧增加的趋势 (Wang et al., 2019a; Lee et al., 2015; Wang et al., 2013b; Kim et al., 2015; Hong et al., 2019)。但同样在 RCP8.5 情景下,2060-2100 年大气环流变化的间接影响也可能有利于京津冀地区臭氧污染的缓解 (Cao & Yin., 2020)。这说明对未来 PM<sub>2.5</sub> 和臭氧污染预估的结果还存在一定的不确定性,需要结合“碳达峰、碳中和”的路径选择开展进一步的预估。





# 结构转型进展



本章旨在逐年统计我国能源结构、产业结构、交通结构等转型升级进展，以及污染治理与零碳 / 负碳技术发展动态。追踪结构转型指标的进展状况，既可分析在我国清洁空气协同路径中面临的障碍，又能助力碳中和目标的实现。从能源结构、产业结构和交通结构等方面逐步消减化石能源消费，推动可再生能源开发利用，深入推广污染治理措施和零碳 / 负碳技术，可为我国搭建从空气污染治理迈向清洁空气治理的桥梁，从而实现环境效应最大化。

# 3. | 能源结构转型

能源绿色低碳转型是协同推动经济高质量发展、加速实现“碳达峰”与“碳中和”愿景和有效促进经济、社会和环境可持续发展的重要途径。本指标基于中国能源绿色转型和低碳发展的重要数据，介绍了中国在能效提升与能源绿色低碳化方面的重要成效，并探讨了“十四五”期间低碳发展的社会与经济影响。

图 3-1 显示，我国能源供应能力和水平不断提升，2020 年的能源消费总量达到 49.8 亿吨标煤，比上年增长 2.2%（国家统计局，2021）。能耗强度持续下降，2020 年单位国内生产总值能耗比 2015 年下降 13.2%，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2015 年下降 18.8%（气候战略中心测算数据）。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 2.1%，单位合成氨综合能耗上升 0.3%，吨钢综合能耗下降 0.3%，单位电解铝综合能耗下降 1.0%，每千瓦时火力发电标准煤耗下降 0.6%（国家统计局，2021）。

电气化水平持续加速提升，2020 年能源消费弹性系数为 0.96，电力消费弹性系数为 1.35，电能占终端能源消费比重达到 27%（国家节能中心，2021），清洁能源发电装机占比为 43.4%，比上年增长 2.6%（国家统计局，2021）。煤炭清洁高效利用水平稳步提升，

2020 年煤炭在能源消费总量中的占比 56.8%，比上年下降 0.9 个百分点。到 2020 年，全国第三批冬季清洁取暖试点城市达到 43 个，京津冀及周边地区和汾渭平原全覆盖。同时由于新增电力需求不能由清洁能源满足、电气化的经济成本较高且可持续性有待提高等问题对于电力化的进程有所影响。

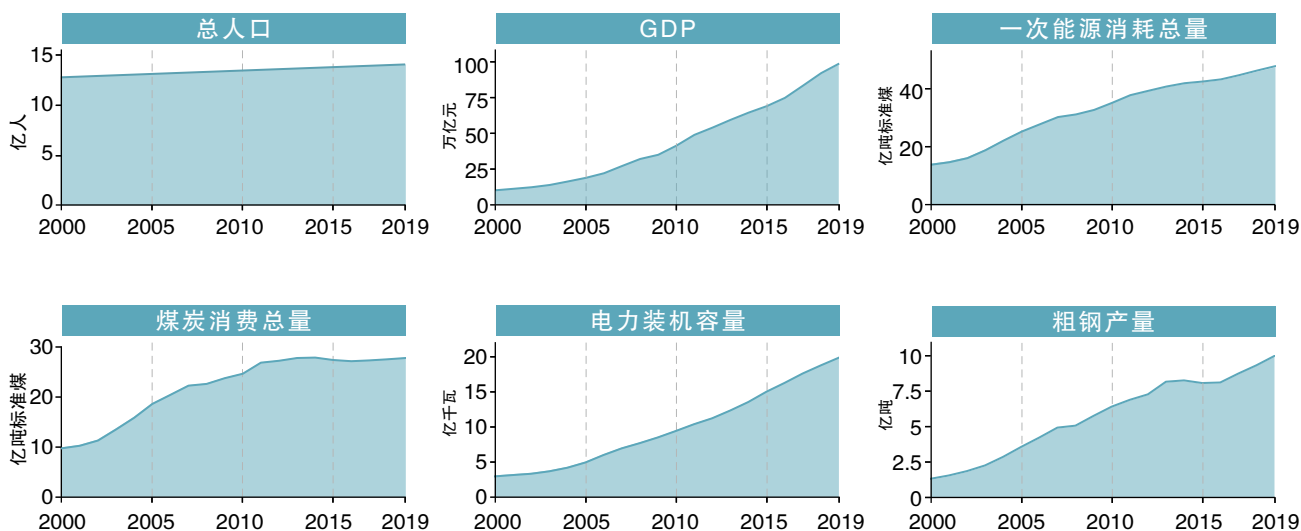


大力发展非化石能源推动能源系统绿色低碳转型，能源结构持续优化升级，可再生能源装机规模不断增长，减污降碳成效显著，同时也为经济高质量发展做了贡献。我国大力推动非化石能源发展，2020年非化石能源占一次能源消费比重达15.9%，提前一年完成“十三五”规划目标任务。能源结构持续优化升级，可再生能源装机规模不断增长，2020年全国火电装机容量12.4亿千瓦，增长4.7%。水电装机容量3.7亿千瓦，增长3.4%；核电装机容量4989万千瓦，增长2.4%；并网风电装机容量2.8亿千瓦，增长34.6%；并网太阳能发电装机容量2.5亿千瓦，增长24.1%，分别是2010年的1.7、4.6、9.5和975倍（国家统计局能源统计司，2021）。但由于新能源出力具有间歇性、波动性，大规模的接入将给电力系统的安全稳定、调峰能力和消纳能力带来新的挑战。

2020年我国可再生能源开发利用规模达到6.8亿吨标准煤，相当于替代煤炭近10亿吨，减少二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物排放量分别约达17.9亿吨、86.4万吨与79.8万

吨（国家能源局，2021），同时也为经济高质量发展做了贡献。据估算，“十四五”期间若碳强度目标达到17%–20%的水平，非化石能源占比将达到19%–21%，我国非化石能源将满足45%–67%的能源消费增量需求，累计投资将超过3.7万亿元，可再生能源领域的就业将达到633–684万人（国家气候战略中心测算）。

在碳达峰与碳中和的战略目标下，“十四五”期间，我国将大力构建现代能源体系，加快发展非化石能源，大幅度提升风电、光伏发电规模，加快推进特高压工程建设，合理控制煤电建设规模，将非化石能源占能源消费总量比重提升到20%左右（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），以更高水平的电气化来支撑煤炭、石油和天然气消费的尽早达峰。在近期碳达峰基础上，电力部门将通过大力发展可再生能源，推广CCUS负碳技术，实现更加深度地脱碳，构建足以支撑高电气化社会庞大用能需求的清洁电力系统，推动2060年前实现碳中和。



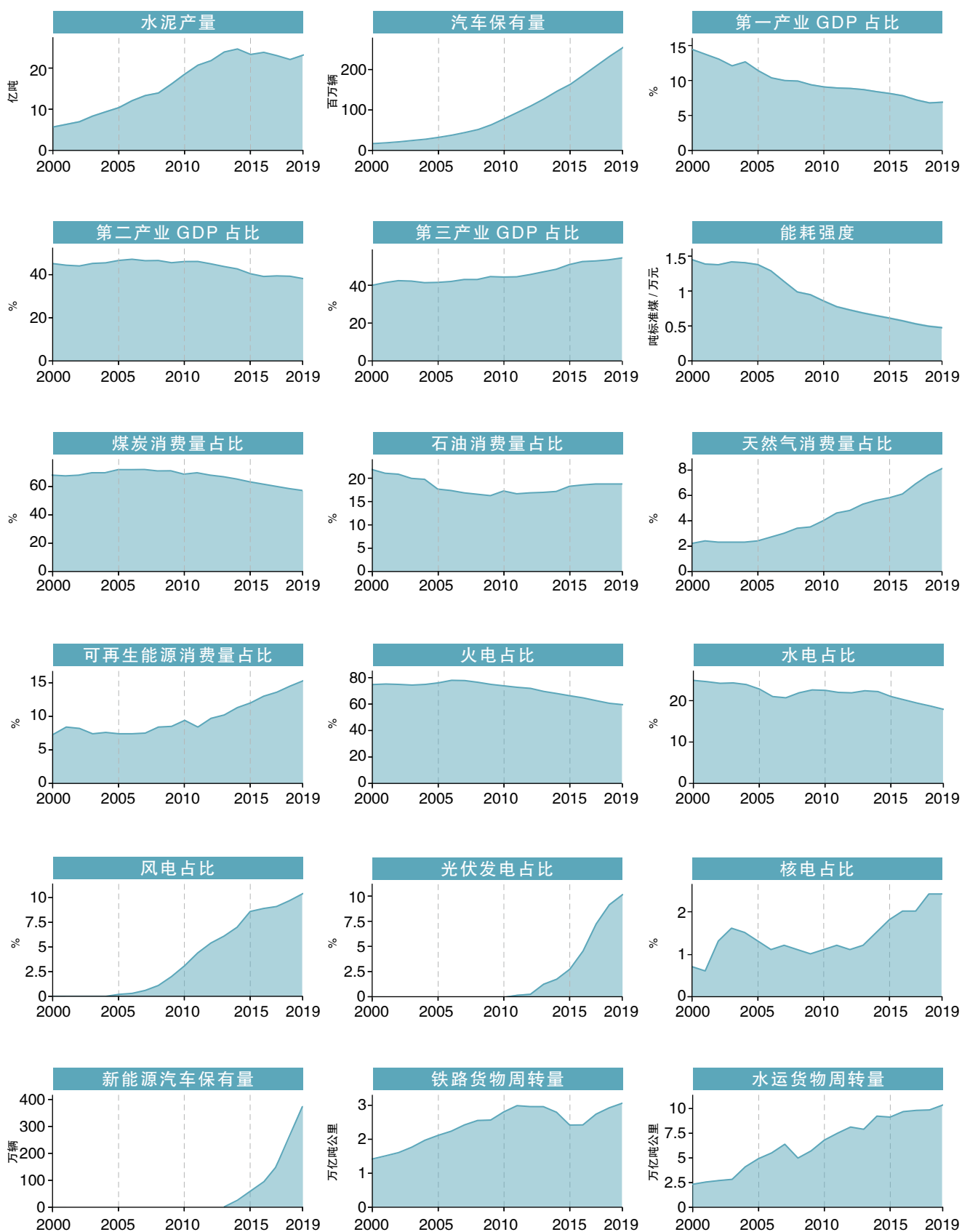


图 3-1 2000-2019 年结构转型进展

# 产业结构升级 3.2

产业是经济发展的核心和基础。转变发展方式，形成节约资源和保护环境的产业结构，并以绿色低碳循环发展构建现代产业体系，将助推我国节能减碳和空气污染防治的协同行动。本指标基于近年来相关规划政策，追踪我国产业结构优化升级进程，从新旧动能转换成效、基础工业落后与过剩产能淘汰，以及“散乱污”企业综合整治等方面，回顾了产业结构转型取得的主要进展，并对我国构建现代产业体系，统筹经济高质量发展和生态环境高水平保护进行了展望。

新产业新业态逆势成长。2015至2020年，我国国内生产总值从68.9万亿元增长至101.6万亿元，其中，第一产业增加值比重由9.0%降低至7.7%，第二产业增加值比重由40.5%降低至37.8%，第三产业增加值比重由50.5%升高至54.5%，第三产业成为经济增长的最大动能（国家统计局，2016；2021）（图3-1）。战略性新兴产业快速发展，2015至2020年，在规模以上工业中，高技术制造业增加值比重从11.8%升高至13.1%，装备制造业增加值比重从31.8%增长至33.7%（国家统计局，2016；2021），成为引领带动产业结构优化升级的重要力量。

基础工业落后与过剩产能淘汰初见成效。重点领域落后产能化解工作在“十三五”期间进一步深化，钢铁、煤炭和煤电三大重点领域提前完成去产能目标。2013至2017年，我国

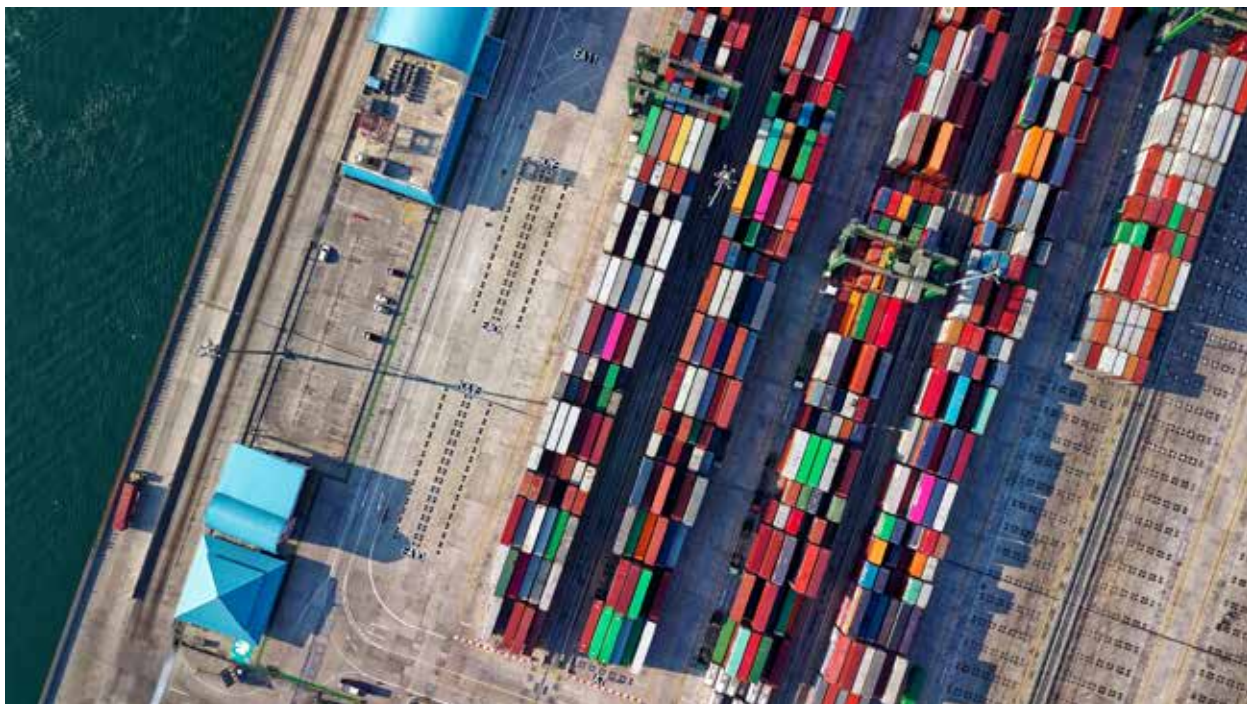
累计淘汰化解落后与过剩的钢铁产能2.0亿吨，水泥产能2.5亿吨，平板玻璃1.1亿重量箱，煤电机组2500万千瓦（Zheng et al., 2018）。2018至2020年，持续深化落后产能淘汰，提升重点行业产能集中度，累计化解过剩钢铁产能1.2亿吨，水泥产能1.4亿吨，平板玻璃0.5亿重量箱，煤电机组2000万千瓦。2013至2017年，累积清理整顿各地“散乱污”企业约30万家（Zheng et al., 2018）。2017至2020年，进一步治理“散乱污”企业约36万家，全国基本完成“散乱污”企业综合整治。产业结构的升级调整对空气质量改善作用显著。研究表明，2013至2017年间，落后产能淘汰使得全国PM<sub>2.5</sub>平均浓度下降了2.8 μg/m<sup>3</sup>（Zhang et al., 2019a）。

未来产业结构转型重心一方面需要向新产业、新业态、新模式的增长倾斜，壮大绿色发

展新动能，另一方面也需深挖存量结构提升空间，提升传统产业产能利用率。目前，国家发展改革委正在编制 2030 年前碳排放达峰行动方案，研究制定电力、钢铁、有色金属、石化、化工、建材等重点行业的绿色低碳转型方案，以政策带动产业结构低碳化调整。电力行业正在积极寻找实现目标的方案，力争率先实现碳达峰，钢铁行业已上报待批《钢铁行业碳达峰及降碳行动方案》，规划于 2025 年前实现碳排放达峰。对钢铁、水泥等基础重工业来说，短期应通过产能与产量压缩、能效提升、燃料结构优化、废钢再利用、构建循环经济产业链等途径，持续释放减排潜力，远期应加强技术升级和工艺

创新，应用突破性低碳技术，探索氢能冶炼和新型水泥，研发 CCUS 技术，加强不同时期不同减排技术的协同，力图深度脱碳，加速迈向碳中和。

由于我国经济未来一个时期仍将保持中高速增长，城市化进程还在继续推进，如何进一步调整升级产业结构、有效压减高耗能工业产品需求、提升能源效率、改善能源结构，是我国 2030 年前实现碳达峰的关键工作和重大挑战。此外，由于我国地区间资源禀赋与发展情况迥异，需要关注在双碳背景下，推动区域经济、产业的协调发展切实可行的转型路径。



# 交通结构转型 3.3

交通运输是国民经济和社会发展的基础性、先导性和服务性行业，也是国家节能减排和协同应对气候环境变化的重点领域之一。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，从能效提升、清洁燃料替代、运输结构优化和绿色出行等几个方面总结了交通运输结构转型方面的进展。

交通行业能效持续提升。中国政府从2006年起分五阶段逐步实施乘用车燃料消耗限值（乘用车燃料消耗量限值，2004），2020年新车车队平均油耗限值目标为5L/100km（乘用车燃料消耗量限值，2021），比2015年水平下降18%（乘用车燃料消耗量限值，2014）。民航行业单位产出能耗不断降低。2019年，中国民航吨公里油耗为0.285公斤，较2005年下降16.2%，机场每客能耗较“十二五”末（2013–2015年）均值下降约15.8%。过去十年，乘用车实际油耗与法规油耗的差异呈现出上升趋势，商用车实际道路油耗评估研究较为匮乏，亟需强化车辆实际道路能效提升的评估和监管。

清洁能源替代稳步推进。在“十城千辆”等多个新能源车推广应用示范工程和新能源车产业发展规划等多项政策的综合影响下，截至2019年底，我国市场新能源车保有量近400万辆（图3-1），在全球市场份额超

过50%。铁路运输逐步实现电气化。2019年全国铁路机车保有量为2.1万台，电气化比例达到62%，内燃机车保有量不足8000台。机场和港口能源清洁化水平稳步提升，截至2019年，全国机场电力、天然气、外购热力占比达到83%，全国年旅客吞吐量500万人次以上机场中95%以上的单位已完成APU替代设备安装并投入使用，民航机场地面保障车辆设备中电动车辆占比约7.5%。到2020年，全国已建成港口岸电设施5400多套，覆盖泊位7000多个（含水上服务区）。

运输结构逐步优化。近年来，我国切实推进大宗货物运输“公转铁、公转水”，在《推进运输结构调整三年行动计划》的推动下，全国货物运输结构明显优化，铁路、水路承担的大宗货物运输量显著提高。2020年，全国铁路货物发送量完成45.52亿吨，完成水路货运量76.16亿吨，较2017年分别增加8.63亿吨和9.59亿吨。与此同时，“十三五”时期，



中国重点区域城际铁路建设快速推进，中长途客流逐步从公路转向高铁。2015–2019年，全国铁路旅客发送量年均增长9.6%。截至2020年底，我国高速铁路运营里程达3.8万公里，已覆盖近95%的百万以上人口城市。目前，由于不同运输结构的价格、效率和灵活性存在差异，一些区域在运输结构调整领域的阶段完成情况与目标差距仍然较大。

绿色出行持续推进。“十三五”时期，中国城市公共交通、出租车和城市配送领域新能源汽车快速发展，北京、上海等特大城市中心城区的绿色出行比例已超过70%。截至2020年底，城市轨道交通运营里程已达到7000公里，百万人口以上的城市建成区公交站点500米覆盖率接近100%。

在能效提升方面，未来应当通过动力系

统优化升级、提升传动效率、加强整车热管理、轻量化等节能技术持续推动传统能源汽车节能化（刘朝全，2019）。预计2020–2030年间传统燃料乘用车平均能耗将下降30%，传统燃料商用车平均能耗下降15%（国家统计局能源统计司，2021）。在能源清洁化方面，未来应当进一步加大电动车推广力度，制订燃油车新车销售退出时间表，切实提升公交、出租、城市物流配送车和乘用车队的新能源占比。对于大型客货车、重型船舶、飞机等交通工具，应积极探索纯电动化、燃料电池技术、可再生燃料技术等低碳、零碳替代技术，为交通行业实现零排放做好技术储备。在绿色出行方面，未来应加快城市公交和城际高铁优先发展，提高绿色交通分担率，合理引导小汽车使用，构建以绿色交通方式为主导的综合交通体系。



# 污染治理进程 3.4

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》的实施，中国大气污染防治工作全面进入快车道，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全面实施，管控不断加严，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2020年的政策实施进展（图3-2），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2020年底，已实现超低排放的煤电机组约9.5亿千瓦，已建成了全球最大的清洁燃煤发电体系（IEA，2020）。
- 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2020年底，钢铁行业已有6.2亿吨粗钢产能正在开展超低排放改造。
- 3 挥发性有机物治理。**“十三五”时期，中国VOCs污染防治工作得到快速推进，陆续发布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。**2018–2020年期间，中国淘汰燃煤锅炉超过11万台，重点区域每小时35蒸吨以下燃煤锅炉已基本清零。
- 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2020年底，累计完成散煤替代2500万户左右，北方地区清洁取暖试点城市实现了对京津冀及周边地区和汾渭平原全覆盖。
- 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

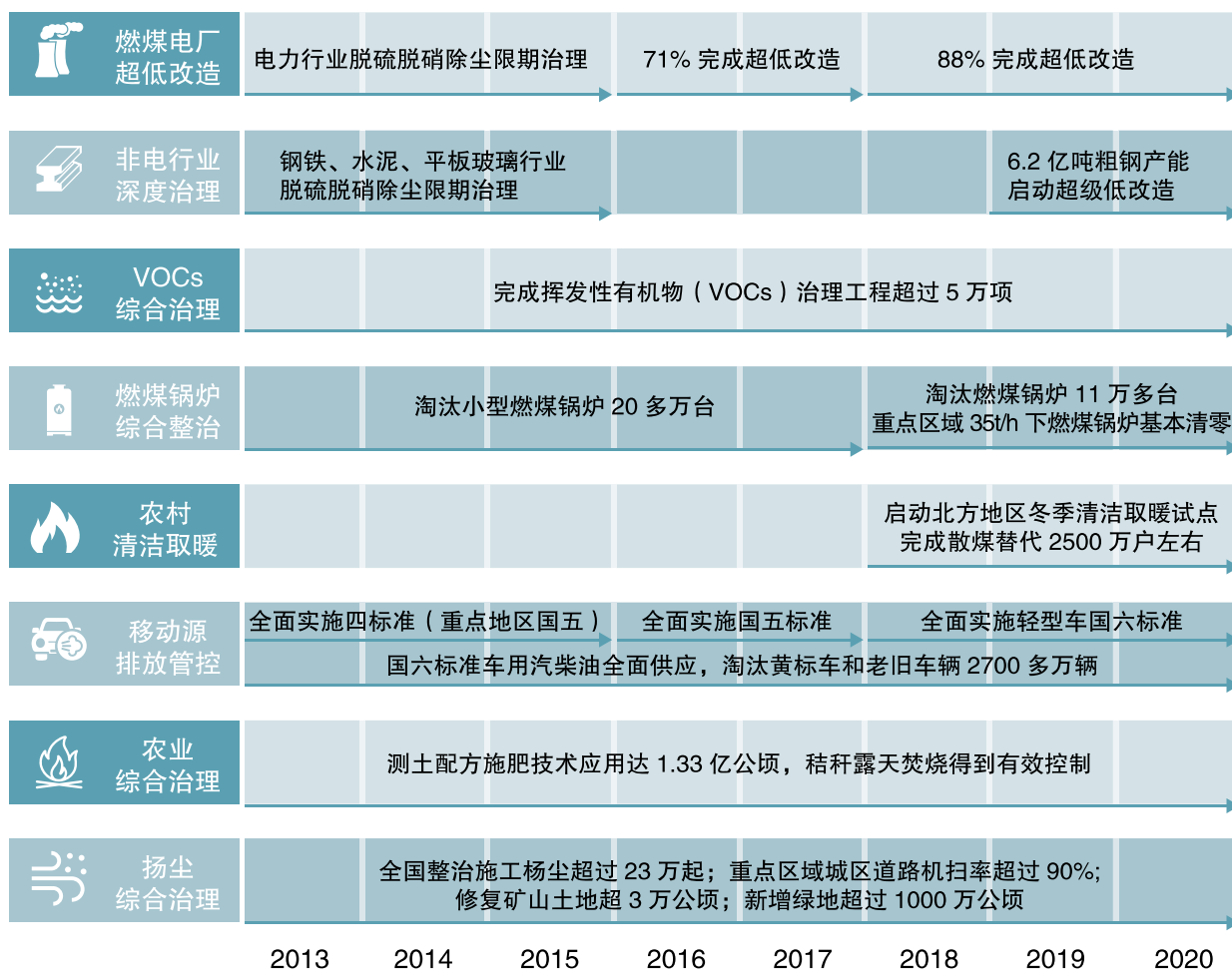


图 3-2 2013-2020 年污染治理指标进展

通柴油、部分船舶用油已实现“三油并轨”。截至 2020 年底，累计淘汰黄标车和老旧机动车 2700 多万辆。

7 农业综合治理。截至 2020 年底，全国推广测土配方施肥技术应用面积已达 1.33 亿公顷，秸秆露天焚烧得到有效控制。

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%；修复矿山土地超 3 万公顷，新增

绿地超过 1000 万公顷。

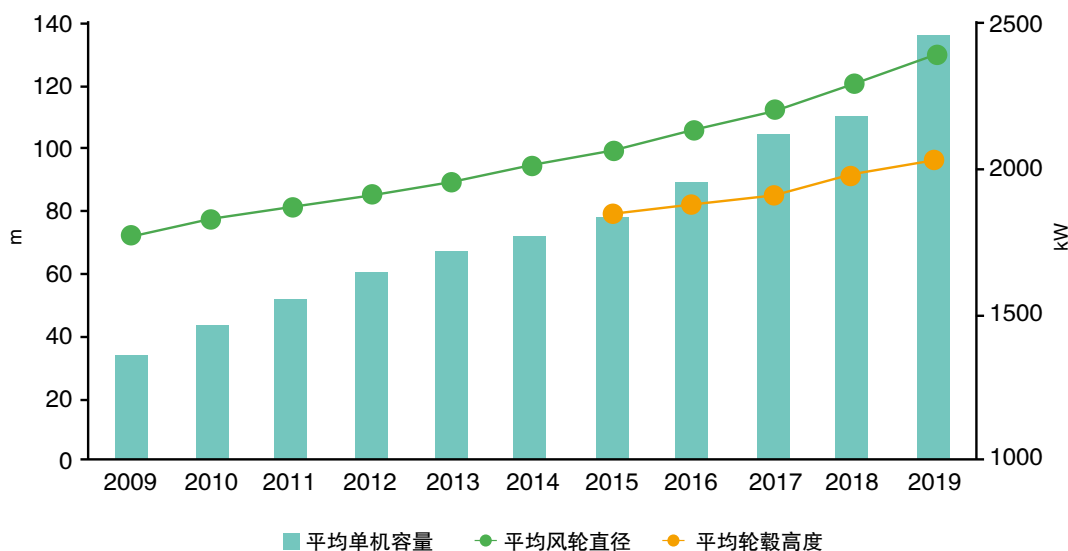
在碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局的大背景下，未来中国加强温室气体和大气污染物排放协同控制、加强细颗粒物和臭氧协同控制的需求将进一步凸显。在污染治理方面，传统工业行业和污染排放部门的末端治理减排潜力已基本挖掘殆尽，非电行业深度治理、挥发性有机物治理、移动源排放管控以及农村清洁取暖等措施有望将继续发挥较为重要的作用，尤其是对于挥发性有机物和氨气等排放量尚未进入明显下降区间的污染物应进一步采取有效减排治理措施，推进相关领域“减污降碳”协同增效。

# 零碳负碳技术 3.5

世界各国均将科技创新作为“碳中和”目标实现的重要保障，我国“碳达峰”与“碳中和”愿景的提出也对科技创新和技术发展提出了进一步的要求。风电、光伏、生物质发电等零碳技术和以碳捕集利用与封存（CCUS）为代表的负碳技术将为我国能源体系绿色低碳转型提供强大支撑。本指标系统梳理了我国零碳、负碳技术总体发展状况，分析了零碳负碳技术未来发展趋势，为进一步探讨零碳负碳技术可行、经济可承受性，寻求技术突破的优先方向提供了基础。

风电、光伏产业实现跨越式发展。“十三五”期间风电、光伏装机迅速增长，截至2020年底累计装机量分别达2.81亿千瓦与2.53亿千瓦。运行消纳情况持续改善，2015至2020年，弃风率和弃光率分别自15%和10%大幅下降至3%与2%，“十四五”期间弃风弃光问题将得到基本解决。2019年新增风电机组平均单机容量达2454千瓦，平均风轮直径达129米（CWEA, 2020），平均轮毂高度96m，上述三个指标分别较2015年增长了33%、30%和22%（图3-3）；2019年PERC单晶电池产业化平均效率达22.3%，预计2025年将达到25.0%。近10年来陆上风电和光伏平均度电造价分别下降30%和75%左右，“十四五”时期将成为全面无补贴平价上网的关键时期（GEIDCO, 2020）。

其他非化石能源持续发展。截至2020年底生物质发电累计装机容量达2952万千瓦，生物质发电效率显著提升。生活垃圾焚烧发电成为新增生物质发电装机主体与行业投资热点，2020年全国生物质发电新增并网容量553.6万千瓦，其中垃圾焚烧发电315.0万千瓦，农林生物质发电226.2万千瓦，沼气发电12.5万千瓦。截至2020年底水电装机量达3.7亿千瓦。弃水情况显著改善，2019年总体有效水能利用率达96%（水电水利规划设计总院，2020）。我国自主设计制造的全球首批百万千瓦水轮机组已于金沙江白鹤滩水电站成功吊装。地热能发电、光热发电技术研究取得显著进展。地热资源勘察技术取得进步，西藏羊易地热电站等项目建设持续推进。首批光热发电项目逐步建成，自主研发塔式太阳能光热



(数据来源: 中国风电产业地图 2019)

图 3-3 2009 年至 2019 年我国新增风电机组典型指标发展情况

发电设备投入运行。核电安全有序发展。截至 2019 年底在运核电机组 43 台, 装机容量共计 4875 千瓦 (CNEA, 2020)。以“华龙一号”、“国和一号”为代表的自主化三代核电技术已完成研发并投入运行。

负碳技术研究取得显著进展。负碳技术能直接吸收转化二氧化碳, 是最终实现碳中和目标的必要技术。CCUS 是目前唯一能够实现化石能源大规模低碳化利用的减排技术, 我国陆地 CO<sub>2</sub> 封存潜力可达 1500~3000 Gt (Li et al., 2019d)。CCUS 技术取得显著进展, 我国已投运或建设中的 CCUS 示范项目 40 个, 捕集能力 300 万吨/年, 累计封存 200 万吨 CO<sub>2</sub> (ACCA21, 2019)。生物能源与碳捕获和储存 (BECCS)

具有更高的负排放潜力, 可以提供负排放和无碳能源的双重优势。在 2050 ~ 2060 年中国达到净零排放的情景下, 预计到 2050 年 BECCS 技术的发电装机容量可达 2.5 亿千瓦。目前, 全球仅有 5 个正在示范运营的 BECCS 项目, 捕集规模共计 150 万吨/年, 捕集成本为 15~400 美元/吨。此外, 直接空气捕获技术 (DAC) 也具有很高的负排放潜力。全球共有 15 座正在示范运行的 DAC 装置, 捕集规模共计 9000 吨/年, 技术成本为 100~1000 美元/吨。

未来我国将加快建设非化石能源发电, 大力提升风电、光伏发电规模, 有序发展海上风电, 加快西南水电基地建设, 安全稳妥推动沿海核电建设, 预计到“十四五”末可再生能源的发



电装机占我国电力总装机的比例将超过 50%。同时，我国负碳技术已取得较大进步，处于研发示范阶段，但缺少切实有效的投融资策略、商业运营模式、财税激励政策以及法律法规体

系，使得整体碳捕集及封存成本还处于较高水平。未来随着碳中和的推动，国家激励政策的进一步完善，加之碳市场金融手段作用，都将有利于负碳技术产业的发展。



# 大气成分源汇及 减排路径

## 第四章



温室气体和大气污染物同根同源，均主要来源于化石燃料的燃烧和利用过程。在政策制定过程中优先考虑减少化石燃料使用的协同减排措施，是实现减污降碳协同增效的主要途径。本章在解析中国主要大气成分历史排放变化及驱动因素的基础上，分析了我国大气污染物与温室气体协同减排的进展和面临的挑战，并进一步基于多个未来排放情景测算和模型模拟结果，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。

# 4. | 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。2018 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）（CEADs, <http://ceads.net>），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；2019–2020 年排放数据来源于全球实时碳数据库（Liu et al., 2020b; Carbon Monitor）（Carbon Monitor, <http://carbonmonitor.org>），通过发电量、工业产品产量、交通流量等动态数据测算。

1997–2020 年化石能源燃烧与水泥工业过程所产生的二氧化碳排放如图 4-1 所示。中国排放经历了三个阶段：1997–2001 年为缓慢增长阶段，排放年均增长 2.6%，2001 年全国排放约 32 亿吨。2002–2013 年为迅速增长阶段，受经济增长与城市化进程推动，排放以年均 9.6% 的速度攀升，成为世界第一排放国，并于 2013 年达到排放峰值。2014–2020 年为增速趋缓阶段，排放略有下降，但在 2017 年重现增长态势，2020 年全国排放约 100 亿吨。

从部门消费来看，工业为主要的排放部门，2000 年其排放占比为 41%，随着国内钢铁、水泥等重工业的迅速发展，工业部门占比上升，2010 年达到 46%，随着工业行





业节能改造，这一比例逐渐下降，到 2020 年，工业部门碳排放占全国的 38%。电力为第二大排放部门，2000 年其排放占比为 36%，尽管近年来电力需求持续攀升，2014 年起我国对煤电机组全面实施节能减排升级与改造，能效水平显著提升，电力部门排放占比仅小幅上升（38%）。

Monitor），2020 年全年，全国碳排放量相比 2019 年略有增加，同比增长 0.5%。其中，工业、电力和民用部门排放与 2019 年相比，同比增长 3%、1% 和 0.5%；地面交通部门排放和国内航空部门排放仍未完全恢复，同比下降 13% 和 18%。

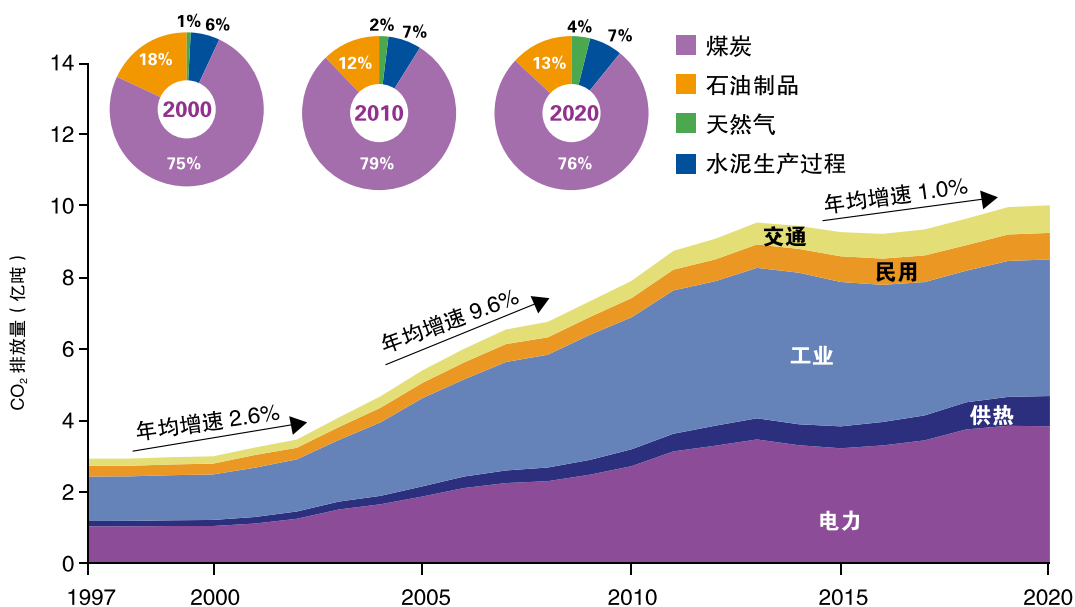
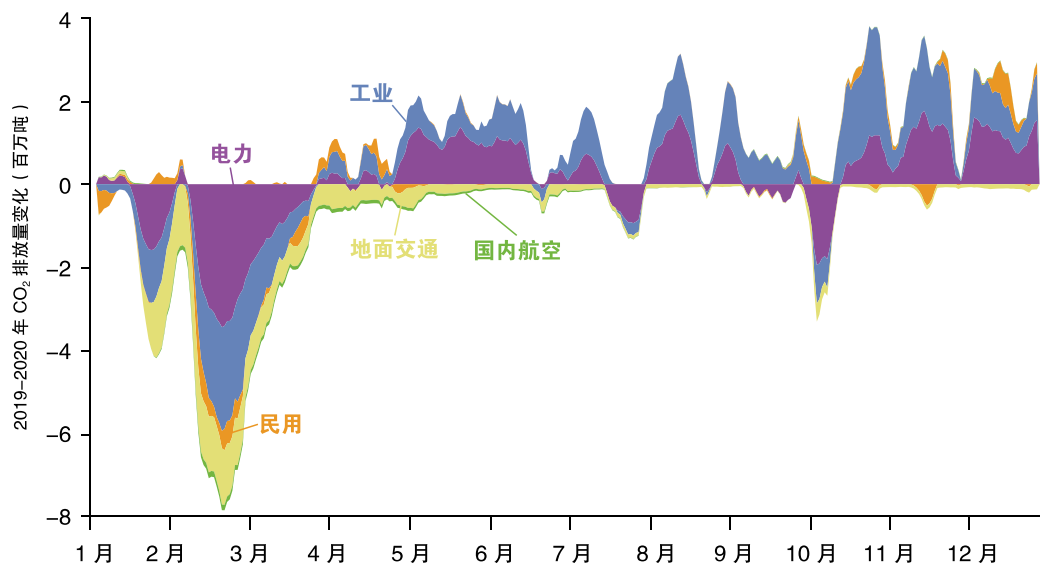


图 4-1 1997-2020 年中国二氧化碳排放趋势

从能源品种来看，煤炭是最主要的排放源，煤炭占全国化石能源消费和水泥生产过程排放 75% 以上，这一比例在过去 23 年先上升后下降，1997-2020 年下降了四个百分点。石油制品为第二大排放源，约占全国排放 12-18%。天然气排放上升较快，从 1997 年 0.37 亿吨增长为 2020 年 4.15 亿吨，年均增速达 11%。

根据全球实时碳数据库 Carbon Monitor 数据显示 (Liu et al., 2020b; Carbon

具体来看 (图 4-2)，2020 年第一季度受到新冠疫情影响，全国碳排放量出现较大幅度降幅，同比下降约 11%。其中，国内航空排放同比下降 41%、地面交通排放同比下降 32%、工业部门排放同比下降 10%、电力部门排放同比下降 8%、民用部门排放同比下降 4%。特别是在春节假期和疫情防控措施的双重影响下，2020 年 2 月创下了最大单月降幅，全国碳排放量同比下降 19%。其中，受疫情封城、限制流动、保持社交距离等措施的影响，居民移动性受到较大影响，地面交通部门排放



数据来源：CEADs (Shan et al., 2018; Shan et al., 2020; CEADs)、Carbon Monitor (Liu et al., 2020; Carbon Monitor)

图 4-2 2019–2020 年中国二氧化碳动态变化

和国内航空排放同比下降 54% 和 71%；受春节假期和疫情停工停产的影响，居民生产生活电力部门排放和工业部门排放分别下降 14% 和 17%。随着疫情迅速得到控制和复工复产的积极开展，中国碳排放量逐步反弹，2020 年 4 月碳排放量已达到并超过 2019 年

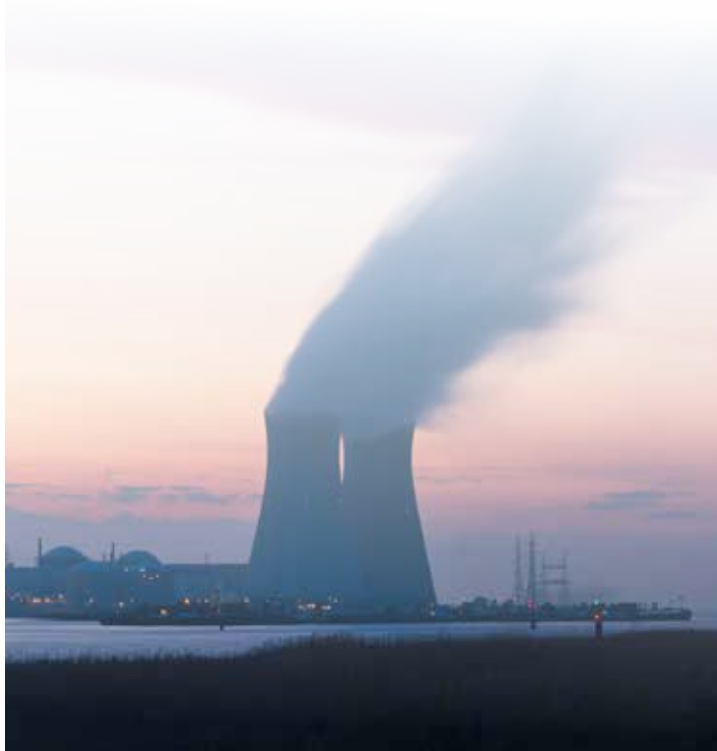
同期水平。2020 年 4 月全国碳排放量同比增长 1%，其中电力、工业和民用部门排放均已超过疫情前同期水平，同比增长 1%、3% 和 7%。此后，2020 年各月碳排放均已超过 2019 年同期水平。2020 年，第二和第三季度同比增长 3%，第四季度同比增长 6%。

# 污染物排放及协同减排进展

## 4.2

CO<sub>2</sub> 与大气污染物存在排放的同源性和控制措施的同效性。本指标利用中国多尺度排放清单模型( MEIC )中的人为源大气污染物排放数据和指标 4.1 中的人为源碳排放数据, 从国家、地区与行业等角度分析了主要大气污染物 CO<sub>2</sub> 与 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、一次 PM<sub>2.5</sub>、VOCs 过去二十年的排放趋势及其近年来的协同减排进展情况。

过去 20 年间, SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和一次 PM<sub>2.5</sub> 排放均呈现先上升后大幅下降的趋势, 但 VOCs 与 CO<sub>2</sub> 排放呈持续上升的趋势( 见图 4-3 )。2000-2005 期间, 我国各类大气污染物与 CO<sub>2</sub> 排放量均持续增加, 与快速增加的煤炭消耗量密切相关。随着 SO<sub>2</sub> 和颗粒物排放总量约束目标相继提出, SO<sub>2</sub> 与一次 PM<sub>2.5</sub> 排放总量自 2005 年开始呈现下降趋势, 但 NO<sub>x</sub>、VOC 与 CO<sub>2</sub> 排放仍保持快速增长的态势。2013 年起, 随着《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的先后实施, 我国在能源、产业、交通、用地四大结构调整和专项治理行动方面实施了一系列重



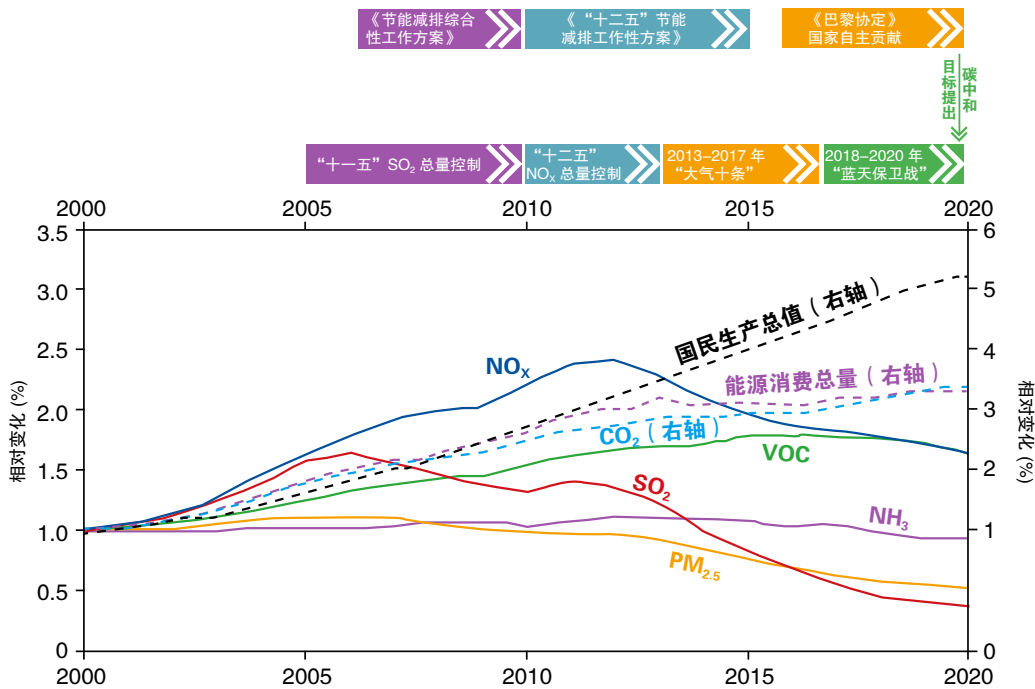


图 4-3 中国人造源二氧化碳及主要大气污染物排放趋势（各年与 2000 年排放比较）

大举措。SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和一次 PM<sub>2.5</sub> 排放量开始下降，2020 年与 2013 年相比排放量分别下降了 70%、28% 和 44%。由于 VOC 管控措施力度不足，其排放在 2017 年之前呈持续增长趋势，但随着水性溶剂的推广和重点行业整治工作的开展，2017 年之后排放开始出现拐点。由于化石能源消费量持续增加，而能源结构和产业结构转型进展相对缓慢，2013 年以来 CO<sub>2</sub> 排放仍呈缓慢增长趋势，但排放涨幅已大幅趋缓。

图 4-4 进一步从行业角度分析了 CO<sub>2</sub> 与主要大气污染物的协同减排进展。2015-

2020 年我国工业部门 CO<sub>2</sub> 排放与主要污染物排放协同下降，表明我国近年来产业结构调整方面的一系列重大举措（淘汰落后产能、化解过剩产能、工业锅炉整治、散乱污企业综合整治等）取得了良好成效。但除工业部门外，电力、供热、民用和交通部门在主要大气污染物排放下降的同时 CO<sub>2</sub> 排放量持续增加。其中，电力和供热部门的污染物减排以末端控制措施为主，无法实现 CO<sub>2</sub> 协同减排。民用部门终端能源消费量增长迅速，但民用部门 CO<sub>2</sub> 排放只增加了 3%，说明散煤清洁化替代在协同减少 CO<sub>2</sub> 排放方面已初见成效。交通部门污染物减排主要来自于老旧车淘汰、排放标准提升等

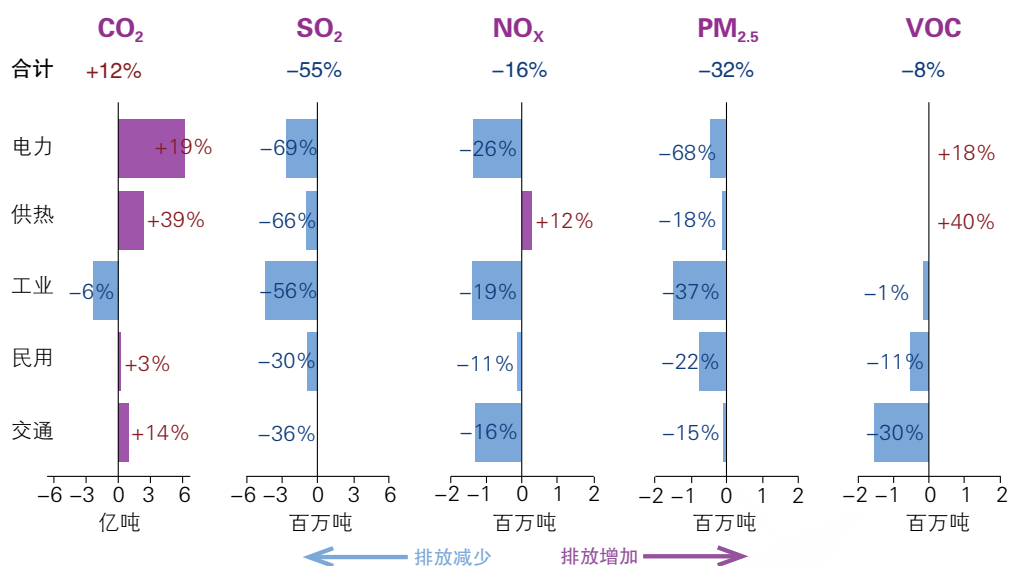


图 4-4 2015-2020 年二氧化碳与主要污染物协同减排情况

末端治理措施，由于我国城市机动车总量仍处在快速增长阶段，2015-2020 年间交通部门 CO<sub>2</sub> 排放增加了 14%。总体来看，我国能源、

产业和交通结构调整的大气污染物削减潜力还有待进一步释放，下一步应当积极推进源头减排措施，实现减污降碳协同效应。

## 4.3 土地利用变化与陆地碳汇

全球碳循环研究表明，过去十年间全球陆地生态系统吸收了人为 CO<sub>2</sub> 排放的约 30% (Friedlinstein et al., 2019)。因此，陆地生态系统碳汇功能对于抵消人为 CO<sub>2</sub> 排放和减缓气候变化具有重要的意义，维持与增强陆地生态系统碳汇也被认为是实现碳中和目标的重要手段。本指标通过总结中国陆地生态系统碳汇领域的相关成果，讨论了我国陆地生态系统碳汇可能的区间范围，分析了影响碳汇估算的因素以及土地利用变化对碳收支的影响。

根据全球碳计划所使用的 16 个碳循环模型的估计，在 2009–2018 年这十年里，中国陆地生态系统的碳汇为  $224 \pm 78 \text{ TgC yr}^{-1}$ ，占全球陆地生态系统碳汇的 3%–10%，相当于我国同期化石燃料 CO<sub>2</sub> 排放的 3–13% (Friedlingstein et al., 2019)。值得注意的是，由于碳循环模型的局限性 (Keenan & Williams, 2018)，陆地生态系统碳汇的强度和空间分布仍然具有较大的不确定性。过去十多年间，我国学者采用不同方法系统评估了中国陆地生态系统碳汇，主要方法包括两类：一类是基于碳储量变化清查的“自下而上”的方法，另一类是基于大气 CO<sub>2</sub> 浓度观测反演陆地生态系统碳收支的“自上而下”的方法。基于清查资料的研究估计我国陆地生态系统碳储量每年增加约  $177\text{--}290 \text{ TgC yr}^{-1}$  (Piao et al., 2009; Jiang et al., 2016; Fang et al., 2018)。考虑由于木材采伐和

土壤侵蚀从陆地生态系统转移的有机碳 ( $48\text{--}57 \text{ TgC yr}^{-1}$ ; Piao et al., 2009; Piao et al., 2011; Jiang et al., 2016)，“自下而上”方法估计我国陆地生态系统碳汇约为  $225\text{--}347 \text{ TgC yr}^{-1}$ 。基于大气 CO<sub>2</sub> 浓度观测和传输模型反演的中国陆地碳收支为  $180\text{--}530 \text{ TgC yr}^{-1}$  (Piao et al., 2009; Zhang et al., 2014; Jiang et al., 2016; Friedlinstein et al., 2019; Wang et al., under review)。考虑校正进口木材与粮食在中国境内氧化排放的 CO<sub>2</sub> 以及未在中国境内氧化的其他含碳气体 (CO, CH<sub>4</sub> 和 VOCs) 的排放 ( $75\text{--}84 \text{ TgC yr}^{-1}$ ; Piao et al., 2009; Jiang et al., 2016)，基于“自上而下”方法估计中国陆地生态系统碳汇约为  $96\text{--}455 \text{ TgC yr}^{-1}$ 。这一范围反映了大气反演在估计区域碳收支中仍存在很大的不确定性。这与反演系统中大气 CO<sub>2</sub> 观测数据和传输模型的选用密切相关，比如，在低分辨率的大

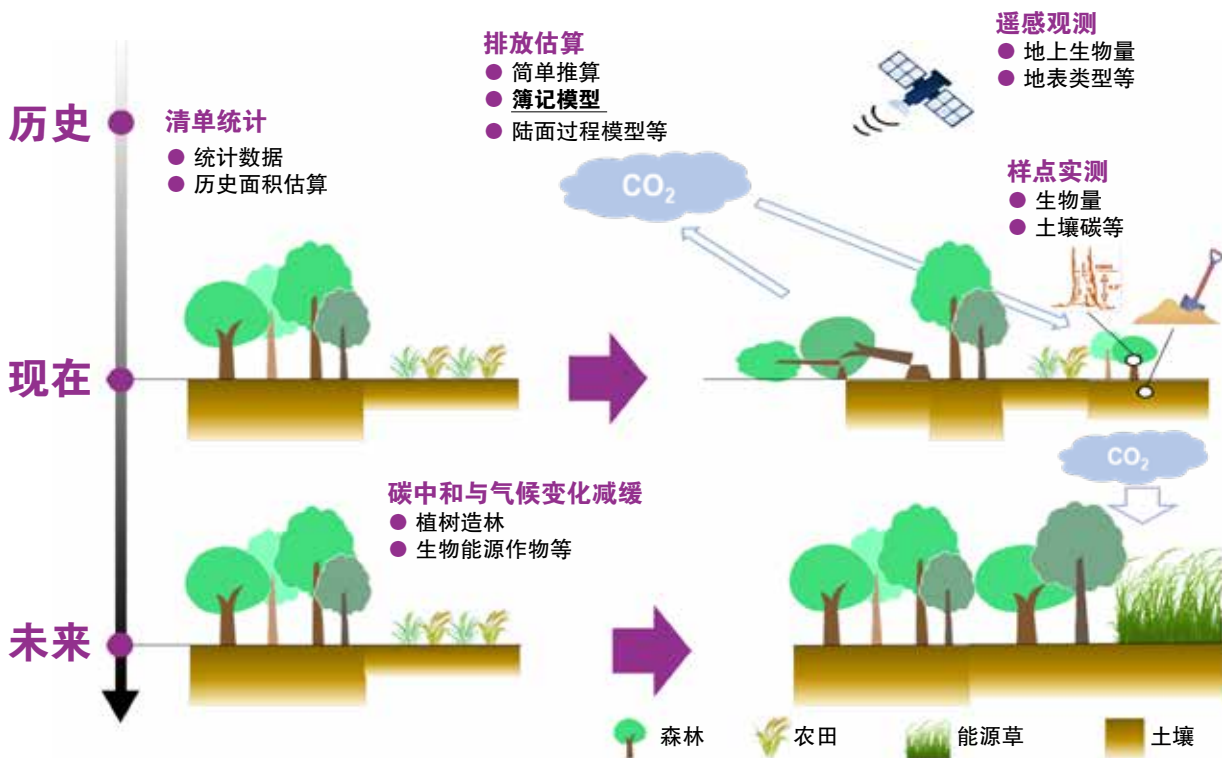


图 4-5 土地利用变化碳收支估算示意图

气反演系统中采用不具代表性的观测数据可能导致较大的系统偏差 (Wang et al., under review)。综合考虑“自下而上”和“自上而下”方法的估计，我国陆地生态系统碳吸收量相当于同期化石燃料 CO<sub>2</sub> 排放量的 4%–20%。

陆地生态系统碳汇的形成受到气候变化以及人类活动对生态系统的管理与干扰的共同影响。以往研究表明，大气 CO<sub>2</sub> 浓度上升，气候变化，大气氮沉降和土地利用变化均对我国陆地生态系统碳汇产生了显著影响 (Tian et al., 2011; Piao et al., 2011; Yu et al., 2014; Lai et al., 2016; He et al., 2019b)。城市化、毁林造田等土地利用变化导致生态系统净碳释放，而以植树造林为代表的土地利用变化导致生态系统碳净碳吸收。因此，科学评估土地利用变化碳收支，认识生态系统管理措

施的增汇潜力，对于实现碳中和目标具有重要的意义。土地利用变化碳收支的估算方法有很多种 (Pongratz et al., 2014)，但是全球尺度的长时间序列估算结果主要是利用动态全球植被模型和簿记模型模拟的结果。由于不同动态植被模型的植被类型、过程和参数化的差异，不同模型模拟的结果相差较大 (Li et al., 2017)。根据全球碳计划中所使用的两个簿记模型结果显示，在 2009–2018 年这十年里，BLUE 簿记模型 (Hansis et al., 2015) 估计的中国土地利用变化造成的碳收支为  $-159 \pm 131 \text{ TgC yr}^{-1}$ ，而 H&N 簿记模型估计为  $49 \pm 9 \text{ TgC yr}^{-1}$  (即碳汇)。两者的差异主要是使用了不同的土地利用面积变化数据。H&N 簿记模型所使用的联合国粮食及农业组织 (FAO) 的森林统计数据 (Houghton and Nassikas, 2017)，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 簿记模型所模拟的过去十年土地利用变化的碳汇主要来自于中国近几十年来的植树造林。

以土地利用变化为代表的生态系统管理与增汇措施, 例如植树造林、生物能源作物种植(图 4-5)、减免耕农业等可以提升生态系统碳汇量, 为减缓气候变化和如期实现碳中和目

标做出重要的贡献。然而, 增强陆地碳汇也面临着许多挑战, 比如, 随着我国森林生态系统林龄的增加, 森林生态系统碳汇强度可能减小; 随着全球气温的进一步上升, 气候变化对陆地碳汇的负面影响也可能逐渐显现。因此, 需要进一步完善大气 CO<sub>2</sub> 观测网络, 发展大气反演模型和基于过程的碳循环模型, 以提升陆地碳汇的估算精度, 准确评估不同的气候变化与生态系统管理措施对我国陆地碳汇的影响。





# 未来减排空间及协同路径 4.4

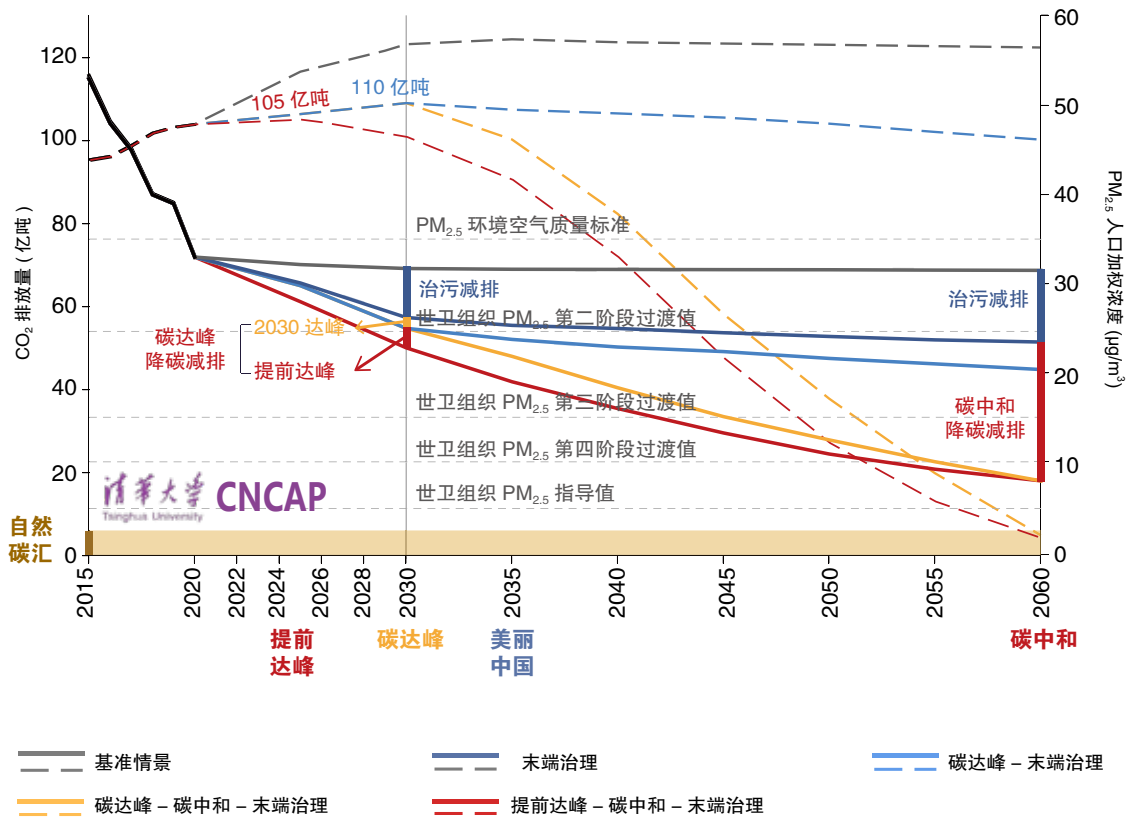
我国正面临空气质量持续改善、力争 2030 年前实现碳达峰以及 2060 年实现碳中和的巨大挑战。本指标基于碳中和与清洁空气协同科学评估与决策支持平台（CNCAP）构建的多个未来排放情景，分析了我国未来温室气体减排与空气污染治理的协同路径。

如图 4-6（Cheng et al., 2021a）所示，通过提升可再生发电占比，推动钢铁、水泥等高耗能产品产量梯次达峰，推进发电及终端用能设施的节能升级改造等一系列措施，我国 CO<sub>2</sub> 排放可于 2030 年实现达峰，排放峰值在 110 亿吨左右。而其它相关研究测算的我国 CO<sub>2</sub> 排放峰值在 97-133 亿吨之间（Meinshausen et al., 2015; Pan et al., 2017; Gallagher et al., 2019; Chai et al., 2014; Elzen et al., 2016; Grubb et al., 2015, Zhou et al., 2013; He et al., 2014; Zhang et al., 2016; Li et al., 2019b）。在此基础上，通过加速推动电力系统低碳转型，加快散煤清洁化进程，加强高耗能行业节能改造与电气化转型，推进传统汽柴油车辆电动化进程等措施，我国可提前至 2025 年左右实现 CO<sub>2</sub> 排放达峰，且峰值 CO<sub>2</sub> 排放降低至 105 亿吨左右。

2030 年后，依赖能源结构、工业结构和运

输结构调整的强化气候政策目标下碳排放迅速下降，在碳中和目标约束下，通过低碳结构调整、能效提升及零/负碳技术应用，我国可逐渐摆脱对煤炭的依赖，2060 年能源结构将以电力和可再生能源为主。煤炭在一次能源中消费占比下降至 10% 以内（Tong et al., 2020），可再生能源、生物质、核能等低碳能源比例可达到 70% 以上。2060 年 CO<sub>2</sub> 排放可降低至 6.8 亿吨，相较 2015 年减少 93%。通过与全球 1.5°C 和 2°C 温控目标路径对比发现，碳中和目标路径下的 CO<sub>2</sub> 排放介于全球 1.5°C 温控目标路径（2060 年排放负 1 亿吨左右）和 2°C 温控目标路径（20 亿吨左右）之间，更接近全球 1.5°C 温控目标路径（Cheng et al., 2021b）。

CO<sub>2</sub> 的深度减排不仅依赖能源结构，运输结构和工业结构的调整，也依赖新兴低碳、零碳或负碳技术（如碳捕集利用与封存 CCUS、生物质结合 CCUS 技术 BECCS），到本世纪



(来源: Cheng et al., 2021a)

图 4-6 2015-2060 中国碳中和与清洁空气协同路径

中叶后，其减排潜力需进一步挖掘。既有研究表明，亟需通过超前部署引导此类新兴技术有序发展，以弥补约 10~28 亿吨碳/年的减排空间，主要部署在电力、水泥和钢铁行业（黄晶，2020；余碧莹等，2021；Wei et al., 2021）。截至 2020 年，我国共开展了 35 个碳捕获与封存示范项目，每年去除排入大气的 CO<sub>2</sub> 可达 300 万吨，但尚未开展面向 BECCS 等负排放技术的示范项目（张九天等，2021；张贤等，2020；刘牧心等，2021）。未来应当进一步加大以 CCUS 和 BECCS 为代表的零碳/负碳技术示范应用力度，对于满足实现碳中和目标的科技需求，开展相关技术储备和重点行业部署规划具有重要意义。

气候目标推动二氧化碳排放降低并协同主要污染物减排是我国中长期气候与环境治理的必然选择（Tong et al., 2020）。如在推动降碳措施、加大源头治理力度的同时持续推进非电行业、柴油机和 VOC 重点行业污染治理工作，则在 2030 年实现碳达峰目标的同时，全国主要污染物相较 2015 年可减少 29%（VOC）- 51%（SO<sub>2</sub>）（Tong et al., 2020），绝大部分地区 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度可达到 35 µg/m<sup>3</sup> 的现行环境空气质量标准，全国人群 PM<sub>2.5</sub> 年均暴露水平可从 2015 年的 55 µg/m<sup>3</sup> 下降到 26-28 µg/m<sup>3</sup> 左右，通过进一步提升可再生能源发电比例，加速终端用能系统节能改造与电气化转型，我国在 2025 年实现 CO<sub>2</sub> 提前达峰的

同时，2030 年全国  $PM_{2.5}$  暴露水平可进一步降低至  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  左右，达到 WHO 第二阶段目标值，实现“减污降碳”的协同效应（图 4-6）。

2030 年之后，由于末端治理措施的减排潜力基本耗尽，碳中和目标下的深度低碳能源转型措施将成为我国空气质量持续深度改善的动力源泉。在碳中和情景下，到 2060 年我国将基本完成低碳能源转型，可再生能源发电占比将达到 70% 以上，工业部门终端煤炭消费比例低于 15%，新能源车占比达到 60% 以上，民用部门能源全面清洁化。如图 4-6 所示，碳中和路径下 2060 年全国碳排放总量约为 6.8 亿吨左右，在当前排放水平基础上减少 90% 以上；与此同时，全国主要污染物排放相较 2015 年降低 65% (VOC)–94% ( $SO_2$ ) (Tong et al., 2020)，人群  $PM_{2.5}$  年均暴露水平达到  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  左右，78% 的人群  $PM_{2.5}$  年均暴露水平低于  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，空气污染问题得到根本解决 (Cheng et al., 2021b)。

值得注意的是，气候与环境治理也可能存在不协同性，一方面，近年来我国  $SO_2$  减排效果显著，未来气候与环境治理政策下  $SO_2$  排放将进一步降低，但  $SO_2$  排放下降可能会增加区域辐射强迫和增强全球暖化趋势，带来一定的气候负效益；黑碳颗粒 (BC) 是重要的大气增温物质，减排黑碳可减缓气候增温，但同时黑碳和大气中制冷物质 (如硫酸盐、有机碳) 排放源相近，这凸显出环境–气候协同治理目标下区域科学减排的复杂性。因此，制定减排措施时，需综合考虑其空气质量健康效益和气候效应，以更好实现气候变化与环境污染的协同治理应对。另一方面，部署以 CCUS 和 BECCS 为代表的零碳 / 负碳技术将额外增加能耗，带来污染物排放。但从长远来看，以可再生能源为主的发电结构和高度电气化的未来能源供给系



统可实现污染物的近零排放，零碳 / 负碳技术的“减碳”正效益远大于“增能增污”负效应，同时要继续开展 CCUS 关键环节技术的研发和试验，降低额外能耗，做好技术储备工作。

综上所述，以加速结构调整为主要推手促进中国碳中和目标的实现不仅可对全球《巴黎协定》温控目标的实现做出重大贡献 (Tong et al., 2019)，也有助于促进我国人群  $PM_{2.5}$  年均暴露水平达到世界卫生组织空气质量指导值，实现中长期空气质量的根本性好转。我国下一步应当以“减污降碳协同增效”为总抓手，推动碳达峰与碳中和目标下的  $PM_{2.5}$  与  $O_3$  污染协同治理，深入发挥和提升结构调整在污染减排中的作用，加快能源清洁低碳转型，逐步构建零碳能源体系；针对“科学治污、精准治污和依法治污”的重大需求，强化科技引领和机制创新，构建碳中和与清洁空气协同的新一代大气复合污染防治技术体系；将保护人民群众健康作为气候变化与空气污染协同治理的出发点，在 2030 年之后加严空气质量标准并逐步与 WHO 相关标准接轨，引导空气质量根本性改善。



# 健康影响与协同效益

空气污染和气候变化的协同治理是实现碳中和目标的重要途径，而健康影响和效益是评估协同治理路径的一个重要指标。尽管我国近几年实施了一系列大气污染控制措施，现在仍面临较严重的颗粒物和臭氧污染问题，其长期和短期暴露对我国人口非意外死亡均有突出贡献。另外，随着全球气候变化，我国的高温天气和其他极端天气事件的发生频率和强度均有增加，对我国居民的生命健康构成紧迫且严重的威胁。空气污染和气候变化相互关联，一方面通过减少碳排放来减缓气候变化趋势的同时，空气污染物的排放减少，空气质量得到进一步改善；另一方面，空气污染控制措施能够减少影响气候变化的相关污染物排放，达到减缓气候变化的目的。因此，需要发展碳减排和空气污染控制的协同路径，通过分析不同协同路径下我国居民的健康效益，可以为“碳中和”目标的早日实现提供“面向人民生命健康”层面的科学依据。

# 5.1 空气污染与健康影响

PM<sub>2.5</sub> 的长期和短期暴露与总死亡、心血管系统、呼吸系统、代谢系统、神经系统、生殖系统以及癌症相关的健康结局之间均有不同程度的相关性 (U.S. EPA, 2019), O<sub>3</sub> 的长期和短期暴露与总死亡、心血管系统、呼吸系统、代谢系统、以及中枢神经系统相关的健康结局之间也有不同程度的相关性, O<sub>3</sub> 长期暴露还可能影响生殖系统健康和癌症 (U.S. EPA, 2020)。本指标基于 TAP 的污染暴露数据和最新的暴露响应方程, 分析了我国 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 污染的长期、短期暴露对居民死亡率的影响。

美国环境保护署通过评估已有的相关研究, 采用五个级别的相关程度来评定单个空气污染物与健康结局的关系, 即因果关系、可能存在因果关系、潜在的因果关系、不足以证明因果关系和不可能存在因果关系。其中, PM<sub>2.5</sub> 与总死亡的关系被认定为具有因果关系 (Causal relationship) (U.S. EPA, 2019), O<sub>3</sub> 与总死亡的关系被认定为具有潜在的因果关系 (Suggestive of, but not sufficient to infer, a causal relationship) (U.S. EPA, 2020)。

全球疾病负担研究认为 PM<sub>2.5</sub> 通过导致心血管、呼吸、代谢系统疾病和不良生育结局增加人群死亡风险; O<sub>3</sub> 暴露则通过导致慢性阻塞性肺病增加死亡。最新人群研究表明, PM<sub>2.5</sub> 暴露与生殖和神经系统疾病有关, 而 O<sub>3</sub> 暴露与心肺疾病和肺癌有关。PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 暴

露导致多种疾病的全部生理机制并不清晰, 通常认为空气污染暴露会通过导致 (1) 系统性的氧化应激反应, (2) 系统性的免疫和炎症反应, (3) 中枢神经系统节律紊乱, 和 (4) 致癌致畸风险等分子机理, 增加疾病负担。

近几十年, 以大气 PM<sub>2.5</sub> 污染的健康风险为主的环境健康问题吸引了大量的社会关注。全球疾病负担研究认为, 我国归因于室外 PM<sub>2.5</sub> 长期暴露的总死亡人数约为 100~200 万 (Burnett et al., 2018; Forouzanfar et al., 2015)。由于大气 PM<sub>2.5</sub> 污染水平高和人口总数大等因素, 我国 PM<sub>2.5</sub> 短期暴露的死亡风险亦很高。研究表明, 全国由 PM<sub>2.5</sub> 短期暴露导致的过早死亡数约为 PM<sub>2.5</sub> 长期暴露早死风险值的七分之一 (Li et al., 2019c)。学者建议在对 PM<sub>2.5</sub> 的疾病负担进行计算时, 需要考虑纳入其短期暴露所带来的健康影响。

臭氧浓度的时空差异极大，不同于PM<sub>2.5</sub>污染使用相对一致的度量方式，学术研究和政策法规均采用多个度量方式的O<sub>3</sub>浓度值来评价其污染状况。近几年，基于多种度量方式的O<sub>3</sub>浓度测量均显示室外O<sub>3</sub>污染形势严峻（Lu et al., 2020）。全国272个城市研究显示，O<sub>3</sub>日最大8小时平均浓度每增加10 μg/m<sup>3</sup>，人群非意外总死亡风险增加0.24%（Yin et al., 2017）。假设O<sub>3</sub>浓度达到我国环境空气质量标准（即日最大8小时平均浓度为100 μg/m<sup>3</sup>），估计可避免约

12万由臭氧短期暴露导致的过早死亡（Liang et al., 2019）。

《大气污染防治行动计划》和《打赢蓝天保卫战三年行动计划》实施以来，我国PM<sub>2.5</sub>污染情况显著改善，由此带来了较大的健康收益。根据TAP测算的PM<sub>2.5</sub>污染暴露水平和最新评估方法（图5-1），2020年PM<sub>2.5</sub>长期和短期暴露相关的过早死亡人数分别为139万和6.4万，较2013年分别下降20%和41%，全国人群PM<sub>2.5</sub>短期暴露水平

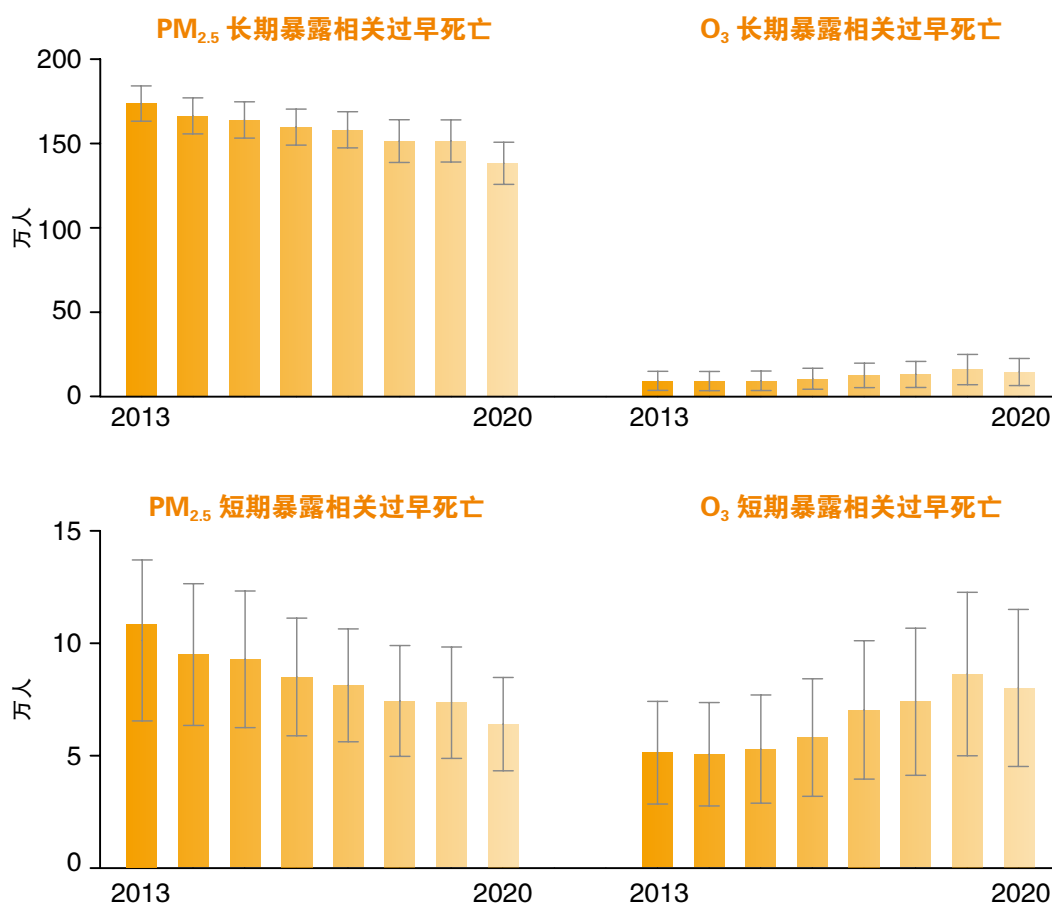


图 5-1 2013–2020 年我国归因于 PM<sub>2.5</sub> 和 O<sub>3</sub> 短期与长期暴露的过早死亡人数

暴露数据来源于 TAP 数据集 (<http://tapdata.org/>)；无风险阈值浓度、长期暴露与死亡的关系函数、人群基础死亡率来自 2019 年全球疾病负担研究；短期暴露与死亡的关系函数来自中国 272 城市研究（Yin et al., 2017; Chen et al., 2017）；人口时空分布来自 LandScan 1 × 1 公里分辨率人口 (<https://landscan.ornl.gov/>)。



及相关健康损失相较年均水平下降更为显著，体现重污染天气治理取得突出成效。与此同时， $O_3$  污染逐渐突显， $O_3$  相关的疾病负担呈现增加趋势，2020 年  $O_3$  长期和短期暴露相关的过早死亡人数分别为 14.8 万和 8.0 万，较 2013 年分别上升 49% 和 51%。

从长期暴露的健康影响来看， $PM_{2.5}$  长期暴露相关的疾病负担仍然是空气污染健康危害的主导因素。然而对于短期暴露的健康影响

而言，尽管对  $PM_{2.5}$  重污染天的治理带来了显著的健康效益，但是  $O_3$  浓度的上涨基本抵消了  $PM_{2.5}$  下降带来的健康改善，且近年来  $O_3$  短期暴露相关的疾病负担已然超过  $PM_{2.5}$ 。同时，近期一项全球 398 个城市的研究发现，二氧化氮 ( $NO_2$ ) 短期暴露浓度每增加  $10 \mu g/m^3$ ，心血管系统和呼吸系统疾病死亡分别增加 0.37% 和 0.47% ( Meng et al., 2021 )。由此，未来在关注大气  $PM_{2.5}$  和  $O_3$  对人体健康影响的同时也需要关注氮氧化物污染的健康危害。



# 气候变化与健康影响 5.2

气候变化导致极端天气事件增加、海平面上升以及生物多样性减少，正严重威胁着人类健康，已经成为制约我国社会可持续发展和“健康中国”战略实施的重要不稳定因素。本指标通过总结气候变化与健康领域的相关成果，分析了不同极端气候事件可能造成的健康影响，提出了我国需要进一步强化适应气候变化人群健康领域研究的建议。

全球气候变化导致的极端高温和低温以及热浪频率的上升均会增加人群死亡率，如针对中国的系统综述结果显示，相对于最适温度，气温每升高或降低 1°C，人群死亡风险增加 2% 或 4% (Luo et al., 2019)。近期基于全国多中心的热浪和死亡时间序列研究显示，热浪期间的死亡风险显著高于非热浪期。与非热浪时期相比，热浪期非意外死亡增加了 15.7%，心血管疾病死亡增加了 22.0%。研究还发现，每年首次出现的热浪比后期的热浪具有更大的死亡风险 (Sun et al., 2020)。寒潮的健康损害也不容忽视，一项基于中国南部和中部地区 15 个省的研究显示，2008 年寒潮期间死亡率增加了 43.8%，造成了 14.83 万例超额死亡 (Zhou et al., 2014)。

气候变化还会造成其他极端天气事件，如热带气旋（台风）、暴雨（洪灾）的发生频率增加，对受灾地区造成较大的健康风险。针对我国沿海省份如浙江、广东等的研究表明，台

风事件不仅会造成直接的人员伤亡，还会导致居民全死因死亡率，女性、婴幼儿和老年人的全死因死亡率，以及恶性肿瘤疾病死亡率的增加 (王鑫等, 2015)，并导致受灾地区的呼吸系统疾病发病率增加 (李佳蔚等, 2018)。针对北京 2012 年 7 月 21 日特大暴雨灾害的研究发现，特大暴雨期间居民非意外死亡风险显著增加，特别是循环系统疾病死亡风险增加达 37%。估算出的暴雨期间总超额死亡为 79 人，其中循环系统疾病超额死亡达 46 人，高于现行灾害监测统计的意外直接死亡人数 (Yan et al., 2020)。

在未来不同气候变化背景下，气温升高和极端天气事件将会对人群健康造成不同程度的威胁。近期的一项研究预估我国气候变化下未来热相关死亡风险，发现在 1.5°C 升温情景下，即使考虑人口适应能力的提升，中国城市每年热相关超额死亡率将从 1986–2005 年的 32.1/百万人增加到 48.8–67.1/百万人；在 2.0°C 升



图 5-2 未来气候变化对我国人类健康风险评估





温情景下，每年热相关超额死亡将比 1.5℃升温情景多 2.7 万例/年 (Wang et al., 2019b)。另一项全国范围的研究显示，在 RCP8.5 下，热相关超额死亡率预计将从 2010 年代的 1.9% 增加到 2030 年代的 2.4% 和 2090 年代的 5.5%。这种增加趋势在中国南部、东部、中部和北部更显著。此外，人口老龄化将未来热相关死亡人数放大了 2.3 到 5.8 倍，特别是在东北地区 (Yang et al., 2021)。

在气候变化和老龄化的双重影响下，重要慢性基础疾病如心脑血管系统疾病的负担也会加重。一项北京市温度相关心脑血管系统疾病死亡的预估研究表明，由于气候变暖，温度相关的缺血性中风死亡将大幅增加，急性缺血性心脏病和出血性中风死亡则保持相对稳定 (Li et al., 2018)。考虑到 65 岁以上老年人口占比的增长，在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下，北京市热相关死亡人数在 1980 年代到 2050 年代期间将出现迅速增加，其增加幅度远大于人口不变情景 (Li et al., 2016)。

此外，气象因素还可通过影响病原体和媒介生物并造成传染病的传播风险。降水会冲刷土壤表面的病原体，导致地表水污染，增加人群对腹泻病原体的暴露。在我国北方，降雨量与细菌性痢疾的发病率呈正相关关系 (Zhang et al., 2021)。较高的湿度可促进蚊虫繁衍，

增加蚊媒传染病的风险。在广州相对湿度每上升 1%，登革热暴发风险增加 1.95% (Wu et al., 2018)。大量研究还报道了气象因素与“新冠”肺炎疫情的暴发与传播密切相关，初步研究显示，高温、高湿可能与“新冠”肺炎日确诊病例数降低相关 (Liu et al., 2020a)。降水的小幅增加能减少携带病毒的飞沫蒸发，使其有效附着于物体表面，而较大的风速则不利于病毒的气溶胶传播 (Wei et al., 2020)。但当前国内有关气象因素与“新冠”肺炎研究的结论仍存在差异，研究证据的质量不高，其影响机制还需进一步探明。

目前，我国在气候变化与健康领域的相关研究结果仍然有限，对政策制定的支撑不足。基于现有研究，我国未来针对气候变化下人群健康适应政策的制定，必须紧紧围绕降低慢性基础疾病患病率、加强人口老龄化的公共卫生服务等措施展开。此外，本次新冠肺炎疫情的全球大流行，不仅让世界各国看到突发公共卫生事件对人类生产生活等各方面带来的巨大影响，同时也促使人们开始思考疫情之下所暴露出的各种不可持续问题。由于气候变化、人类活动、生态环境、野生动物与病原体之间的复杂联系，我国未来还应通过多学科和多领域的合作以应对气候变化相关的各类疾病，特别是新发传染病的重大挑战。

## 5.3 协同治理的健康效益

协同效益研究表明温室气体与空气污染物的协同治理对于人群健康改善属于“双赢”措施。本指标通过总结我国协同治理与健康效益领域的相关成果，讨论我国协同治理可能取得的健康效益，从区域和行业维度进一步剖析影响健康效益的主要因素。

近年来，我国协同治理的健康研究不断深入，为识别关键排放部门、分析重点防控政策、制修订地区与省份的差异化气候减缓路径、预测量化人群健康改善效益、评估协同治理政策的成本效益提供重要的科学建议。气候减缓政策可以促进能源结构优化和化石能源消费下降，在降低碳排放的同时显著减少大气污染物的排放和减少污染治理成本，并带来可观的健康协同效益（Tong et al., 2020）。如果不实施额外的气候政策，到2030年，中国人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度为 $69.9-70.1 \mu g/m^3$ ， $O_3$ 为54.4 ppb；到2050年，中国平均地表臭氧将增加8ppb，导致每年新增6.2万例过早死亡（Westervelt et al., 2019）。考虑到中国承诺的NDC目标实现，2030年人口加权 $PM_{2.5}$ 、臭氧日最大8小时滑动平均值浓度分别下降 $8.33 \mu g/m^3$ 和1.57ppb，将避免因臭氧导致的5.4万例过早死亡，避免因 $PM_{2.5}$ 导致的9.4-9.5万例过早死亡（Li et al., 2019c），而仅考

虑 $PM_{2.5}$ 的健康风险时，政策实施的净效益为3396（4645-1250）亿美元。严格的气候减缓政策会带来更显著的健康协同效益（Xie et al., 2020）。进一步考虑 $2^\circ C$ 情景，2030年人口加权 $PM_{2.5}$ 浓度将下降 $13.3 \mu g/m^3$ ，可避免16.0-16.2万例过早死亡，净效益可达5348（7907-2559）亿美元。与“美丽中国”目标相适应的加强NDC情



景，到 2035 年，PM<sub>2.5</sub> 浓度的进一步降低，可避免每年 15.8 万例过早死亡，O<sub>3</sub> 浓度的下降每年可避免约 1.2 万例过早死亡，避免 8900 亿元人民币的健康损失（Xing et al., 2020）。

气候减缓政策带来的健康协同效益存在明显的地域性特点。气候减缓 2℃情景下，中国中部和南部地区 PM<sub>2.5</sub> 浓度显著改善，到 2030 年将低于 60 μg/m<sup>3</sup>，西部地区的空气质量协同改善程度不大（Qu et al., 2020）。PM<sub>2.5</sub> 为首要污染物时，山西和贵州等煤炭消费大省空气质量改善较为显著，而对于沿海地区由于轻工业和服务业占比较高，能源利用效率较高，提升空间较小等因素，PM<sub>2.5</sub> 下降不显著。健康协同效益也表现出较大的空间异质性（Cui et al., 2020），2℃情景下，到 2030 年可避免的慢性过早死亡人数分别为：东部地区 8.7 万例，中部地区 5.0 万例，西部地区 2.6 万例。相比于污染控制型政策，碳交易政策可以显著改善健康效益，并节约减排成本（Cao et al., 2021）。具体而言，实施碳交易政策，碳成本约下降为 63.53 元/吨，可进一步避免 1.5 万例急性过早死亡、8.8

万例慢性过早死亡和 550 亿美元统计生命价值损失（Chang et al., 2020）。

火力发电、工业、交通、民用等部门不仅排放温室气体，而且排放大量的一次污染物，直接或间接导致人群的过早死亡和住院治疗（Zhang et al., 2020）。全国各地区的电力部门脱碳减排 1.95 亿吨 CO<sub>2</sub> 时，预计可避免 PM<sub>2.5</sub> 相关过早死亡 1120 例（Cao et al., 2019）。如果在 2030 年前大面积部署光伏发电，可以显著改善气候和空气质量，提高健康效益。假设国家在 2030 年达到 400GW 的光伏目标，分布式和集中式光伏比例相当，那么 2030 年全国碳排放将降低 4.2%，并显著减少 PM<sub>2.5</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放，避免 1 万例过早死亡（Yang et al., 2018）。京津冀地区钢铁行业按照规模和能效去产能时，2030 年 PM<sub>2.5</sub> 浓度分别下降 0.2 μg/m<sup>3</sup>、0.3 μg/m<sup>3</sup> 和 0.7 μg/m<sup>3</sup>，最多可避免过早死亡为 5.18 万例，可避免的经济损失分别为 16 亿、16 亿和 56 亿元（Li et al., 2020）。交通部门能效提升和运输模式优化措施会降低一次污染物排放，避免 18.3 万例过早死亡，可避免因 SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 和 PM<sub>10</sub>、PM<sub>2.5</sub> 导致的经济损失为 23.9 亿美元、409.4 亿美元、6622 亿美元和 5723 亿美元（Liu et al., 2018）。考虑交通部门达到 2℃情景的碳限制，全国的 PM<sub>2.5</sub> 平均浓度将降低 2.5 μg/m<sup>3</sup>，中部和东部地区减排量最多，例如河南降低 4.6 μg/m<sup>3</sup>，安徽降低 4.4 μg/m<sup>3</sup> 等，可避免的过早死亡人数为 9.0 万例，可避免的经济损失为 625 亿美元（Tian et al., 2019）。京津冀地区如果积极推动居民“煤改电”政策，可在 2020 年避免 3.7 万人过早死亡，而在 2030 年可以避免 4.4 万人过早死亡（Zhang et al., 2019c）。





# 治理体系与实践



习近平总书记提出“二氧化碳排放力争2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和”的目标之后，气候变化应对和生态环境保护的协同体系建设大幅提速。生态环境部研究制定的《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》（以下简称“指导意见”），在战略规划、法律法规、管理制度等方面，提出了碳中和与清洁空气开展协同治理的主要要求。财政、补贴、价格、税收、收费、交易和金融等各种经济手段也进一步完善，更多地在空气污染治理和应对气候变化方面取得协同效果。在国家的引导下，部分省市先行先试，尝试建立温室气体减排和污染防治工作的衔接机制，取得一定效果。

# 6. | 协同治理体系建设

2018年我国进行的国家机构改革将应对气候变化职能调整至新组建的生态环境部，为协同开展碳中和与清洁空气工作提供了体制基础。2020年，生态环境部研究制定了“指导意见”，并于2021年1月9日发布。“指导意见”明确了“十四五”期间协同治理工作的主要路径，标志着协同治理体系建设进入到新阶段。本指标旨在梳理我国协同治理体系建设的相关进展，从战略规划、法律法规、管理制度等方面总结取得的协同进展。

一是在战略规划方面，对气候变化应对和大气污染防治两方面工作进行了统筹谋划。《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”，将深入开展污染防治行动和积极应对气候变化作为“持续改善环境质量”的重要内容进行统筹部署。在2020年开展的美丽中国建设以及国家生态环境保护“十四五”规划的研究和编制中，应对气候变化和空气质量改善均作为重要组成部分，两个部分在目标、任务、措施等方面协同发力，推动产业、能源和交通运输结构调整，支撑生态环境保护发挥对宏观经济治理的影响。

除了在国家规划中强化气候变化应对和大气污染防治统筹之外，还对地方开展相关工作进行了部署和方向上的指导。在“指导意见”中，首次在政府层面提出了选择典型城市开展空气







质量达标与碳排放达峰“双达”试点示范，推动城市碳达峰碳中和以及空气质量改善相关规划的协同和融合。各级政府根据所辖行政区的社会经济发展阶段、产业结构、资源禀赋等因素，明确环境质量改善和碳达峰的时间表、路线图、施工图。石油、化工、煤炭、钢铁、电力、汽车、交通等行业宣布了各自的碳达峰和碳中和计划，也将在大气污染物减排方面发挥重要的协同作用。

二是在法律法规方面，气候变化应对领域的立法成为社会关注的热点。在2015年8月29日修订通过的《中华人民共和国大气污染防治法》中，提出了“对颗粒物、二氧化硫、氮氧化物、挥发性有机物、氨等大气污染物和温室气体实施协同控制”。2009年，全国人民代表大会常务委员会《关于积极应对气候变化的决议》中提出按照积极应对气候变化的总体要求，严格执行节约能源法、可再生能源法、循环经济促进法、清洁生产促进法、森林

法、草原法等相关法律；2014年，国家发改委组织编写了《气候变化应对法》草案，但是我国始终没有服务于温室气体排放管理的专门法律。2021年两会期间，多名人大代表和政协委员对推动气候变化相关立法提出建议，在不远的将来，有望形成大气污染防治和气候变化应对两方面相互支撑、协同推进的法律法规体系。

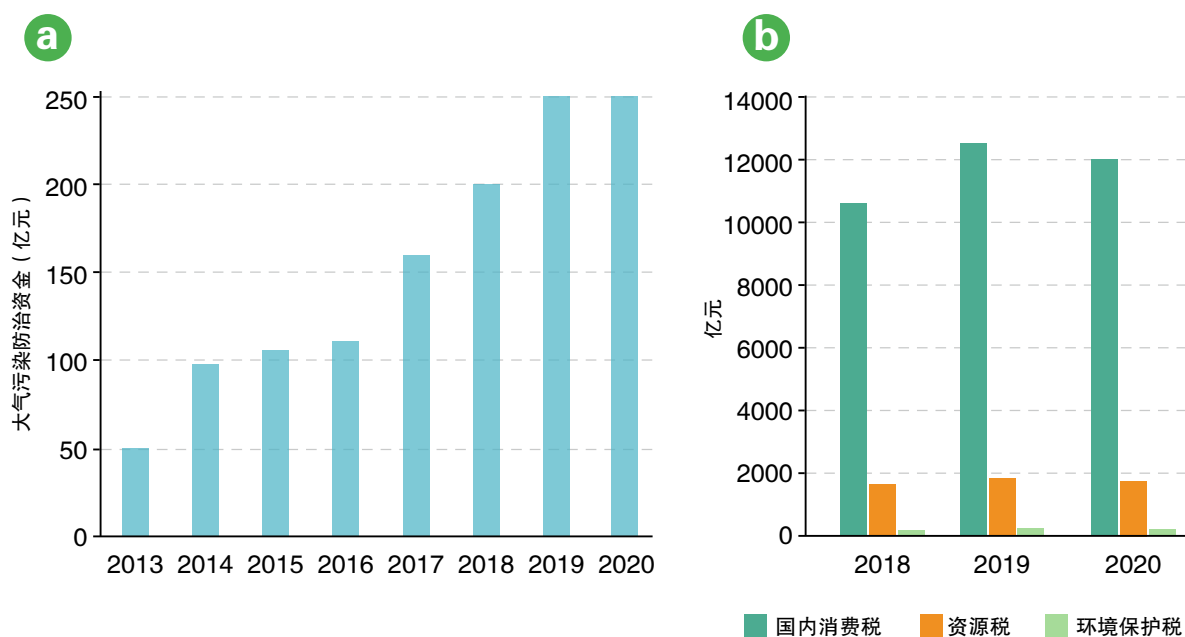
三是在管理制度方面，着力推动碳排放管理需求融入到生态环境管理制度中。一方面，结合生态环境统计报表制度的修订，将二氧化碳直接排放量纳入生态环境统计体系，实现对污染源大气污染物和温室气体排放量统计的衔接。另一方面，将二氧化碳排放纳入环境影响评价，在“三线一单”、规划环评、项目环评等领域提出对二氧化碳排放控制的要求，发挥环境制度在遏制大气污染物和二氧化碳排放增速方面的作用，推动建立减污降碳源头防控的管理制度体系。

## 6.2 协同治理经济政策

“十三五”期间，中国以打赢蓝天保卫战为主战场，推动财政、补贴、价格、税收、收费、交易和金融等各种经济手段在空气污染治理和应对气候变化领域的实施落地。从政策制定初衷看，多数经济手段主要针对减污或降碳单一目标。但从实施成效看，由于空气污染物和温室气体排放同根同源同过程，多数经济手段通过推动能源结构、产业结构、运输结构调整，一定程度上达到了减污降碳协同治理的成效。本指标通过总结近年来协同治理的经济政策，讨论我国在减污降碳协同治理方面的经济投入。

在财政、补贴政策方面，一是大气污染防治专项资金的大力投入推动了多领域减污降碳。自2013年设立大气污染防治专项资金，截至2020年底，中央累计安排1225亿元。其中，2020年共安排资金250亿元，用于支持北方地区冬季清洁取暖、工业污染深度治理、移动源污染防治等重点工作，推动产业结构、能源结构、运输结构不断优化调整，并通过支持氢氟碳化物销毁处置，直接推进削减温室气体排放。二是对可再生能源、新能源汽车、绿色建筑、生态保护方面的资金补助政策导向性强，推动污染物和温室气体协同减排的效果明显。以可再生能源发电补贴为例，2020年国家可再生能源电价补贴资金预算总额约924亿元，同比增长7%，用于支持风电、光伏发电、生物质发电项目。

在税收、价格政策方面，构造了以环境保护税为主体，以资源税为重点，以车船税、车辆购置税、消费税等税种为辅助的绿色税收体系和差别化价格政策体系。其中，环境保护税自2018年1月1日起实施，应税大气污染物包括二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳等共计44类，税额幅度为每污染当量1.2元至12元。截至2020年累计征收环境税579亿元。资源税征税形式由“按超额利润征收”演变到“从量计征”到“从价计征”，2020年共计征税1755亿元。在消费税方面，对成品油、汽车、摩托车、电池、涂料、鞭炮焰火、木制一次性筷子和实木地板等大气污染物和温室气体排放的重要产品征收了消费税。此外，车船税减免、节能企业所得税优惠、煤炭高效利用税收优惠等税收减免政策激励了能源节约和环保产业发展。在价格政策方面，对铁合金、电石、烧碱、



说明：2020年数据来源于财政部（2021），2018年、2019年数据来自国家统计局（2019，2020）。单位：亿元。

图 6-1 2013-2020 年中国大气污染防治资金情况 (a) 及 2018-2020 年中国绿色税收规模 (b)

水泥、钢铁、黄磷、锌冶炼等七个行业实行差别电价，对限制类、淘汰类的企业用电实行加价，对电解铝、水泥、钢铁行业实行基于能耗的阶梯电价，体现出推动结构调整的激励约束导向作用。

在金融政策方面，基本建立了比较完整的绿色金融体系，截至 2020 年底，中国绿色贷款余额已达 11.95 万亿元，位居世界第一。绿色基金、绿色保险、绿色信托、绿色 PPP、绿色租赁等新产品、新服务和新业态不断涌现。2020 年 7 月，中国国家绿色发展基金正式成立，首期募资规模 885 亿元，重点支持环境保护和污染防治、生态修复和国土空间绿化、能源节约利用、绿色交通、清洁能源等绿色发展领域。2020 年 10 月 26 日，

生态环境部、国家发改委、人民银行、银保监会、证监会等五部委联合发布《关于促进应对气候变化投融资的指导意见》，为气候变化领域的建设投资、资金筹措和风险管控进行了全面部署。

在碳排放权等环境权益交易方面，2020 年，北京、天津、上海、湖北、广东、深圳和重庆 7 个碳排放权交易试点碳市场年成交额共 21.5 亿元，碳交易年平均成交价格为 28.6 元/吨。国家碳排放权交易体系已从试点走向全面推开，2020 年 12 月 25 日，印发了《碳排放权交易管理办法（试行）》。用能权、排污权等资源环境权益市场也在深入探索。

## 6.3 地方实践

城市是我国大气环境管理和低碳实践的基本单元。在我国的环境管理体系中，城市的作用主要是将国家宏观管理政策自上而下进行落实，是将管理顶层设计与实践相结合的主体。在大气环境管理方面，《中华人民共和国大气污染防治法》明确了城市政府的大气污染治理职能，要求空气质量不达标的城市编制实施空气质量达标规划。在低碳实践方面，我国也在城市层面开展了一系列工作，分别于2010、2012和2017年开展了第三批低碳城市试点工作，涵盖了6个省份、81个城市。因此，城市是我国协同推进大气污染治理和气候变化应对，力争2030年前实现“碳达峰”和到2035年基本建成“美丽中国”的主战场。本指标通过总结我国城市污染改善和低碳试点工作进展，分析已明确碳达峰年份目标城市的碳排放代表性及其空气质量改善挑战。

在国家的引导下，部分省市先行先试，尝试建立温室气体减排和污染防治工作的衔接机制，取得一定效果。如重庆市将应对气候变化要求写入《构建现代环境治理体系实施方案》，在全国率先将碳排放管理纳入环境影响评价和排污许可，出台《推动排污许可与碳排放协同管理》等文件，在管制目标、管理对象、监管手段、政策措施、资源市场、体制机制六个方面推进减污降碳“六个协同”。黑龙江省将降碳与实行最严格的“三线一单”生态环境分区管控相结合，严控高耗能、高排放项目建设，通过规划环评、项目环评推动区域、行业和企业落实煤炭消费削减替代、温室气体排放控制。

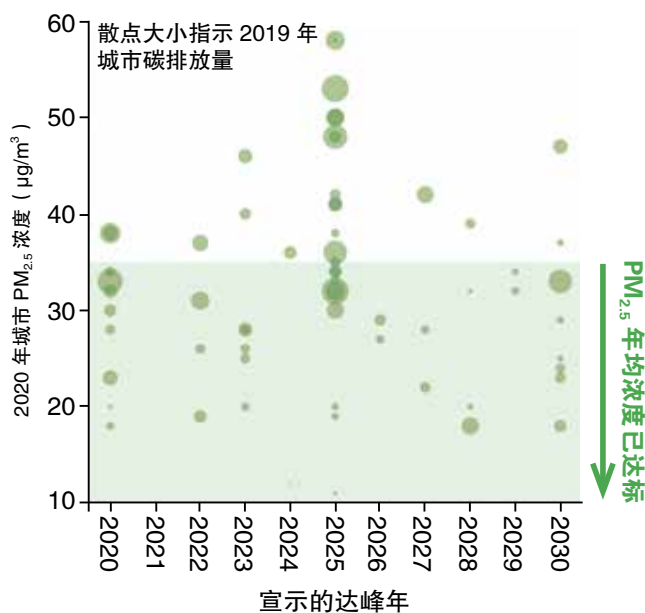


图 6-2 70 个中国城市碳排放达峰年目标和 2020 年  $PM_{2.5}$  浓度对比

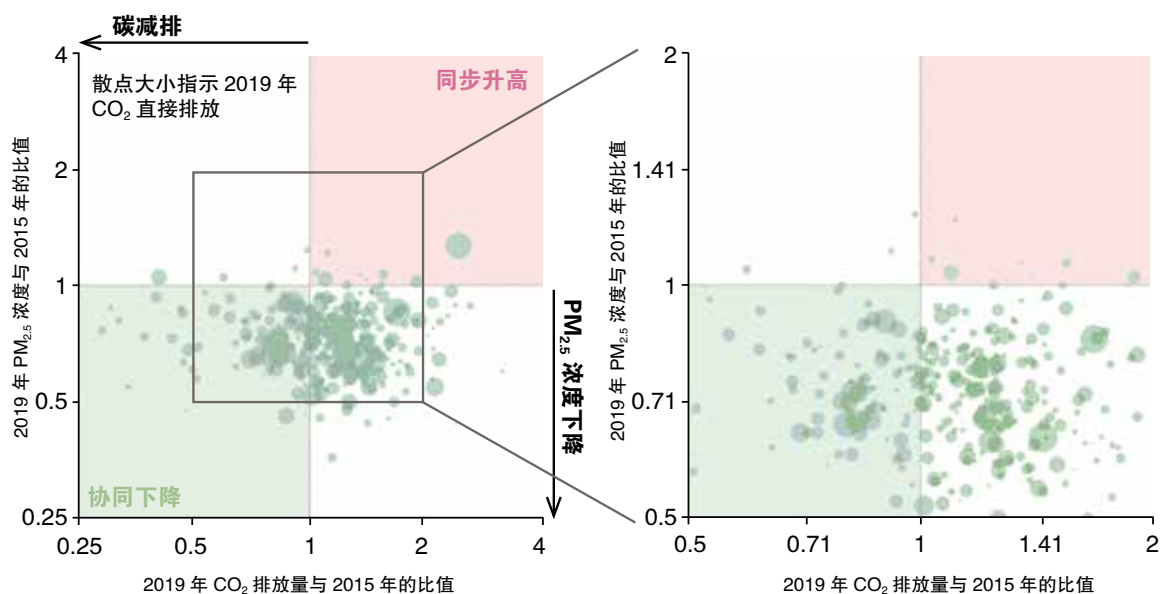


图 6-3 2015–2019 年城市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度和 CO<sub>2</sub> 排放量变化情况比较

2013 年以来，随着《大气污染防治行动计划》和《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，全国绝大多数城市大气环境质量显著提升（Zhang, 2019; Ding, 2019; Huang, 2018）。据统计，全国已有 70 个地级及以上城市明确提出了碳排放达峰年份目标。根据《中国城市二氧化碳排放和大气污染数据集（2020）》（Cai, 2018, 2019a, 2019b; 中国城市温室气体工作组, 2020），2019 年这 70 个城市 CO<sub>2</sub> 直接排放占全国碳排放总量的 30.1%。其中 51 个城市宣示的 CO<sub>2</sub> 排放达峰年在 2025 年及之前，2019 年合计碳排放量占全国碳排放总量的 24.4%；19 个城市宣示的碳达峰年份在 2026–2030 年之间，2019 年合计碳排放量占全国碳排放总量的 5.7%。2020 年，这 70 个已明确达

峰目标城市的 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度范围为 11–58 μg/m<sup>3</sup>，均值为 32 μg/m<sup>3</sup>，其中 47 个城市 PM<sub>2.5</sub> 浓度已达到年均浓度不高于 35 μg/m<sup>3</sup> 的国家环境空气质量标准。

基于中国环境监测总站发布的 PM<sub>2.5</sub> 浓度监测数据和《中国城市二氧化碳排放和大气污染数据集（2020）》（中国城市温室气体工作组, 2020），分析了我国 335 个地级及以上城市 2015–2019 年的 PM<sub>2.5</sub> 浓度和 CO<sub>2</sub> 排放量变化趋势，进而评估了城市大气污染和碳排放协同管理效果。分析结果显示，2015–2019 年间，有 318 个城市的 PM<sub>2.5</sub> 浓度呈下降趋势，占城市总数的 94.9%，其中有 98 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 29.3%。共有 11 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 3.3%。

随着国家碳达峰碳中和工作顶层设计的逐步完善，以及污染防治攻坚战持续深入，在自上而下压力和城市自身在新发展阶段下追求

高质量发展内生动力共同作用下，可以预期在“十四五”期间，我国将有更多的城市根据自身特点，开展各具特色的大气环境质量和低碳实践，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。



# 参考文献

- Burnett, R., Chen, H., Szyszkwicz, M., Fann, N., Hubbell, B., Pope, C. A., Apte, J. S., Brauer, M., Cohen, A., Weichenthal, S., Coggins, J., Di, Q., Brunekreef, B., Frostad, J., Lim, S. S., Kan, H., Walker, K. D., Thurston, G. D., Hayes, R. B., ... Krewski, D. (2018). Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences – PNAS*, 115(38), 9592–9597. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115>
- Cai, B., Cui, C., Zhang, D., Cao, L., Wu, P., Pang, L., Zhang, J., & Dai, C. (2019a). China city-level greenhouse gas emissions inventory in 2015 and uncertainty analysis. *Applied Energy*, 253(June), 113579. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113579>
- Cai, B., Guo, H., Ma, Z., Wang, Z., Dhakal, S., & Cao, L. (2019b). Benchmarking carbon emissions efficiency in Chinese cities: A comparative study based on high-resolution gridded data. *Applied Energy*, 242(February), 994–1009. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.146>
- Cai, B., Liang, S., Zhou, J., Wang, J., Cao, L., Qu, S., Xu, M., & Yang, Z. (2018). China high resolution emission database (CHRED) with point emission sources, gridded emission data, and supplementary socioeconomic data. *Resources, Conservation and Recycling*, 129(October 2017), 232–239. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.036>
- 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, B., & Yin, Z. (2020). Future atmospheric circulations benefit ozone pollution control in Beijing–Tianjin–Hebei with global warming. *Science of the Total Environment*, 743(219), 140645. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140645>
- Cao, C., Cui, X., Cai, W., Wang, C., Xing, L., Zhang, N., Shen, S., Bai, Y., & Deng, Z. (2019). Incorporating health co-benefits into regional carbon emission reduction policy making: A case study of China's power sector. *Applied Energy*, 253(June), 113498. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113498>
- Cao, L., Tang, Y., Cai, B., Wu, P., Zhang, Y., Zhang, F., Xin, B., Lv, C., Chen, K., & Fang, K. (2021). Was it better or worse? Simulating the environmental and health impacts of emissions trading scheme in Hubei province, China. *Energy*, 217, 119427. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119427>
- CEADs. (2021). China Emission Accounts & Datasets. Retrieved from <https://www.ceads.net>
- Chai, Q. M., & Xu, H. Q. (2014). Modeling an emissions peak in China around 2030: Synergies or trade-offs between economy, energy and climate security. *Advances in Climate Change Research*, 5(4), 169–180. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2015.06.001>
- Chang, S., Yang, X., Zheng, H., Wang, S., & Zhang, X. (2020). Air quality and health co-benefits of China's national emission trading system. *Applied Energy*, 261(February 2019), 114226. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114226>
- Chen, H., Wang, H., Sun, J., Xu, Y., & Yin, Z. (2019). 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, R., Yin, P., Meng, X., Liu, C., Wang, L., Xu, X., Ross, J. A., Tse, L. A., Zhao, Z., Kan, H., & Zhou, M. (2017). Fine particulate air pollution and daily mortality: A nationwide analysis in 272 Chinese cities. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 196(1), 73–81. <https://doi.org/10.1164/rccm.201609-1862OC>
- Cheng, J., Tong, D., Liu, Y., Yan, L., Geng, G., & Zhang, Q. (2021a), Health benefits of China's clean air and carbon neutrality synergistic pathway, in prep.
- Cheng, J., Tong, D., Zhang, Q., Liu, Y., Lei, Y., Yan, G., Yan, L., Yu, S., Cui, R. Y., Clarke, L., Geng, G., Zheng, B., Zhang, X., Davis, S. J., & He, K. (2021b). Pathways of China's PM<sub>2.5</sub> air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality. *National Science Review*. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab078>
- Cui, X., Cai, W., Shi, X., Li, T., Wang, Q., & Gong, P. (2020). The nature and scale of the response to climate change will determine the human health for centuries to come in China. *Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin*, 65(1), 12–17. <https://doi.org/10.1360/N972019-00185>
- den Elzen, M., Fekete, H., Höhne, N., Admiraal, A., Forsell, N., Hof, A. F., Olivier, J. G. J., Roelfsema, M., & van Soest, H. (2016). Greenhouse gas emissions from current and enhanced policies of China until 2030: Can emissions peak before 2030? *Energy Policy*, 89(June 2015), 224–236. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.11.030>
- Ding, D., Xing, J., Wang, S., Liu, K., & Hao, J. (2019). Estimated Contributions of Emissions Controls, Meteorological Factors, Population Growth, and Changes in Baseline Mortality to Reductions in Ambient PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>2.5</sub>-Related Mortality in China, 2013–2017. *Environmental Health Perspectives*, 127(6), 067009. <https://doi.org/10.1289/EHP4157>
- Fang, J., Yu, G., Liu, L., Hu, S., & Stuart Chapin, F. (2018). Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(16), 4015–4020. <https://doi.org/10.1073/pnas.1700304115>
- Forouzanfar, M. H., Afshin, A., Alexander, L. T., Ross Anderson, H., Bhutta, Z., Biryukov, S., Brauer, M., Burnett, R., Cercy, K., Charlson, F. J., & Geleijnse, J. . (2016). Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *The Lancet (British Edition)*, 388(10053), 1659–1724. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(16\)31679-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(16)31679-8)
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O' Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., Peters, W., Pongratz, J., Sitch, S., Le Quéré, C., DBakker, O. C. E., Canadell, J. G., Ciais, P., Jackson, R. B., Anthoni, P., Barbero, L., Bastos, A., Bastrikov, V., Becker, M., ... Zaehle, S. (2019). *Global carbon budget 2019*. *Earth System Science Data*, 11(4), 1783–1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>
- Gallagher, K. S., Zhang, F., Orvis, R., Rissman, J., & Liu, Q. (2019). Assessing the Policy gaps for achieving China's climate targets in the Paris Agreement. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09159-0>
- Geng, G., Xiao, Q., Liu, S., Liu, X., Cheng, J., Zheng, Y., Xue, T., Tong, D., Zheng, B., Peng, Y., Huang, X., He, K., & Zhang, Q. (2021). Tracking Air Pollution in China: Near Real-Time PM<sub>2.5</sub> Retrievals from Multisource Data Fusion. *Environmental Science & Technology*, 55(17), 12106–12115. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01863>
- Grubb, M., Sha, F., Spencer, T., Hughes, N., Zhang, Z., & Agnolucci, P. (2015). A review of Chinese CO<sub>2</sub> emission projections to 2030: the role of economic structure and policy. *Climate Policy*, 15(sup1), S7–S39. <https://doi.org/10.1080/14693062.2015.1101307>
- Han, Z., Zhou, B., Xu, Y., Wu, J., & Shi, Y. (2017). Projected changes in haze pollution potential in China: An ensemble of regional climate model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(16), 10109–10123. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10109-2017>



- 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>
- He, C., Liu, R., Wang, X., Liu, S. C., Zhou, T., & Liao, W. (2019a). How does El Niño–Southern Oscillation modulate the interannual variability of winter haze days over eastern China? *Science of the Total Environment*, 651, 1892–1902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.100>
- He, H., Wang, S., Zhang, L., Wang, J., Ren, X., Zhou, L., ... Yu, G. (2019b). Altered trends in carbon uptake in China's terrestrial ecosystems under the enhanced summer monsoon and warming hiatus. *National Science Review*, 6(3), 505–514. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwz021>
- He, J., Gong, S., Yu, Y., Yu, L., Wu, L., Mao, H., ... Li, R. (2017). Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities. *Environmental Pollution*, 223, 484–496. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.01.050>
- He, J. (2014). Analysis of CO<sub>2</sub> emissions peak: China's objective and strategy. *Chinese Journal of Population Resources and Environment*, 12(3), 189–198. <https://doi.org/10.1080/10042857.2014.932266>
- Hong, C., Zhang, Q., Zhang, Y., Davis, S. J., Tong, D., Zheng, Y., Liu, Z., Guan, D., He, K., & Schellnhuber, H. J. (2019). Impacts of climate change on future air quality and human health in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(35), 17193–17200. <https://doi.org/10.1073/pnas.1812881116>
- Hong, C., Zhang, Q., Zhang, Y., Davis, S. J., Zhang, X., Tong, D., Guan, D., Liu, Z., & He, K. (2020). Weakening aerosol direct radiative effects mitigate climate penalty on Chinese air quality. *Nature Climate Change*, 10(9), 845–850. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0840-y>
- 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>
- Huang, J., Pan, X., Guo, X., & Li, G. (2018). Health impact of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan: an analysis of national air quality monitoring and mortality data. *The Lancet Planetary Health*, 2(7), e313–e323. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30141-4](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30141-4)
- ICAO. (2019). IBCAO2019 Environmental Report. Retrieved from <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/envrep2019.aspx>
- IEA. (2020). Energy Technology Perspectives 2020. *Energy Technology Perspectives 2020*. OECD. <https://doi.org/10.1787/ab43a9a5-en>
- Jiang, F., Chen, J. M., Zhou, L., Ju, W., Zhang, H., Machida, T., Ciais, P., Peters, W., Wang, H., Chen, B., Liu, L., Zhang, C., Matsueda, H., & Sawa, Y. (2016). A comprehensive estimate of recent carbon sinks in China using both top–down and bottom–up approaches. *Scientific Reports*, 6(August 2015), 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep22130>
- Keenan, T. F., & Williams, C. A. (2018). The terrestrial carbon sink. *Annual Review of Environment and Resources*, 43, 219–243. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102017-030204>
- Kim, M. J., Park, R. J., Ho, C. H., Woo, J. H., Choi, K. C., Song, C. K., & Lee, J. B. (2015). Future ozone and oxidants change under the RCP scenarios. *Atmospheric Environment*, 101, 103–115. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.11.016>
- Lai, L., Huang, X., Yang, H., Chuai, X., Zhang, M., Zhong, T., Chen, Z., Chen, Y., Wang, X., & Thompson, J. R. (2016). Carbon emissions from land–use change and management in China between 1990 and 2010. *Science Advances*, 2(11). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1601063>

- Lee, J.-B., Cha, J.-S., Hong, S.-C., Choi, J.-Y., Myoung, J.-S., Park, R. J., Woo, J.-H., Ho, C., Han, J.-S., & Song, C.-K. (2015). Projections of summertime ozone concentration over East Asia under multiple IPCC SRES emission scenarios. *Atmospheric Environment*, 106, 335–346. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.019>
- Li, B. S., Chen, Y., Zhang, S., Wu, Z., Cofala, J., & Dai, H. (2020). Climate and health benefits of phasing out iron & steel production capacity in China: findings from the IMED model. *Climate Change Economics*, 11(03), 2041008. <https://doi.org/10.1142/S2010007820410080>
- Li, J., Wei, R., Zhang, A., Hu, W., Lin, J., & Ma, W. (2018). A case–crossover study on the tropical cyclones and daily outpatient numbers of respiratory diseases. *Journal of Shandong University (Health Sciences)*, 56(8), 43–49. Retrieved from <http://yxbwk.njournal.sdu.edu.cn/EN/10.6040/j.issn.1671-7554.0.2018.055>
- Li, M., Zhang, D., Li, C. T., Selin, N. E., & Karplus, V. J. (2019a). Co–benefits of China’s climate policy for air quality and human health in China and transboundary regions in 2030. *Environmental Research Letters*, 14(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab26ca>
- Li, N., Chen, W., Rafaj, P., Kieseewetter, G., Schöpp, W., Wang, H., Zhang, H., Krey, V., & Riahi, K. (2019b). Air Quality Improvement Co–benefits of Low–Carbon Pathways toward Well Below the 2°C Climate Target in China. *Environmental Science & Technology*, 53(10), 5576–5584. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06948>
- Li, T., Guo, Y., Liu, Y., Wang, J., Wang, Q., Sun, Z., He, M. Z., & Shi, X. (2019c). Estimating mortality burden attributable to short–term PM<sub>2.5</sub> exposure: A national observational study in China. *Environment International*, 125(February), 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.073>
- Li, T., Horton, R. M., Bader, D. A., Zhou, M., Liang, X., Ban, J., Sun, Q., & Kinney, P. L. (2016). Aging Will Amplify the Heat–related Mortality Risk under a Changing Climate: Projection for the Elderly in Beijing, China. *Scientific Reports*, 6(1), 28161. <https://doi.org/10.1038/srep28161>
- Li, W., Ciais, P., Peng, S., Yue, C., Wang, Y., Thurner, M., Saatchi, S. S., Arneeth, A., Avitabile, V., Carvalhais, N., Harper, A. B., Kato, E., Koven, C., Liu, Y. Y., Nabel, J. E. M. S., Pan, Y., Pongratz, J., Poulter, B., Pugh, T. A. M., ... Zaehle, S. (2017). Land–use and land–cover change carbon emissions between 1901 and 2012 constrained by biomass observations. *Biogeosciences*, 14(22), 5053–5067. <https://doi.org/10.5194/bg-14-5053-2017>
- Li, X., Wei, N., Jiao, Z., Liu, S., & Dahowski, R. (2019d). Cost curve of large–scale deployment of CO<sub>2</sub>–enhanced water recovery technology in modern coal chemical industries in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 81, 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.12.012>
- Liang, S., Li, X., Teng, Y., Fu, H., Chen, L., Mao, J., Zhang, H., Gao, S., Sun, Y., Ma, Z., & Azzi, M. (2019). Estimation of health and economic benefits based on ozone exposure level with high spatial–temporal resolution by fusing satellite and station observations. *Environmental Pollution*, 255, 113267. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113267>
- Liu, F., Klimont, Z., Zhang, Q., Cofala, J., Zhao, L., Huo, H., Nguyen, B., Schöpp, W., Sander, R., Zheng, B., Hong, C., He, K., Amann, M., & Heyes, C. (2013). Integrating mitigation of air pollutants and greenhouse gases in Chinese cities: Development of GAINS–City model for Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 58, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.03.024>
- Liu, J., Zhou, J., Yao, J., Zhang, X., Li, L., Xu, X., He, X., Wang, B., Fu, S., Niu, T., Yan, J., Shi, Y., Ren, X., Niu, J., Zhu, W., Li, S., Luo, B., & Zhang, K. (2020a). Impact of meteorological factors on the COVID–19 transmission: A multi–city study in China. *Science of The Total Environment*, 726, 138513. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138513>

- Liu, L., Wang, K., Wang, S., Zhang, R., & Tang, X. (2018). Assessing energy consumption, CO<sub>2</sub> and pollutant emissions and health benefits from China's transport sector through 2050. *Energy Policy*, 116(100), 382–396. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.02.019>
- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., Zheng, B., Cui, D., Dou, X., Zhu, B., Guo, R., Ke, P., Sun, T., Lu, C., He, P., Wang, Y., Yue, X., Wang, Y., Lei, Y., ... Schellnhuber, H. J. (2020b). 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>
- Lu, X., Zhang, L., Wang, X., Gao, M., Li, K., Zhang, Y., Yue, X., & Zhang, Y. (2020). Rapid Increases in Warm-Season Surface Ozone and Resulting Health Impact in China Since 2013. *Environmental Science & Technology Letters*, 7(4), 240–247. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00171>
- Luo, Q., Li, S., Guo, Y., Han, X., & Jaakkola, J. J. K. (2019). A systematic review and meta-analysis of the association between daily mean temperature and mortality in China. *Environmental Research*, 173(March), 281–299. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.03.044>
- Meinshausen, M., Jeffery, L., Guetschow, J., Robiou Du Pont, Y., Rogelj, J., Schaeffer, M., ... Meinshausen, N. (2015). National post-2020 greenhouse gas targets and diversity-aware leadership. *Nature Climate Change*, 5(12), 1098–1106. <https://doi.org/10.1038/nclimate2826>
- Meng, X., Liu, C., Chen, R., Sera, F., Vicedo-Cabrera, A. M., Milojevic, A., Guo, Y., Tong, S., Coelho, M. de S. Z. S., Saldiva, P. H. N., Lavigne, E., Correa, P. M., Ortega, N. V., Osorio, S., Garcia, Kyselý, J., Urban, A., Orru, H., Maasikmets, M., ... Kan, H. (2021). Short term associations of ambient nitrogen dioxide with daily total, cardiovascular, and respiratory mortality: multilocation analysis in 398 cities. *BMJ*, 372(March), n534. <https://doi.org/10.1136/bmj.n534>
- Carbon Monitor. Retrieved from <https://carbonmonitor.org>
- Pan, X., Elzen, M. den, Höhne, N., Teng, F., & Wang, L. (2017). Exploring fair and ambitious mitigation contributions under the Paris Agreement goals. *Environmental Science and Policy*, 74(May), 49–56. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.04.020>
- Piao, S., Ciais, P., Lomas, M., Beer, C., Liu, H., Fang, J., Friedlingstein, P., Huang, Y., Muraoka, H., Son, Y., & Woodward, I. (2011). Contribution of climate change and rising CO<sub>2</sub> to terrestrial carbon balance in East Asia: A multi-model analysis. *Global and Planetary Change*, 75(3–4), 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.10.014>
- Piao, S., Fang, J., Ciais, P., Peylin, P., Huang, Y., Sitch, S., & Wang, T. (2009). The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 458(7241), 1009–1013. <https://doi.org/10.1038/nature07944>
- Pongratz, J., Reick, C. H., Houghton, R. A., & House, J. I. (2014). Terminology as a key uncertainty in net land use and land cover change carbon flux estimates. *Earth System Dynamics*, 5(1), 177–195. <https://doi.org/10.5194/esd-5-177-2014>
- Qu, C., Yang, X., Zhang, D., & Zhang, X. (2020). Estimating health co-benefits of climate policies in China: an application of the regional emissions-air quality-climate-health (REACH) framework. *Climate Change Economics*, 11(3), 2041004. <https://doi.org/10.1142/S2010007820410043>
- 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(1), 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), 54. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0393-y>
- Sun, Z., Chen, C., Yan, M., Shi, W., Wang, J., Ban, J., Sun, Q., He, M. Z., & Li, T. (2020). Heat wave characteristics, mortality and effect modification by temperature zones: a time–series study in 130 counties of China. *International Journal of Epidemiology*, 49(6), 1813–1822. <https://doi.org/10.1093/ije/dyaa104>
- The Administrative Center for China's Agenda 21 Ministry of Science and Technology. (2019). *Roadmap for Carbon Capture, Utilization and Storage Technology in China*.
- Tian, H., Melillo, J., Lu, C., Kicklighter, D., Liu, M., Ren, W., Xu, X., Chen, G., Zhang, C., Pan, S., Liu, J., & Running, S. (2011). China's terrestrial carbon balance: Contributions from multiple global change factors. *Global Biogeochemical Cycles*, 25(1), n/a–n/a. <https://doi.org/10.1029/2010GB003838>
- Tian, X., Dai, H., Geng, Y., Zhang, S., Xie, Y., Liu, X., Lu, P., & Bleischwitz, R. (2019). Toward the 2–degree target: Evaluating co–benefits of road transportation in China. *Journal of Transport and Health*, 15(October), 100674. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100674>
- Tong, D., Cheng, J., Liu, Y., Yu, S., Yan, L., Hong, C., Qin, Y., Zhao, H., Zheng, Y., Geng, G., Li, M., Liu, F., Zhang, Y., Zheng, B., Clarke, L., & Zhang, Q. (2020). Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: methodology and 2015–2050 emission pathways under a range of socio–economic, climate policy, and pollution control scenarios. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(9), 5729–5757. <https://doi.org/10.5194/acp-20-5729-2020>
- Tong, D., Zhang, Q., Zheng, Y., Caldeira, K., Shearer, C., Hong, C., Qin, Y., & Davis, S. J. (2019). Committed emissions from existing energy infrastructure jeopardize 1.5 °C climate target. *Nature*, 572(7769), 373–377. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1364-3>
- U.S. EPA. (2020). Integrated Science Assessment for Ozone and Related Photochemical Oxidants. EPA/600/R-20/012. Research Triangle Park, NC:U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. EPA. (2019). Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, 2019). U.S. Environmental Protection Agency. Retrieved from <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=347534>
- Wang. The inversed large land carbon sink over China is not robust. (2021) under review
- Wang, H., Chen, H., & Liu, J (2015). Arctic Sea Ice Decline Intensified Haze Pollution in Eastern China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 8(1), 1–9. <https://doi.org/10.3878/AOSL20140081>
- Wang, J., Gong, S., Zhang, X., Yang, Y., Hou, Q., Zhou, C., & Wang, Y. (2012). A parameterized method for air–quality diagnosis and its applications. *Advances in Meteorology*, 2012(2). <https://doi.org/10.1155/2012/238589>
- Wang, J., Wang, Y., Liu, H., Yang, Y., Zhang, X., Li, Y., Zhang, Y., & Deng, G. (2013a). Diagnostic identification of the impact of meteorological conditions on PM<sub>2.5</sub> concentrations in Beijing. *Atmospheric Environment*, 81, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.033>
- Wang, P., Chen, Y., Hu, J., Zhang, H., & Ying, Q. (2019a). Source apportionment of summertime ozone in China using a source–oriented chemical transport model. *Atmospheric Environment*, 211(March), 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.05.006>
- Wang, Y., Wang, A., Zhai, J., Tao, H., Jiang, T., Su, B., ... Fischer, T. (2019b). Tens of thousands additional deaths annually in cities of China between 1.5°C and 2.0°C warming. *Nature Communications*, 10(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11283-w>

- Wang, Y., Shen, L., Wu, S., Mickley, L., He, J., & Hao, J. (2013b). Sensitivity of surface ozone over China to 2000–2050 global changes of climate and emissions. *Atmospheric Environment*, 75(x), 374–382. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.04.045>
- Wei, J.–T., Liu, Y.–X., Zhu, Y.–C., Qian, J., Ye, R.–Z., Li, C.–Y., Ji, X.–K., Li, H.–K., Qi, C., Wang, Y., Yang, F., Zhou, Y.–H., Yan, R., Cui, X.–M., Liu, Y.–L., Jia, N., Li, S.–X., Li, X.–J., Xue, F.–Z., ... Cao, W.–C. (2020). Impacts of transportation and meteorological factors on the transmission of COVID–19. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 230(June), 113610. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2020.113610>
- Wei, Y.–M., Kang, J.–N., Liu, L.–C., Li, Q., Wang, P.–T., Hou, J.–J., ... Yu, B. (2021). A proposed global layout of carbon capture and storage in line with a 2°C climate target. *Nature Climate Change*, 11(2), 112–118. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00960-0>
- Westervelt, D. M., Ma, C. T., He, M. Z., Fiore, A. M., Kinney, P. L., Kioumourtzoglou, M.–A., Wang, S., Xing, J., Ding, D., & Correa, G. (2019). Mid–21st century ozone air quality and health burden in China under emissions scenarios and climate change. *Environmental Research Letters*, 14(7), 074030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab260b>
- Wu, X., Lang, L., Ma, W., Song, T., Kang, M., He, J., ... Ling, L. (2018). Non–linear effects of mean temperature and relative humidity on dengue incidence in Guangzhou, China. *Science of the Total Environment*, 628–629, 766–771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.136>
- Xiao, Q., Geng, G., Cheng, J., Liang, F., Li, R., Meng, X., ... He, K. (2021). Evaluation of gap–filling approaches in satellite–based daily PM<sub>2.5</sub> prediction models. *Atmospheric Environment*, 244(June 2020), 117921. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117921>
- Xie, Y., Wu, Y., Xie, M., Li, B., Zhang, H., Ma, T., & Zhang, Y. (2020). Health and economic benefit of China’s greenhouse gas mitigation by 2050. *Environmental Research Letters*, 15(10). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba97b>
- Xing, J., Lu, X., Wang, S., Wang, T., Ding, D., Yu, S., ... Hao, J. (2020). The quest for improved air quality may push China to continue its CO<sub>2</sub> reduction beyond the Paris Commitment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(47), 29535–29542. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013297117>
- 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, J., Zhou, M., Ren, Z., Li, M., Wang, B., Liu, D. L., ... Liu, Q. (2021). Projecting heat–related excess mortality under climate change scenarios in China. *Nature Communications*, 12(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21305-1>
- Yang, X., & Teng, F. (2018). Air quality benefit of China’s mitigation target to peak its emission by 2030. *Climate Policy*, 18(1), 99–110. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1244762>
- Yin, P., Chen, R., Wang, L., Meng, X., Liu, C., Niu, Y., ... Kan, H. (2017). Ambient Ozone Pollution and Daily Mortality: A Nationwide Study in 272 Chinese Cities. *Environmental Health Perspectives*, 125(11), 117006. <https://doi.org/10.1289/EHP1849>
- Yin, Z., & Wang, H. (2016). The relationship between the subtropical Western Pacific SST and haze over North–Central North China Plain. *International Journal of Climatology*, 36(10), 3479–3491. <https://doi.org/10.1002/joc.4570>

- Yu, G., Chen, Z., Piao, S., Peng, C., Ciais, P., Wang, Q., ... Zhu, X. (2014). High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(13), 4910–4915. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317065111>
- Zhang, M., Jordaan, S. M., Peng, W., Zhang, Q., & Miller, S. M. (2020). Potential Uses of Coal Methane in China and Associated Benefits for Air Quality, Health, and Climate. *Environmental Science and Technology*, 54(19), 12447–12455. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c01207>
- Zhang, Q., Zheng, Y., Tong, D., Shao, M., Wang, S., Zhang, Y., ... Hao, J. (2019a). Drivers of improved PM<sub>2.5</sub> air quality in China from 2013 to 2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(49), 24463–24469. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907956116>
- Zhang, X., Wang, Y., Lin, W., Zhang, Y., Zhang, X., Gong, S., Zhao, P., Yang, Y., Wang, J., Hou, Q., Zhang, X., Che, H., Guo, J., & Li, Y. (2009). Changes of atmospheric composition and optical properties over Beijing 2008 Olympic monitoring campaign. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(11), 1633–1652. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2804.1>
- Zhang, X., Gu, X., Wang, L., Zhou, Y., Huang, Z., Xu, C., & Cheng, C. (2021). Spatiotemporal variations in the incidence of bacillary dysentery and long-term effects associated with meteorological and socioeconomic factors in China from 2013 to 2017. *Science of the Total Environment*, 755, 142626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142626>
- Zhang, X., Xu, X., Ding, Y., Liu, Y., Zhang, H., Wang, Y., & Zhong, J. (2019b). The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on PM<sub>2.5</sub> mass reduction in key regions in China. *Science China Earth Sciences*, 62(12), 1885–1902. <https://doi.org/10.1007/s11430-019-9343-3>
- Zhang, X., Karplus, V. J., Qi, T., Zhang, D., & He, J. (2016). Carbon emissions in China: How far can new efforts bend the curve? *Energy Economics*, 54(2016), 388–395. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2015.12.002>
- Zhang, X., Jin, Y., Dai, H., Xie, Y., & Zhang, S. (2019c). Health and economic benefits of cleaner residential heating in the Beijing–Tianjin–Hebei region in China. *Energy Policy*, 127(October 2018), 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.008>
- Zhang, Y., Mao, H., Ding, A., Zhou, D., & Fu, C. (2013). Impact of synoptic weather patterns on spatio-temporal variation in surface O<sub>3</sub> levels in Hong Kong during 1999–2011. *Atmospheric Environment*, 73, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.02.047>
- Zheng, B., Tong, D., Li, M., Liu, F., Hong, C., Geng, G., Li, H., Li, X., Peng, L., Qi, J., Yan, L., Zhang, Y., Zhao, H., Zheng, Y., He, K., & Zhang, Q. (2018). Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(19), 14095–14111. <https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018>
- Zhou, M., Wang, L., Liu, T., Zhang, Y., Lin, H., Luo, Y., Xiao, J., Zeng, W., Zhang, Y., Wang, X., Gu, X., Rutherford, S., Chu, C., & Ma, W. (2014). Health impact of the 2008 cold spell on mortality in subtropical China: the climate and health impact national assessment study (CHINAs). *Environmental Health*, 13(1), 60. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-13-60>
- Zhou, N., Fridley, D., Khanna, N. Z., Ke, J., McNeil, M., & Levine, M. (2013). China's energy and emissions outlook to 2050: Perspectives from bottom-up energy end-use model. *Energy Policy*, 53(2013), 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.09.065>

- Zou, Y., Wang, Y., Zhang, Y., & Koo, J. H. (2017). Arctic sea ice, Eurasia snow, and extreme winter haze in China. *Science Advances*, 3(3), 1–9. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602751>
- 财政部 . 2020 年财政收支情况 . Retrieved from [http://gks.mof.gov.cn/tongjishuju/202101/t20210128\\_3650522.htm](http://gks.mof.gov.cn/tongjishuju/202101/t20210128_3650522.htm)
- 《乘用车燃料消耗量限值》(GB19578–2014) .
- 《乘用车燃料消耗量限值》(GB19578–2021) .
- 工业和信息化部 . (2011). 关于印发《钢铁工业“十二五”发展规划》的通知, 1–15. Retrieved from [http://www.gov.cn/zwggk/2011-11/07/content\\_1987459.htm](http://www.gov.cn/zwggk/2011-11/07/content_1987459.htm)
- 工业和信息化部 . (2021). 水泥工业“十二五”发展规划 . Retrieved from <http://www.ccement.com/news/Content/48009.html>
- 国家发展和改革委员会 . (2020). 关于做好 2020 年重点领域化解过剩产能工作的通知 . Retrieved from [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/19/content\\_5520429.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-06/19/content_5520429.htm)
- 国家发展和改革委员会 . (2019). 发展改革委修订发布《产业结构调整指导目录(2019 年本)》 . Retrieved from [http://www.gov.cn/xinwen/2019-11/06/content\\_5449193.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2019-11/06/content_5449193.htm)
- 国家节能中心 . (2021). 能源经济新亮点 . Retrieved from <http://www.chinanec.cn/website/News!view.shtml?id=245621>
- 国家林业和草原局 . (2019). 中国森林资源报告(2014–2018) . 中国林业出版社 .
- 国家能源局 . (2021). 2021 年一季度网上新闻发布会文字实录 .
- 国家能源局 . (2021). 国新办举行中国可再生能源发展有关情况发布会 . Retrieved from [http://www.nea.gov.cn/2021-03/30/c\\_139846095.htm](http://www.nea.gov.cn/2021-03/30/c_139846095.htm)
- 国家气候中心 . (2020). 中国气候公报 . 北京 .
- 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 . (2020). 中华人民共和国 2019 年国民经济和社会发展统计公报 .
- 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.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227\\_1814154.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202102/t20210227_1814154.html)
- 黄晶 . (2020). 中国 2060 年实现碳中和目标亟需强化科技支撑 . 可持续性发展经济导刊, 10, 15–16.
- 胡琼, 周伟新, & 刁峰 . (2019). IMO 船舶温室气体减排初步战略解读 . 中国造船, 60(1), 195–200.
- 李佳蔚, 魏然, 张安然, 胡文琦, 林君芬, 马伟 . (2018). 热带气旋与医院门诊呼吸系统疾病日就诊量的病例交叉研究 . 山东大学学报: 医学版, (8): 43–49, doi: 10.6040/j.issn.1671-7554.0.2018.055
- 刘牧心, 梁希, & 林千果 . (2021). 碳中和背景下中国碳捕集、利用与封存项目经济效益和风险评估研究 . 热力发电, 1(9). <https://doi.org/https://doi.org/10.19666/j.rlfid.202101009>

- 国家统计局能源统计司 . (2021). 中国能源统计年鉴 2020. 北京 : 中国统计出版社 .
- 全国人民代表大会 . (2009) 《关于积极应对气候变化的决议》. Retrieved from [http://www.npc.gov.cn/zgrdw/huiyi/ztbg/jjydqhbh1110/2009-08/25/content\\_1515436.htm](http://www.npc.gov.cn/zgrdw/huiyi/ztbg/jjydqhbh1110/2009-08/25/content_1515436.htm)
- 全球能源互联网发展合作组织 ( GEIDCO ) . (2020). 中国 “十四五” 电力发展规划研究 .
- 生态环境部 . (2021). 《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》. Retrieved from [http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202101/t20210113\\_817221.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202101/t20210113_817221.html)
- 生态环境部 . (2020). 《关于促进应对气候变化投融资的指导意见》. Retrieved from [http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202010/t20201026\\_804792.html](http://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk/xxgk03/202010/t20201026_804792.html)
- 水电水利规划设计总院 . (2020). 中国可再生能源发展报告 2019.
- 王鑫, 荀换苗, 康瑞华, 王伟, & 马伟 . (2015). 2008–2011 年广州市越秀区台风对居民死亡率的影响及疾病负担研究 . 环境与健康杂志, 32(4), 315–318. <https://doi.org/10.16241/j.cnki.1001-5914.2015.04.010>
- 尹志聪, 李雨嫣, 段明铿, & 王会军 . (2021). 2020 年大气科学与环境健康交叉领域热点回眸 . 科技导报, 39(1), 88–96.
- 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 陈景明, 谭锦潇, & 李晓易 . (2021). 碳中和目标下中国碳排放路径研究 . 北京理工大学学报, 23(2), 18–24.
- 张九天 & 张璐 . (2021). 面向碳中和目标的碳捕集、利用与封存发展初步探讨 . 热力发电, 50(1), 1–6.
- 张贤 . (2020). 碳中和目标下中国碳捕集利用与封存技术应用前景 . 可持续发展经济导刊, 12(22–24).
- 中华人民共和国中央人民政府 . 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 . Retrieved from [http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content\\_5592681.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)
- 中华人民共和国国务院办公厅 . (2020). 《新时代的中国能源发展》白皮书 (全文) .
- 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 .
- 中国光伏行业协会 . (2020). 中国光伏产业发展路线图 (2019 版) . Retrieved from [http://www.chinapv.org.cn/road\\_map.html](http://www.chinapv.org.cn/road_map.html)
- 中国核能行业协会 ( CNEA ) . (2020). 中国核能发展报告 (2020) .
- 中国可再生能源学会风能专业委员会 ( CWEA ) . (2020). 中国风电产业地图 2019.
- 中国气象局 . (2020). 大气环境气象公报 . 北京
- 中国汽车工程学会 . (2020). 节能与新能源汽车技术路线图 2.0. 机械工业出版社 .
- 中国石油集团经济技术研究院 . (2015). 国内外油气行业发展报告 .
- 中国水泥协会 . (2017). 关于发布《水泥工业 “十三五” 发展规划》的通知 . Retrieved from <http://www.gdc-c.com/Article/ShowArticle.asp?ArticleID=723>
- 中华人民共和国中央人民政府 . (2020) 《碳排放权交易管理办法 (试行)》. Retrieved from [http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/06/content\\_5577360.htm](http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-01/06/content_5577360.htm)



## 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

盖怡君 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处项目经理

孙 茹 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处传播经理

王肖阳 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处项目官员

张 桐 中国清洁空气政策伙伴关系秘书处项目官员

# 2021 中国碳中和与清洁空气 协同路径



Icon 清华大学  
Tsinghua University



北京大学  
PEKING UNIVERSITY



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



ENERGY FOUNDATION  
能源基金会