



中国环境与发展国际合作委员会

专题政策研究报告

降碳减污扩绿增长协同机制



2023



中国环境与发展国际合作委员会
专题政策研究报告

降碳减污扩绿增长协同机制
专题政策研究

中国环境与发展国际合作委员会 2023 年年会
2023 年 8 月

专题政策研究项目组成员

(中外组长、成员、支持专家及协调员姓名、单位、职务 / 职称)

中外组长 *: (姓名按字母顺序排序)

何豪 (Hal HARVEY) SPS 外方组长, 国合会委员, 能源创新公司创始人

贺克斌 SPS 中方组长, 国合会委员, 中国工程院院士, 清华大学环境学院教授, 清华大学碳中和研究院院长

张永生 SPS 中方副组长, 国合会特邀顾问, 中国社会科学院生态文明研究所所长、研究员

中外核心成员 *: (姓名按字母顺序排序)

Chris BUSCH 能源创新公司, 交通项目主任

Michael O'BOYLE 能源创新公司, 电力项目主任

Richard COREY 美国加州空气资源局前副局长, AJW 合伙人

边少卿 清华大学环境学院, 助理研究员

雷 宇 生态环境部环境规划院, 大气环境规划研究所, 所长

马晓琴 中国社科院生态文明研究所, 博士后

同 丹 清华大学地球系统科学系, 助理教授

张红军 Holland & Knight 律师事务所, 合伙人

张 强 清华大学地球系统科学系, 教授, 副系主任

张少君 副教授, 清华大学环境学院大气污染与控制教研所

支持专家 *: (姓名按字母顺序排序)

Felipe RODRÍGUEZ 国际清洁交通委员会, 重型车项目主任 / 欧盟常务副主任

龚慧明 能源基金会中国, 交通项目高级项目主任

何 卉 国际清洁交通委员会, 中国项目主任

胡 涛 湖石可持续研究院，理事长
张世秋 北京大学环境科学与工程学院，教授

协调员 *: (姓名按字母顺序排序)

鲁 垚 清华大学环境学院教授、碳中和研究院院长助理
张秀丽 能源创新公司，中国项目经理

其他项目成员 *: (姓名按字母顺序排序)

Anand GOPAL 能源创新公司，执行主任
薄 宇 中国科学院大气物理研究所 / 清华大学，高级工程师
冯悦怡 生态环境部环境规划院，大气环境规划研究所，助理研究员
耿冠楠 清华大学环境学院，副研究员
何东全 北京智汇绿行科技中心首席科学家
孟 菲 能源创新公司，中国项目主任
孙世达 清华大学地球系统科学系，助理研究员
王云石 加州大学戴维斯分校，交通研究院，中国交通与能源中心主任
徐政雪 中国社会科学院生态文明研究所、研究助理
严禧哲 清华大学地球系统科学系，博士研究生
禹 湘 中国社科院生态文明研究所，副研究员
赵 眇 清华大学环境学院，博士研究生

* 本专题政策研究项目组联合组长、成员以其个人身份参加研究工作，不代表其所在单位，亦不代表国合会观点；课题研究结果不一定反映所有专家的观点。本报告作为中国环境与发展国际合作委员会年会材料，供参会嘉宾参阅。

目录

执行摘要	I
(一) 扩绿增长：减排如何促进经济增长	I
(二) 碳中和与清洁空气协同路径	II
(三) 煤电减退：减污降碳协同增效必由之路	III
(四) 交通领域的重点问题与减污降碳难点	III
(五) 建立协同管控的监管和执行机制	IV
前 言	1
第 1 章 扩绿增长：如何通过减排促进经济增长.....	2
一、为什么碳中和是中国的重大机遇	2
二、“双碳”目标如何促进经济增长	4
三、“双碳”正成为中国经济增长新动能	9
第 2 章 碳中和与清洁空气协同机制与路径.....	11
一、研究背景	11
二、中国碳中和与清洁空气协同治理进展评估	12
三、政策建议	16
第 3 章 煤电减退：减污降碳协同增效必由之路.....	18
一、中国煤电现状及淘汰风险概述	19
二、美国退煤经验：迅速减少燃煤发电量与改善负担得起的、可靠的电网 齐头并进	21
三、煤电退役协同效益及靶向退役路径设计	25
四、煤电淘汰的政策建议	27

第4章 交通部门：重点问题与减污降碳挑战	29
一、引言	29
二、中国重型车电动化发展经验与挑战	30
三、重型车电动化的加州经验	33
四、中国重型车电动化的减污降碳效益评估	34
五、经济效益：创新刺激和增强经济发展	40
六、政策建议	41
第5章 协同管控的监管和执行机制.....	43
一、加州协同管控经验	43
二、将环境公益诉讼机制扩展到温室气体管控	51
第6章 性别分析	55
一、降碳减污扩绿增长协同机制中的性别问题	55
二、电力和交通部门绿色低碳转型中的性别平等	56
三、协同管控中的性别策略	58
第7章 政策建议	60
绿色增长	60
跨部门合作	60
电力	61
交通	62
参考文献	63
致 谢	72

执行摘要

党的二十大报告就推动绿色发展、促进人与自然和谐共生作出重大部署，强调要推进美丽中国建设，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展。推进减污降碳协同增效，是贯彻新发展理念促进经济社会发展全面绿色转型的有力抓手，也是实现美丽中国建设和“双碳”目标的必然选择。基于大气污染物和碳排放高度同根同源同过程的特征，两者在管控思路、管理手段、任务措施等方面高度一致，推进大气污染防治与温室气体协同控制是实现减污降碳协同增效的关键领域。

本专题首先就“双碳”目标与经济增长之间的关系进行了系统分析，并就减碳如何促进经济持续增长和高质量发展提出政策建议。进而，专题聚焦大气污染防治与碳减排这一减污降碳协同治理的关键领域，构建空气污染与气候变化协同治理监测指标体系，通过追踪各项指标的进展，分析中国碳中和与清洁空气协同治理的成效、阻碍并提出解决思路。在此基础上，专题选取温室气体和大气污染物排放的主要贡献部门——电力、交通两大重点领域，梳理协同控制的进展、重点问题和减污降碳面临的形势和挑战，并结合国际先进经验，针对煤电减退、重型车电动化等关键举措开展协同效益评估、路径规划研究，提出推动低碳转型、实现减污降碳协同增效的政策建议。报告还就减污降碳协同管控的监管和执行机制进行了分析，在梳理总结国际经验的基础上，提炼了有效制定和实施多污染物协同治理措施和行动计划的基本原则，并提出了完善环境治理与环境公益诉讼的相关政策建议。此外，报告在性别平等视角下分析降碳减污扩绿增长协同管理可能面临的挑战并提出政策建议。

本专题的研究主要有以下发现和结论：

（一）扩绿增长：减排如何促进经济增长

协同推进降碳、减污、扩绿、增长，其实质就是要在完整、准确、全面贯彻新发展理念的过程中，以“降碳”为战略抓手，形成环境与发展之间的相互促进关系，通过推动经济社会全面绿色转型，实现生态环境保护与经济发展双赢。碳中和是促

进中国经济高质量发展的重大机遇和驱动力，随着新能源汽车、风光储新能源产业链等绿色低碳产业驶入发展快车道，“双碳”目标正在为中国经济增长提供新动能和可持续性。

“1+N”框架提供了一个很好的基础，但必须在省市级有详细的计划和支持，组织实现省市进行健康的竞赛实现目标。控制常规污染(NO_x , $\text{PM}_{2.5}$, SO_x 和其他污染物)，同时控制 CO_2 , CH_4 和 N_2O 等温室气体，可以改善公众健康，节约大量资金，并将投资引向更好的选择。除了经济和生活水平的进步外，对传统污染物的协同控制将促进更好的公众健康和宜居环境。中国从世界领先的可再生能源投资和新能源汽车开发中受益，这些努力通过提供充足的供应和降低技术成本也使世界受益。推动重要技术在学习曲线上前进的工作提供了广泛和快速的回报，中国应该找出更多可以降低关键技术（和实践）成本的领域，包括工业热泵、零碳钢、零碳混凝土、石油化工、更多的电动汽车等等。几乎所有这些都可以通过精细设计的性能标准、特定行业的目标和经济信号所实现，可以推动环境的快速改善，同时为先进的产品和服务创造新的市场。

（二）碳中和与清洁空气协同路径

基于结构转型、碳污协同、空气质量、健康效益、地方实践五类指标，总结分析中国空气污染与气候变化协同治理进程及面临挑战。评估结果表明：**一是在社会管理层面**，中国已经开始主动构建减污降碳协同治理的管理制度和政策体系，协同战略规划逐步成形，环评、监测、监管、环统等领域协同治理制度逐步完善，碳排放权交易市场、碳金融和气候投融资等经济政策取得突破性进展。**二是在技术应用层面**，结构转型以及新一代能源和减排技术的应用是实现空气质量改善和碳减排协同效益的根本，有利于能源、产业、交通等结构向低碳化绿色化调整的技术正在加速得到应用。**三是在协同治理成效层面**，减污降碳推动空气质量持续改善，并带来显著健康效益， $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 和 NO_2 暴露水平近年来持续下降， $\text{PM}_{2.5}$ 长期和短期暴露相关的成人过早死亡人数2017-2021年间下降幅度分别为23.9%和26.2%。**四是中国减污降碳协同仍存在较大提升空间**，从城市尺度来看，2015-2020年间，仅有31.3%的城市实现了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 CO_2 排放量协同下降，大多数城市尚未实现空气

质量改善和碳减排的协同；从重点领域来看，工业部门实现了 CO₂ 减排与 PM_{2.5} 污染改善的正协同效应，而电力供热、交通、民用部门仍呈现负效应，其结构调整的协同减排潜力有待大幅释放。

未来中国碳中和与清洁空气的协同路径，应将实施结构调整和绿色升级作为根本途径，加快推动末端治理转向源头治理，以碳中和目标推动能源结构和技术更迭，进而更高质量地推动碳达峰碳中和与清洁空气目标的实现。**一是**推动能源绿色低碳发展，控制化石能源消费总量，推动煤炭清洁高效利用，构建非化石能源占比稳步提高的新型电力系统。**二是**深化调整产业结构，遏制“两高一低”项目盲目发展，淘汰落后产能和化解过剩产能，注重源头治理，大力发展战略性新兴产业。**三是**优化交通结构，加快提升机动车清洁化水平，推进清洁能源替代，构建高效集约的物流体系，加快大宗货物和中长途货物运输“公转铁”和“公转水”，大力发展战略性新兴产业。**四是**稳步调整用地结构，持续推动重点行业布局优化，实施重点企业退城搬迁，推动农业面源污染防治，强化扬尘治理。

（三）煤电减退：减污降碳协同增效必由之路

煤电是中国温室气体及大气污染物排放的主要贡献部门，对全国人为源 CO₂、SO₂、NO_x 排放的贡献率达 35%、15%、15%。推动以煤炭为主的电力系统向低碳电力来源过渡是实现碳达峰碳中和目标、持续改善空气质量、保障人体健康的必然选择。煤电占中国总发电量的 60% 以上，推动煤电减退面临多重挑战：**一是**由于可变可再生能源的稳定性和可靠性较弱，燃煤发电的淘汰将对能源系统的安全带来挑战和机遇；**二是在**煤电基础设施快速发展的背景下，中国煤电机组服役时间偏低（平均服役时间 11 年），煤电大规模退役势必面临严峻的资产搁浅风险；但是，由于可再生能源现在比煤电更便宜，因此也存在着巨大的机会。

国际经验表明，实现电力部门低碳转型的关键：一是建立燃煤电厂或整个电力行业的温室气体排放标准，二是在保障电力系统可靠性和可负担性的前提下，加快向以新能源为主体的新型电力系统过渡。针对中国实现深度减排与平稳转型的煤电减退战略提出以下政策建议：**一是**综合考虑煤电机组的排放水平、技术属性、成本费效、资产搁浅、健康协同效应以及社会公平等，系统性设计煤电减退政策，实现

煤电退役的综合效益最优。**二是**加快剩余煤电厂的灵活性改造，以提高对可变风能和太阳能的高渗透率的适应能力，并满足调峰要求，将煤炭视为调峰设备，而非电网的基荷资源。**三是在**全国范围内实施电力系统经济调度，以提高电厂效率，减少可再生能源弃电，促进可再生能源和储能项目建设。**四是**从省级尺度向区域尺度进一步扩大电力系统可靠性责任，减少现有煤炭优势，为加快部署可再生能源创造更多机会。**五是**制定新的、更有雄心的清洁能源和储能部署目标。**六是**改变市场结构，在不要求电力调度的基础上保持大部分现有燃煤机组存量的可靠性服务，必要时考虑开发可靠性储能产品。**七是**加强对高比例可再生能源系统可靠性的研究，与其他国家的主要电网运营商合作，实施最佳实践模型，以更好地比较各类型资源的可靠性贡献。

(四) 交通领域的重点问题与减污降碳难点

重型车是交通领域减污降碳的重难点，其排放的颗粒物、NO_x 和 CO₂ 占机动车排放总量的 52%、76% 和 30%，推动重型车队新能源化转型是交通部门减污降碳的重要手段。基于全生命周期的评估结果表明，中国不同地区电动车相比于传统燃油车可实现 30%~60% 的 CO₂ 削减效益，随着中国可再生能源电力比例提高等应用条件的改善，预计 2030 年中国电动汽车全生命周期 CO₂ 排放将降低 50% 以上。目前中国重型车电动化面临两大现实挑战：一是现阶段电动重型车活动水平低于同类型柴油车，抑制了电动货车在燃料周期减排潜力的发挥，并直接导致其总拥有成本高于柴油货车，失去经济竞争力；二是有限的充电基础设施对长距离、高负荷的重型牵引车推广带来了阻碍。

针对中国加速重型车新能源化转型提出以下政策建议：**一是**制定明确的、更有雄心的新能源重卡长期发展目标，基于商业可用性和拥有成本预测，建议新能源重卡销售比例目标设置为 2030 年达到 45%，2035 年达到 75%，2040 年达到 100%。**二是在**轻型乘用车“双积分”政策的基础上，建立新能源重卡企业销售标准以促进销售目标的达成。**三是**继续完善和扩大中国现有新能源汽车推广的多种政策工具组合，包括制定新能源汽车行业标准、扩大新能源基础设施建设、继续实施新能源汽车免征车辆购置税等财政激励和允许新能源重型货车路权优先制度等非财政激励措施、明确商业车队新能源车辆采购要求等。**四是**通过有序充电等手段最大化利用可

再生能源电力，提高电力和交通系统之间的协同效益，实现更高电网稳定性、更低的燃料成本和深度减排。**五是**加快电池储能技术创新，以及充电站、换电站等新能源汽车基础设施建设，提高电动货车使用率，获得成本竞争力。

此外，为了在中国创造可持续的宜居城区，重点应该是支持快速、可靠的公共交通，建立有物理保护的自行车道，为行人提供充足的遮阳人行道空间，为大部分居民实现”15分钟城市”的概念，并确保新的城市发展符合”翡翠城市”的原则，以创造安全、愉快和高效的生活方式。

（五）建立协同管控的监管和执行机制

基于加州空气污染与气候变化协同治理经验，提出了有效识别、制定和实施多污染物协同治理措施和行动计划的基本原则和必备要素：**一是**明确、可追踪、可衡量的目标；**二是**强大的数据和分析的技术基础；**三是**广泛的伙伴关系和公开透明的公众参与机制；**四是**确定优先次序 / 指导措施制定的综合计划；**五是**制定和实施措施的能力和专业知识；**六是**持续的监测及有力的执行和监管机制；**七是**措施有效性评估和调整优化。加州的建筑法规政策为提高建筑效率要求和鼓励采用高效电器和建筑材料提供了一个很好的例子。在前述基础上本研究总结提炼了协同治理需要克服的常见障碍：**一是**协同治理的主体多涉及不同部门、团体或行政区域等多方利益攸关者，必须通过重塑组织结构、合作关系和利益机制，驱动多方协同实现效益最大化；**二是**针对大气污染防治和气候变化应对两者的法律法规较为孤立，对协同治理的约束和保障力度相对薄弱，须建立健全内在协同的法治保障体系。

环境公益诉讼（EPIL）自 2015 年在中国实施以来，作为一种新的环境执法工具，已成为公司在遵守环境法方面实现更好合规性的重要推动力。中国实施环境公益诉讼面临的挑战：**一是**环保法适用范围狭窄，没有授权 EPIL 以减少温室气体排放为目标的法案；**二是**针对潜在的环境问题损害赔偿的法律机制缺失，受限于目前“基于损害”的规定；**三是**环境治理和 EPIL 基础能力薄弱，相关人员法律或环境专业知识不足。完善环境治理与环境公益诉讼相关政策建议：**一是**将 EPIL 范畴从环境损害扩展至温室气体管控，通过发布法律文件、提供国家指南等，指导和促成针对温室气体排放和气候损害的 EPIL 案件；**二是**为 EPIL 机制和实施提供进一步的政治支持；

三是建立预防性的 EPIL 机制，以避免潜在的环境和气候损害；四是促进省级 EPIL 法规的发展，允许并鼓励起草颁布省级 EPIL 实施细则；五是强化 EPIL 运作的能力建设。

前 言

党的二十大报告就推动绿色发展、促进人与自然和谐共生作出重大战略部署，强调要推进美丽中国建设，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展。推进减污降碳协同增效，是贯彻新发展理念促进经济社会发展全面绿色转型的有力抓手，也是实现美丽中国建设和“双碳”目标的必然选择。基于大气污染物和碳排放高度同根同源同过程的特征，两者在管控思路、管理手段、任务措施等方面高度一致，推进大气污染防治与温室气体协同控制是实现减污降碳协同增效的关键领域。常规大气污染物（ NO_x 、 SO_x 、 $\text{PM}_{2.5}$ 等）和温室气体（ CO_2 、 CH_4 、 N_2O 等）具有高度的同源性，协同控制可以有效整合资源、提高效率、降低成本、改善公众健康，同时可以促进新技术的应用，引导投资朝着更好的方向进行选择，为经济增长提供新的机遇和动力。

本专题梳理了国际经验和国内挑战，研究重点分析温室气体和传统大气污染物的协同管理，同时保持健康的经济增长和有效的系统监管。本项目重点关注电力和交通两个部门，特别探究了电力和交通部门减污降碳的关键措施、挑战和减排潜力。具体而言，电力部门研究了国际加快煤电退役的经验，以及中国在电网去碳化方面的进展和挑战，同时力求实现安全、可靠和灵活的电力供应。在交通领域，研究团队分析了促进重型货车向零排放车辆过渡的政策选择，评估了技术和经济可行性以及减排效益。此外，团队还借鉴加州的经验，探讨了改进管理机制和更有效地执行政策的方案。

在第一章中，本研究首先分析了“双碳”目标与经济增长之间的关系。然后，就如何促进经济可持续增长和高质量发展提出政策建议。

第二章的重点是减污和降碳的协同管理。它构建了两方面的监测指标体系，并分析了中国协同管理的进展和障碍。研究跟踪各项指标的进展情况，并提出解决方案。

在第三章和第四章中，本研究选择了减污降碳的两个关键领域，即电力和交通，来分析探索协同控制的有效措施。研究分析了两个领域的关键问题，评估了现状、详细阐述了国际经验分析、并深入分析了在污染减排和温室气体减排方面所面临的挑战和建议。研究团队参考国际最佳实践和经验，分析了煤电减退和重型车电气化转型等关键举措的协同效益和路径规划。

在第五章中，报告分析了协同控制污染减排和温室气体减排的监管和执行机制。报告在梳理和总结国际经验的基础上，完善了有效制定和实施多污染物协同控制措施和行动计划的基本原则。报告还提出了完善环境治理和环境公益诉讼的相关政策建议。

在第六章，报告探讨了减污降碳工作中，尤其是电力和交通具体领域中的性别议题。

在每一章中，报告都提出了促进低碳转型、实现污染减排与温室气体减排协同效应的措施，以及促进经济绿色转型的政策建议。第七章对这些建议进行了总结。

第1章 扩绿增长：如何通过减排促进经济增长

中共二十大报告强调，要协同推进“降碳、减污、扩绿、增长”。从本质上就是要在新发展理念下，以“降碳”为战略抓手，形成“双碳”目标与经济增长之间的相互促进关系。

“双碳”目标和经济增长之间的关系，本质上是环境与发展之间的关系问题。但是，长期以来，减排被视为经济增长的负担。目前讨论“双碳”目标和经济增长之间的关系时，更多的是强调二者之间如何平衡。但越来越多的证据表明，经济脱碳是促进中国经济高质量发展的重大机遇和驱动力。

认识并抓住这一机遇的关键在于能否“完整、准确、全面”的理解和贯彻新发展理念。区分新旧发展理念的一个简单标准就是，究竟是将“环境与发展”当作相互促进的关系，还是当作对立关系。在推进“双碳”目标和削减常规污染物的同时，我们必须摈弃脱碳是经济的净成本这种传统落后观念。本文通过相关证据和成功的案例，论证经济发展、减少常规污染、实现“双碳”目标是可以并行不悖的，只要有合适的政策支持。

一、为什么碳中和是中国的重大机遇

1. 碳中和是中国发展可持续发展范式的机遇

“双碳”问题不只是能源问题，更是发展范式转变问题；碳中和不只是中国的行动，而是全球范围的共识与行动。迄今为止，已有 150 多个国家承诺“碳中和”。这些国家的碳排放和经济体量，占了全球 90% 左右¹。为什么这么多国家承诺碳中和？首先肯定是因为气候危机越来越严重，如果不加以遏制，中国和全球将面临惊人的人道主义负担，但更重要的是，专家和决策者越来越认识到，减排背后有巨大的机遇。过去十年，新能源成本和电动汽车（EVs）的成本大幅下降。在过去的 10 到 15 年里，太阳能光伏的价格下降了 90% 以上，陆上风电也是如此，而现在海上风电的价格也下降了约一半。电池、照明、热泵和其他关键技术的成本正在变得比他们的效率低下的前辈们要便宜。

¹ 见 <https://eciu.net/netzerotracker>

这正在形成一个国际趋势。承诺碳中和的150个国家中，约70%是发展中国家¹。在过去，难以想象发展中国家会承诺“碳中和”，因为传统的智慧认为，碳排放要先到达一个高峰然后才能下降，整体呈“倒U型”曲线。但如今，这么多的发展中国家承诺通过低碳发展模式实现碳中和和经济繁荣，这是对传统发展模式的颠覆性改变。全球范围的碳中和共识与行动，标志着传统的发展范式正在逐渐成为过去，新的绿色发展范式正在崭露头角。

中国在全球绿色发展竞争中具有独特优势。一是新发展理念。由于经历过传统发展模式的弊端，且有五千年“人与自然和谐共生”的文化底蕴，中国对绿色发展和生态保护有着深厚的历史根基。二是强大的政府协调能力。绿色转型可以节省资金和加速发展，但它需要一套稳定且明智的政策来摆脱旧的方式。这种系统性的发展范式转变需要政府进行推动和协调。而这一点中国具有独特优势。三是市场优势。中国的人口规模超过欧美总和，拥有世界上最大的单一市场，这是绿色技术孕育、孵化、成长的最大保证。四是技术优势。目前，中国在新能源和新能源汽车（NEVs）等领域具有全产业链的研发和制造能力，可以形成强大的自主创新能力很强的经济韧性。总的来说，工业革命是以牺牲环境为代价实现繁荣的。绿色发展范式将环境与发展之间的权衡转变为协同，并将决定未来。

2. 碳中和是中国产业“换道超车”的重大机遇

碳中和是工业革命以来最全面而深刻的发展范式转变，意味着工业时代形成的很多产业将被改造甚至要推倒重来。这个转型过程固然是巨大挑战，但更多会带来大量新的机遇。比如，如果继续走传统燃油车和传统能源路径，那么中国要追赶超过一世纪技术积淀的发达国家就十分困难，但碳中和就为中国相关产业赶超发达国家提供了一个罕见的历史机会，促进绿色产业发展。

——中国已经在许多领域形成竞争优势，转变发展模式。中国光伏产业为全球市场供应了60%以上的硅料、90%以上的硅片、89%左右的电池片、70%以上的组件。同时，中国也是世界上最大的风机制造国，产量占全球一半。全球市场份额最大的前15家大风机厂商，中国占10家。2021年中国对全球的可再生能源的投资贡献率为35%，约占全球前十大投资国投资总和的一半。

——在新能源汽车方面，中国同样有较大优势。2020年和2021年，中国新能源汽车占全球销量分别为41%和53%。在全球二十大新能源汽车厂家中，中国占12家，德国3家，美国2家。2021年中国新能源汽车出口达到31万辆，同比增长304.6%。

根据《全球电动汽车展望2023》，2022年全球电动汽车销售量超过1000万辆，

预计 2023 年销售量将再增长 35%，达到 1400 万辆。这种爆炸性的增长意味着电动汽车在整个汽车市场的份额已从 2020 年的约 4% 增长到 2022 年的 14%，并预计今年将进一步增长到 18%。中国是领跑者，2022 年全球市场 60% 的电动汽车销量在中国。如今，全球路上行驶的一半以上的电动汽车都在中国。根据中国汽车工业协会的数据，2023 年第一季度，中国汽车出口量为 106.9 万辆，超过日本的 104.7 万辆。预计中国全年将出口 400 万辆汽车，超过日本，成为最大的汽车出口国。

二、“双碳”目标如何促进经济增长

1. “双碳”目标是经济增长的阻力还是动力？

“双碳”目标既可以成为经济增长的阻力，也可以成为经济增长的动力。究竟是成为阻力还是动力，取决于经济增长的模式。如果经济增长是工业革命后建立的高排放、高资源消耗的传统增长模式，即“挖煤、开矿、办工厂”，那“双碳”无疑就会阻碍经济增长；如果是在绿色转型模式下，采用是现代的发展理念和内容，“双碳”目标和增长之间就会是相互促进的关系。

实际上，中国对环保与增长之间的关系有了越来越深入的理解。在早期的工业化阶段，中国的确将“减排”当作经济增长的负担。因为生产需要投入能源，对于中国来说，这尤其意味着大量的化石能源。这种情况提供了两种碳减排路径：一是减少产量，也就是影响经济增长；二是增加生产成本。这两个结果，“双碳”都会成为经济增长的负担。因此，在这个模式下，每个国家都将碳排放视为所谓的发展权，希望他国多减，自己少减。

十八大以后，中国在环境和发展之间关系的认识与行动上有了根本转变，从过去“要我减”到“我要减”。“双碳”目标是“我们自己要做”，而不是“别人要我们做”。背后的原因是，过去的传统发展方式已经不可持续，中国经济必须实行绿色转型。这开启了一个新的时代——通过绿色发展包括清洁能源转型带来经济机会。发展的根本目的是提高人们的福祉。传统发展模式不仅带来不可持续的环境危机，还使得发展目的与手段的本末倒置。新发展理念、美好生活概念的提出，以及人民福祉为中心的发展战略，实质是回归发展的根本目的。

一旦这种绿色转型发生，环境和发展之间就有可能相互促进。举例而言，在传统的以煤炭发电厂为基础的经济结构下，削减排放就意味着削减电力使用。在新的以风能和太阳能等可再生能源为基础的结构下，削减排放就是加速清洁能源技术的过程，带来了众多的新经济机会。这样，减排就成为一个“创造性毁灭”的过程，有可能驱动经济从一个旧的结构跃升到更有竞争力的新结构，带来整个发展范式的变化。

如果坚持传统的发展理论和思维，往往难以察觉到“双碳”背后发展范式的深刻转变，以及转变带来的巨大增长机遇。就像用传统农业时代的思维没法理解工业时代的经济现象一样，用传统工业时代的思维，也没法理解绿色发展时代正在发生的经济现象及其机遇。

2. 脱离传统发展范式中的旧增长来源

旧发展路径中的第一个旧增长源就是基于消费主义和过度消费，激励人们浪费性地消费更多物质产品。比如，由于过度摄入食物而导致的超重成人比例，这与慢性疾病密切相关，中国从1975年的9.9%迅速上升到2016年的32.3%²。中国的比例正向发达国家趋同。这导致大量所谓的“富贵病”（diseases of affluence）。疾病治疗成为经济增长的重要的，但是悲惨的来源。医疗产业的这种“先生病、后治疗”的扭曲模式，同“先污染、后治理”的传统经济发展逻辑惊人地一致。

第二个旧增长源是通过各种推销、创新来激发人们的欲望，以创造新的市场需求。这其中的大部分欲望，的确可以提高人们的福祉，但相当一部分欲望，对提高人们的福祉其实并无帮助，甚至可能还有副作用。就正如亚当·斯密^[1]指出，市场经济的高生产力，乃是由一个幻觉所驱动，即人们以为物质财富会带来幸福。中国社会科学院生态文明研究所课题组的一项调查显示^[2]，约75%的调查者认为，适当减少物质方面的消费并不会影响生活品质。关于物质主义与幸福之间关系的研究，已有大量文献进行了讨论^[3-6]。这意味着增长的来源不应该仅限于和/或依赖于大规模的物质商品的生产和消费。

3. 发展范式转型：回到经济发展的初心

遗憾的是，所谓现代经济增长，很大程度上是在往第一个和第二个途径上发展。我们可以看到，相当一部分所谓的现代经济活动，本质上都是凯恩斯意义上的“挖沟填沟”活动。绿色转型是指第三个途径。这种转型需要从发展理念、发展内容上进行全面转型，不只是像过去1980年代就开始关注的“微笑曲线”、技术进步或产业升级那种。实际上，“微笑曲线”可能是一个企业或国家经济发展的常规路径，但我们现在需要的是全球经济的绿色转型。因此，绿色转型更具根本性。

新的发展路径是满足人的全面发展需求，即在基本物质需求满足后，将物质之外的精神文化等服务需求转化为经济增长的驱动力。这意味着，生产和消费的内容发生转变。经济增长更多地依赖于知识、技术、环境、文化、体验等无形资源的基础上，而不是像过去那样过于依赖物资资源的投入。这一途径需要发展理念、发展

2 <https://ourworldindata.org/grapher/share-of-adults-who-are-overweight?tab=chart&country=~IND>

内容、商业模式、体制机制等方面系统的系统性转变，是工业革命后最为全面而深刻的发展范式转变。

推动发展范式转型，我们要回答一个非常根本的问题，即增长的目的是什么？GDP 只衡量直接的金融交易。这种传统的发展模式并不能充分衡量人们生活的质量，因为它既没有计算各种外部成本、隐性成本、长期成本和机会成本的代价，也没有计算其益处。这种唯 GDP 导向的增长，只是把人作为工具化的产物来看待。现在，中国的发展战略正在发生巨大的变化，从过去 GDP 导向的发展，转向福祉导向的发展，即“以人民为中心”的发展。

4. 减排对经济增长影响的分析³

4.1 通过提高传统部门的经济效率，同时促进经济增长和减排，包括通过技术创新、组织创新、管理创新，降低碳排放强度等。

图 1-1 和 1-2 展示了中国提高效率的潜力。图 1-1 是电力的碳强度。从图中可以看出，与美国、欧盟和世界平均水平相比，中国还有很大的提升空间，包括降低其从化石燃料发电的比例。图 1-2 是关于每小时工作产出——在绝对水平上，中国的产出远低于美国，但正在迅速迎头赶上。

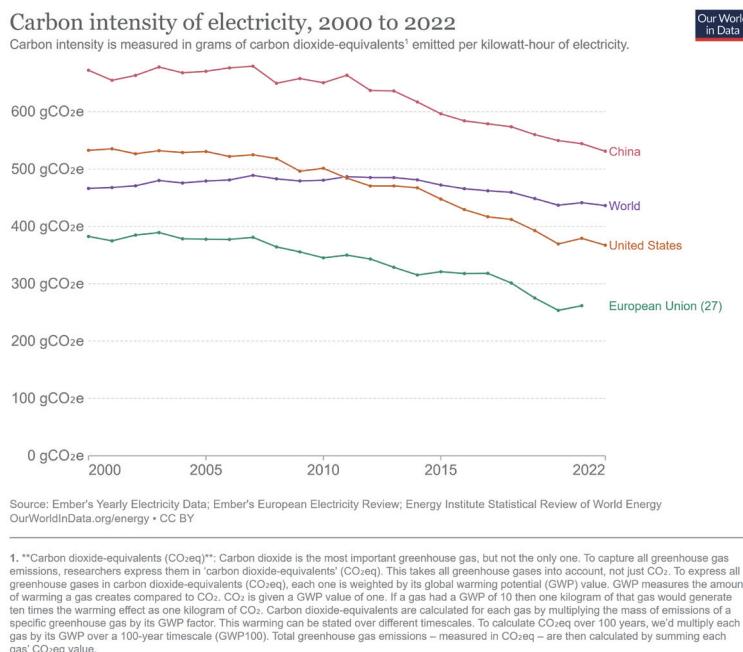


图 1-1 电力的碳强度⁴

3 需要进一步的定量研究

4 https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity?tab=chart&country=OWID_WRL~CHN~USA~OWID_EU27

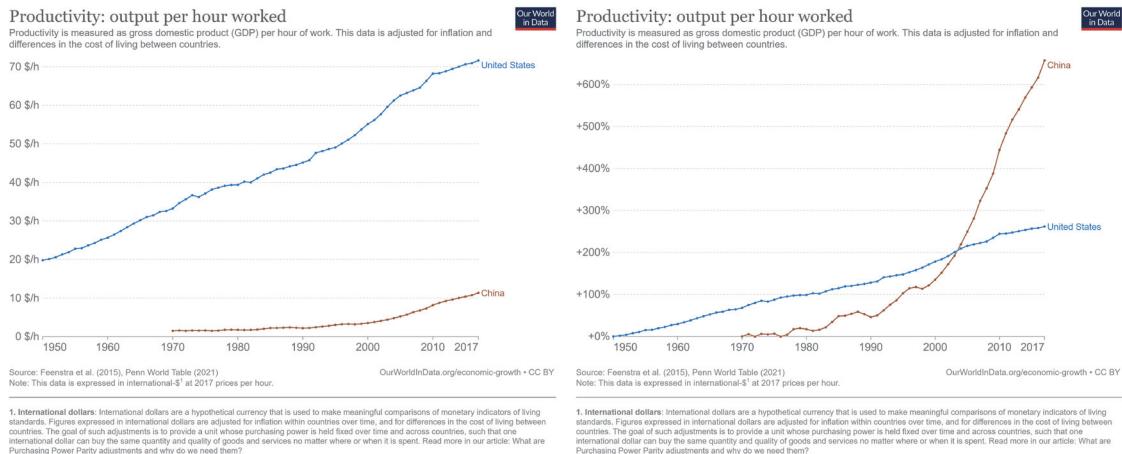


图 1-2 生产率：绝对水平和增长率⁵

4.2 尽可能地将外部成本内部化，以使绿色发展更具成本效益。如果考虑到其外部社会成本，看似高效率的传统发展模式，实际上成本更高。反而，绿色发展可能更具成本效益。

我们以空气污染为例，展示中国降低传统增长模式的外部成本的潜力。图 1-3 显示，尽管 1990 年至 2019 年由空气污染引起的死亡人数的比例一直在下降，但仍然高于世界平均水平。

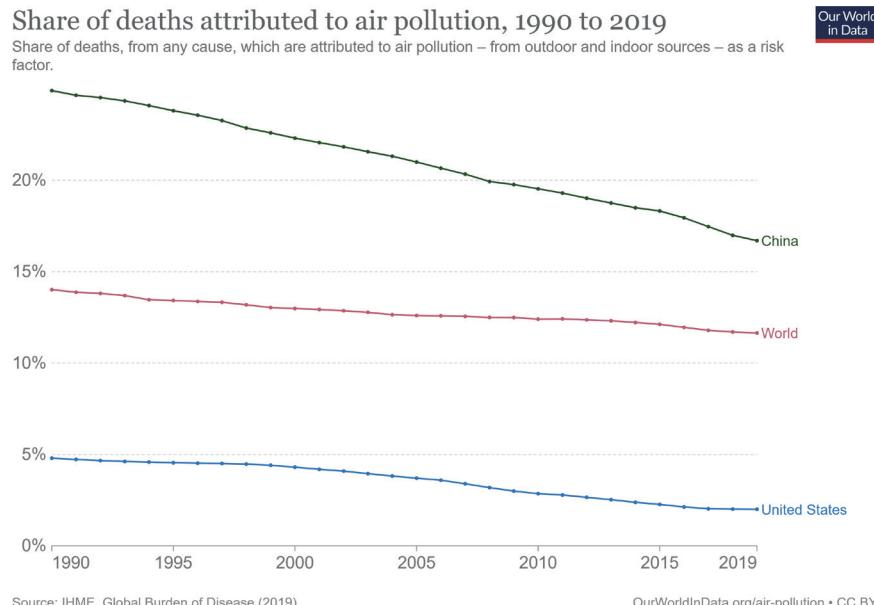


图 1-3. 旧增长模式的社会成本⁶

⁵ <https://ourworldindata.org/working-hours>

⁶ <https://ourworldindata.org/air-pollution>

4.3 减排如何促进经济跃升到更可持续的新结构，这就是所谓的创造性毁灭。例如：从“化石能源 - 燃油车”结构，跃升到“新能源 - 电动车”。如我们可以从新能源价格的急剧下降和新能源发电量的增加在图 1-4 和图 1-5 中看到，经济正在经历向新的、更具竞争力的结构的跃升。

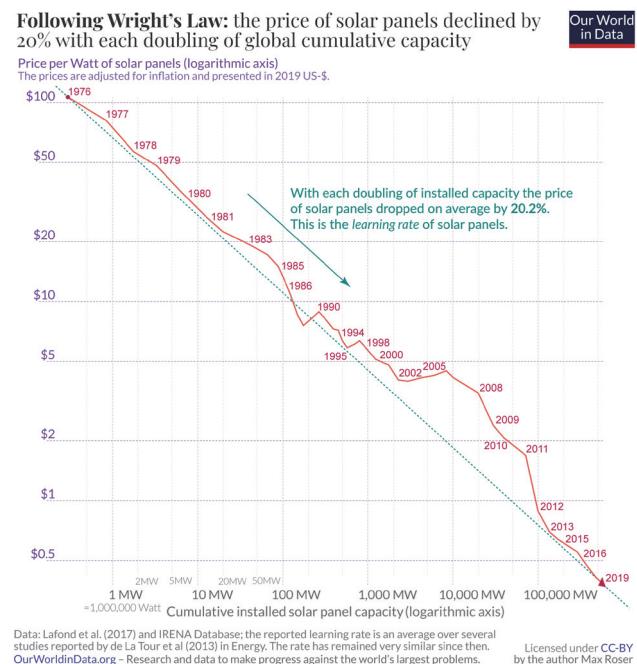


图 1-4 由快速技术进步驱动的创新性破坏⁷

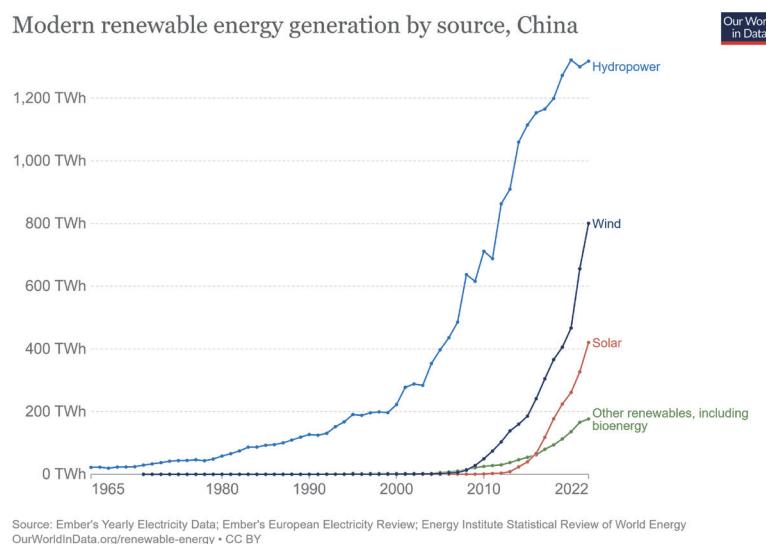


图 1-5. 跃升到新能源⁸

⁷ <https://ourworldindata.org/learning-curve>

⁸ <https://ourworldindata.org/renewable-energy>

4.4 经济内容如何更加去物质化，增长更加依赖非物质资源的投入。比如，技术、知识、文化、生态环境、创意……以实现更高生产力、更可持续、更高福祉。

我们以“使用互联网的人数”作为代理指标，来展示中国在数字时代实现绿色经济的潜力。中国的数字几乎是欧洲和北美的总和。正如斯密^[7]指出，劳动分工是经济增长的源泉，劳动分工的限度取决于市场的范围。这个大的数字是中国在数字时代发展绿色经济的独特优势。

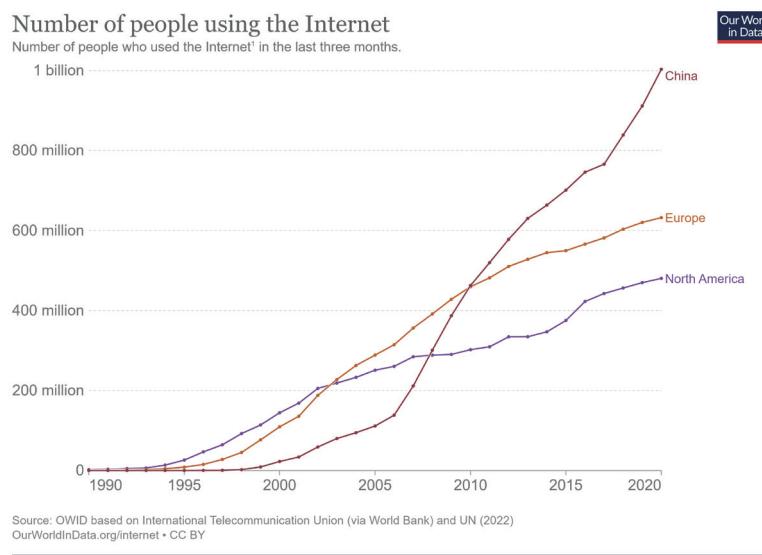


图 1-6. 潜在的大市场范围⁹

三、“双碳”正成为中国经济增长新动能

1. “双碳”催生新的增长动能

实际上，“双碳”并未影响中国经济增长。十八大以后，中国在环境和发展之间关系的认识上有了根本转变，在环境保护上采取了前所未有的力度，但经济增长并没有因此而受影响。2012-2022年的十年间，中国能源消费的增量，有2/3来自于清洁能源；全国单位GDP二氧化碳排放下降了34.4%，煤炭在一次能源消费中的占比从68.5%下降到了56%^[8]。在此期间，中国经济实力实现历史性跃升，国内生产总值从54万亿元增长到114万亿元。

从同“双碳”最直接相关的新能源与新能源汽车产业看，“双碳”是在促进而不是阻碍经济增长。“双碳”目标宣布后，这些行业呈现井喷的增长势头。

9 <https://ourworldindata.org/internet>

2021 年，我国新能源增长速度是全国发电装机容量增速的 2-3 倍。其中，并网光伏发电装机容量为 3.06 亿千瓦，同比增长 20.9%；发电量为 3259 亿千瓦时，同比增长 24.8%。并网风电装机容量为 3.28 亿千瓦，同比增长 16.6%；发电量为 6526 亿千瓦时，同比增长 39.9%。并网生物质发电装机容量为 3798 万千瓦，同比增长 28.7%；发电量为 1637 亿千瓦时，同比增长 23.5%。

尤其要指出，新能源汽车为认识“双碳”与经济增长关系提供了一个形象例子。正是因为新能源车出现井喷式增长，2022 年我国汽车产销双双超过 2700 万辆，结束了自 2018 年以来连续 3 年产销下降的局面。如果按照传统的路径走下去，石油汽车产业的增长潜力就已耗尽，而走绿色转型道路，这些产业就又焕发强大活力。汽车产业增长的例子，同样出现在 5G、机器人、人工智能、互联网经济等新兴领域。

与此同时，化石能源逐渐退出对经济的影响可控。“双碳”目标对经济增长的冲击，最直接的是传统化石能源及其相关部门。根据国家规划，2030 年和 2060 年，化石能源在中国能源消费中的比重分别降到 75% 和 20% 以内。一些人担心，化石能源行业从此会沦为夕阳行业，对融资、就业、地方财政、社会保障、金融安全等带来很大冲击，由此引发系列经济和社会风险。但是，化石能源有序退出，并不意味着化石能源行业会立即陷入低迷状态。在“3060”路线图下，由于一方面中国的能源需求将继续增加，另一方面，化石燃料价格相对较高是培育新能源和减少化石燃料需求的条件，化石能源价格有可能会继续维持在一个相对高水平。

第2章 碳中和与清洁空气协同机制与路径

气候变化已成为事关人类生存和永续发展的重大问题，高温热浪、极端降水、自然灾害等风险日益凸显，迫切需要世界各国团结协作在全球范围内实现碳减排。中国提出2030年前实现碳达峰、2060年实现碳中和的国家重大战略决策。此外，中国空气污染相对来说尚处于高位，污染长期、短期暴露对人体健康产生诸多不利影响，空气质量改善任务依然艰巨。化石燃料燃烧产生的大气污染物与温室气体具有“同根同源同过程”的特性，因此，碳中和与清洁空气目标具有内在一致性。“双碳”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。

一、研究背景

十四五时期，中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。坚持降碳、减污、扩绿、增长协同推进，是中国落实新发展理念的关键点。然而，已有的针对中国减污降碳扩绿增长协同机制的研究，往往侧重于单一方面，如能源结构、空气质量、排放变化等，缺乏系统性、全面性、综合性的评估视角。

基于上述背景，本研究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，建立了空气污染与气候变化协同治理监测指标体系（图2-1）。通过追踪各项指标的进展，分析中国碳中和与清洁空气协同治理进程中的成就与阻碍。



图2-1 空气污染与气候变化协同治理监测指标体系

本报告在空气污染与气候变化协同治理监测指标体系中，选取了结构转型、碳污协同、空气质量、健康效益、地方实践五个关键指标。通过回溯指标变化，识别政策改进的关键点，提出相应的政策建议。

二、中国碳中和与清洁空气协同治理进展评估

1. 结构转型

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 CO₂ 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（图 2-2）。

从能源结构来看，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。从产业结构来看，坚决遏制高耗能高排放项目盲目发展、大力发展战略性新兴产业等举措有效推动了减污降碳协同增效。从交通结构来看，持续提升交通行业能效、推进清洁能源替代、逐步优化运输结构，对于推动社会经济整体的减污降碳具有重要意义。

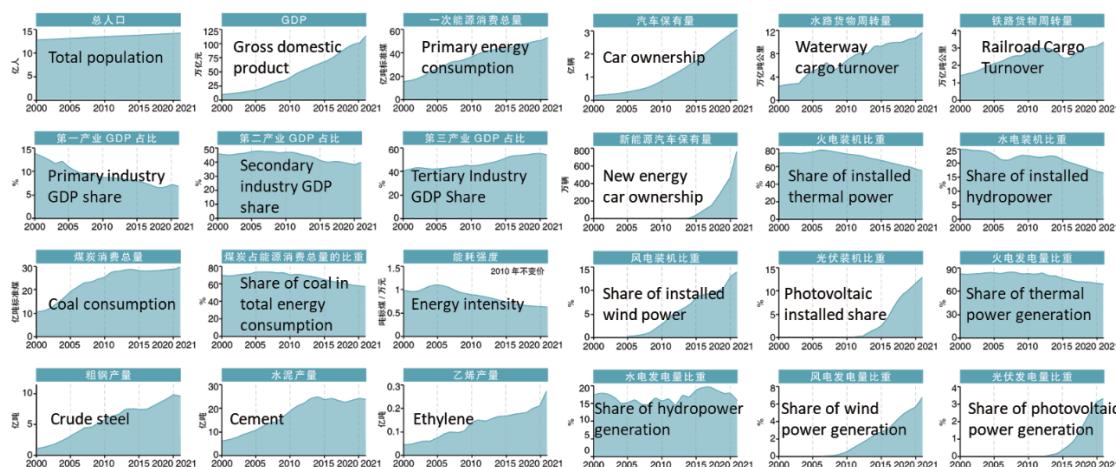


图 2-2 2000–2021 年中国结构转型进展

2. 碳污协同

在碳达峰、碳中和的大背景下，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。

大气污染治理政策的实施，具有减污降碳协同效益。从全国尺度看（图 2-3），2015-2020 年间，中国工业部门 CO₂ 减排与 PM_{2.5} 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_{2.5} 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_{2.5} 浓度下降。随着电力行业污染末端控制的深度推进，未来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。

对于交通、民用部门而言，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 CO₂ 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_{2.5} 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。

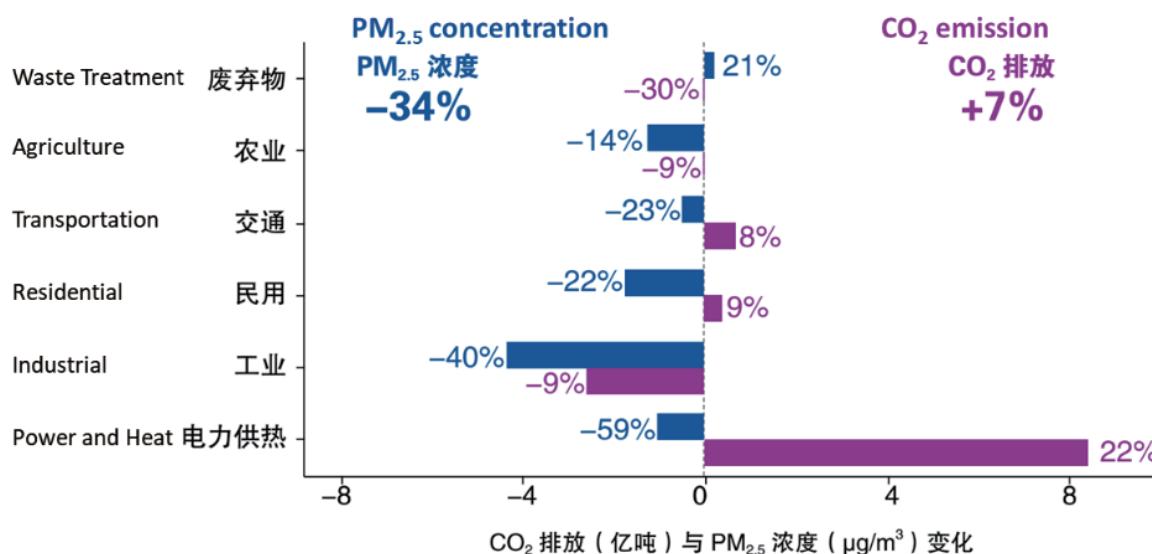
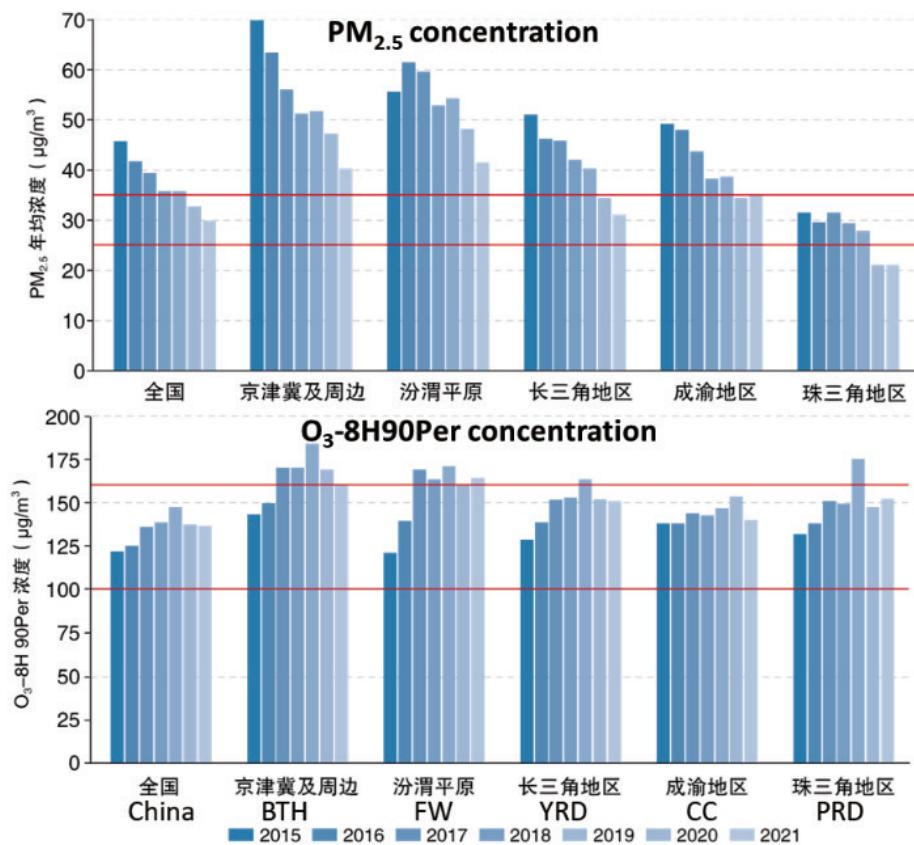


图 2-3 2015–2020 年中国 CO₂ 排放与 PM_{2.5} 污染协同控制情况

3. 空气质量

中国减污降碳的成效充分体现在了空气质量改善过程中（图 2-4）。2021 年，全国 339 个地级及以上城市和京津冀及周边 (Beijing-Tianjin-Hebei, BTH)、汾渭平原 (Fenwei Plain, FW)、长三角 (Yangtze River Delta, YRD)、成渝地区 (Chengdu-Chongqing, CC)、珠三角 (Pearl River Delta, PRD) 五个重点区域的污染物浓度相比 2020 年均有所下降，其中 SO₂ 和 NO₂ 的区域年平均值全面低于国家一级标准（年均浓度：SO₂≤20 μg/m³; NO₂≤40 μg/m³）。除汾渭平原外，O₃ 区域年平均值也低于国家二级标准 (O₃ 日 8 小时滑动平均最大值第 90 百分位数：O₃-8H90Per≤160 μg/m³)。但是，PM_{2.5}

图 2-4 2015–2021 年中国及其重点区域 PM_{2.5}、O₃ 浓度变化

在较多地区还未达标（年均浓度：PM_{2.5}>35 µg/m³）。

4. 健康效益

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。得益于空气质量的改善，中国 PM_{2.5} 长、短期暴露水平持续下降，相关的成人过早死亡人数显著降低（图 2-5）。2021 年中国 PM_{2.5} 长期和短期暴露相关的成人过早死亡人数分别为 121 万和 6 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_{2.5} 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_{2.5} 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_{2.5} 的易感性，一定程度上放大了 PM_{2.5} 改善相关的健康效应。

部分研究表明 O₃ 暴露的健康危害独立于 PM_{2.5} 暴露的健康危害，由于 O₃ 暴露水平的增加，导致其成为危害中国公共健康的主要大气污染物之一。2021 年 O₃ 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；相较于 2019-2021 三年间 O_3 长、短期暴露相关死亡人数均呈现下降趋势。比较发现， O_3 短期暴露相关的过早死亡人数较 $PM_{2.5}$ 更高，即使考虑到不确定性，也与 $PM_{2.5}$ 处于同等水平。

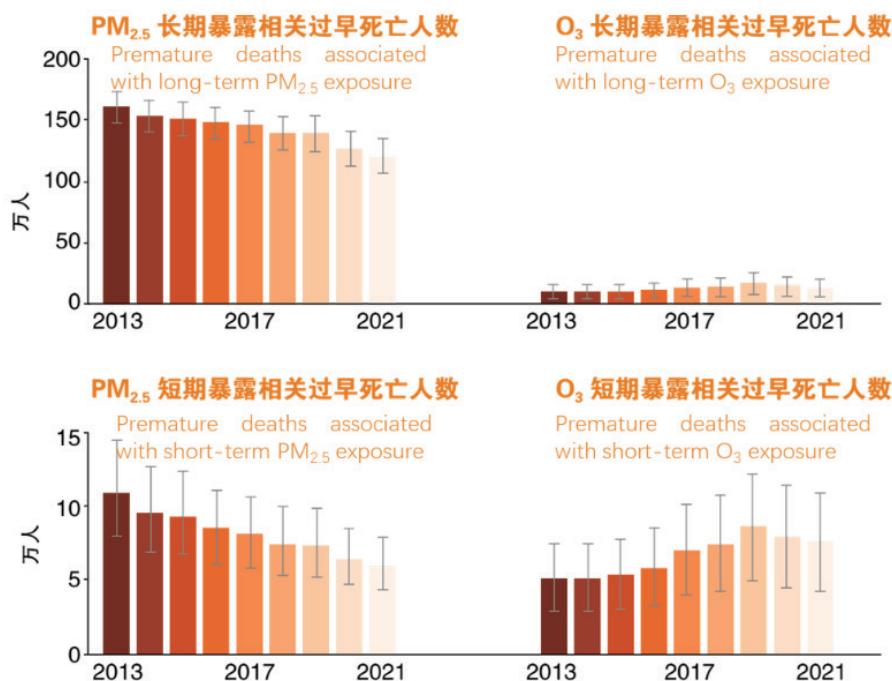
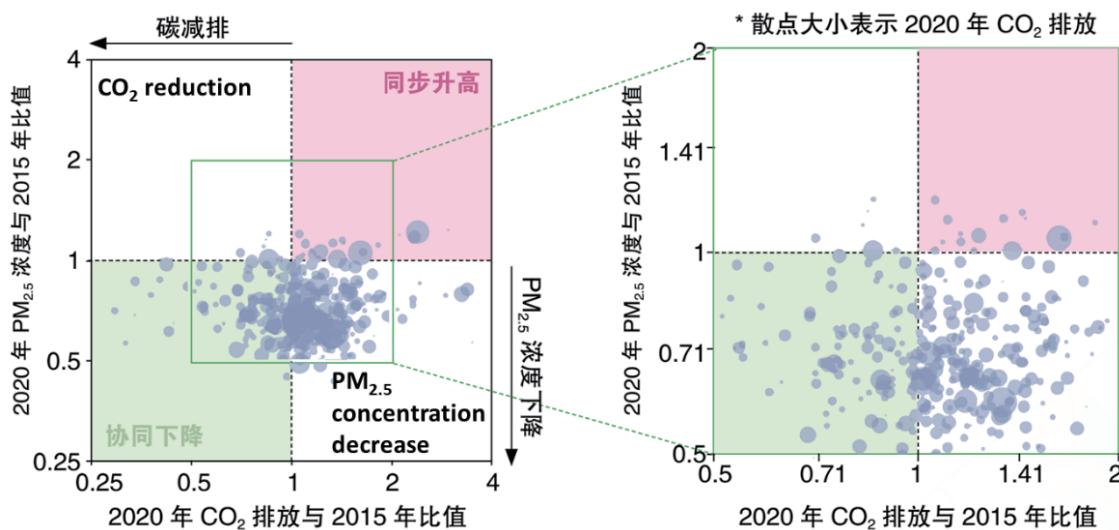


图 2-5 2013–2021 年中国归因于 $PM_{2.5}$ 和 O_3 暴露的成人过早死亡人数¹⁰

5. 地方实践

尽管中国减污降碳工作取得了一定成效，但仍存在较大的提升空间。基于环境空气质量监测数据和 CO_2 排放清单数据，分析了中国 335 个地级以上城市 2015-2020 年间 $PM_{2.5}$ 浓度和 CO_2 排放量的协同变化趋势（图 2-6）。结果显示，2015-2020 年间仅有 105 个城市实现了 $PM_{2.5}$ 年均浓度和 CO_2 排放量协同下降，占城市总数的 31.3%。这些城市的 $PM_{2.5}$ 年均浓度平均下降了 29%， CO_2 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 $PM_{2.5}$ 年均浓度和 CO_2 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 $PM_{2.5}$ 浓度和 CO_2 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。

10 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c04548>

图 2-6 城市尺度 PM_{2.5} 年均浓度和 CO₂ 排放量变化情况比较

三、政策建议

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。

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；温室气体自愿减排交易进一步推动；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。

综上所述，在社会管理层面，中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中国二氧化碳排放量持续增加的核心因素，也是中国实现减污降碳协同增效需要应对的最大挑战。

总体而言，中国尚未完全实现污染物与 CO₂ 的协同减排，亟待实施更多富有针对性的政策。党的二十大报告明确指出，“协同推进降碳、减污、扩绿、增长，推进生态优先、节约集约、绿色低碳发展”。然而，减污降碳协同治理作为生态文明建设领域的新理念，还缺乏较为成熟的理论体系和技术方法，迫切需要围绕协同治理开展科学与技术研究，加快探索协同增效内在机制、实施路径、治理技术和政策创新。未来中国碳中和与清洁空气协同的机制，应持续调整优化能源、产业、交通、用地四大结构，加快推动末端治理转向源头治理，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。具体而言，应注重以下四个方面。

(1) 继续调整能源结构。控制化石能源消费总量，推动煤炭清洁高效利用，推进燃煤机组升级改造，推广大型燃煤电厂热电联产改造。积极发展非化石能源，大力发展战略性新兴产业，加快发展风能、光伏和太阳能等可再生能源发电。继续实施散煤双代改造，严控农村散煤复燃。

(2) 深化调整产业结构。遏制“两高”项目盲目发展，淘汰落后产能，化解过剩产能，确保“散乱污”企业的动态清零。加快实施电力、钢铁和水泥等重点行业的节能改造升级和污染物深度治理。开展 VOCs 综合治理，实施原辅材料和产品源头替代工程。

(3) 积极调整交通结构。更新机动车车队构成，淘汰高排放老旧车辆，推广新能源或清洁能源车辆。构建高效集约的物流体系，加快大宗货物和中长途货物运输“公转铁”和“公转水”，大力发展多式联运。加强非道路移动源管控，淘汰老旧工程机械。

(4) 稳步调整用地结构。优化肥料和饲料使用，推进农药化肥减量增效，推动规模养殖场污染治理和畜禽粪污资源化利用。提升秸秆综合利用水平，强化秸秆焚烧整治。引导重点行业向环境容量充足和扩散条件较好的区域布局，实施重点企业退城搬迁。

第3章 煤电减退：减污降碳协同增效必由之路

燃煤发电站是全球包括中国在内的电力行业的主要空气污染和温室气体排放源。在减少空气污染方面有成熟的技术选择，其中许多技术今天已经在较新的燃煤电厂中得到应用：针对二氧化硫的烟气脱硫，针对氮氧化物的选择性催化还原（SCR），针对细颗粒物和汞控制的袋式除尘装置。新的技术正在开发中，以捕获和永久封存化石电厂的碳排放。根据全球 CCS 研究所的数据，截至 2021 年，全世界大约有 21 个大规模的碳捕获和封存（CCS）设施在运行^[9]，包括在中国的四个项目。

污染标准要求新电厂采用先进的减污技术和效率标准，这是一种最佳做法，在中国、美国和欧洲已经取得了显著的污染减排效果。总的来说，自 2005 年以来，中国对新的和现有的燃煤电厂的污染控制标准使电力部门的 NOx 减少了 81%，SO₂ 减少了 77%，PM_{2.5} 减少了 80%，尽管同期的煤炭发电量增加了 117%^[10]。美国在 1990 年至 2021 年间取得了类似的进展，发电厂的二氧化硫年排放量下降了 94%，氮氧化物年排放量下降了 88%^[11]。

中美都显示了电厂污染控制在改善公众健康和空气质量方面的有效性，但美国在减少温室气体排放方面取得了更大的进展，这是因为三个因素：来自清洁资源的经济竞争、州温室气体和清洁能源标准以及煤炭污染标准。这些因素结合在一起，极大地减少了煤炭在美国电力部门的占比，并带来了巨大的减污降碳的共同利益。自 2011 年以来，美国的煤电已经下降了 50% 以上。

今天，对中国和美国来说，限制传统污染和温室气体污染的第一条和最具成本效益的途径是用无碳的可再生能源和储能来迅速取代煤炭。目前，美国的煤炭发电量不到 20%，而且还在快速下降，到本世纪末，煤炭发电量将可能接近零。中国有机会学习美国和其他国家的经验，同时继续关注电力部门的改革，促进调度最有效、最清洁的资源，并加强系统的能源安全。

一、中国煤电现状及淘汰风险概述

1. 中国的煤电现状

中国的电力系统仍然高度依赖煤炭。在“十三五”和“十四五”期间，中国的煤炭消费总量从快速增长阶段逐步过渡到平稳阶段^[12]。通过淘汰落后产能和实施超低排放标准等手段，煤电在节能减排方面取得了可喜的进展。尽管燃煤发电的比例略有下降，但2021年仍占全国总发电量高达60%。中国拥有世界上最大的燃煤发电基础设施，总装机容量超过所有其他国家的总和（2021年为1110吉瓦）^[13]。截至2020年，中国的电力部门消耗了21亿吨煤，占全国煤炭消费总量的50%。在此背景下，中国的燃煤发电行业并没有停止其新建的步伐。尽管2020年中国淘汰8.6吉瓦的煤电，但新增的煤电装机容量达到了29.8吉瓦^[14]。煤电基础设施的快速发展导致中国现有煤电厂的平均投运时间较短，其中超过75%的煤电厂在2020年的运行时间不到15年^[15]。煤电的扩张带来了更高的资产搁浅风险，阻碍了中国为实现碳中和目标而建设现代电力系统的进程。

煤电的清洁发展不能掩盖燃煤发电对气候目标的威胁。作为中国主要的人为排放源之一，自“清洁空气行动”实施以来，煤电的污染物排放得到了有效控制。下图展示了在2005-2020年间，中国煤电行业在煤炭使用量增加的背景下，通过严格的污染物控制标准实现了大幅减排。至2020年，中国的煤电贡献了120万吨二氧化硫、300万吨氮氧化物和20万吨PM_{2.5}，远远低于2015年的排放水平^[16]。但与此同时，中国的煤电仍排放了35.1亿吨的二氧化碳，占全国人为源碳排放的35%^[17]，仍在威胁着中国兑现气候目标的承诺。随着末端治理的深入，中国电力行业末端治理减排潜力正在逐步缩小，必须寻求新的路径以促进碳和污染物的协同减排。在当前气候目标和公众健康的共同挑战下，扭转电力系统对煤炭的依赖是中国缓解温室气体排放和进一步改善当地空气质量的必然选择。

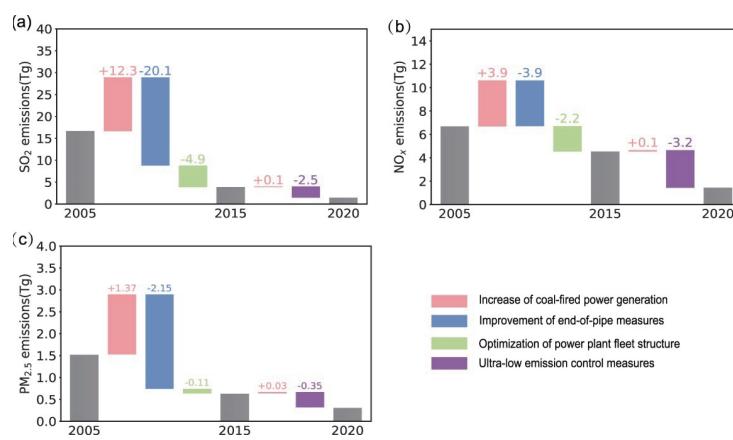


图3-1 电厂相关法规大幅度减少了电厂排放^[10]

2. 煤电淘汰的必要性和风险

现有燃煤电厂碳排放锁定效应阻碍了中国 2030 年碳达峰和 2060 年碳中和目标的实现^[18,19]。据估计，全球现有和拟建电厂（包括煤电厂）碳排放锁定效应高达 846Gt，这一数字超过了《巴黎协定》1.5℃预算的限额（420-580Gt CO₂），并且占了 2℃ 目标下限（1170-1500Gt CO₂）的约 70%^[20]。虽然新兴的负排放技术（如碳捕集与封存、直接空气捕集、植树造林、风化和直接海洋捕集与碳封存）可能具有巨大的碳减排潜力^[21]，但由于未来技术成本变化的巨大不确定性，上述技术能在多大程度上抵消燃煤电厂的碳排放仍不清楚^[22,23]。据相关文献预测，2050 年全球生物质能 + 碳封存技术的负排放潜力可达 BECCS 0.5-5 Gt CO₂ yr⁻¹，直接空气捕捉 + 碳封存技术的负排放潜力约为 DACCS 0.5-5 Gt CO₂ yr⁻¹，植树造林的负排放潜力可达 0.5-3.6 Gt CO₂ yr⁻¹，生物炭固碳潜力为 0.5-2 Gt CO₂ yr⁻¹^[22]。如果风能和太阳能等清洁的可再生能源无法取代燃煤和其他化石燃料发电无被清洁的可再生能源，以燃煤发电为主的能源结构维持不变，仅依靠负排放技术，预计将无法实现巴黎协定气候目标^[22]。

除了二氧化碳排放，燃煤电厂的空气污染物排放预计将造成大量的过早死亡，并阻碍联合国可持续发展目标的良好健康和福祉的实现，尽管未来将广泛部署末端控制技术，燃煤电厂的健康负担仍将很难消除^[24,25]。据估计，2010 年全球大约有 730 万与 PM_{2.5} 暴露有关的过早死亡，其中 12%（861,300）是由使用煤炭、天然气、石油和生物质的火力发电厂的排放造成的^[25]。如果燃煤发电厂按照历史路径逐步减退，电厂的末端控制较为薄弱，无论在 RCP 1.9 和 RCP 6.0 的气候缓解情景下，每年与 PM_{2.5} 暴露有关的死亡人数均将高达 100 万左右^[20]。就中国而言，2018 年燃煤发电排放相关的过早死亡人数达到 159,200 人，占全球火电 PM_{2.5} 污染相关过早死亡人数的一成以上^[25]。因此，应对这些挑战的最可行和最具成本竞争力的战略是迅速淘汰目前的燃煤电厂，并提高清洁可再生能源的渗透率，尽管在失业、能源安全和搁浅资产方面存在潜在风险^[26,27]。

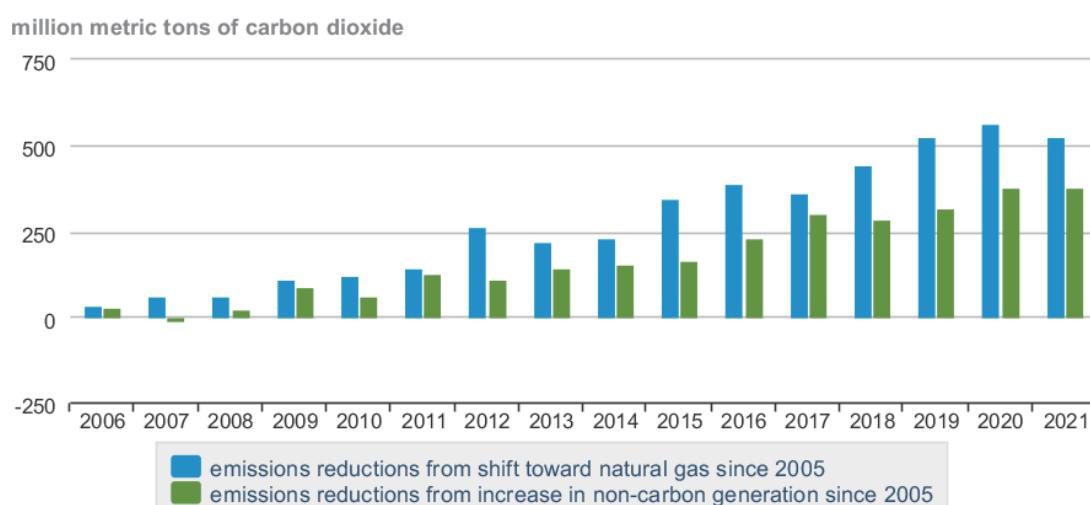
此外，燃煤电厂的减退会影响能源安全。2020 年中国的总用电量高达 7779.1 太瓦时，其中 63.2% 由燃煤发电贡献（4917.7 太瓦时）^[28]。虽然在 2℃ 和 1.5℃ 的气候目标下，中国总发电量预计到 2050 年将分别达到 12,500 太瓦时和 14,500 太瓦时，但燃煤发电的比例将逐渐减少，甚至将低于 800 太瓦时^[26]。由于新能源的稳定性和可靠性较弱，不受其日常和季节性周期的影响，燃煤发电的淘汰将对能源系统的安全构成巨大风险^[29]。此外，由于运营时间相对较短（平均运营时间不到 15 年），燃煤淘汰将导致中国大量搁浅的资产损失。以往研究^[30]表明，为了实现巴黎协定 2℃ 气候目标，预计到 2035 年，全世界化石燃料的累积搁浅资产将达到 1-4 万亿美元（相

相当于 2016 年全球 GDP 的 10% 左右) 折现财富损失。与发达国家的燃煤电厂通常已运行 30 年以上相比^[19]，由于中国的电厂机组比较年轻，煤电淘汰的常备资产和宏观经济影响会大得多。

二、美国退煤经验：迅速减少燃煤发电量与改善负担得起的、可靠的电网齐头并进

1. 美国监管燃煤电厂空气污染的经验

2005 年，煤炭发电占美国发电量的一半。2022 年，这一比例下降到 19%，被天然气、可再生能源和更高的能源生产力所取代。自 2005 年以来，这种煤电递减的趋势一直是美国温室气体减排的主要原因，它是三个主要因素的结果：燃煤电厂严格的污染标准，州清洁能源政策，以及燃料转向更便宜的天然气、风能和太阳能。



Data source: U.S. Energy Information Administration (EIA), *Monthly Energy Review*, October 2022, Table 7.2a, Electricity Net Generation: Total (All Sectors) and Table 7.3c Consumption of Selected Combustible Fuels For Electricity Generation: Commercial and Industrial Sectors

图 3–2 相对于 2005 年，由于电力发电燃料组合变化带来的 CO₂ 减排

美国环保署（EPA）是煤电厂大气污染和温室气体排放的主要监管者。EPA 制定基于健康的空气质量标准，然后制定技术强制标准以帮助达到这些空气质量标准。环保局还颁布标准，以减少煤电厂的水污染，包括与煤灰和洗涤器废物处置有关的污染。除了环保局为发电厂制定国家标准外，各州也被授权确保在本州范围内达到空气和水质量标准。在要求发电厂达到特定的性能标准之前，环保局必须进行成本效益分析。

在过去的二十年里，美国环保署一直在提高对新的和现有的燃煤电厂的污染标准的严格程度。这些标准已经将污染成本内部化，并导致数百家煤电厂退休或宣布

在十年内退休。自从美国环保署在 2015 年对需要 CCS 的新煤电厂采用温室气体标准以来，没有新的煤电厂破土动工，所有的电厂投资都在风能、太阳能、储能和天然气方面。2023 年 5 月宣布的现有煤电厂的二氧化碳污染标准将要求任何在 2035 年以后运行的现有煤电厂安装捕获率为 90% 的 CCS。类似的基载天然气厂标准将要求 90% 的 CCS 或掺入 96% 的氢气。

在过去十年中，一些煤电厂已经安装了主要的新污染控制措施，而另一些煤电厂则选择了退役，用更清洁的发电方式取代。下图显示了 2005-2019 年现有煤电厂如何高速安装 SO_x、NO_x、PM 和汞的污染控制。因此，自 2005 年以来，受管制煤电厂的平均账面价值翻了一番，这意味着与 15 年前相比，现在有更高的资本资产价值需要支付。这些控制措施可以在比过去更短的时间内摊销，从而为在未来十年内退役的工厂保留了大门。鉴于美国的政策是在 2035 年之前停止使用持续增长的煤炭，对消费者来说，更好的结果几乎都是退役而不是改造这些工厂。

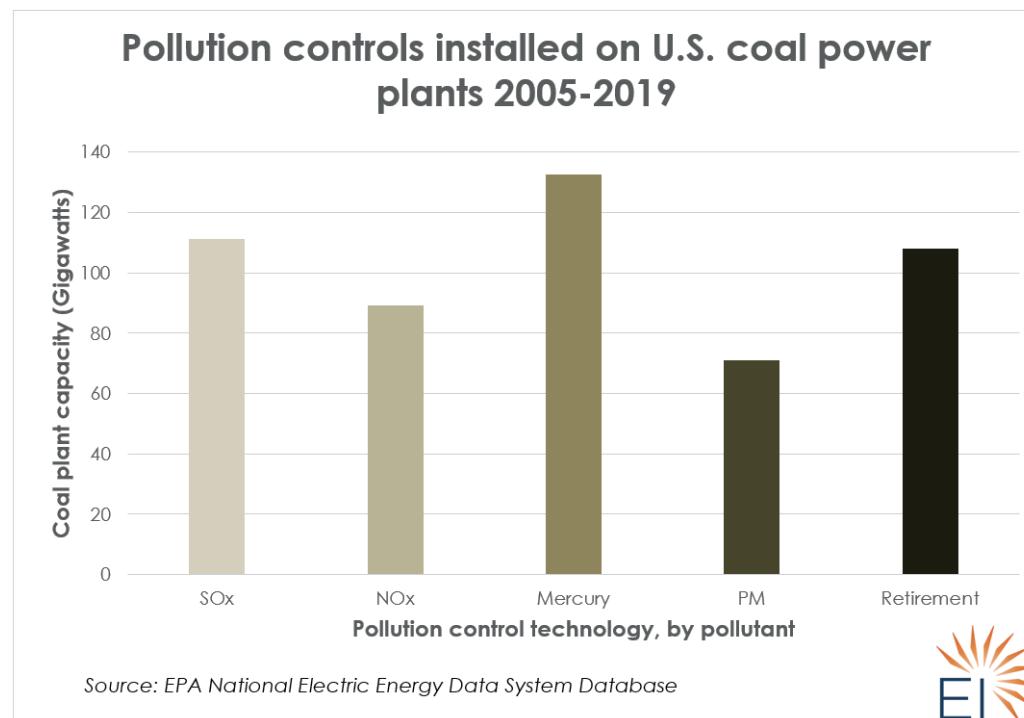


图 3-3 2005–2019 年间，美国煤电厂安装的污染控制设施

归根结底，对于温室气体排放和污染来说，重要的是每单位电力的污染率和燃烧的化石燃料总量。美国学术机构和能源创新公司的建模研究认为，到 2030 年消除煤炭是实现美国 2030 年国家自主贡献（NDC）的一个具有成本效益的途径。为了实现这一目标，美国正在依靠三个主要行动：1) EPA 的新一轮额外污染标准，包括现有天然气和煤炭的碳标准，2) 联邦对清洁能源和储能的新激励措施，使清洁能源在

大多数情况下比煤炭和天然气更便宜，3) 州清洁能源政策。

综上所述，我们从美国的经验中提出四点启示：

1. 当市场施加经济压力，要求减少发电量、改用清洁燃料或使电厂退役时，对现有燃煤电厂的污染进行监管可以产生巨大的温室气体共同效益。监管温室气体排放也可以带来巨大的污染减排共同利益，但在美国这样做的经验有限。
2. 减少化石电厂污染的最低成本解决情景绝大多数是转向零碳电厂、电池储能、需求侧管理和输电投资的组合。
3. 美国在十年的时间里将煤炭在发电中的份额从 50% 降至不到 20%，同时保持了可靠的、可负担的电力系统。
4. 电厂可以通过制定长期的电力部门碳目标来管理资产搁浅的风险，并确保对现有电厂的所有新投资——用于污染控制或其他方面——在符合碳减排目标的时期内摊销，包括拜登总统承诺的到 2035 年实现 100% 清洁电力。

2. 挑战和政策选择

在中国和美国，零碳发电和煤电之间的电厂成本动态是相似的——根据国际可再生能源机构的数据，中国最近的风能、太阳能和储能成本下降意味着新的风能和太阳能发电比现有的平均燃煤电厂更便宜。然而，中国的市场体系与美国截然不同。经济调度仍在不断发展，因此对污染的监管不一定会像美国那样具有减少温室气体的共同效益，在美国，较高的成本使效率较低的煤电厂更难竞争，并迫使一些老的煤电厂退休。在中国，改善经济调度可以成为一项减少温室气体的政策，因为更高效、更清洁的工厂将更多地运行，而更多污染的煤电厂将减少运行。同样，将经济调度的地理范围从省级扩大到区域，可以降低成本，减少可再生能源的弃电，解决仍在增长的电力部门的排放问题将有助于在 2030 年前碳峰值并开始有意义地减少排放。

由于严格的污染标准和严格的效率要求已经到位，中国电力部门未来的温室气体减排必须来自于燃料转换、CCS 改造或两者兼而有之。借鉴美国对特定污染物监管的脱节做法，中国有机会颁布整个行业的温室气体排放标准，允许国家以下各级政府灵活选择最优化其他公共政策和可靠性目标的技术。例如，美国对现有煤电厂提出的二氧化碳标准允许各州在退役、CCS 或燃气共烧之间进行选择。对现有燃气电厂的类似要求将允许大型基荷燃气电厂的业主在 CCS 改造、氢气混合或较低的容量系数之间做出选择，以符合要求。中国化石电厂的类似标准可以与省级和国家级清洁能源产能目标并存。

现在制定与中国碳目标相一致的标准，也有助于为中国煤电厂的持续扩张划定

一些界限，从而有助于避免搁浅资产或未来的更高成本。增加一个煤电厂可能意味着增加发电量——一旦资产建成，它至少可以持续 20-30 年。中国明智的做法是避免美国不经济的煤炭机组和天然气发电及基础设施所面临的迫在眉睫的资产搁浅问题。电力部门的温室气体排放标准可以帮助促进现在的燃料转换，并促进对清洁能源资源的考查，提供与新煤电厂类似的可靠性价值。在绝对必要的情况下，煤电厂的产能可以增加，但温室气体标准将对未减产的煤的利用施加事实上的限制，并促使低效的工厂减少运行。

可靠性是关键——煤炭仍然具有很高的可靠性和能源安全价值。但随着可负担得起的电网规模的电池储能的出现，清洁能源资源现在能够提供重要的可靠性服务。劳伦斯伯克利国家实验室最近的一项研究表明，不需要新的煤炭来维持一个可靠的电力系统，即使在研究的主要场景中，中国的清洁电力达到 80%，负荷增长 60%^[31]，现有的 1,100 吉瓦的煤炭可以与几百吉瓦的电池和抽水蓄能一起提供平衡，而可再生能源和核能开始提供绝大部分的能源。

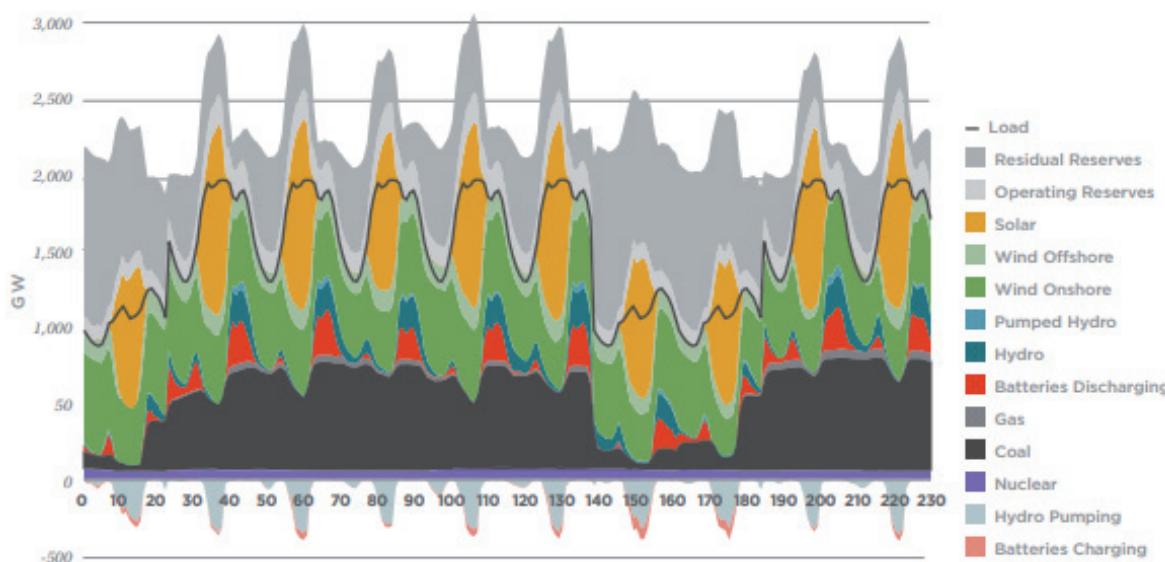


图 3-4 在 2035 年 80% 的清洁电力系统中，夏季最高净负荷周的国家系统调度，
10% 的电力需求尖峰^[31]

中国可以通过专注于向无碳来源的燃料转换，而不是通过更多的化石投资来推迟转型，如转换到天然气等中间化石燃料，从而跨越美国的步伐。针对整个电力系统的温室气体排放标准能够最大限度地提高灵活性和成本效益。由于竞争性市场仍在发展中，限制了效率对煤炭和可再生能源调度的影响，因此，对温室气体标准的额外关注对实现污染和温室气体减排的共同效益至关重要。

总的说来，政策将是电力部门减污降碳的关键。一个关键的政策将是建立煤电

厂或整个行业的温室气体排放标准，允许电厂经营者和国家以下各级政府灵活地使用哪些技术来减少排放。由于中国可再生能源的经济性非常有利，而且有了新的更清洁的选择来提高可靠性，有可能迅速减少燃煤发电，增加对可再生能源的投资，并更快地实现温室气体和污染的削减目标。

一些补充政策也将是实现这些目标的关键，同时保持可靠性并提高可负担的电力：

- 在全国范围内实施经济调度，以奖励更高的电厂效率，减少可再生能源的弃电，并促进经济的可再生能源和储能项目，与现有的煤炭发电竞争。
- 进一步扩大电力系统的可靠性义务，从省级规模到区域规模，建立试点项目经验。这将提高可再生能源的可靠性价值，改善输电规划，并为提高效率和加快可再生能源部署创造更多机会。
- 制定更新、更有雄心的清洁能源部署标准，包括电池储能部署目标，以帮助中国继续领导不断增长的清洁能源份额。
- 改变市场结构，向煤电厂支付可靠性服务的费用，同时不要求他们进行不经济的调度。考虑开发可靠性储能产品，作为支持可变可再生能源的可靠性措施，直到对可靠系统运行的信心增强。
- 继续加强对高可再生能源系统可靠性的研究。与其他国家的主要电网运营商合作，实施最佳实践建模，以更好地比较所有类型资源的可靠性贡献。
- 投资研究可调度的清洁能源资源，如先进的地热、先进的核电、氢能、长时储能和需求管理，以取代煤炭机组的产能价值。

三、煤电退役协同效益及靶向退役路径设计

1. 将健康协同效益纳入煤电退出的决策中

中国煤电的提前退出路径具有高度的不确定性，需要谨慎规划。由于现有煤电基础设施规模巨大和较短的投运时间，煤电机组的提前退出将面临巨大的风险。目前，煤电淘汰政策主要针对小容量、不达标的发电机组和自备电厂，沿用当前煤电淘汰策略很有可能错过了碳减排协同效益最大化的机会窗口，政策制定者在设计战略时应考虑更多因素。

煤电退出的首要目的是减缓气候变化，但同时也会削减大气污染物的排放，显著改善空气质量并带来可观的健康协同效益，有必要将煤电提前退出的健康协同效益应纳入气候政策的决策中。历史来看，中国煤电机组结构优化使2005-2015年间

人口加权平均 $PM_{2.5}$ 浓度降低了 $2.1 \mu g/m^3$ ^[10]。未来人口老龄化的加剧将进一步加剧中国煤电污染物排放的健康负担^[32]，保护公众健康应作为煤电提前退出的出发点，以协同治理气候变化和空气污染。针对中国电力系统脱碳路径的相关分析指出，煤电退役带来的区域健康协同效益，极有可能会抵消甚至超过气候变化减缓政策的执行成本^[32,33]。在实现自主贡献目标的路径中，中国电力行业的碳减排措施可以在 2050 年避免超过 36 万例过早死亡，其健康协同效益将高达减排政策实施成本的 3-9 倍^[34]。

值得注意的是，煤炭退出的健康协同效益在设备间有很大的差异^[35]”。在设计煤炭退出途径时，应考虑设施层面协同效益的异质性。针对高污染机组的靶向退役战略可以大大减少健康负担^[25]。因此，在设施层面的健康协同效益评估纳入煤电退出的政策设计中，在保护中国的公众健康、减缓提前退役的风险和实现效益最大化等方面具有重要参考意义。

除健康协同效益外，煤电提前退出对缓解水资源短缺、生态保护等方面也有积极影响^[36,37]。在 $1.5^\circ C$ 目标和更严格的碳减排目标约束下，除了新疆的某些地区外，煤电的退役将会大大缓解中国大部分流域的水资源压力^[38]。此外，煤电淘汰将减少冷却废水中的热量排放，减少对河流、湖泊等水生生物栖息地的热污染^[39]”。

2. 燃煤电厂靶向退役路径设计

设施层面的煤电退出评估分析符合中国当前的精细化治理原则。为了探索煤电退出的最佳路径，有必要从设施层面量化协同效益潜力，靶向淘汰高污染电厂，为中国煤电退出中的成本最小化和效益最大化提供科学支持。现有研究已经基于各类评估模型，如多目标优化、化学运输模型和成本效益分析，对煤电未来退役路径进行了探索^[38,26,29]。

从技术、经济和环境影响三个维度出发构建综合指标以制定各电厂的退役优先级，被识别为优先淘汰的煤电机组占中国煤电装机容量的 20%^[26]。这些优先淘汰的机组主要集中分布在中国中部和东部人口密集的高污染地区，特别是河北、黑龙江和山东等省，且具有规模小、寿命长、设备陈旧等特点。为了实现 $1.5^\circ C$ 的目标，当务之急是停止煤电基础设施建设，并迅速淘汰这些表现较差的电厂。对于其他现有的燃煤电厂，其平均寿命应进一步缩短到 20 年，或者将煤电年均运行小时数从 2020 年的 4350 小时逐步减少到 2030 年的 3750 小时。

煤电退役路径的健康协同效益高度依赖于策略的选择。相同碳减排量所带来的污染物减排量和健康协同效益因电厂机组的位置分布和技术属性而有很大的不同^[19]。例如，2010 年 0.8% 煤电装机容量（333 台）产生了中国燃电全部 $PM_{2.5}$ 排放量的

16%。同样，碳排放量占比为5%的燃煤发电机组可以不成比例地造成40%以上的健康负担^[35]”。在相同的气候-能源和清洁空气途径下，针对高污染机组的提前退役策略可以在中国避免数百万人的死亡，从而大幅减少健康负担^[25]。在中国有雄心的气候目标下，实施靶向退役和污染控制策略，能够在2030年避免近8万人因电厂排放而过早死亡。

为了减缓煤电退出带来的风险并深化脱碳进程，另一项研究在设备级电厂数据库和资源空间信息的基础上，探索了基于生物质掺烧及碳捕获与封存技术的中国煤电改造路径^[40]”。在生物质资源充足、混燃技术取得重大突破的路径下，基于生物质掺烧及碳捕获与封存技术的煤电改造方案有望帮助中国的电力行业在短时间内实现净零排放甚至负排放的目标，至2060年累计负碳量将高达10.32Gt。

尽管上述煤电退役路径分析存在不确定性，但它们为中国电力系统摆脱对煤炭的依赖提供创新思路和宝贵参考。然而，设计煤电淘汰路径仍然是一项复杂的工作，当前关于煤电退役的系统性分析仍相对薄弱。仍需解析当前和未来煤电需求增长的驱动力，探索扭转煤电发展趋势的可能性和关键因素；并从资产搁浅、资源禀赋、环境影响、社会公平和能源安全等多个角度构建煤电退役综合评估框架，为政策决策者提供多视角的定量分析方案。

此外，煤电退役并非电力行业减污降碳协同增效的唯一手段，仍需从源头控制、过程控制、末端治理等角度统筹耦合其他火电行业减污降碳措施。积极发展风光、生物质、绿氨等新能源发电技术，塑造低碳清洁安全新型电力系统。全面完成燃煤机组的超低排放改造，大力推进“三改联动”，实施存量煤电节能改造、供热改造、灵活性改造，平稳过渡到以降碳带动减污的火电发展新阶段。

四、煤电淘汰的政策建议

实现中国能源系统的深化脱碳和稳定转型，需加强顶层设计，将能源安全、资产搁浅和社会公平纳入煤电淘汰政策。保障能源系统的安全需要保证煤电的有序退役，使剩余的电厂有能力满足高峰负荷的需求，防止出现大面积的停电事故。事实证明，过于激进的燃煤发电逐步淘汰可能导致潜在的电力供应短缺，特别是在风能和太阳能发电量急剧下降的极端天气期间^[41]。如果可调度的能源发电机和储能不能提供足够的灵活电力，就会引发大面积停电事件，造成巨大的经济损失和社会问题^[41]。

此外，中国大部分燃煤电厂的运行年限不超过15年，比欧盟、澳大利亚和美国等发达国家的燃煤电厂年轻得多^[20]。因此，不考虑搁浅资产的快速退役政策将造成巨大的资本损失^[42]。此外，燃煤电厂的潜在经济和社会损失可能会在不同的利益相关者、群体和地区之间存在巨大的差异，对于经济发展和就业严重依赖燃煤发电相

关产业的地区可能会造成更为严峻的挑战^[30,43]。因此，未来的煤电厂淘汰战略需要考虑到社会公平，特别是对利益相关者的生计，尽管燃煤电厂的退役对气候减缓有全球性的影响^[44]。

此外，建议加快现有燃煤电厂的灵活性改造，增强为不稳定的风能和太阳能出力调峰装机。预计 2035 年后，太阳能和风能等可再生能源将在电力系统中占主导地位，届时一半以上的电力需求将由太阳能、风能和水力发电来满足，从而提高电力系统的脱碳程度^[26]。随着中国低碳能源转型的推进，燃煤发电的角色将从支撑性电源转变为调节性的备用电源，以适应在不断变化的气候背景下来自风能和太阳能的间歇性电力供应的调峰需求^[45]。然而，为波动的可再生能源电力供应充当峰值负荷调节器的煤电厂将导致运营成本、温室气体和空气污染物排放的增加^[46]。对于充当峰值负荷调节器角色的燃煤电厂而言，长期低负荷的运行将导致单位发电量污染物和温室气体排放增加。因此，未进行灵活性改造的传统燃煤机组通常不能满足整合高份额太阳能和风能的灵活性要求^[47]。这一主要是由于煤电机组的低负荷运行使得热损失增加，发电效率下降，从而提高了煤耗和运行成本^[47,48,46]。因此，未来需要加紧对燃煤电厂进行灵活性改造，以满足风光能巨大的调峰需求，并控制调峰期间的污染物排放水平。

此外，燃煤电厂可以改造为生物质能发电厂。大力推广生物质液体燃料在火电中的应用能够提高农林废弃物利用的产业化水平，并带来以下一系列收益。一方面，它将减少现有火力发电厂的退役装机，从而降低资产搁浅和相关社会问题的风险，如失业和经济停滞^[49]。另一方面，生物质发电厂能够提供清洁和可再生的电力供应，这将加快净零排放电力系统的构建速度，促进未来气候目标的实现^[22,23]。此外，与燃煤电厂相比，生物质能发电厂有望提供更加灵活的电力供给，以满足具有高度波动性的风能和太阳能带来的电力调峰需求，保障电力系统安全。此外，生物能源可以考虑与碳捕获和储存技术结合（BECCS）——长期以来被认为是最有前途的负排放技术之一，以期去除大气中的温室气体，尽管 BECCS 技术目前的成本较为昂贵，并且会造成一定的污染物排放^[22]。

第4章 交通部门：重点问题与减污降碳挑战

一、引言

作为本地和全球污染物的主要来源，重型货车应成为排放协调控制的重点。重型货车（HDTs）通常消耗柴油，用于高强度作业，年行驶距离大于 75,000 公里，重量超过 12 公吨，与主要以汽油为燃料的乘用车相比，传统重型货车中的柴油燃烧会产生更高水平的本地和全球空气污染物。2021 年，HDT 在中国的机动车（不包括摩托车）中占 3.08%，但它们排放的污染物中，有很大一部分对公众健康造成严重损害，占机动车排放的颗粒物（PM）的 51.5% 和氮氧化物（NO_x）的 76.1%（MEE, 2022）。同行评议的研究显示清洁空气的改善^[50,51]，加速部署新能源汽车（NEVs），包括纯电动车、氢燃料电池车辆和插电式混合动力电动车，挽救了成千上万的生命^[52]。

在温室气体排放方面，HDT 在中国交通部门的二氧化碳排放中占 30% 左右^[53]，与零排放的电力一起，电动汽车创造了一条实现净零排放的途径。与全球趋势一致，中国的电力正变得越来越清洁，随着太阳能和风能技术的成本下降和快速采用，这一趋势将继续下去。自 2020 年以来，可再生能源技术已经占据了全球新发电能力投资的一半以上，中国的可再生能源部署比其他任何地方都多^[54]。

除了减少污染，加快 NEV 部署的建议将带来两个经济上的收益：第一，通过增加对创新的激励，将推动国内技术进步；第二，通过加快技术进步，使中国企业在规模和经验上积累早期优势，提高中国新能源重型货车制造商的竞争力。2010 年，“十二五”规划将 NEV 生产确定为国家战略产业。由于这一举措和其他行动，中国已经成为全球新能源乘用车和新能源客车出口的领导者。过去的成功显示了中国有可能在不断增长的国际零排放重型货车市场上获得同样的先发优势^[55]。

由于 2010-2021 年电池成本下降 89%，主要由中国政策和企业推动，所有类型的新能源汽车的销售正在全球范围内起飞，并得到日益积极的经济效益的支持。由于未来的学习曲线效应，这种性能提高和成本降低的趋势将继续下去。创新将来自于越来越多样化的商业化电池化学的进步，以及随着生产的增加而不断学习的过程。由于规模经济的好处，人们对未来成本的降低也很有信心。根据目前的计划，到 2030 年，全球电池产能将扩大至少五倍，即至少增加 500%^[56]。

提高能源安全是中国加快向零排放重型货车转型的另一个原因，它有三个优势。首先，NEVs 建立在中国在电池制造业的强大地位之上。相比之下，传统汽车已经使中国成为世界上最大的石油进口国。相比之下，中国在电池生产所需的原材料矿物加工方面具有主导地位^[57]。由于矿物精炼是关键矿物供应链中技术上最复杂的环节，也是最重要的环节，而且由于大多数矿物在全球范围内分布良好，加快 NEV 转型将增强中国的能源安全^[58]。其次，对进口石油燃料的依赖本身就比对重要电池矿物的依赖风险更大。石油价格飙升会立即影响到所有燃油车辆，无论其新旧。对加油的需求是持续的。相比之下，矿物价格的波动可能对大多数消费者没有影响，因为它们被嵌入到非常不频繁的资本购买中。第三，石油燃料的使用涉及其完全转化为废物——未使用的热量和不必要的空气污染物，电池在寿命结束时仍可进行回收和再利用电池中的矿物。

二、中国重型车电动化发展经验与挑战

1. 中国电动重型车推广现状

中国是目前世界上拥有电动重型车数量最多的国家，2021 年中国电动重型车保有量占全球总保有量的 90% 以上。过去几年，中国新能源重型货车的销量与新能源乘用车市场的早期腾飞有相似之处。2018 年，中国成为第一个电动车销量超过 100 万辆的全国市场，此后一直是最大的电动车市场。在商用车购置激励措施的推动下，零排放重型货车销量在 2018 年短暂达到了 1.7% 的峰值^[57]，在过去的两年里，NEV 销售开始重新起飞，在 2022 年增长到 HDT 销售的 3.5%。中国电动汽车百人会副会长欧阳明高最近预测，2023 年 NEV HDV 的销量将至少增长 90%，这一展望是我们在图 4-1 中对 2023 年 6.6% 的销量估计的基础。到目前为止，纯电动占据了 90% 以上的新能源重型货车销量，尽管氢燃料电池车辆也符合条件，且它们在 NEV 中的份额一直在增加^[59]。

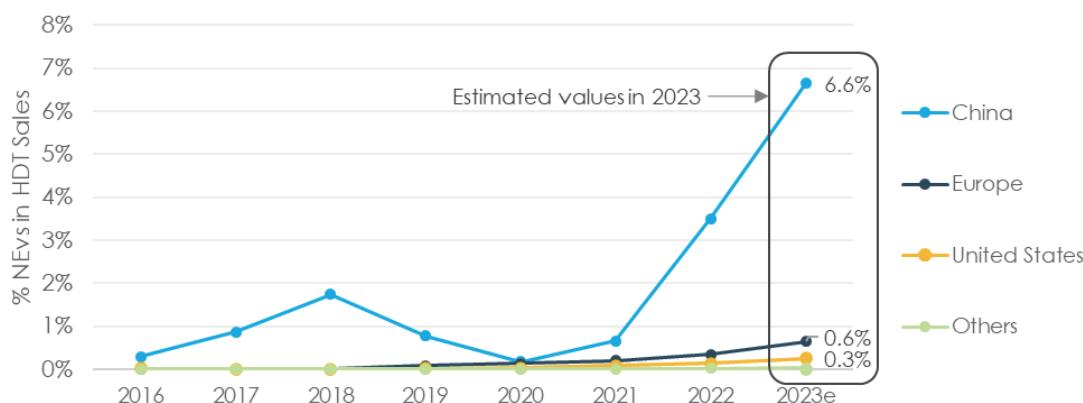


图 4-1 新能源汽车在全球重型卡车销售中的份额^[60-62]

在推广电动重型货车的过程中，中国一直非常重视公共车队的示范效应，大力推动出租、公交、环卫、城市货运等车辆的电动化，全国公交车电动化比例已从2015年的20%提升至2020年的60%。北京、深圳等多个城市明确了公共领域新能源汽车的推广比例要求和全面电动化时间，例如，深圳早在2018年即实现了全部出租和公交车队的电动化；北京除明确对新能源车公交车和出租车的要求外，对新增的环卫车、机动车铁路作业车辆也提出了不低于50%的电动化比例要求；上海和天津提出到2020年城区公交车全部更新为新能源车。如图4-2所示，2018-2020年全国新增新能源大客车和货车共计47万辆，以公交车和轻型货车（总质量4.5吨以下，主要为环卫、邮政、城市物流）为主（占比90%以上）。在先行城市示范的基础上，2020年国家发布的《新能源汽车产业发展规划》明确提出，从2021年起，重点区域新增或更新公交、出租、物流配送等公共领域车辆，新能源汽车比例不低于80%。

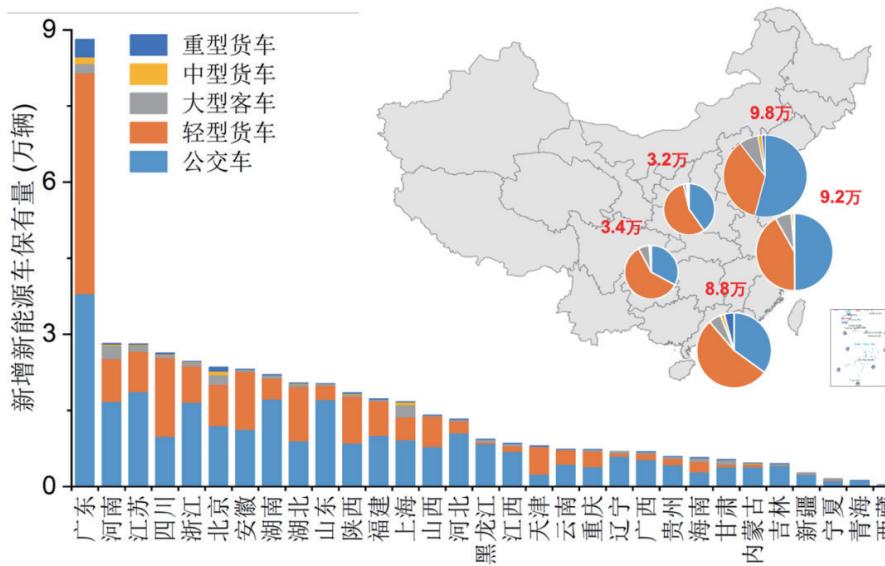


图4-2 2018—2020年全国各省市（不含港澳台）货车和大型客车中新能源车新增量

2. 中国电动重型车推广相关政策

在消费环节，中国政府除为电动重型车购车者提供补贴和贷款政策优惠外，同时对符合条件的电动重型车免征车辆购置税；在使用环节，政府对电动重型车实行较大力度的路桥通行费优惠，并且大力推动物流园区、公路服务区等场所的充电站建设。同时，部分城市对传统柴油重型车设置了较为严格的准入政策，电动重型车不受此类限行措施限制。中国对电动重型车的支持政策覆盖了新能源车生命周期多个环节，极大推动了电动重型车的推广。

除国家补贴外，部分省市也出台了新能源重型车的地方推广政策。如深圳市通

过进一步优化新能源汽车的商业运营模式，形成了“政府扶持监管、企业融资运营、技术创新规范”的特色，一方面既发挥政府的方向引导作用，另一方面又引入金融机构实行租赁制，激发市场活力。此外，还鼓励引入电力部门和社会各方的参与，基本实现经济效益的突破。

政府支持换电车的举措最近在中国的成功中发挥了重要作用。换电技术包括将电池电动车开进换电站，在那里，耗尽的电池被取出，换上充满电的电池组^[63]。目前使用最新的设施，整个过程是自动化的，可以在几分钟内完成^[64]。节省时间对于全天运行的商业车辆，或在远离固定充电设施的远距离行驶的司机来说尤其重要^[65]。

3. 典型城市电动重型车经验

深圳是中国电动车推广的先行城市。2016 年至今，深圳持续完善新能源汽车产业的标准体系建设，建立了运营车辆及动力电池使用阶段的检测认证体系、动力电池的信息管理体系、动力电池梯级利用和再生利用产业体系，为新能源汽车的良性发展提供持续而坚实的保障。此外，在配套设施建设方面，深圳市严格要求新建建筑按照 30% 比例配建充电桩，既有住宅区和社会公共停车场按照 10% 比例配建充电桩，引导更多社会资本参与充电设施建设，为深圳电动车的快速发展打下了坚实的基础。

为进一步改善道路通行环境，解决轻型柴油货车污染问题，深圳于 2018 年在全国率先创新试点，在全市范围内设立“绿色物流区”，示范使用新能源物流车。自 2018 年 7 月起，“绿色物流区”全天禁止轻型柴油货车驶入，仅允许电动货车通行。“绿色物流区”的设置给新能源物流车提供了路权优惠，解决了早期新能源物流车没有通行优势、运营积极性不高的问题，对深圳市新能源物流车的推广和使用起到了积极推动作用。截至 2020 年底，深圳市轻型新能源货车已积累推广 8.6 万辆，相比 2017 年保有量增加了 91%，轻货车队的新能源比例达到 22%

经过十余年的积累，深圳市电动重型车推广在公交、出租、物流等多个领域均取得令人瞩目的进展：2017 年在全球率先实现公交车全面电动化；2018 年底实现出租车全面电动化，成为全球推广应用纯电动出租车规模最大的城市；截至 2020 年底，推广纯电动泥头车 4275 辆，规模位居全球第一。

4. 中国电动重型车推广面临的挑战

尽管近年来快速发展较快，目前中国电动重型车推广仍存在行驶里程短、充电基础设施有限的现实挑战。以城市电动物流车为例，目前电动物流车平均日行驶里程为 109 km、平均日出行天数为 233 天，远低于柴油物流车日行驶里程均值（252 km）和日出行天数（320 天）。低活动水平抑制了电动货车在燃料周期的减排潜力

的发挥，并直接导致其总拥有成本（total cost of ownership, TCO）高于柴油货车，失去经济竞争力。此外，目前公共充电基础设施较为有限，这对推广高负载、高电耗、充电频繁的电动牵引车带来了挑战。

三、重型车电动化的加州经验

1. 国际政策背景

缔约方大会第二十七届会议上，全球商用车零排放倡议正式启动，到2023年初，有27个国家成为该倡议的支持者。这些领先的国家承诺共同努力，到2040年实现100%的新零排放卡车和公共汽车的销售，过渡目标是到2030年实现30%的零排放车辆销售。这一努力旨在促进到2050年实现净零碳排放一年前，在2021年的缔约方大会第二十六届会议上，为商用车部署了高目标的NEV，2021年12月，14个国家和几个国家以下的政府、制造商和承运公司签署了关于零排放中型和重型车辆的初步谅解备忘录（MOU）。

在美国，重型商用车的销量预计将在2030年达到39-48%的NEVs^[66]。该预测没有考虑到2023年4月12日美国环保署的一项提案，该提案预计将导致电动汽车在专用车辆（如公共汽车和垃圾车）中占50%，在新的短途货运牵引车中占35%；以及在2032年长途货运牵引车中占25%^[67]。在另一项重大发展中，欧盟在2023年初发布了一项计划，通过有雄心的卡车新标准加速NEVs商用车的采用，要求其尾气碳排放在2030年下降45%，2035年下降65%，2040年下降90%^[68]。

2. 加州政策案例研究

2021年，加州的先进清洁卡车政策使该州处于专门针对NEV货车发展的前沿，要求2035年在加州销售的新重型货车和巴士中，约有60%是NEV^[69]。与中国的双重信贷政策一样，先进清洁卡车是一项技术中立的政策，意味着电动卡车或氢燃料电池卡车都有资格。图4-3显示了先进清洁卡车政策对不同车辆重量级别的NEV销售量要求，以及基于预测的未来销量的加权平均值。

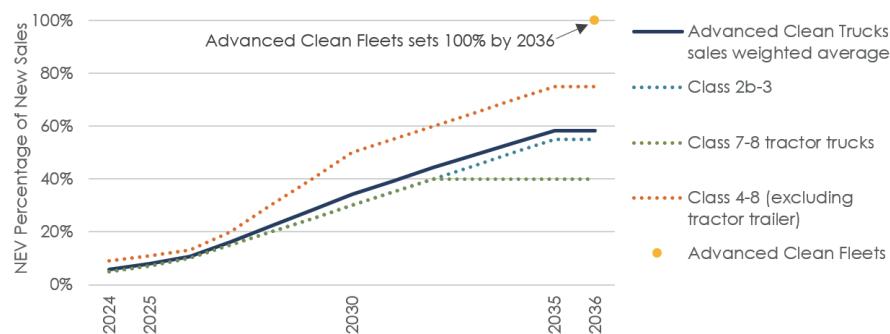


图4-3 加州先进清洁卡车和先进清洁车队政策下的NEV销售情况^[70,71]

当加州在 2020 年首次制定其先进清洁卡车措施时，它是第一个此类措施。在过去的两年中，可获得和计划获得的 HDT 车型激增，特斯拉已经开始交付大规模生产的牵引卡车，一次充电可行驶 800 公里。由于这些原因，以及其在 2045 年之前实现交通和经济领域碳中和的承诺，加州最近加快了完成向 NEV 商用车过渡的预定时间表。

2023 年 4 月 28 日，加州空气资源委员会批准了先进清洁车队规则，开启了商业车辆监管的新篇章，在 2036 年之前将该州 3.86 吨以上的所有商业车辆的 NEV 卡车销售要求提升到 100%，如图 4-3 所示先进清洁车队规则的另一个值得注意的特点是一个政策创新，即减少对政府资助的消费者激励措施的依赖，逐步提高商业车辆车队的 NEV 购买要求。这种支持市场向 NEV 过渡的需求方的新颖方式，释放了政府收入用于其他投资^[72]。

加利福尼亚州采用 NEV 销售标准来推动商业部署，是基于该州对乘用车（如轻型乘用车）采取类似政策的成功经验。2022 年，NEV 销售量达到加州乘用车销售量的 20%^[73]，该州针对乘用车的 NEV 销售标准一直是这一结果的重要推动力，包括直接促进了特斯拉的成功^[74]。自 2009 年以来，加州 NEV 信贷为特斯拉带来了约 25 亿美元的货币收益，是所有州项目中最多的，在早期的关键时刻提供了现金流，使特斯拉在某些方面进入了盈利状态^[75]。加州大学戴维斯分校交通研究所的创始主任丹·斯珀林总结说：“如果没有加州的 [NEV] 授权，特斯拉将破产并消失”^[75]。

四、中国重型车电动化的减污降碳效益评估

1. 协同可持续电力系统的新能源车生命周期减污降碳潜力分析

新能源车的污染物、二氧化碳减排潜力需要采用生命周期评价方法开展系统评估。生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）是系统评价一类产品从资源开采、生产、运输配送、使用到报废回收阶段等整个生命周期内环境影响的方法。美国阿岗实验室（Argonne National Laboratory, ANL）开发的 GREET 模型（Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation）是交通领域广泛使用的 LCA 模型，包含对车辆燃料周期（Well to Wheel, WTW）、材料周期（Vehicle Cycle）两方面的评价，其中前者关注能源生产与行驶阶段的应用，后者则关注汽车材料 / 零部件从原材料开采到最终的报废回收的整个过程。

然而，考虑到对燃煤发电的高度依赖，公众对 BEV 减少二氧化碳排放的实际影响仍有争议。早期阶段的 LCA 研究集中在 WTW 的研究上，因为当时燃料循环被认为是整个生命周期中二氧化碳排放的主要部分。之前的研究认为，2010 年左右，在煤电丰富的地区（如华北地区），BEV 相对于汽油车在减少 WTW 二氧化碳排放方

面的优势非常有限，而在华南地区，鉴于其相对清洁的电力结构，BEV 可以有效减少 WTW 二氧化碳排放。因此，在分析 BEV 的 WTW 排放时，电力结构的空间或时间差异成为一些后续研究的重点。在过去的十年中，更清洁的电力结构推动了中国 BEVs 的 WTW 二氧化碳排放量的快速下降，即使在华北地区，BEVs 也可以很容易地提供 WTW 二氧化碳减排。最近的研究试图将一些基本的车辆循环部件的局部概况引入全生命周期的边界水平，发现并提出车辆循环包括电池及其原材料的生产贡献了相当大的份额（如 >25%）。

基于 GREET 模型的分析结果显示，由于区域电网的电力结构不同，各区域电动汽车的全生命周期 CO₂ 排放强度存在差异。考虑 2020 年全国平均电力结构（煤电比例 60.2%），配备 NCM 电池的电动车、配备 LFP 电池的电动车和传统燃油车的全生命周期 CO₂ 排放量分别为 165 g/km、153 g/km 和 280 g/km。据此可以计算得，电动车相比于传统燃油车可实现至少 40% 的削减效益。不同地区的煤电比例和可再生能源比例将对这一数值产生较大的影响，如华北电网拥有最高的煤电比例（78.8%），该区域电动车的 CO₂ 减排效益仍可达到 30%，西南电网拥有最高的水电比例（68.3%），该区域电动车 CO₂ 排放的削减效益甚至超过 60%。总的来看，中国电动车相对于传统燃油车具备至少 30% 的 CO₂ 减排优势。

未来随着电力的进一步清洁化、电池技术进步、车辆能源效率的提高等一系列电动汽车应用条件的改善，中国电动汽车的全生命周期 CO₂ 排放强度还将大幅降低，如图 4-4 所示。预计到 2030 年，配备镍钴锰（NCM）三元锂电池的电动车的排放强度将降低至 93 g/km，降幅高达 53%。各区域之间的差异也进一步缩小，如华北电网的电动车排放强度为 109 g/km，西南电网的电动车排放强度为 65 g/km。

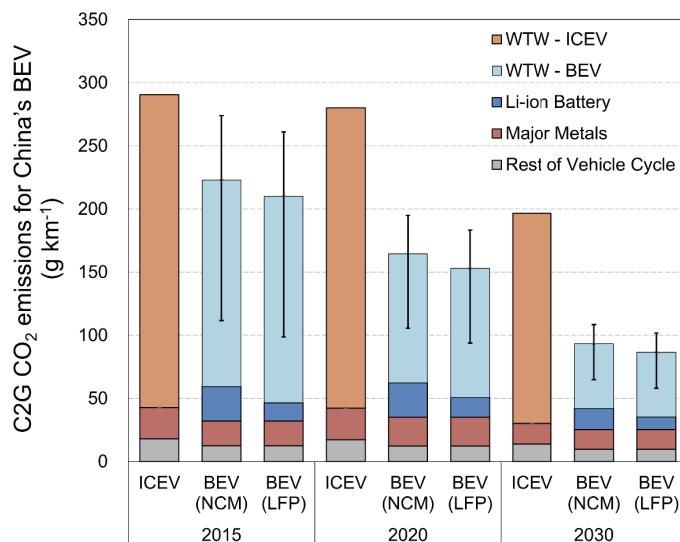


图 4-4 中国电动汽车的全生命周期 CO₂ 排放及未来预测

在有序充电的情景下，当电动车最大化利用可再生能源电力时，电动车与可持续电力可协同实现 CO₂ 深度减排。研究发现，在有序充电调节下，可实现电动车燃料周期 CO₂ 减排 20%，充电成本减少 50%，同时节省了 95% 的新建电力机组需求。利用电动车充电设施的灵活性，可以在电力和交通系统之间实现协同效益，实现更高电网稳定性、更低的燃料成本和深度减排。

2. 建模评估加速重型车辆电动化不同进程方案

为了定量评估 HDT NEV 部署的减排潜力，我们使用中国能源政策模拟模型（China EPS），这是一个由能源创新政策与技术有限公司和中国绿色创新发展项目开发的一个开源的、经同行评议的模型^[53]，通过比较不同政策情景下的能源使用、排放、成本和其他模型输出，确定最有效的政策组合。作为一个覆盖整个经济领域的系统动力学模型，中国 EPS 官网既能计算出增加零排放重型货车部署对交通的直接影响，也能计算出包括整个经济在内的更广泛的能源系统效应。

如表 4-1 所示，我们利用中国的 EPS 分析了两种加速的 NEV 部署情景。在建议情景中，与本章建议的部署目标一致，零排放重型货车销量在 2030 年达到 45%，2040 年达到 100%。在中情景中，NEV 的销售在 2030 年达到 30%，在 2045 年达到 100%。建议情景和中情景的影响都是与“十四五”规划情景（中国 EPS 的预设情景之一）进行比较计算的。

表 4-1. 所分析的中国 EPS 情景（NEV 占所有 HDT 新销量的百分比）^[53]

	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
推荐情景	13%	45%	75%	100%	100%	100%	100%	100%
中情景	9%	30%	55%	75%	90%	100%	100%	100%
十四五情景	6%	19%	36%	44%	45%	46%	47%	47%

接下来的结果将从两个时间角度提出，分别延伸到 2040 年和 2060 年。前一个时间框架为早期影响提供了更好的分辨率，第二个时间框架与中国的碳中和承诺相一致。第一组结果使用三个类别对整个经济的影响进行分解：交通、电力和系统平衡。

1. 交通，交通部门的影响反映了污染物排放的变化，但只关注车辆本身的排放，即狭义上的车辆尾气排放，这不包括与生产汽油和柴油交通燃料的石油炼制有关的排放，以及新能源的排放。中国 EPS 在工业排放项下单独跟踪与发电、石油提炼和制氢相关的排放。
2. 电力，电力部门的影响是指由于增加使用电力作为交通燃料而增加的排放。下面的结果中与电力有关的额外排放是基于第十四个五年计划情景下计算的

污染物排放强度，其中清洁能源——包括可再生、水电和核技术——的比例在2030年达到40%，2040年达到52%。任何年份、任何情景下的清洁电力来源份额都可以从网络应用程序的数据可视化标签中获得，标签为“发电量、容量和需求——清洁来源的发电份额”。

3. 系统平衡。系统平衡效应综合了交通和电力以外的其余效应。与石油提炼相关的工业排放的额外减少是最重要的单一贡献者。

4. 净减排量。净效应计算的是前述影响的总和。

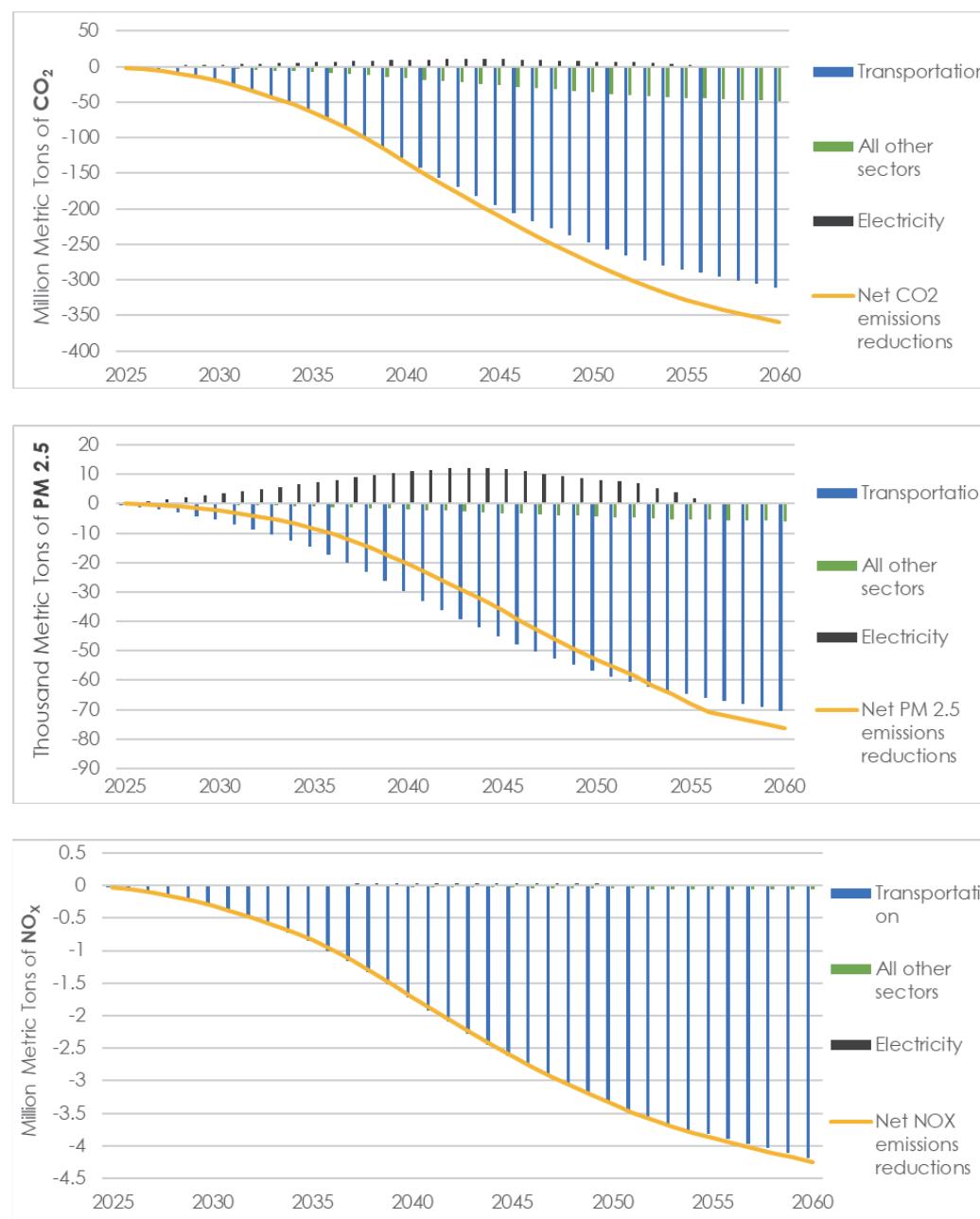
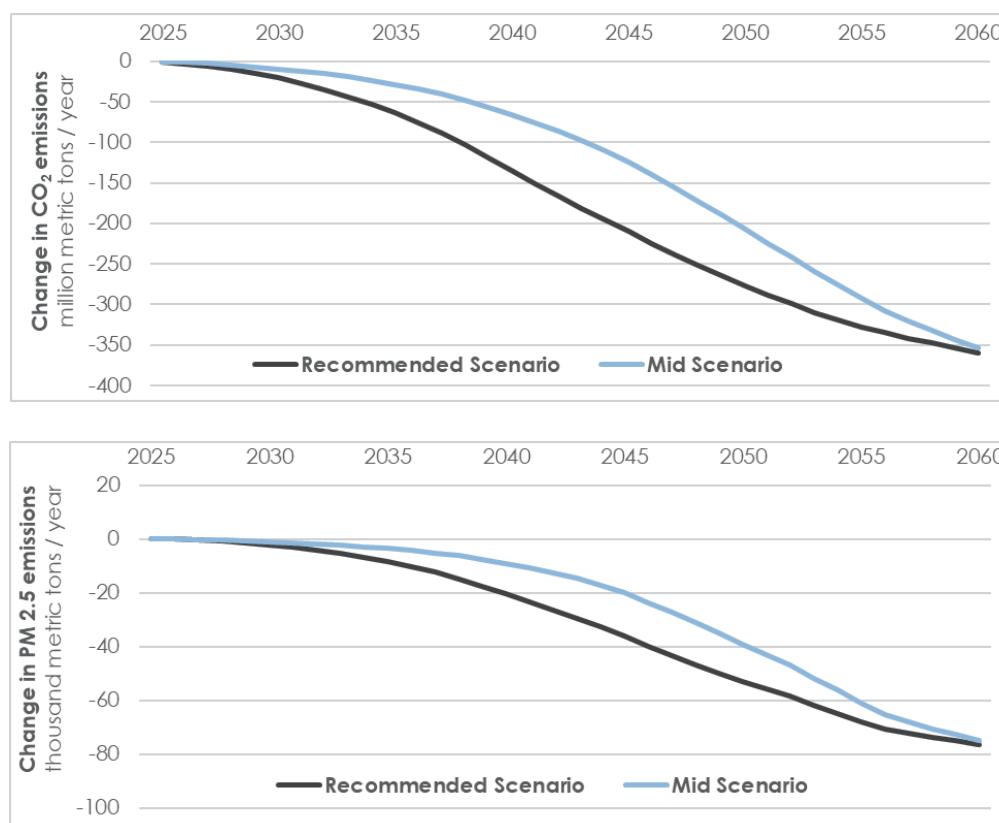


图4-5. 建议情景中整个经济体的CO₂、PM_{2.5} 和 NO_x 的减排量

上述结果表明，NEV 部署的净效益取决于发电的污染物排放强度，特别是 PM_{2.5}。只有在 2026 年，与交通相关的 PM_{2.5} 排放的减少才开始超过由于额外的零排放重型货车带来的更大的发电需求而增加的 PM_{2.5} 排放。随着更多的清洁能源进入电力系统，交通的 PM_{2.5} 优势迅速增长，到 2030 年，带来 50% 以上的效益，即以 1.5 个单位的交通减排量对 1 个单位的电力减排量的比率来实现减排。在 2035 年，交通与电力的效益比例已经增长到超过二比一的优势。在以后的几年里，随着“十四五”规划情景中清洁电力的使用继续增长，由于零排放重型货车增加的电力使用而导致的 PM_{2.5} 排放继续下降，达到了很低的水平，在上图中已经难以识别。

公共健康的影响取决于人们在最初排放时对空气污染物的暴露程度，即污染物最集中的时候。机动车尾气排放在人口稠密的城市地区更频繁地释放，导致更高的暴露和摄入率。在中国，交通在与暴露和环境空气污染有关的损害中所占的比例在上升。归因于交通的健康危害的比例从 2005 年的 8% 上升到 2015 年的 14%，而电力引起的比例从 13% 下降到 6%。在加州，据估计，居民癌症发病率的 70% 可归因于柴油发动机的排放造成的有害空气污染物。加州空气资源委员会的结论是，颗粒物排放的危险因其位置而加剧；它们“经常在人们身边排放，所以会出现高暴露度”。此外，柴油机尾气中还含有 40 多种致癌物质，“其中大部分很容易被吸附在烟尘颗粒上”，这也放大了柴油机尾气的危害。

下一组结果，图 4-6 提供了建议情景和中情景的净减排量的比较。



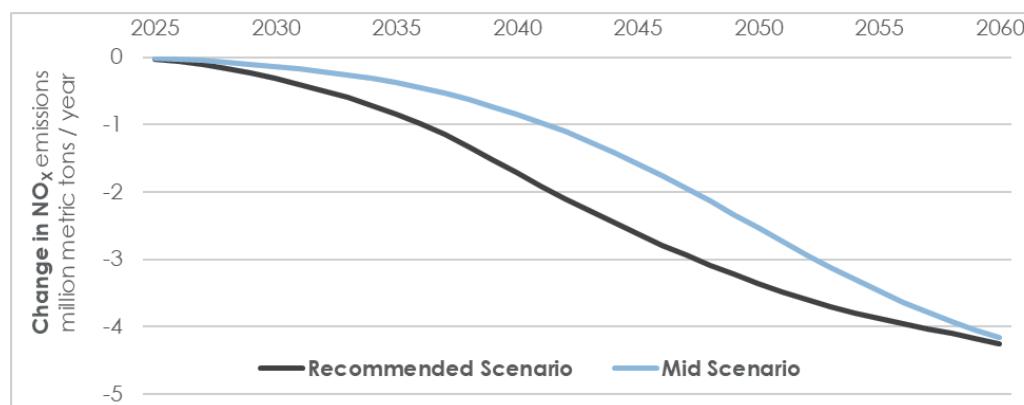


图 4-6 建议情景与中情景中交通部门减排量的比较^[53]

图 4-6 中建议情景与中情景的净减排量的比较表明，建议情景在 2020 年代和 2030 年代产生的减排量明显更大。在 2030 年，建议情景推动脱碳的速度是中情景的两倍。然而，在接近 2060 年时，每年的影响越来越相似，因为建议情景和中情景在 2045 年后都模拟了 100% 的零排放重型货车销售。建议情景在最初几十年的显著边际优势在 2060 年之前产生了额外的 9.47 亿吨 CO₂ 累积减排量。

技术可行性

国际清洁交通委员会的结论是：“商业可用性和总拥有成本预测分析表明，2030 年 45% 的零排放重型货车销量和 2040 年 100% 的销量是可行的目标”^[76]。本章结果部分探讨了技术、投资和市场趋势，以使能够迅速转向零排放重型货车销售。

建议有雄心的零排放重型货车部署目标可行性的一个指标是，需要零排放重型货车在销量上的增长速度慢于中国轻型乘用车市场历史上的增长速度。从 2015 年到 2022 年，中国轻型乘用车 NEVs 销量的年平均增长率为 62%。相比之下，从 2022 年的实际水平来看，41% 的年增长率可以实现 2030 年 NEVs 占 HDT 销量 45% 的建议目标。

考虑到历史投资和已发布的承诺，由于行业投资增加的趋势，市场势头将持续。清洁技术投资在 2022 年首次突破 1 万亿美元，其中电气化交通的增长速度超过任何其他类别。电气化交通的投资首次接近压倒可再生能源，2022 年的投资额为 4660 亿美元，比 2021 年多 54%，车型供应量的增加是投资增加的一个结果^[77]。对现有零排放重型货车车型的全球梳理显示，2021 年有 158 款，2023 年初达到 352 款。矿物投入的投资也在上升，关键矿物的探明储量正在增长^[78]。例如，在过去五年中，锂的供应量增长了 60% 以上^[78]。

谈到技术趋势，人们对未来几年电池创新的继续发展很有信心，因为有一系列

的创新有可能取得商业成功。推进到商业准备阶段的电池创新包括从渐进性创新（例如完全不使用锂的钠电池^[79]，以及合成石墨正极^[80] 到变革性创新（固态电池）^[81]。电池技术的快速发展经常让能源和交通建模者感到惊讶，甚至超过了他们的乐观设想，这是大多数当前展望低估了电动车电池技术未来学习曲线效应的另一个原因^[82]。

另一个有希望的技术经济发展涉及到磷酸锂离子电池不断上升的商业成功，这种电池不需要钴，并提供了一个负担得起的替代品，尽管代价是能量密度较低。BloombergNEF 预测，磷酸锂离子电池的市场份额在 2023 年将达到 40%，高于 2022 年的 25%，而 2019 年的市场份额还不到 10%^[83]。

越来越多的电池储能技术通过相关的创新和经济效益，促进了零排放重型货车快速部署的可行性。更多的商业上可行的电池技术增加了技术情景的可能性。更多的电池多样性也提供了成本下降的压力，创造更多的竞争压力和替代的可能性。我们在市场对磷酸锂离子电池的拥抱中已经看到了这种证据，因为它们具有成本效益的优势。

由于这些趋势和其他原因，按照建议快速部署零排放重型货车是可行的，但这并不是说简单或容易。建议的 NEV 转型将带来挑战，但克服这些挑战的努力是非常值得的，它将带来排放效益和经济回报的有力结合。

五、经济效益：创新刺激和增强经济发展

建议的政策将在技术创新和促进经济发展方面带来经济上的共同利益，此外，地方和全球空气污染物也是其主要目标。通过加快向零排放重型货车的过渡，中国的政策制定者可以刺激更多的学习曲线向上发展，提供创新、更好的性能和更低的成本。

最近一项关于中国轻型乘用车双积分政策的研究实证分析为这种好处提供了证据，“由于创新能力的改善和企业声誉的提高”^[84]。双重信用政策为所有制造商设定了一个全行业的标准，但在单个企业层面提供了灵活性。当领先的 NEV 制造商销售的 NEV 百分比高于行业的平均要求时，他们会获得 NEV 信用额度。低于整个行业要求的企业可以购买 NEV 信用额度来遵守。这种灵活性使企业可以采取不同的合规方式。反过来，允许异质企业采取不同的合规策略，通过引导投资于最高价值的选择来刺激市场效率，并通过奖励那些超出最低平均合规要求的企业来鼓励创新。

由于支持加速 NEV 部署的政策而产生的国内创新刺激将反过来提高中国零排放重型货车生产商的国际竞争力。随着时间的推移，这种好处的意义将越来越明显，考虑到人们对 NEV 有望成为首选交通技术的共识。

中国在十二五规划中把 NEV 视为具有重要经济意义的产业，而出口数据表明中国支持 NEV 的政策已经带来了经济红利。NEV 出口的激增使中国超过德国，成为全球第二大机动车出口国^[85]。2022 年，重型 NEV 出口比 2021 年增长 131%，而乘用车 NEV 出口增长 120%^[72]。到目前为止，客车占中国重型 NEV 出口的大部分，但货车部分正在增长。

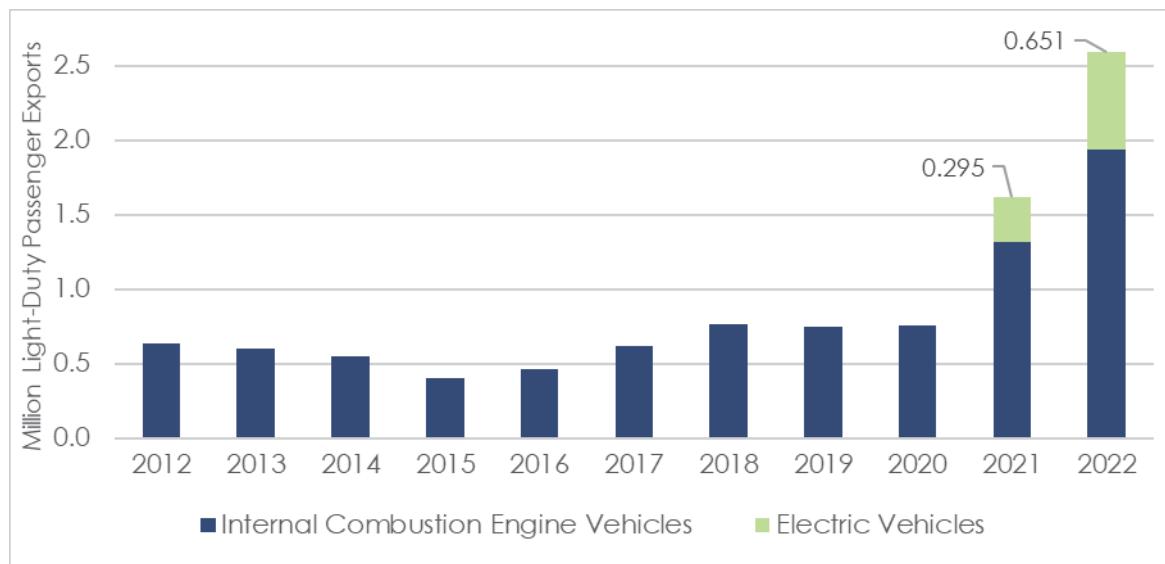


图 4-7. 中国的轻型乘用车出口：电动汽车与内燃机汽车¹¹

六、政策建议

我们建议采取三方面的策略：(1) 为零排放重型货车的部署制定明确、有雄心的长期目标，并通过(2) 建立零排放重型货车销售标准来帮助实现这些目标；(3) 继续完善和扩大中国现有多种政策组合，认识到有必要采取多种手段来优化能源转型。未来市场条件的确定性和清晰度的提高将有助于释放更大的投资，支持供应链的发展，并刺激更多的创新。

关于零排放重型货车部署的长期目标，我们建议将零排放重型货车销售的量化目标设定为 2030 年达到 45%，2035 年达到 75%，2040 年达到 100%。据报道，工业和信息化部正在考虑零排放重型货车部署目标和支持政策，但这些政策尚未公布。国务院的 NEV 产业发展计划要求到 2035 年电池电动车成为乘用车的“主流”技术，在中国汽车工程学会的技术路线图 2.0 中，具体到 2035 年至少达到乘用车销量的 50% 在最大的新车市场中，这种长期的、数字上的明确性正日益成为规范。美国和欧洲国家等 27 个国家承诺，到 2030 年，3.5 公吨以上的商用车的 NEV 销量将达

11 资料来源：中国汽车工业协会：中国汽车制造业协会

到 30%，最迟在 2040 年达到 100%。

建议的长期时间表与国际清洁交通委员会的研究相一致，该委员会使用重型车辆一词来指 3.5 公吨以上的货车和客运巴士，并得出结论：“商业可用性和总拥车成本预测表明，2030 年 45% 的零排放 HDV（重型车辆）销售和 2040 年 100% 的销售是可行的目标”^[76]。由于资本存量周转的挑战，需要最大的可行雄心，其根源在于新销售的车辆持续多年，由于车主不愿意过早退役，给未来几年的减排带来阻力。因此，内燃机汽车销售持续的时间越长，交通系统的惰性就越强。延迟向零排放重型货车过渡，除了放弃当地的清洁空气和经济发展利益外，还会增加实现净零目标的难度。

为了实现有雄心的目标，第二个建议是在可行的情况下尽快对 HDT 制定一个新能源汽车销售要求。这样的政策可以建立在中国成功的轻型乘用车双积分政策的基础上，ICCT 认为该政策是“中国市场增长的主要动力”。关于零排放重型货车销售标准的设计，在其第一阶段，双积分政策让企业选择使用多余的 NEV 积分来满足燃油效率法规。官员们正在正确地重新思考这一设计特点，以确保不会意外地削弱对车辆效率的总体激励，因为效率对传统和新能源汽车都很重要。

中国成功的轻型乘用车 NEV 部署战略使用了多种互补的政策工具，这种“组合方式”对零排放重型货车部署也很重要，并应包括鼓励车辆节能的措施，制定 NEV 行业标准，扩大新能源燃料基础设施，以及继续实施财政激励和非财政激励措施。关于财政激励措施，对新能源商用车的销售税豁免定于 2023 年底到期，我们建议将其延长至 2025 年底。一个有前途的非财政政策选择是允许零排放重型货车享有优先路权，缓解传统 HDTs 目前面临的重大限制。例如，《柴油货车污染治理攻坚行动情景》禁止柴油货车在重污染预警日进出涉及大宗材料运输的工业企业或港口^[86]。

我们强调了一项值得加入中国零排放重型货车组合的新政策：商业车队的车辆采购要求，这是加州最近采取的一项新政策，我们在下面的加州案例研究中进一步讨论。对有效的零排放重型货车组合的所有支持政策的全面讨论超出了本章的范围，但也将扩展到考虑需求管理、交通结构调整（例如，公转铁）的机会，以及解决交通能源生产和汽车生产材料投入的生命周期排放的措施。

第5章 协同管控的监管和执行机制

一、加州协同管控经验

1. 简介

本章的目的是通过全面关注减排目标、战略设计和实施，阐述有效解决传统污染（如形成臭氧的污染物、颗粒物、有毒污染物）和气候变化的行动策略。具体来说，如下所述，传统污染和温室气体的许多关键排放源是相同的（例如，交通、火力发电、工业源）。因此，适当选择的战略可以削减每一种相关的污染物，从而降低成本、提高效率、取得更好的结果。

本文还探讨了实现措施预期减排的必要原则，强调精心设计的措施必须与有效的实施相结合，以成功实现其目标。

2. 加州空气污染控制的历史

加州空气资源委员会（CARB）于1967年根据州法律成立，目的是建立一种方法来解决加州严重的空气质量问题，特别是在南加州和中央山谷地区。正如今天的情况一样，公众广泛关注空气污染及其对公众健康的影响，并需要采取行动，从而促成了CARB的成立。

自成立以来，CARB一直与公众、社区、商业部门和地方政府合作，努力寻求解决加州空气质量和气候问题的办法。鉴于加州严重的空气质量问题，联邦《清洁空气法》赋予加州汽车委员会制定机动车标准的独特权力。在过去的几十年里，提供给CARB的权力为世界上一些最具创造性的减排战略创造了条件。CARB制定的许多措施已经成为美国的标准，并被国际司法机构采用。一些创新的控制策略使加州的空气变得更加清洁，这些策略包括：

- 全国第一个关于碳氢化合物、一氧化碳、氮氧化物和柴油燃料车辆颗粒物的尾气排放标准；
- 催化转化器；
- OBD车载诊断系统，或“检查引擎”灯系统；
- 全国第一个零排放汽车(ZEV)法规，要求制造商生产越来越多的ZEV(如轿车、

货车、客车)；

- 加利福尼亚州的先进清洁汽车计划，减少汽车的传统污染物和温室气体污染物的排放；
- 逐步淘汰用于干洗的四氯乙烯；
- 要求海运船只（如游轮、货轮、油轮和汽车运输船）在停靠加州港口时，将排放量减少 90% 以上。

在过去的几十年里，加州的汽车和货车以及它们使用的燃料（主要是汽油和柴油）成为世界上最清洁的。CARB 已经消除了汽油中的铅，通过了更清洁的汽油标准，以及货车、公共汽车和其他公路/越野设备的清洁柴油标准。CARB 还开始工作，以减少数以千计的普通家用产品（例如，粘合剂去除剂、空气清新剂、汽车刹车、清洁剂、电器清洁剂、通用脱脂剂、护发产品）等颗粒物前体物的排放。

毒物法

20世纪 80 年代，加州通过立法，进一步关注有毒污染物的识别和控制。AB 1807 和 AB 2588 通过应用先进的风险评估方法和公共通知工具，支持识别和优先处理有毒污染物的影响，以及缓解努力。这些计划共同支持了一系列的行动，推动了有毒污染物的减少，其中大部分的利益由该州受影响最大的社区实现。例如，所采取的措施逐步淘汰了用于干洗的四氯乙烯，减少了镀铬机的六价铬排放，降低了汽油中的苯含量，以及大幅减少了柴油燃料燃烧产生的柴油颗粒物排放。

AB32/ 气候变化

在过去几十年里，加州制定的许多措施都有助于减少温室气体的排放（例如，电器效率标准）。然而，随着 2006 年 AB32 法案的通过，应对气候变化的重点行动得到了显著提升。AB32 要求制定一个全面的计划或路线图，以实现立法规定的温室气体减排目标。该计划，即“范围规划”，于 2008 年首次制定，随后数次更新，最近一次是在 2022 年，是有史以来为实现气候变化承诺而制定和实施的最全面的战略。范围规划包括一个广泛的减排措施组合，与经济中的每个主要部门（例如，交通、能源、工业、建筑、农业、森林等）相互作用。自 AB32 法案通过以来，支持更严格的温室气体减排目标的几个法案（如 SB32，Pavley/Garcia）已被采纳。

3. 有效减排计划的原则

在过去几十年空气污染控制的基础上，我们可以将学到的知识用于制定和实施计划和措施，同时关注减少标准和有毒污染物以及温室气体的排放。这样做将有机会设计出更有效的措施，以降低成本实现所需的减排。这些原则是确定优先次序、

制定和实施排放控制措施的基础。

- 明确和可衡量的目标

建立明确的、可追踪的、可执行的减排目标，并定期报告，使利益相关者能够容易地评估进展，是有效情景 / 措施的基石。下面是两个数字：图 5-1 显示了加州法定的温室气体减排量；图 5-2 显示了加州南海岸空气流域（即全国臭氧水平最高的地区）为达到联邦 8 小时臭氧标准（70 ppb, parts per billion）所需的减排目标（氮氧化物）。

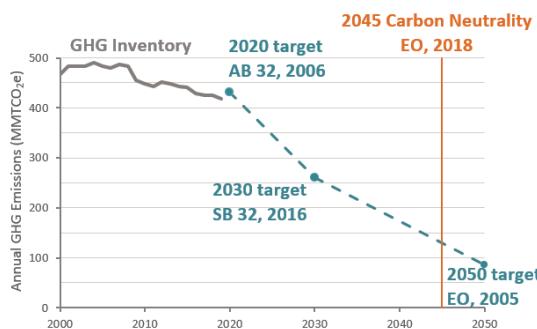


图 5-1



图 5-2

- 支持行动 / 领导力

减少温室气体、标准污染物和有毒污染物排放的进展是以行动为前提的，包括建立法规、激励计划、执法和行业对新的清洁技术的投资。然而，如果没有明确和持续的公众和政治领导的支持，建立和实施有效的减排计划所需的步骤是不可能的。持续的支持需要积极沟通与空气质量差和气候变化有关的影响，以及正在采取的行动的有效性。

- 行动的权力

采取有效行动来解决空气污染和气候变化问题，需要采取一整套措施，包括通过可执行的法规。监管组织必须有明确和毫不含糊的权力来制定、实施和执行必要的要求，以提供市场确信，如果受到挑战，它将获胜。确信法规是合法的并将被执行是必要的，以提供市场信心，对更清洁更有效的技术的投资将得到回报。正是这些投资提供了所需的减排量，并支持创新，从而逐步形成更清洁和更有效的解决情景。

- 数据 / 分析（即建议措施的强大技术基础）。

严密的分析为制定有效的计划和缓解措施提供依据。为成功计划提供信息的基础是定期更新和核实的强大的排放清单。下图 5-3 展示了加州 2019 年全州温室气体、氮氧化物和柴油颗粒物的排放清单。一个初步的观察是，交通部门在每一类污染物

的排放中占主导地位。

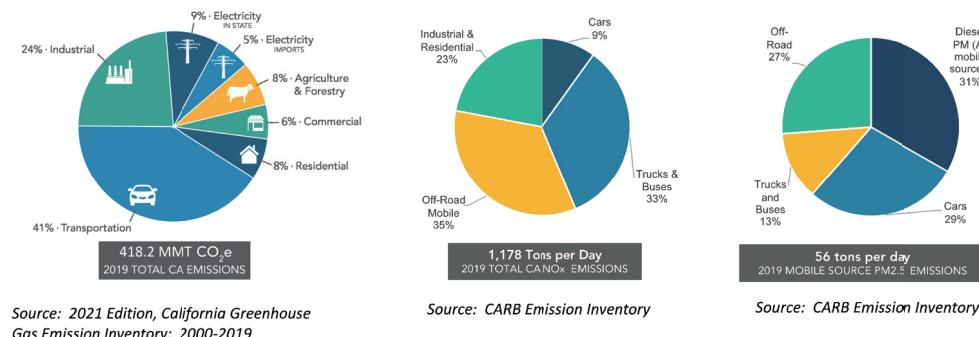


图 5-3 加州各部门温室气体、氮氧化物、PM_{2.5} 的排放情况

- 伙伴关系（例如，学术、政府、工业、社区、环境）。

有效的控制计划和措施依赖于伙伴关系。这包括与学术机构联系，以确定是否有有用的研究以及潜在的新工作来弥补差距。政府、社区、行业和非营利性合作伙伴也是确定国内外有用模式的关键，这些模式可以被用来促进制定成功的计划，可以被其他合作伙伴复制，从而向市场发出更强烈的信号，支持投资、创新，并帮助加速向清洁技术的过渡。

- 制定综合计划，优先考虑 / 指导措施的制定

实现减排目标需要仔细规划，为一揽子相互关联的措施提供信息，以了解措施之间如何相互影响。例如，需要向电气化过渡的措施（如将机动车队转变为电动车）必须考虑所需的电力来源，以及其对温室气体、标准和有毒污染物排放的影响以及其他潜在影响。因此，确定优先次序、制定和实施措施的前提是建立全面的计划，考虑实现所需减排的一系列潜在措施，以及这些措施从排放、公共健康和经济角度如何相互影响。

- 制定和实施措施的能力和专业知识

制定和实施有效的计划和措施需要一个资源网络，包括内部专家、承包商（包括与学术机构有关的承包商），以及资金。成功实施主要的空气污染和气候变化控制计划所需的资源往往超过了制定和通过最初法规所需的资源。因此，必须在计划 / 措施的设计中预计到支持实施所需的持续资源要求，以更好地确保成功实施。

- 透明度（即公开的公共程序 / 广泛的参与）。

最有效的计划和措施是通过公开程序制定的，使感兴趣的利益相关者能够通过各种形式（例如，网络会议、面对面的研讨会、一对一的会议、在网上发布概述发展过程和相关资源的帖子）轻松参与，并在会议之前提前发布建议。另外，公众的

意见也应张贴出来，并容易获得对利益相关者建议的书面答复，说明为什么以及如何采纳或不采纳建议的理由。

- 采取行动（采取 / 执行措施）。

有雄心的和可实现的减排目标很重要，但减排的结果是采取行动（例如，通过和执行法规，提供激励性资金等）。支持减排措施的信息是动态的，它随着时间而变化。因此，采取行动所依据的信息是不完整的，需要决定一个建议何时足够有力地向前推进（否则，措施将永远被改进，永远不会采取行动）。应用本文所述的原则有助于指导制定有效措施的过程。但是，在实现减排目标方面取得进展的前提是采取行动 -- 通过和执行排放计划，为市场提供明确的信号，即投资和创新将得到回报。

- 持续的测量 / 监测 / 报告

一旦采用排放控制情景，就必须进行仔细的监测和报告，以评估其有效性。这些报告应经常更新，并广泛提供给学术界和其他利益相关者进行独立分析。例如，建立一个具有关键措施指标的仪表板来评估持续的绩效，已被证明是一个有用的战略。这样做有助于通过识别潜在的弱点来加强项目，并让感兴趣的利益相关者了解一项措施的减排效果。

- 严格的执法

绝大多数被监管方都遵守减排计划的要求。这可能包括投资于更新 / 更清洁的控制技术和燃料，以及满足报告要求。负责监督法规遵守情况的机构有责任建立一支训练有素的专业队伍，检查排放源和记录是否符合要求。而且，在发现违规行为时，采取适当的执法行动至关重要。这向违规者发出了一个明确的信号，即他们将被抓住并受到惩罚，同时也向遵守规则的大多数受监管方发出了一个公平竞争的信号。建议广泛宣传所采取的执法行动，以促进这些目标的实现。

- 为加强措施而进行的调整

在整个计划的实施过程中，工作人员必须仔细评估计划数据，并让利益相关者参与其中，以评估计划中任何未按预期工作的因素。持续的评估可用于支持发布指导意见或告知可能需要的法规修订。

- 结果

评估计划有效性的标准是，它们是否按计划有意义地减少排放，以支持实现目标。而且，减排量以及带来的收益（如，避免的过早死亡、减少的哮喘发病率、降低住院率、减少的工作日和上学日损失）与成本和相关资源是相称的。第十节提供了加州项目经验的例子。

4. 结果——实现的减排量

如果没有本文所述的要素，减排措施就不可能成功实施。以下几个数字说明了在加州观察到的柴油细颗粒物（图 5-4）、温室气体（图 5-5）、导致臭氧和二次细颗粒物形成的氮氧化物（图 5-6）以及已知的人类致癌物苯（图 5-7）的减排情况。这些数字中报告的许多减排量是通过多污染物措施实现的（即同一措施有助于减少一种以上的污染物）。除了显示过去 20 年温室气体的减排量，图 5-5 说明在同一时期，加州的 GDP 大幅增长，而人均温室气体排放量继续下降。

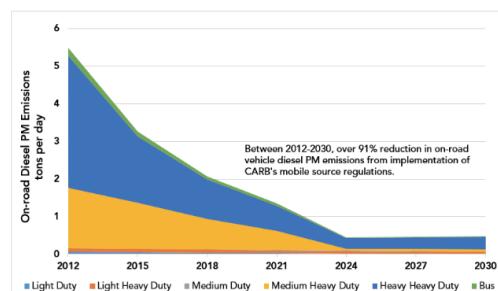


图 5-4

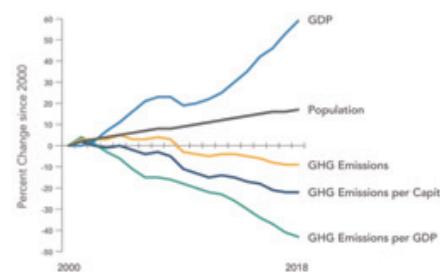


图 5-5

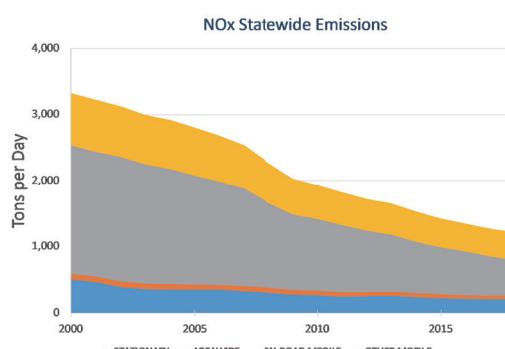


图 5-6

苯
空气监测仪趋势--平均值 (ppb)

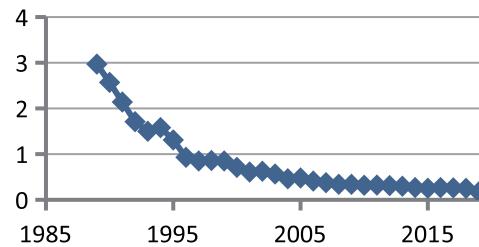


图 5-7

5. 应用这些原则：识别和制定以多污染物为重点的措施（来自加州经验的说明性例子）

本节的目的是提供一些已经在加州成功实施的多污染物措施的例子。这些措施提供了多污染物效益，并建立在本文描述的原则之上。但是，首先提供了一个优先考虑、选择和实施措施的简略路线图。

确定措施的优先次序

排放清单有助于了解最重要的排放部门，以及最大减排的潜在机会。考虑到所有感兴趣的污染物（即温室气体、标准和有毒污染物）的排放清单，指导这一过程，以阐明解决多种污染物的潜在机会。然而，也有一些明显的例外，这不是本文的重点，在这种情况下，制定一项措施是一个优先事项，即使它可能没有提供减少共同污染

物的重要机会（例如，减少空调制冷系统的氢氟碳化物排放）。

从整体上考虑排放清单的一个主题是，在加州以及全球许多地区，交通是温室气体、氮氧化物和柴油细颗粒物的主要排放源。在本文讨论的原则指导下，可以确定、制定和实施多污染物措施，从而提供空气质量、社区和气候效益，同时更有效地利用有限的资源和投资。

制定措施

措施的制定应以数据和对减排机会的分析、措施的可行性、成本、效益和实施时间表为依据。分析报告应与广泛的利益相关者密切协调，公布/张贴，并广泛分发，允许公众参与，提出问题，并制定具体建议。一个透明的公共过程与分析一样重要，并支持制定更有效的措施。

实施

如前所述，建立一个在整个实施过程中对措施进行仔细监测的程序，有助于及早发现可能出现的问题。例如，为了促进有效的实施，可能需要对监管要求进行进一步的指导或潜在的修正。另外，在整个实施过程中所获得的经验可以与所有利益相关者分享，以加快实施的学习曲线，以及加快其他管辖区的措施的输出和采用。

示例说明

以下是三个例子的摘要，包括选择这些例子的基本理由：1) 零排放车辆；2) 低碳燃料标准；以及 3) 建筑 / 设备标准。

零排放车辆（汽车、货车等）

加州制定了几个支持向零排放运输过渡的计划。这包括对汽车、货车、公共汽车和其他车辆制造商的零排放要求，以及支持“市场拉动”的计划，如车队购买要求。激励措施在支持向零排放运输的过渡中也发挥了重要作用。而且，如前所述，清洁交通带来标准和有毒污染物以及温室气体的排放减少。这些努力也减少了对石油基燃料的依赖，为消费者节省了开支，同时由于减少了过早死亡、哮喘病例、住院、损失的工作和上学时间，带来了数十亿的利益。

低碳燃料标准 (LCFS, Low Carbon Fuel Standards)

随着全球各地的管辖范围向交通部门电气化过渡，很明显，液体和气体燃料将继续在整个过渡过程中发挥几十年的作用，特别是对电气化最具挑战性的部门（如航空）。因此，促进更清洁的传统燃料以及投资下一代燃料是解决情景的一个组成部分。

LCFS 要求逐步降低运输燃料的碳强度，这样做是为了促进对燃料的投资，以

减少温室气体、臭氧和颗粒污染物的排放，以及包括柴油颗粒在内的无数有毒污染物。加利福尼亚州制定并成功实施的 LCFS 由于其有效性，正在被其他州 / 辖区复制。例如，LCFS 有助于将该州的柴油消耗量减少一半，这主要是由于用可再生柴油替代，其温室气体和颗粒物的排放量较低。该计划还促进了对低碳强度乙醇、可再生天然气、可再生氢气和电力的投资。

建筑 / 设备标准

商业和住宅建筑依靠大量的设备来提供空间加热和降温、热水，以及烹饪。成千上万的建筑物的燃料来源是天然气。供应给这些设备的天然气在热水器、熔炉、锅炉和炉灶中燃烧，导致臭氧和颗粒污染物以及各种有毒化合物的排放。例如，这部分排放估计占南加州氮氧化物最高排放量的三分之一，为达到基于健康的国家环境空气质量标准，即在 2037 年之前臭氧浓度达到 70 ppb (parts per billion)。在新建筑中要求使用电力设备的努力，以及支持在现有建筑中使用电力设备的监管计划和激励措施，可以改善区域、地方和室内空气质量，并减少温室气体。

6. 克服障碍

本节确定了有效制定和实施共同污染物减排工作的必要因素。然而，要成功实施共同污染物控制计划，必须识别和克服一些障碍。不同地区的障碍可能不同，因此需要对问题和解决情景进行重点评估。必须克服的两个常见障碍是行政和法律规范。

由于传统的空气质量项目通常在许多管辖区已经运行了几十年，有一个既定的体制结构，包括工作人员、管理人员、组织报告结构、沟通、预算、监督等。因此，气候项目通常是作为独立于传统空气质量项目的单位而设立。气候项目可能有专门的预算、人员配置、交流和汇报关系，独立于传统的空气质量项目，不一定要求或充分激励与传统的空气质量项目的协调，造成效率低下，并失去制定和实施强有力的共同污染物建议的机会。突破这些常见的体制障碍的关键包括最高领导层明确和一致的期望，即将良好协调的共同污染物项目作为一个优先事项。这些优先事项必须通过结构调整得到加强（例如，由共同的领导监督传统的污染物和气候项目，设置预算奖励共同污染物项目，晋升时强调有跨部门合作记录的团队成员）。

另一个体制障碍与授权立法和权力有关。传统的空气质量项目通常是通过一系列的法律和指令，以及在规则制定过程中的跟踪记录，经过演变和优化后建立起来的。优化过程可能包括为应对影响项目设计和记录的法律挑战而进行的修改。气候项目通常是最近建立的，有新的指令、优先事项和授权。因此，从法律和权力的角度来看，传统的空气质量项目和气候项目往往是孤立的。这转化为旨在满足其法律授权的项

目（例如，专注于满足标准污染物标准的法规），而不是充分考虑有效和高效的共同污染物控制机会。强调所有空气质量和气候项目提案必须评估共同污染物控制的机会，包括成本和效益的行动（例如，新的立法 / 行政行动），可以作为传统空气污染和气候项目之间的桥梁。此外，识别与现有法律的冲突、不一致和合作机会，可以为立法协调提供信息，以更好地实现与充分考虑降碳减污共同污染物控制努力机会的情景的效率。

7. 建议

大量的证据表明了空气污染和气候变化对公众健康和经济的不利影响。在国际、国家、地区和地方层面的行动承诺正以前所未有的速度增加，这既是对科学的认可，也是对日益增长的应对压力的认识，这同时给政府和行业提出了更高的要求。更有效地集中有限的资源是最重要的，动员所有有意的组织锁定实现多重目标的机会。应对空气质量、有毒污染物和气候变化的减排战略将变得更加重要，同时也要关注整体减排措施的效率和如何进行有效识别和实施。本节提出了成功识别、制定和实施多污染物排放控制措施的基本原则和程序，旨在支持一系列专注于制定有效的综合行动计划的相关者开展广泛讨论。

二、将环境公益诉讼机制扩展到温室气体管控

1. 背景介绍

环境公共利益诉讼（EPIL）是一种法律工具，在美国和一些欧洲国家通过公共利益团体（如非政府组织（NGO））对污染者的现有或潜在环境损害提出诉讼。例如，在过去十年中，非政府组织在美国主要通过 EPIL 案件成功阻止了所有建造新煤电厂的提案。因此，EPIL 已被批准为对抗环境污染和气候变化的一个强大机制。例如，在过去的几年里，环保团体起诉美国环保署，因为它给煤电厂发放环境许可证。这些诉讼声称，美国环保署未能确保燃煤电厂的细颗粒物排放符合联邦标准，以保护公众健康。因此，这些燃煤电厂不能按照最初的提案继续推进。

从 2016 年 1 月 1 日《环境保护法修正案》生效开始，EPIL 作为一种新的环境执法工具在中国开始使用。在过去的 7 年中，EPIL 的实践已经出现并在中国的环境治理中发挥了积极作用。

近年来，每年都有数以千计的 EPIL 案件被提起仲裁或达成和解，这标志着 EPIL 在中国的出现和快速发展。

除了设在中国的非政府组织外，2017 年以来，检察院也提出了许多 EPIL 案件。在检察院提起的许多 EPIL 案件中，非政府组织向检察院提供了有关诉讼的来源和信

息。检察院和非政府组织之间的合作是中国保护知识产权的一个特点，这在其他国家是不存在的。检察院在《环境保护法》案件中发挥的积极作用越来越大，扩大了《环境保护法》的效力，极大地加强了中国的环境治理。

中国法院和环保部门一直在合作处理 EPIL 案件。根据 EPIL 程序，法院在受理环境影响调查案件后，应向当地环保部门通报该案件。法院可以要求环保部门提供被告的信息，如环评、排污许可证、合规和违规记录等，环保部门有义务向法院提供这些信息。在 EPIL 过程之中或之后，环境主管部门可以对被告人进行调查，并对被告人进行行政处罚。

一些环保法案件非常重要。例如，宁夏自治区的一个 EPIL 案件导致了中国环境污染案件历史上最高的处罚：569,000,000 元的土壤修复和污染防治费用，以及 6,000,000 元的环境公共利益基金。

为了避免潜在的 EPIL 索赔，许多公司——包括国企、民企、外企等在遵守环境法方面都已经变得更为警惕。这已成为公司实现更好的合规性的重要推动力。

2. 主要挑战

尽管 EPIL 在中国取得了积极的发展和成果，但在实施 EPIL 的过程中仍然存在许多挑战。

在中国目前的法律体系下，环保法的适用范围很窄，没有明确的指导原则来规定环保法可以针对温室气体的排放。在中国目前的法律体系下，可以根据已发生的事件所造成的环境损害，例如空气污染和土壤污染，对污染者提出环境赔偿诉讼。这些案件是“基于损害的”诉讼理由。中国还没有建立一个法律机制或惯例，使非政府组织或检察官能够对未来可能对环境和气候有害的建设项目（如计划中的煤电厂）提出 EPIL 案件。

环境保护法和环境治理的基础能力仍然薄弱。自 EPIL 进入中国以来，中国只有非常有限的非政府组织提出了 EPIL 案件。一般来说，这些非政府组织不具备足够的法律或环境专业知识，无法以最专业的方式提出和处理 EPIL 案件。另外，EPIL 对大部分检察官都还是新事物，尤其是基层检察官。

3. 政策建议

在上述背景和挑战的基础上，我们分析了 EPIL 的国际经验和本地改进 EPIL 的需求，并希望通过 CCICED 向中国政府提供以下政策建议。

将 EPIL 的范围扩大到温室气体的执行上

为了应对紧迫的气候挑战，改善温室气体的执行情况，EPIL 的范围应该从环境

损害扩大到温室气体的执行。

全国人民代表大会（NPC）、中国最高检察院和中国最高法院应发布条例或解释文件，允许非政府组织和检察官提出针对温室气体排放和气候损害的 EPIL 案件。

中国最高检察院和最高法院应该提供一个实用指导方针，以提出、裁决和解决针对温室气体排放和气候损害的环境赔偿案件。中国最高检察院在 2023 年 2 月发布了意见¹²，呼吁对碳达峰和碳中和进行更好的司法服务，这是一个积极的信号。为 EPIL 提供更多关于碳达峰和碳中和的具体意见将是非常有用的。

应该为当地的非政府组织和检察官提供培训项目，使他们能够获得更好的知识和经验来提出关于温室气体执法的 EPIL 案件。

应收集、汇编和分发有关针对温室气体排放和气候损害的 EPIL 案例研究。

国家当局应允许或鼓励非政府组织和检察官提出与温室气体排放和气候损害有关的 EPIL 案件，包括涉及近年来省级当局最近批准但尚未开始建设的煤电厂的案件。

为 EPIL 机制和实施提供进一步的政治支持

总的来说，中国政府对中国的 EPIL 一直持支持态度。EPIL 语言已被纳入全国人民代表大会（NPC）批准的国民经济和社会发展五年计划以及其他高级别的政府文件。尽管如此，中国政府和最高政治领导人仍然需要进一步支持 EPIL 的机制和实施。

在高层文件和讲话中，包括由党和 / 或国家顾问发布的文件和讲话中，应反复强调 EPIL。

中国政府机构——尤其是省级和地方机构，应该认识到，行政机构的环境执法工作历来都很薄弱 -- 因此，中国需要一种新的、额外的方法，即 EPIL，以改善环境和气候执法。虽然国家层面的政府官员普遍支持 EPIL 作为环境执法的替代工具，但一些地方环境官员可能不愿意支持 EPIL 案件。应开展内部教育，使地方官员对环保法的支持更加有力和一致。

建立预防性的 EPIL 机制

为了避免潜在的环境和气候损害，减少搁浅成本，EPIL 应该被扩大到预防潜在的环境和气候损害。中国必须将“预防性 EPIL”引入中国的法律体系和实践中，以便某些未来的建设项目可以被非政府组织或检察官起诉，从而有可能被停止或推迟。

– 国家机关，即全国人民代表大会（NPC）、中国最高检察院和中国最高法院

12 <https://www.court.gov.cn/zixun-xiangqing-389351.html>

应发布一项法规或解释文件，通过该文件，建设项目的所有者或提议者可以就其潜在的环境或气候损害提起诉讼。

- 如果一个建设项目因潜在的环境和气候损害而被作为 EPIL 案件起诉，除非法院做出决定，否则这样的建设项目应该被搁置。
- 应该对“潜在的环境和气候损害”做出明确的定义，以避免预防性的环境赔偿金被滥用。
- 在设计中国的 EPIL 预防机制和操作程序时，可以引入国际经验、最佳做法和领先案例。

推广 EPIL 的省级法规

目前，大多数 EPIL 法规是由国家机关颁布的。一般来说，省级政府在制定自己的 EPIL 法规和实施细则方面并不积极。应通过以下行动促进省级 EPIL 法规的制定。

- 应允许并鼓励省级主管部门在尚未提供国家实施细则的领域和主题中制定自己的 EPIL 实施细则。
- 国家主管部门可以组织 3-5 个省级政府作为试点，起草并颁布省级 EPIL 实施细则。
- 国家当局可以提供 EPIL 实施细节的“模板”，省级和地方政府可以利用它来改善其环境和气候治理。

为 EPIL 的运作建立更好的能力

中国政府可以努力为 EPIL 的运作建立更好的能力，并鼓励其他感兴趣的利益相关者进行这种能力建设。

- 国家机关，如全国人民代表大会（NPC）和生态环境部（MEE）应组织或鼓励针对利益相关者的 EPIL 培训项目，其中包括环境官员、律师、非政府组织代表和行业管理者。
- 中国最高检察院和中国最高法院都建立自己的内部培训系统，通过该系统不定期地对检察官和法官进行培训。在这些内部培训计划中，应加入 EPIL。
- 所有政府机构都应鼓励出版和分享 EPIL 案例和经验。
- 中国领先的社会组织，如中华环境保护基金会（CEPF）应扩大其现有的项目，在更有意义的范围内对草根非政府组织进行指导和提供资助。
- 应鼓励国际气候基金会和环境非政府组织为 EPIL 的培训、出版和其他能力建设行动提供资助。

第6章 性别分析

本章节的内容旨在分析和识别降碳、减污、扩绿、增长协同管控中的性别议题，理解不同性别群体在绿色转型中的角色、权利、机会、需求和作用。通过性别分析，我们可以更好的确定不平等的源头，并通过设计和实施更加公平和有效的政策、机制和服务来解决这些问题。本研究提出的具体研究问题是：1. 降碳减污扩绿增长协同机制中存在那些性别议题？2. 在重点领域的碳污同治和绿色转型中，如何通过制度设计保障性别平等？鉴于国内对于绿色低碳发展中性别平等的研究还比较缺乏，本研究拟采用文献综述的方法识别特定的性别议题，结合国内碳污同治的背景和具体的行业转型现状提出初步政策建议，为后续的研究奠定基础。

一、降碳减污扩绿增长协同机制中的性别问题

气候变化和空气污染的影响在全球范围内并不均等，女性、儿童等社会群体较为普遍的会受到影响^[87]，且影响也往往更为严重^[88-90]。一方面，自然灾害、极端天气事件、气候变化和空气污染暴露特别影响孕妇和儿童的健康^[91]，增加营养不良、急性呼吸道感染、腹泻疾病、低出生体重和过早死亡等问题的风险^[92]；另一方面，不同的传统角色和社会经济地位影响了不同性别群体获取和管理资源的差异，女性及其他性少数群体在公共领域（如污染防控）中的决策参与和领导作用也往往处于弱势地位。

性别平等议题在绿色经济转型中容易被忽视。中共二十大提出要实现美丽中国建设，协同推进降碳、减污、扩绿、增长。“双碳”目标是经济增长的新动能，会引发中国发展范式的转变。尽管这个转变在很大程度上会降低暴露风险，但是同样会在其他方面引发对社会不同群体的影响：目前中国气候变化和污染防治领域对性别的关注和考虑不足^[93]，存在采取“性别盲”的方式进行经济转型的风险^[94]，在绿色变革中制定的新政策也有可能对女性的就业、参与度、工作环境、受教育和培训的机会等产生长远的负面影响。

在全球范围内，许多国际倡议、协议和政策已特别关注性别平等和社会公正议题。其中，联合国的可持续发展目标（SDGs）是最为人所熟知的框架。SDG5 强调实现性别平等和赋予所有女性和女孩权利，消除对所有女性和女童的所有形式的歧

视^[95]；而SDG10则聚焦在减少国内和国际层面的经济、政治和社会的不平等^[96]”。这两个目标的实现是所有其他可持续发展目标的基础。在气候变化方面，《联合国气候变化框架公约》、《巴黎协定》以及《京都议定书》在政策框架、执行策略和资金机制等多个层面都坚实地巩固了性别平等的重要地位^[93]。同时，许多国家也已积极推动了相关实践。以北欧国家为例，他们在推动绿色增长的同时，积极将性别平等融入到相关政策和实践中。例如，瑞典在制定环境政策时，会特别考虑到政策对不同性别群体的影响，并尽可能地在政策中体现公平性。再比如，丹麦推出了“性别主流化”政策，强调在所有领域和层面上实现性别平等，以确保男性和女性都能平等地受益于绿色增长。

在推动绿色增长的过程中，引入性别议题，并积极践行性别主流化的理念，不仅是提升性别平等的关键策略，更是推动可持续发展的重要基础。中国在绿色发展的竞争中展现出了独特的优势，我们不仅拥有坚定的新发展理念，更有着强大的政府协调能力，并且在推动社会公平性方面已经取得了一些瞩目的成就，比如在脱贫攻坚战中就展现出了强大的执行力和协调力。现在，我们将重心转向降碳、减污、扩绿、增长的协同推进，在这一过程中，我们应更加强调性别主流化的重要性，并以此作为新的契机更加深入地推动和实践性别平等理念。

二、电力和交通部门绿色低碳转型中的性别平等

1. 电力部门

电力部门的绿色低碳转型有助于消除空气污染和气候变化带来的性别不平等，但转型过程也容易引发新的不平等问题。推动煤电的逐步退役和清洁能源的广泛应用是电力部门低碳转型的主要措施，其产生的环境和健康协同效益通常大于政策成本^[91,97-99]；煤炭退役过程还会使一些女性获得新的就业机会，增加她们的自信心、自尊和经济独立性^[100,101]；也有研究发现，在一些转型期间，女性逐渐从私人领域转向公共领域，从被动的角色转变为积极的角色^[102]，性别角色甚至得到了强化和重新配置^[103]。然而，也有研究发现，在退煤过程中，在个人、家庭、社区以及劳动力市场四个层面对女性会产生不同程度的不平等风险^[104]，比如家庭成员工作的调整可能会引起家庭分工的变化，使女性不得不花费更多的时间和精力承担更多的家庭职责^[105,106]。

我国煤炭资源丰富，煤电发电量目前仍占总发电量的60%左右，电力部门的脱碳化是所有经济领域转型中的重中之重，因此需要采取多元化的策略实现性别主流化，尤其是煤电产业密集的区域。首先，需要重视煤炭行业的女性劳动者。在过去以煤炭为主导的能源生产中，大多数直接劳动者是男性，然而，这并不意味着女性

没有受到影响。事实上，煤炭产业的减退和煤电退役可能会在就业、收入以及家庭生活等方面对女性产生重大影响。因此，在低碳转型中，应制定专门的政策来保障女性劳动者的利益，比如通过技能培训和教育帮助她们适应新的就业市场。其次，推动新能源产业的性别平等。新能源产业的发展为性别主流化提供了新的机遇。我们可以通过政策推动和鼓励更多的女性参与到新能源产业中，比如在太阳能和风能等领域。同时，也应改善女性在这些行业的工作环境，保障她们的权益。最后，加强性别视角下的政策研究和制定。我们需要更多的性别敏感性数据，以便更好地理解低碳转型对男性和女性的不同影响，以及如何制定更为公平的政策。通过引入性别视角，我们可以更全面地考虑和解决低碳转型过程中出现的各种问题，从而实现更加公正和包容的能源转型。

2. 交通部门

在交通部门的绿色低碳转型过程中，可能出现的性别不平等问题主要集中在四个方面：出行行为、工作岗位、交通安全以及交通污染暴露。在出行模式方面，研究发现女性的出行频率和距离相对较低^[107]，而且她们更趋向于使用步行设施^[107]和公共交通^[108]，因而产生环境影响更小^[109]。然而，在许多城市，公共交通服务的可用性和便利性往往不足，步行和骑行设施也常常缺乏，这对低收入的女性影响尤甚，他们可能因此被迫步行或限制出行^[110]，从而导致出行不公平。在交通行业就业方面，由于性别刻板印象和行业文化的影响，女性在交通工程和技术职位，尤其是在绿色低碳技术研发和决策岗位上的比例仍然偏低。此外，随着绿色低碳转型的推进，某些传统男性主导的工作可能会减少，如化石燃料采矿和重工业，而新的就业机会如可再生能源产业的发展，可能由于教育和技能障碍而无法平等惠及所有性别。在中国的货车行业中，尽管有一部分女性参与运输行业，但是车辆配置和行业配套措施等方面主要是以男性从业者为设计依据，对女性从业者的支持不足。第三，女性出行安全问题由来已久，尤其是在公共交通方面。如果公共交通系统不充分考虑到性别差异，可能会使得女性在出行（如通勤）时感到不安全。无论在公共交通上、等待交通工具时，还是在街道上步行时，口头和行为上的骚扰经常会发生^[111-113]。有研究认为公共交通可以加上“女性车厢”设计^[114]；也有学者认为需要加强道德培训和提高意识，并建立严格的规则执行机制以遏制骚扰行为^[111]；除此之外，还有人指出要提高城市的“步行性”，用创造优秀的步行条件和设施来提升包容性和平等性^[115]。第四，女性更多采取步行、自行车、电动自行车、公共交通等慢行交通模式，以致更多地暴露于机动车尾气污染中，对呼吸道、心血管健康等有着更高的潜在风险。孕妇暴露于尾气污染中，可能对孕妇和胎儿健康都有影响风险。

为了在交通部门的低碳转型中实现性别主流化，我们需要从政策、规划和实践等多个层面采取行动。首先，在政策层面，我们需要确保所有的交通和环保政策都充分考虑到性别差异，并以此为基础制定具体的措施。比如，改善公共交通服务和步行、骑行设施，以支持女性的低碳出行模式；其次，在绿色就业方面，通过教育和职业培训等措施，提高女性的技能和知识，以便她们能在新兴的绿色交通产业中找到工作。再者，在规划层面，我们需要确保城市和交通规划充分考虑到所有性别的需求和利益，尤其是对公共交通和非机动车出行设施的需求。此外，我们还需要通过公众参与和社会对话等方式，提高女性在交通规划和决策中的代表性和影响力。最后，在实践层面，我们需要通过各种方式提升女性的领导力和影响力，打破性别刻板印象，提高女性在绿色低碳转型中的角色和地位。具体措施可能包括提供领导力培训、促进职业网络和导师制度、提高女性在重要决策岗位上的比例等。

三、协同管控中的性别策略

总的来说，在推动我国降碳、减污、扩绿、增长的进程中，由于政策制定和措施实施往往会对不同性别的人群产生不同的影响，性别主流化不可或缺。建议从以下三个方面进一步促进绿色转型中的性别平等。

1. 制定科学的研究计划，跟踪研究，周期性反馈

制定一个中长期的研究计划，跟踪并深入研究性别主流化在我国绿色转型进程中的发展情况，为政策制定和完善提供科学依据。研究计划的第一步，应从文献回顾和设定研究目标两方面入手，打下坚实的理论基础，并明确研究的方向；第二步，深入分析绿色低碳转型政策对男性和女性的影响，并通过案例研究进一步了解性别因素在绿色转型过程中的具体作用；第三步，通过定量分析，尝试将绿色转型政策对男性和女性的影响进行量化，同时也将根据已有的分析结果，提出初步的、具有性别敏感性的政策建议；第四步，可以通过专家访谈和焦点小组讨论，获取更多第一手资料和深入见解，进一步优化我们的政策建议；第五步，整理编写研究的最终报告，并将研究成果和政策建议推广给相关的决策者和利益相关者，为推进我国绿色低碳转型的性别主流化提供参考。以上研究过程应当长期跟踪具体的行业情况，并形成周期性的反馈机制，及时为政策制定者出谋划策，促进绿色转型中的性别平等。

2. 注意共性的性别议题，兼顾特殊的行业问题

各个行业的绿色低碳转型中，既存在共性的性别议题，也存在特殊的行业问题，因此在问题识别、研究方法确定、以及政策设计中要注意区分。共性的措施包括引入性别响应预算，使财政资金分配考虑到性别影响，反映对男性和女性需求的公平对待；在政策的执行和评估中加入性别指标；在相关产业的就业和技能培训中，增

加对女性的支持和鼓励；在决策中加大女性的参与力度等。而对于特定的行业，比如煤电退役过程中，要特别注意煤炭（或煤电）产业密集地区的特殊议题，比如由于工作变动导致家庭劳动分工的变化或产生的性别歧视；在交通领域，要特别注意在转型中需要解决过去忽视的性别不平等问题，比如提升公共交通和设施对于女性的包容性、可获取性、安全性和机动性等。

3. 学习国际做法，总结自身经验，促进国际交流

在推动性别主流化的初期，要不断学习国际上的良好做法和成功案例，为我国推进性别平等打造良好开端。同时，中国也可以在国际间分享自己在推动性别平等和社会公平方面的经验和成果。比如，中国的扶贫成果被广泛认可，其中在推动性别平等和妇女发展方面的成就尤为突出。我们的成功经验包括鼓励和支持农村妇女参与各种可持续行业的实践，以及积极发掘妇女在生态保护中的潜能等，都对全球实现绿色增长和性别平等的目标有着重要的参考价值。最后，我们需要体现大国担当，这不仅要求我们在应对气候变化方面做出有力的承诺，也需要我们积极推动性别平等的实现。我们应致力于促进国际间的交流，通过参与和影响国际政策制定、立法过程和签署相关协议，推动全球的环保行动和性别平等的进步。

第7章 政策建议

绿色增长

- 碳中和是中国的一个重要机遇，双碳目标正在成为中国经济增长的新动力。中国必须制定有远见的目标，并制定强有力的计划，特别是在能源领域，以确保目标的实现。
- “1+N”框架为建立一个全面的路线提供了一个很好的基础。它必须有详细的计划，围绕着健康的“竞赛”来组织，并在省市一级有详细的支持。
- 控制常规污染（氮氧化物、PM_{2.5}、硫氧化物和其他颗粒物，同时控制二氧化碳、甲烷和一氧化二氮等温室气体）可以节省大量的资金，并将投资引向更好的选择。
- 中国在可再生能源投资和新能源汽车发展方面取得的巨大进步，通过提供供应和降低技术成本，已经证明对世界有利。推动重要技术在学习曲线上前进的工作提供了广泛和快速的回报。中国应该找出更多可以降低关键技术（和实践）成本的领域——包括工业热泵、绿色钢铁、混凝土、石油化工、更多的电动汽车等等。
- 除了经济和生活水平的进步，对传统和常规污染物的协同控制将刺激更好的健康和宜居。
- 几乎所有这些都可以通过精心设计的性能标准、特定部门的目标和经济信号的组合，来推动环境的快速改善，同时为先进的产品和服务创造新的市场。

跨部门合作

- 我们在本课题中提出的建议的实质是，中国可以从政策的明智进步中获得巨大的健康、经济和环境利益。共同解决常规污染物和温室气体污染物的成本远远低于单独解决：例如，新建筑应该包括高质量的建筑（循环经济）；超高效；通过热泵供暖、制冷和供应热水；使用清洁电力供电。
- 在早期，财政激励措施可以推动这四部分（经济、环境、健康、气候变化）的利益。随着价格的下降和市场的发展，高性能的建筑应该由先进的建筑法规

来强制执行。一次建设，正确建设，永远收获。

- 一个同步的行政系统需要以下条件：
 - 一个强大的数据和分析的技术基础
 - 明确和可衡量的目标
 - 持续的监测和有力的执行
 - 全面的计划，对部署进行优先排序和衡量
 - 提高制定和实施措施的能力和专业知识
 - 彻底和准确的测量和报告
- 重要步骤包括
 - 制定监管制度和计划，同时推动提高可靠性和减少煤炭的使用。
 - 逐步减少煤炭消费，稳步、快速地提高清洁能源的比例。
 - 限制污染和能耗严重的企业，减少过剩产能，并注意源头控制。
 - 促进农业面源和粉尘源的污染控制。
- 将环保法的范围扩大到温室气体执法，为环保法的机制和实施提供进一步的政治支持，建立预防性的环保法机制，推动环保法的省级法规建设，提高环保法的运行能力。

电力

清洁电力是协同治理的核心。这就要求做到

- 保障能源安全：清洁电力必须共同实现可靠性、可负担性和低碳/零碳的目标。
- 系统设计煤电退役路径，综合考虑技术属性、盈利能力、搁浅资产、健康影响和社会公平多个方面的因素，以实现能源系统从煤炭到可再生能源的平稳过渡。
- 加快存量煤电灵活性改造，以提高对可再生风能和太阳能的高渗透率的适应能力，并满足调峰要求。
- 继续专注于实施经济调度，重点关注效率较低的煤电厂。
- 继续扩大电力系统的可靠性义务，从省级规模到区域规模，减少现有的煤炭优势，为效率和快速部署可再生能源创造更多机会。
- 制定更新的、更有雄心的清洁能源部署标准和储能部署目标。
- 改变市场结构，保留部分现役煤电厂以发挥电力安全的保障作用，同时发展储能，提高电网可靠性。

- 与其他国家的主要电网运营商合作，实施最佳实践模型，以更好地比较所有类型资源的可靠性贡献。

交通

- 继续向电动汽车过渡。确保向汽车制造商提供明确公开的市场信号，继续向电动汽车过渡；设定充电站目标并分配责任；投资研发以开发更好的电池技术。
- 重型车辆将需要激励措施、车队要求和技术发展的巧妙组合。这项工作是重中之重。
- 随着车队的电气化，交通部门的去碳化将与电网的碳强度联系起来。为了在未来进一步减少排放，有必要通过有序充电等措施有效利用可持续的电力。
- 为新能源重型货车的部署建立明确、有雄心的长期目标（新能源车辆在中重型车辆销售中的比例：2030 年达到 45%，2035 年达到 75%，2040 年达到 100%），并通过以下方式帮助实现这些目标
 - 建立一个零排放重型货车销售标准
 - 继续完善和扩大中国现有的多种政策组合，并认识到有必要采用多种手段来优化过渡管理。确定这些 NEV 政策和重型车辆的具体长期 NEV 目标将提高未来市场条件的确定性和清晰度，刺激更多的投资，支持供应链的发展，并激励更多的创新。
 - 更新车队，优化交通方式
 - 确保城市被设计成：
 - 支持快速、可靠的公共交通。
 - 拥有丰富的物理保护自行车道网络。
 - 为行人提供充足的空间，有遮阳的人行道。
 - 对大多数人来说，“15 分钟城市”成为一个现实。
 - 新的城市发展应该遵循“翡翠城市”的原则，建立安全、愉快和高效的生活方式。

参考文献

- [1] SMITH A. The Theory of Moral Sentiments[M]//Passions Within Reason. 1759.
- [2] 张永生 . 碳中和：亟需新的商业模式 [J]. 经济导刊 , 2021(11).
- [3] KEYNES J M. Economic Possibilities for our Grandchildren[M]. 1971 in D. London: Macmillan: Essays in Persuasion, 1930.
- [4] DEATON A. Income, health, and well-being around the world: Evidence from the Gallup World Poll[C/OL]//Journal of Economic Perspectives: 卷 22. 2008. DOI:10.1257/jep.22.2.53.
- [5] EASTERLIN R A. Does Economic Growth Improve the Human Lot? Some Empirical Evidence[M/OL]//Nations and Households in Economic Growth. 1974. DOI:10.1016/b978-0-12-205050-3.50008-7.
- [6] EASTERLIN R A. Income and happiness: Towards a unified theory[J/OL]. Economic Journal, 2001, 111(473). DOI:10.1111/1468-0297.00646.
- [7] SMITH A. An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations[M/OL]//W. Strahan and T. Cadell. London, 1776. DOI:10.2307/2221259.
- [8] 刘毅 . 美丽中国建设迈出重大步伐 [N/OL]. 人民日报 , 2022-09-16. [http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2022-09/16/nw.D110000renmrb_20220916_2-06.htm#:~:text=本报记者 刘毅 《人民日报》\(,2022年09月16日第06版\) 中共中央宣传部9月15日举行“中国这十年”系列主题新闻发布会，生态环境部部长黄润秋介绍了“贯彻新发展理念，建设人与自然和谐共生的美丽中国”有关情况。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央以前所未有的力度抓生态文明建设，从思想、法律、体制、组织、.](http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2022-09/16/nw.D110000renmrb_20220916_2-06.htm#:~:text=本报记者 刘毅 《人民日报》(,2022年09月16日第06版) 中共中央宣传部9月15日举行“中国这十年”系列主题新闻发布会，生态环境部部长黄润秋介绍了“贯彻新发展理念，建设人与自然和谐共生的美丽中国”有关情况。党的十八大以来，以习近平同志为核心的党中央以前所未有的力度抓生态文明建设，从思想、法律、体制、组织、)
- [9] TURAN G, TEMPLE-SMITH L. Global CCS Institute welcomes the 20th and 21st large-scale CCS facilities into operation[EB/OL]//Global CCS Institute. (2020). <https://www.globalccsinstitute.com/news-media/press-room/media-releases/global-ccs-institute-welcomes-the-20th-and-21st-large-scale-ccs-facilities-into-operation/>.
- [10] WU R, LIU F, TONG D 等 . Air quality and health benefits of China's emission control policies on coal-fired power plants during 2005-2020[M/OL]//Environmental Research Letters. (2019). DOI:10.1088/1748-9326/ab3bae.
- [11] EPA PRESS OFFICE. EPA Issues Power Plant Emissions Data for 2021[EB/OL]//United States Environmental Protection Agency. (2022). <https://www.epa.gov/newsreleases/epa-issues-power-plant-emissions-data-2021>.
- [12] 国家统计局 . 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]// 中华人民共

- 和国中央人民政府 . (2022). https://www.gov.cn/xinwen/2022-02/28/content_5676015.htm.
- [13] 中国电力企业联合会 . 中国电力行业年度发展报告 2022[R/OL]. (2022). <https://www.cec.org.cn/upload/zt/fzbgzt2021/zt2021/index.html>.
- [14] GEM, CREA, E3G 等 . Boom And Bust Coal 2022[R]. 2022.
- [15] QIANG Z, DAN T. 全球能源基础设施碳排放及锁定效应 [R/OL]. Beijing(2021). <https://www.efchina.org/Reports-zh/report-lceg-20220303-zh>.
- [16] LIU F, ZHANG Q, TONG D 等 . High-resolution inventory of technologies, activities, and emissions of coal-fired power plants in China from 1990 to 2010[J/OL]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(23). DOI:10.5194/acp-15-13299-2015.
- [17] ZHENG B, TONG D, LI M 等 . Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions[J/OL]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2018, 18(19). DOI:10.5194/acp-18-14095-2018.
- [18] LIU Z, DENG Z, HE G 等 . Challenges and opportunities for carbon neutrality in China[M/OL]// Nature Reviews Earth and Environment. (2022). DOI:10.1038/s43017-021-00244-x.
- [19] TONG D, ZHANG Q, DAVIS S J 等 . Targeted emission reductions from global super-polluting power plant units[J/OL]. Nature Sustainability, 2018, 1(1). DOI:10.1038/s41893-017-0003-y.
- [20] TONG D, ZHANG Q, LIU F 等 . Current Emissions and Future Mitigation Pathways of Coal-Fired Power Plants in China from 2010 to 2030[J/OL]. Environmental Science and Technology, 2018, 52(21). DOI:10.1021/acs.est.8b02919.
- [21] FUHRMAN J, BERGERO C, WEBER M 等 . Diverse carbon dioxide removal approaches could reduce impacts on the energy–water–land system[J/OL]. Nature Climate Change, 2023, 13(4). DOI:10.1038/s41558-023-01604-9.
- [22] FUSS S, LAMB W F, CALLAGHAN M W 等 . Negative emissions - Part 2: Costs, potentials and side effects[M/OL]//Environmental Research Letters. (2018). DOI:10.1088/1748-9326/aabf9f.
- [23] MECKLING J, BIBER E. A policy roadmap for negative emissions using direct air capture[J/OL]. Nature Communications, 2021, 12(1). DOI:10.1038/s41467-021-22347-1.
- [24] GENG G, ZHENG Y, ZHANG Q 等 . Drivers of PM_{2.5} air pollution deaths in China 2002–2017[J/OL]. Nature Geoscience, 2021, 14(9). DOI:10.1038/s41561-021-00792-3.
- [25] TONG D, GENG G, ZHANG Q 等 . Health co-benefits of climate change mitigation depend on strategic power plant retirements and pollution controls[J/OL]. Nature Climate Change, 2021, 11(12). DOI:10.1038/s41558-021-01216-1.
- [26] CUI R Y, HULTMAN N, CUI D 等 . A plant-by-plant strategy for high-ambition coal power phaseout in China[J/OL]. Nature Communications, 2021, 12(1). DOI:10.1038/s41467-021-21786-0.

- [27] GOFORTH T, NOCK D. Air pollution disparities and equality assessments of US national decarbonization strategies[J/OL]. *Nature Communications*, 2022, 13(1). DOI:10.1038/s41467-022-35098-4.
- [28] BP STATISTICAL REVIEW OF WORLD ENERGY 2021. *Statistical Review of World Energy – 2021 The global energy market in 2020[R]*//Review World Energy data (2021: 卷 70. 2021.
- [29] TONG D, FARNHAM D J, DUAN L 等 . Geophysical constraints on the reliability of solar and wind power worldwide[J/OL]. *Nature Communications*, 2021, 12(1): 1-12. DOI:10.1038/s41467-021-26355-z.
- [30] MERCURE J F, POLLITT H, VIÑUALES J E 等 . Macroeconomic impact of stranded fossil fuel assets[J/OL]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(7). DOI:10.1038/s41558-018-0182-1.
- [31] ABHYANKAR N, LIN J, KAHRL F 等 . Achieving an 80% carbon-free electricity system in China by 2035[J/OL]. *iScience*, 2022, 25(10). DOI:10.1016/j.isci.2022.105180.
- [32] LIU Y, TONG D, CHENG J 等 . Role of climate goals and clean-air policies on reducing future air pollution deaths in China: a modelling study[J/OL]. *The Lancet Planetary Health*, 2022, 6(2). DOI:10.1016/S2542-5196(21)00326-0.
- [33] CHANG S, YANG X, ZHENG H 等 . Air quality and health co-benefits of China's national emission trading system[J/OL]. *Applied Energy*, 2020, 261. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.114226.
- [34] W. C, J. H, C. W 等 . The Lancet Countdown on PM_{2.5} pollution-related health impacts of China's projected carbon dioxide mitigation in the electric power generation sector under the Paris Agreement: a modelling study[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2018, 2(4).
- [35] LI J, CAI W, LI H 等 . Incorporating Health Cobenefits in Decision-Making for the Decommissioning of Coal-Fired Power Plants in China[J/OL]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54(21). DOI:10.1021/acs.est.0c03310.
- [36] ZHANG X, LIU J, TANG Y 等 . China's coal-fired power plants impose pressure on water resources[J/OL]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 161. DOI:10.1016/j.jclepro.2017.04.040.
- [37] RAPTIS C E, VAN VLIET M T H, PFISTER S. Global thermal pollution of rivers from thermoelectric power plants[J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(10). DOI:10.1088/1748-9326/11/10/104011.
- [38] LI H, CUI X, HUI J 等 . Catchment-level water stress risk of coal power transition in China under 2°C /1.5°C targets[J/OL]. *Applied Energy*, 2021, 294. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116986.
- [39] RAPTIS C E, OBERSCHELP C, PFISTER S. The greenhouse gas emissions, water consumption, and heat emissions of global steam-electric power production: A generating unit level analysis and database[J/OL]. *Environmental Research Letters*, 2020, 15(10). DOI:10.1088/1748-9326/aba6ac.
- [40] WANG R, LI H, CAI W 等 . Alternative Pathway to Phase Down Coal Power and Achieve

- Negative Emission in China[J/OL]. Environmental Science and Technology, 2022, 56(22). DOI:10.1021/acs.est.2c06004.
- [41] RAYNAUD D, HINGRAY B, FRANÇOIS B 等 . Energy droughts from variable renewable energy sources in European climates[J/OL]. Renewable Energy, 2018, 125. DOI:10.1016/j.renene.2018.02.130.
- [42] LU Y, COHEN F, SMITH S M 等 . Plant conversions and abatement technologies cannot prevent stranding of power plant assets in 2 °C scenarios[J/OL]. Nature Communications, 2022, 13(1). DOI:10.1038/s41467-022-28458-7.
- [43] SVOBODOVA K, OWEN J R, KEMP D 等 . Decarbonization, population disruption and resource inventories in the global energy transition[J/OL]. Nature Communications, 2022, 13(1). DOI:10.1038/s41467-022-35391-2.
- [44] LI L, ZHANG Y, ZHOU T 等 . Mitigation of China's carbon neutrality to global warming[J/OL]. Nature Communications, 2022, 13(1). DOI:10.1038/s41467-022-33047-9.
- [45] LU X, CHEN S, NIELSEN C P 等 . Combined solar power and storage as cost-competitive and grid-compatible supply for China's future carbon-neutral electricity system[J/OL]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(42). DOI:10.1073/pnas.2103471118.
- [46] ZHAO Y, WANG C, LIU M 等 . Improving operational flexibility by regulating extraction steam of high-pressure heaters on a 660 MW supercritical coal-fired power plant: A dynamic simulation[J/OL]. Applied Energy, 2018, 212. DOI:10.1016/j.apenergy.2018.01.017.
- [47] NA C, PAN H, ZHU Y 等 . The flexible operation of coal power and its renewable integration potential in China[J/OL]. Sustainability (Switzerland), 2019, 11(16). DOI:10.3390/su11164424.
- [48] STEVANOVIC V D, PETROVIC M M, MILIVOJEVIC S 等 . Upgrade of the thermal power plant flexibility by the steam accumulator[J/OL]. Energy Conversion and Management, 2020, 223. DOI:10.1016/j.enconman.2020.113271.
- [49] AHLSTRÖM J M, WALTER V, GÖRANSSON L 等 . The role of biomass gasification in the future flexible power system – BECCS or CCU?[J/OL]. Renewable Energy, 2022, 190. DOI:10.1016/j.renene.2022.03.100.
- [50] WU, YE et al. On-Road Vehicle Emissions and Their Control in China: A Review and Outlook[J]. Science of The Total Environment, 2017.
- [51] ZHANG X, LIN Z, CRAWFORD C 等 . Techno-economic comparison of electrification for heavy-duty trucks in China by 2040[J/OL]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2022, 102. DOI:10.1016/j.trd.2021.103152.
- [52] LIANG X, ZHANG S, WU Y 等 . Air quality and health benefits from fleet electrification in

- China[J/OL]. Nature Sustainability, 2019, 2(10). DOI:10.1038/s41893-019-0398-8.
- [53] EI. China Energy Policy Simulator[EB]//Energy Innovation: Policy & Technology, LLC and Innovative Green Development Project. 2022.
- [54] IEA. World Energy Investment 2022[R/OL]. Paris(2022). <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022>.
- [55] HANCOCK T. How China Is Quietly Dominating the Global Car Market[EB]//Bloomberg News. 2023.
- [56] IEA. Energy Technology Perspectives 2023[J]. IEA Report, 2023.
- [57] IEA. Global EV Outlook 2022[R/OL]//International Energy Agency. Paris(2022). <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022>.
- [58] IEA. The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions[EB/OL]//International Energy Agency (IEA). (2021). <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>.
- [59] MCKERRACHER C. China's Electric Trucks May Well Pull Forward Peak Oil Demand. Bloomberg[EB]. 2022.
- [60] IEA. Global EV Data Explorer[EB/OL]//International Energy Agency. (2022). <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/global-ev-data-explorer#>.
- [61] MCKERRACHER C. Electric Vehicles Look Poised for Slower Sales Growth This Year.[EB]// Bloomberg.Com. 2023.
- [62] CAAM. 2023 年 1 月新能源汽车销售情况 [EB/OL]// 中国汽车工业协会 (CAAM). (2023). <http://en.caam.org.cn/Index/show/catid/66/id/2050.html>.
- [63] BERNARD M R, TANKOU A, CUI H 等 . Charging Solutions for Battery Electric Trucks[R/OL]. Washington(2022). <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/charging-infrastructure-trucks-zeva-dec22>.
- [64] QIANG H, HU Y, TANG W 等 . Research on Optimization Strategy of Battery Swapping for Electric Taxis[J/OL]. Energies, 2023, 16(5). DOI:10.3390/en16052296.
- [65] Battery Swapping for EVs Is Big in China. Here's How It Works[EB/OL]//Bloomberg News. (2022). <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-01-24/battery-swapping-for-evs-is-big-in-china-here-s-how-it-works>.
- [66] SLOWICK, PETER, STEPHANIE SEARLE H B. Analyzing the Impact of the Inflation Reduction Act on Electric Vehicle Uptake in the United States[EB/OL]//International Council on Clean Transportation. (2023). <https://theicct.org/publication/ira-impact-evs-us-jan23/>.
- [67] EPA. Proposed Rule: Greenhouse Gas Emissions Standards for Heavy-Duty Vehicles – Phase

- 3[EB/OL]//United States Environmental Protection Agency. (2023). <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/proposed-rule-greenhouse-gas-emissions-standards-heavy>.
- [68] IRLES S. Europe's New Heavy-Duty CO₂ Standards, Explained[EB]//International Council on Clean Transportation (blog). 2023.
- [69] CARB. Advanced Clean Trucks Fact Sheet[EB/OL]//California Air Resource Board. (2021). <https://ww2.arb.ca.gov/resources/fact-sheets/advanced-clean-trucks-fact-sheet>.
- [70] CARB. Final Statement of Reasons - Advanced Clean Trucks Regulation[EB/OL]//California Air Resource Board. (2021). <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/barcu/regact/2019/act2019/fsor>.
- [71] CARB. Appendix A4. 2036 100 Percent Medium- and Heavy-Duty Zero-Emission Vehicle Sales Requirements, Preliminary Draft Regulation Order Advanced Clean Fleets Regulation[EB/OL]//California Air Resource Board. (2023). <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2023-02/230213prelim100sales>.
- [72] CARB. Proposed Advanced Clean Fleets Regulation Preliminary Language Revisions Workshop - Staff Presentation[EB/OL]//California Air Resource Board. (2023). https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2023-02/acfpres230213_ADA.
- [73] CNCDA. California Auto Outlook, Covering 4th Quarter 2022[EB/OL]//California New Car Dealers Association. (2023). https://www.cncda.org/wp-content/uploads/Cal-Covering-4Q-22_FINAL.
- [74] STAFF. The Zero Emission Vehicle Regulation Fact Sheet[EB/OL]//California Air Resources Board. (2021)[2021-04-27]. https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2019-06/zev_regulation_factsheet_082418_0.pdf.
- [75] GARDINER D. Newsom says ‘there is no Tesla without’ California. Here’s how much money it has received from the state[EB/OL]//San Francisco Chronicle. (2022)[2022-09-28]. <https://www.sfchronicle.com/politics/article/Does-Tesla-owe-all-its-success-to-California-17473046.php>.
- [76] XIE, YIAO, TIM DALLMANN R M. Heavy-Duty Zero-Emission Vehicles: Pace and Opportunities for a Rapid Global Transition. ZEV Transition Council Briefing Paper[EB/OL]//International Council on Clean Transportation. (2022). <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/05/globalhvsZEV-hdzev-pace-transition-may22>.
- [77] BLOOMBERGNEF. Global Low-Carbon Energy Technology Investment Surges Past \$1 Trillion for the First Time[EB/OL]//BloombergNEF. (2023). <https://about.bnef.com/blog/global-low-carbon-energy-technology-investment-surges-past-1-trillion-for-the-first-time/>.
- [78] FICKLING D. We're Not Even Close to Running Out of Green Minerals[EB/OL]. (2023). <https://www.bloomberg.com/opinion/articles/2023-02-06/energy-transition-we-re-not-close-to-running>

- out-of-green-minerals.
- [79] BRADSHER K. Why China Could Dominate the Next Big Advance in Batteries[EB]//The New York Times. 2023.
- [80] XUE W, HUANG M, LI Y 等 . Ultra-high-voltage Ni-rich layered cathodes in practical Li metal batteries enabled by a sulfonamide-based electrolyte[J/OL]. Nature Energy, 2021, 6(5). DOI:10.1038/s41560-021-00792-y.
- [81] YE L, LI X. A dynamic stability design strategy for lithium metal solid state batteries[J/OL]. Nature, 2021, 593(7858). DOI:10.1038/s41586-021-03486-3.
- [82] WAY R, IVES M C, MEALY P 等 . Empirically grounded technology forecasts and the energy transition[J/OL]. Joule, 2022, 6(9). DOI:10.1016/j.joule.2022.08.009.
- [83] LEE, ANNIE G C. How Tesla's Quest for Cheaper Batteries Boosts China. Bloomberg.Com, April 4, 2023, sec. Bloomberg Green Quick Take[EB/OL]. (2023). <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-04-04/how-tesla-s-quest-for-cheaper-batteries-buoys-china-quicktake>.
- [84] DONG F, ZHENG L. The impact of market-incentive environmental regulation on the development of the new energy vehicle industry: a quasi-natural experiment based on China's dual-credit policy[J/OL]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(4). DOI:10.1007/s11356-021-16036-1.
- [85] REN D. China Closes Gap with Japan After 2022 Car Exports Surpass Germany with 54.4 per Cent Surge to 3.11 Million Vehicles[EB/OL]//South China Morning Post. (2023). <https://www.scmp.com/business/china-business/article/3206875/chinas-car-exports-surpass-germanys-after-544-cent-surge-311-million-2022-narrowing-japans-lead>.
- [86] 中华人民共和国国务院 . “柴油货车污染治理攻坚战”——行动方案的通知 [EB/OL]// 中华人民共和国国务院 . (2018). http://www.gov.cn/gongbao/content/2019/content_5389334.htm.
- [87] COP26. Women Bear the Brunt of the Climate Crisis, COP26 highlights[EB/OL]//UN News. (2021)[2023-05-26]. <https://news.un.org/en/story/2021/11/1105322>.
- [88] SUGDEN F, DE SILVA S, CLEMENT F 等 . A framework to understand gender and structural vulnerability to climate change in the Ganges River Basin: Lessons from Bangladesh, India and Nepal[M/OL]//IWMI Working Papers: 卷 159. 2014. DOI:10.5337/2014.230.
- [89] ADB. Philippines : Integrated Flood Risk Management Sector Project[R]. 2018.
- [90] EIGE. Gender in environment and climate change[J/OL]. 2016. <http://eige.europa.eu/rdc/eige-publications/gender-environment-and-climate-change>.
- [91] VANDYCK T, EBI K L, GREEN D 等 . Climate change, air pollution and human health[M/OL]// Environmental Research Letters. (2022). DOI:10.1088/1748-9326/ac948e.

- [92] IPCC. Climate Change 2022, Impacts, Adaptation and Vulnerability[R]. 2022.
- [93] LIU L. Mainstreaming gender in actions on climate change[J/OL]. Climate Change Research, 2021, 17(5): 548-558. DOI:10.12006/j.issn.1673-1719.2020.298.
- [94] DUPAR M, ODI E T. Women ' s economic empowerment – the missing piece in low-carbon plans and actions[J]. 2022(19): 1-16.
- [95] SDG5 Gender Equality[EB/OL]//United Nations. [2023-05-27]. <https://sdgs.un.org/goals/goal5>.
- [96] SDG10 Reduced Inequalities[EB/OL]//United Nations. [2023-05-27]. <https://sdgs.un.org/goals/goal10>.
- [97] CHANTHAMITH B, WU M, YUSUFZADA S 等 . Interdisciplinary relationship between sociology, politics and public administration: Perspective of theory and practice[J/OL]. Sociology International Journal, 2019, 3(4): 353-357. DOI:10.15406/sij.2019.03.00198.
- [98] SEBASTIAN RAUNER, NICO BAUER, ALOIS DIRNAICHNER 等 . Coal-exit health and environmental damage reductions outweigh economic impacts[J]. Nature Climate Change, 2020, 10.
- [99] ZHANG S, WU Y, LIU X 等 . Co-benefits of deep carbon reduction on air quality and health improvement in Sichuan Province of China[J/OL]. Environmental Research Letters, 2021, 16(9). DOI:10.1088/1748-9326/ac1133.
- [100] OBERHAUSER A M. Gender and Household Economic Strategies in Rural Appalachia[J/OL]. Gender, Place & Culture, 1995, 2(1). DOI:10.1080/09663699550022080.
- [101] MAGGARD S W. Gender and Schooling in Appalachia: Historical Lessons for an Era of Economic Restructuring. Research Paper 9411[J/OL]. 1994, 7(May 2023): 34. <https://www.lib.uwo.ca/cgi-bin/ezpauthn.cgi?url=http://search.proquest.com/docview/62554028?accountid=15115>.
- [102] MIEWALD C E, MCCANN E J. Gender struggle, scale, and the production of place in the Appalachian coalfields[J/OL]. Environment and Planning A, 2004, 36(6). DOI:10.1068/a35230.
- [103] DUBLIN T, LICHT W. Gender and economic decline: The pennsylvania anthracite region, 1920-1970[J/OL]. Oral History Review, 2000, 27(1). DOI:10.1093/ohr/27.1.81.
- [104] WALK P, BRAUNGER I, SEMB J 等 . Strengthening gender justice in a just transition: A research agenda based on a systematic map of gender in coal transitions[J/OL]. Energies, 2021, 14(18). DOI:10.3390/en14185985.
- [105] SMERALDO SCHELL K, SILVA J M. Resisting Despair: Narratives of Disruption and Transformation Among White Working-Class Women in a Declining Coal-Mining Community[J/OL]. Gender and Society, 2020, 34(5). DOI:10.1177/0891243220948218.
- [106] MEASHAM F, ALLEN S. In Defence of Home and Hearth? Families, Friendships and Feminism in

- Mining Communities[1][J/OL]. Journal of Gender Studies, 1994, 3(1). DOI:10.1080/09589236.1994.9960550.
- [107] MAHADEVIA D, ADVANI D. Gender differentials in travel pattern - The case of a mid-sized city, Rajkot, India[J/OL]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 44. DOI:10.1016/j.trd.2016.01.002.
- [108] SPITZNER M, HUMMEL D, STIESS I 等 . Interdependente Genderaspekte der Klimapolitik[R/OL]. (2020). <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>.
- [109] KRONSELL A, SMIDFELT ROSQVIST L, WINSLOTT HISELIUS L. Achieving climate objectives in transport policy by including women and challenging gender norms: The Swedish case[J/OL]. International Journal of Sustainable Transportation, 2016, 10(8). DOI:10.1080/15568318.2015.1129653.
- [110] PANJWANI N. MAINSTREAMING GENDER IN KARĀCHĪ'S PUBLIC TRANSPORT POLICY[J]. European Journal of Sustainable Development, 2018.
- [111] ARAYA A A, LEGESSE A T, FELEKE G G. Women's safety and security in public transport in Mekelle, Tigray[J/OL]. Case Studies on Transport Policy, 2022, 10(4). DOI:10.1016/j.cstp.2022.10.019.
- [112] HUFFMAN A H, VAN DER WERFF B R, HENNING J B 等 . When do recycling attitudes predict recycling? An investigation of self-reported versus observed behavior[J/OL]. Journal of Environmental Psychology, 2014, 38. DOI:10.1016/j.jenvp.2014.03.006.
- [113] MOJICA F J, FERRER F N. Every Ride Matters: Women Commuters ' Experiences[J/OL]. Asian Journal of Education and Social Studies, 2022. DOI:10.9734/ajess/2022/v35i1745.
- [114] 黎昌江 . 地铁女性车厢设置及其对站台乘客候车的影响研究 [D/OL]. 西南交通大学 , 2021. doi:10.27414/d.cnki.gxnu.2021.001001.
- [115] HARUMAIN Y A S, AZMI N F, YUSOFF S M. Assessing Elements of Walkability in Women's Mobility[J/OL]. Journal of the Society of Automotive Engineers Malaysia, 2021, 1(3). DOI:10.56381/jsaem.v1i3.61.

致 谢

项目课题组非常感谢中国环境与发展国际合作委员会（国合会）设立并支持“全减污降碳扩绿增长协同机制”专题政策研究，为中外方专家提供了一个充分讨论和交流的平台。

特别感谢国合会中方首席顾问刘世锦先生、外方首席顾问 Scott Vaughan 先生、首席顾问的支持专家组 Knut Alfsen 博士，以及生态环境部应对气候变化司一级巡视员孙桢司长、大气环境司固定源处王凤处长和工业和信息化部赛迪研究院冯相昭研究员在课题实施过程中提供的咨询建议。

感谢课题组支持专家北京大学环境科学与工程学院张世秋教授、湖石可持续发展研究会胡涛理事长、能源基金会中国交通项目高级项目主任龚慧明、国际清洁交通委员会中国项目主任何卉女士和欧盟项目常务主任 Felipe RODRÍGUEZ 先生、加州大学伯克利分校林江教授对项目报告的审阅和咨询建议。

感谢国合会国际支持办公室专家 Kristine St-Pierre 对性别议题的特别指导。感谢国合会秘书长张慧勇先生、副秘书长刘侃女士和唐华清女士，以及国合会秘书处和国际支持办公室王美真女士等为本课题提供的组织和协调等方面的支持。