



空气污染与气候变化的 协同治理效益 ——中国广东和山东的 政策路径

马里兰大学全球可持续发展中心
清华大学地球系统科学系

2023年10月

作者:

余莎¹, Jenna Behrendt¹, Andy Miller¹, 刘洋², Jacqueline Adams¹, 崔宜筠¹, 李文丽¹, 张海稳¹, 程静², 同丹², 宋佳伟¹, 张强², Nate Hultman¹

致谢:

本报告由红杉气候基金会 (Sequoia Climate Foundation) 资助。感谢楼洁红、朱梦曳、Haewon McJeon、Mel George Vallimyalil 和 Kowan O' Keefe 以及来自中国、美国和其他国家不同研究机构的审稿人提供的有益意见。特别感谢马里兰大学的超级计算资源 (<http://hpcc.umd.edu>) 为本研究工作提供的支撑。

建议引用格式:

Y Sha., J. Behrendt, A. Miller, Y. Liu, J. Adams, R. Cui, W. Li, H. Zhang, J. Cheng, D. Tong, J. Song, Q. Zhang, N. Hultman. 2023. "Co-benefits between Air Quality and Climate Policies in Guangdong and Shandong Provinces in China." Center for Global Sustainability, University of Maryland & Tsinghua University. 33pp.

¹ 马里兰大学全球可持续发展中心

² 清华大学地球系统科学系

* 通讯作者: jbehrend@umd.edu

目录

缩写词列表	3
1. 引言	4
2. 空气质量改善与气候变化应对现状	6
2.1. 主要政策进展	6
2.2. 广东和山东:排放现状与相关政策	7
3. 研究方法	9
3.1. 情景设计	9
4. 减排路径	11
4.1. 全国和省级减排路径	11
4.2. 广东省能源转型与碳减排路径	12
4.3. 山东省能源转型与碳减排路径	15
5. 空气质量改善协同效益	19
5.1. 广东省空气质量改善协同效益	19
5.2. 山东省空气质量改善协同效益	21
6. 政策建议	23
6.1. 广东省空气质量改善与气候变化应对政策建议	23
6.2. 山东省空气质量改善与气候变化应对政策建议	24
7. 总结与展望	27
参考文献	29

图目录

图 2.1	全国和地方的空气质量政策。	7
图 3.1	能源、排放、污染浓度和健康影响评估的分析方法和建模工具。	9
图 4.1.1	现行政策 (Cpol) 和 2050 年零碳 (NZ2050) 情景下全国和各省的二氧化碳排放路径。 ..	11
图 4.2.1	广东省分部门二氧化碳排放量。	12
图 4.2.2	NZ2050 情景下广东省的能源系统转型。	14
图 4.3.1	山东省分部门二氧化碳排放量。	15
图 4.3.2	NZ2050 情景下山东省的能源系统转型。	16
图 5.1.1	不同情景下广东省的 PM _{2.5} 浓度。	19
图 5.1.2	不同情景下广东省与 PM _{2.5} 污染暴露相关的过早死亡人数。	20
图 5.1.3	广东省与 PM _{2.5} 污染暴露相关的过早死亡人数贡献分解。	20
图 5.2.1	不同情景下山东省的 PM _{2.5} 浓度。	21
图 5.2.2	不同情景下山东省与 PM _{2.5} 污染暴露相关的过早死亡人数。	22
图 5.2.3	山东省与 PM _{2.5} 污染暴露相关的过早死亡人数贡献分解。	22

表目录

表 2.1	国家层面各部门温室气体与空气污染物控制政策。	6
表 3.1	气候政策和大气污染治理的能源和排放预测情景。	10
表 6.1	广东省和山东省中短期与长期碳减排和空气质量改善政策建议。	26

缩写词列表

术语	英文全称	中文术语
BAU	Business as Usual	参考情景
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage	生物能源与碳捕获与封存技术
BHE	Best Health Effects	最佳健康效应
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage	碳捕获、利用和封存
CO₂	Carbon Dioxide	二氧化碳
CSG	China Southern Power Grid	中国南方电网
EV	Electric Vehicle	电动汽车
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicles	燃料电池电动汽车
FYP	Five-Year Plan	五年计划
GDP	Gross Domestic Product	国内生产总值
GHG	Greenhouse Gas	温室气体
LUC	Land Use Change	土地利用变化
NEA	National Energy Administration	国家能源局
NO_x	Nitrogen Oxides	氮氧化物
PM	Particulate Matter	颗粒物
PM₁₀	Particulate Matter (diameter < 10 micrometers)	颗粒物（直径 < 10 微米）
PM_{2.5}	Particulate Matter (diameter < 2.5 micrometers)	颗粒物（直径 < 2.5 微米）
PV	Photovoltaics	光伏
SO₂	Sulfur Dioxide	二氧化硫
VOCs	Volatile Organic Compounds	挥发性有机化合物
WHO	World Health Organization	世界卫生组织

单位	含义
GW	吉瓦
m³	立方米
Mt	百万吨
TWh	太瓦时
μg	微克

1. 引言

中国正面临应对气候变化与改善空气质量的双重挑战。尽管每项挑战均任务艰巨，研究表明，同时处理这两个问题可以最大程度实现协同效益。本报告以中国广东和山东两个省份为例，聚焦应对气候变化对改善空气质量的协同效益。尽管广东和山东均为中国的经济和人口大省，但它们的产业、能源结构、对化石燃

料的依赖程度以及当前空气污染水平均存在较大差异。本报告通过量化两个省份在各自脱碳路径下当地空气质量改善的情况，评估两省在各个行业部门减少二氧化碳(CO₂)排放和改善PM_{2.5}污染的协同机会和政策措施，为协同策略的设计提供支持，并为其他省份提供经验。

中国当前亟需改善空气质量保护公共健康，同时需要减少温室气体(GHG)排放，减轻气候变化带来的日益严重的影响。根据全球疾病负担(GBD)评估的数据，2017年细颗粒物(PM)污染问题成为影响中国公众生命健康的四大主要风险因素之一(M. Zhou et al, 2019)。研究表明，2017年中国有超过124万人由于空气污染暴露而死亡(Yin et al, 2020)。尽管中国已经实施一系列空气污染治理政策减少与空气污染相关的死亡，但要实现国家空气质量目标，需采取额外措施以进一步减少空气污染对人类健康的负面影响(Yin et al, 2020)。同时，气候变化带来的其他影响也逐渐凸显，自20世纪以来，全国各地的地表温度持续上升，高温和极端天气事件频发(如洪涝和干旱等)，严重影响了农业和畜牧业产量(Shaw et al, 2022)。

中国在应对气候变化和改善空气质量方面提出了一系列政策目标，为协同应对气候变化与空气污染治理提供了契机。这些目标包括“30-60”脱碳目标，旨在2030年之前实现二氧化碳(CO₂)排放达峰，2060年之前实现碳中和。此外，还有“美丽中国”空气质量战略，计划到2035年之前将全国PM_{2.5}浓度限制在年均35μg/m³以下(United Nations, 2021; Xing et al, 2020)。然而这一目标仍远低于世界卫生组织(WHO)第四阶段建议值(10μg/m³)，因此需要持续改善空气质量，努力达到甚至超过承诺的政策目标(World Health Organization, 2021)。自2012年以来，中国已采取一些列措

施，包括加强末端排放控制、能源转型以及经济结构调整，显著减少了空气污染物排放(Geng et al, 2021)。近期，中国采取了更多元化和灵活的方法来改善空气质量，如鼓励非政府机构参与、采用自上而下和自下而上相结合的政策，以及依靠市场机制来解决问题(P. Wang et al, 2021)。由于末端排放控制的潜力在短期内逐渐减小，低碳转型将成为中国实现长期空气质量改善的关键(Cheng et al, 2021)。

研究广泛表明，全球气候减缓与局地空气质量改善之间存在较强的协同作用(Aunan et al, 2006; Scovronick et al, 2019; Yamineva and Liu, 2019)。然而，协同效应大小取决于所采用的具体减缓技术和策略。例如，生物能源或碳捕获、利用和封存(CCUS)技术虽然能够减少温室气体排放，但由于需要继续使用化石燃料或额外的能源投入，可能反而会加剧空气污染(Koornneef et al, 2011)。为了最大程度实现空气污染治理和碳减排的协同效益，在选择碳减排措施时必须综合考虑减少空气污染的问题(Q. Zhang et al, 2023)。这表明，全面理解和应对温室气体和空气污染物的减排问题有助于更有效地实现这两个政策目标。

此外，低碳转型和空气质量改善均需要对各个省份进行有针对性的分析，并据此制定相应的策略。首先，实现温室气体净零排放的路径因省而异，取决于各省份现有的能源与经济结构以及转型潜力(Nilsson et al, 2021)。中国各省份和城

市面临的气候行动和低碳转型挑战各异,故需要制定不同的策略(P. Wang et al, 2021)。此外,受到气候、能源系统、人口分布和人口特征等多种因素的影响,各地区的空气质量及其对公共健康的影响也存在显著差异(H. Chen et al, 2020; Y. Chen et al, 2013)。尽管从2014年到2018年,全国范围内的空气污染有所减少,但北京、天津、河北和山东等地,仍然面临严重的空气质量问题(H. Chen et al, 2020)。截至2017年,中国338个地级市中有64%未能达到国家设定的PM_{2.5}标准(Q. Zhang et al, 2019),这既揭示了需要采取更多措施来实现全国范围内的空气质量目标,也反映出不同地区的空气质量的差异。因此,采取区域性、本地化的评估方法可能有助于实现国家政策目标(P. Wang et al, 2021)。

地方层面的行动者不仅有机会参与国家气候目标的制定,还可以推动政策的落实。当前环境目标的挑战性日益加剧,在实现这些目标的过程中,非国家行为主体,包括地方政府、市场和民间社会行为主体,越来越多地参与政策制定(P. Wang et al, 2021)。非政府行为主体可以通过测试新的减排技术或策略,以及在政府和非政府行为主体之间交流最佳实践,从而提升国家政策的雄心(Hsu et al, 2018)。《巴黎协定》明确提到,次国家和地方级别的行动是能力建设和适应的关键领域(United Nations, 2015)。空气质量和公共健康的改善可以激励地方政府在短期内采取更多气候减缓行动。研究表明,地方健康影响,如COVID-19大流行,可以成为制定政策的动力(Vandyck et al, 2021)。有助于实现双重目标的综合战略将为加强地方行动和实现国家目标提供 stronger 的动力。

评估地方层面的能源系统转型以及区域和地方层面上的减排措施对空气质量的协同效益,有助于更深入理解中国整体空气质量和气候减缓战略的协同效益。尽管以往的研究评估了不同气候减缓方案下对中国整体空气质量影响(Cai et al, 2018; Cheng et al, 2021; Tang et al, 2022; Y. Wang et al, 2022),但针对地方层面的方案和影响及地方行为主体采取行动的研究却不多(L. Zhang et al, 2022; W. Zhang et al, 2020)。本报告对中国两个关键省份——广东和山东在不同政策路径下的碳排放和空气质量影响进行了量化,并评估了

实现脱碳和空气质量协同效益的特定部门和省级政策。我们根据各省份的化石燃料依赖程度、空气质量和经济发展情况进行了排序,选取了广东和山东这两个省份作为研究重点,因为它们能够代表中国两种不同的减排和发展路径(更多详细信息请参见技术附录)。由于经济和人口规模大,广东和山东都受到二氧化碳和空气污染的严重影响,但在化石燃料依赖程度、空气质量现状和人均国内生产总值(GDP)方面却存在显著差异。本报告第2节将重点介绍中国在改善空气污染和实现气候减缓目标而所实施的一些国家级、地区级和行业级政策。第3节将讨论我们开发减排途径和空气质量模型所采用的方法。第4节将讨论碳减排战略及其对国家、广东省和山东省特定行业部门的影响。第5节将探讨了广东省和山东省不同情景下的空气污染物浓度和碳减排战略对空气质量的协同效益。第6节将详细讨论对广东和山东的政策建议。第7节将总结研究结论,并指出未来可能的研究方向。

2. 空气质量改善与气候变化应对现状

2.1. 主要政策进展

在“十二五”期间，中国实施了一系列重要的改善空气质量的政策，包括2013年的《大气污染防治行动计划》(The State Council, 2013a)。此后，中国进而颁布了一系列旨在实现气候减缓和空气质量目标的国家政策。这些目标包括“30-60”气候减缓目标和更新的2035年PM_{2.5}浓度目标。最新的《十四五“节能减排”综合工作方案》设定了2025年的目标，包括能耗比2020年降低13.5%，化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)、氮氧化物(NO_x)和挥发性有机化合物(VOCs)比2020年降低

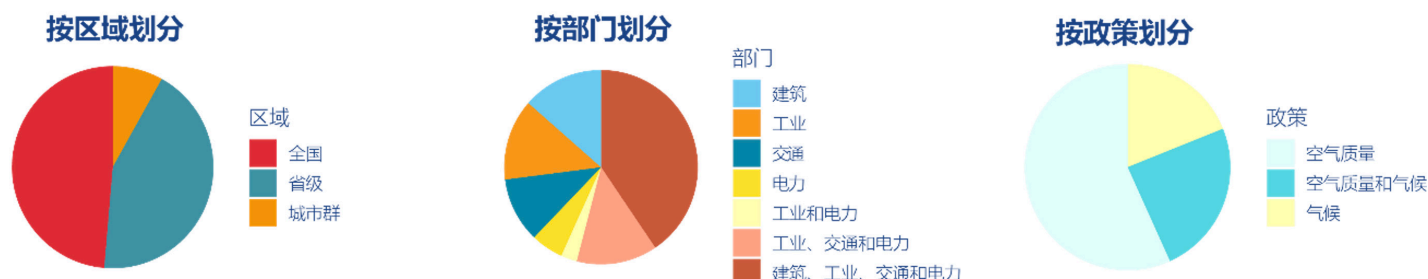
8%至10%以上(The State Council, 2022)。在“十三五”规划的基础上，“十四五”规划设定了降低能源强度和消耗的基础，同时限制氨(NH₃)、二氧化硫(SO₂)和氮氧化物(NO_x)的排放(The State Council, 2017)。“十三五”规划还包括了挥发性有机化合物(VOCs)污染防治工作计划，目标是在2020年将VOCs排放量在2015年的基础上减少15%(Agency of Environmental Protection & General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 2013)。此外，一些政策如《打赢蓝天保卫战三年行动计划》，明确提出了将减少空气污染物排放与温室气体排放相结合，这表明中国开始有针对性地将大气污染和气候变化进行整合治理(The State Council, 2018b)。另外还有一些专门针对特定部门温室气体和/或空气污染物的政策，详见表2.1。

表 2.1: 国家层面各部门温室气体与空气污染物控制政策。

部门	主要政策	关键成果
建筑	绿色建筑评价标准 (住房和城乡建设部, 2006、2014、2019)	<ul style="list-style-type: none"> 制定室内空气质量标准 把控民用建筑工程所用材料
	民用建筑工程室内环境污染控制标准 (住房和城乡建设部, 2018、2020)	<ul style="list-style-type: none"> 降低能耗 提高能源效率 促进民用建筑低碳绿色发展
工业	工业绿色发展规划 (工业和信息化部, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> 降低碳和空气污染物的排放强度 提高能源效率 提高资源利用率 完善绿色制造体系
	国家高新区绿色发展专项行动实施方案 (科学技术部, 2021)	<ul style="list-style-type: none"> 转向污染减排、绿色工业和高新技术发展
交通	大气污染防治行动计划 (国务院, 2013b)	<ul style="list-style-type: none"> 推进智能交通管理 缓解城市交通拥堵 增加公共交通工具的比例
	机动车污染防治技术政策 (He & Li, 2018; 生态环境部, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> 提高新型机动车的排放限值 加强对机动车非常规污染物的控制 推动机动车向绿色、低碳、可持续发展的方向发展。
	轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (生态环境部, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> 明确轻型汽车污染物排放要求、生产一致性和在用符合性检查的要求和判断方法
	乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分并行管理办法 (工业和信息化部, 2017)	<ul style="list-style-type: none"> 提高乘用车的节能水平 缓解能源和环境压力 建立节能和新能源汽车的长期管理机制 促进汽车工业的健康发展
电力	中共中央国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见 (国务院, 2018a)	<ul style="list-style-type: none"> 改造和退役落后燃煤电厂

图 2.1: 全国和地方的空气质量政策。

分别按区域、行业和政策类型划分



为了深入了解不同参与者、部门和关键领域的政策构成,并识别政策差距,我们对2012年至2022年37项政策进行了评估(图2.1)。此分析考察的空气污染物包括PM_{2.5},以及PM_{2.5}的前体物NO_x、SO₂和VOCs。这些污染物主要来自工业部门的燃烧化石燃料的锅炉、电力部门的燃煤发电厂、交通部门的汽车尾气以及建筑部门的供暖设备(Liu et al, 2016)。在我们评估的现有政策中,约一半是国家层面的政策,其余政策主要来自省级,少数来自城市群(例如:京津冀地区、珠江三角洲、长江三角洲)。这些政策主要针对电力、工业和交通等部门,相对较少政策关注建筑部门。我们审查的大多数政策都涵盖了多个部门,这表明在制定政策时已经考虑到了多种政策成果和目标。就政策目标而言,我们评估的大多数政策主要是空气质量政策,我们将其定义为主要通过末端控制措施来减少空气污染物,而没有明确针对能源或温室气体排放进行控制的目标。另外一些政策同时考虑了空气质量和气候问题,这些政策被定义为明确针对能源使用或温室气体减排以及空气污染物减排的政策。对最近几项政策的评估结果表明,国家和区域层面政策分布较均匀,跨部门政策占多半,但大多数政策仍然单独侧重于空气质量和末端控制,或能源转型以及气候减缓,而非同时涵盖两个方面。由于评估时间和政策数量的限制,此分析仅为初步评估。进一步识别政策差距需要对各级政府、各部门以及针对不同目标的政策进行更全面的评估。有关我们分析的更多信息,请参见技术附录。

2.2. 广东和山东:排放现状与相关政策

在地方层面评估碳减排和提升空气质量路径有助于协同政策机制的制定。地方政策可以更加有针对性地对政策目标产生积极影响。例如,《大气污染防治行动计划》在京津冀地区、珠江三角洲和长江三角洲地区设定了PM₁₀和PM_{2.5}浓度限值,并在这些污染严重地区成功实现了减排、改善空气质量以及降低死亡率(Q. Zhang et al, 2019年)。在本研究中,我们将以广东和山东两省为重点,评估碳减排和空气质量改善的政策和路径,并为其他省份提供参考。

广东和山东两个省份经济规模大且人口众多,受气候变化和空气污染直接影响。然而,两省对化石燃料的依赖程度、目前的空气质量和人均国内生产总值(GDP)各不相同,其减排途径也大相径庭,代表两种不同的减排路径。目前,两省的空气污染物排放和二氧化碳排放水平存在显著差异。2020年,广东的PM_{2.5}年平均浓度为22μg/m³(Department of Ecology and Environment of Guangdong Province, 2021a),而山东为46μg/m³(People's Government of Shandong Province, 2021)。广东和山东的气候条件不同,导致供暖和制冷的能源需求以及大气扩散条件不同。广东和山东的国内生产总值(GDP)分别居全国第一和第三位,人口分别为全国第一和第二位,但由于经济结构和能源结构的差异,其二氧化碳排

放量分别居全国第五和第一位 (Carbon Emission Accounts and Datasets, 2023; Guan et al, 2021; National Bureau of Statistics, 2020; Shan et al, 2020)。2019年, 山东的二氧化碳排放量几乎是广东的两倍, 两省二氧化碳排放量分别约为9.4亿吨和5.7亿吨 (Carbon Emission Accounts and Datasets, 2023; Guan et al, 2021; Shan et al, 2020)。在不同的产业构成和经济结构下 (详情请参见附录), 两省需要采取不同的减排策略 (Yuan and Zhou, 2021; Zhang, 2017; Zhao, 2015)。

在政策方面, 广东省和山东省均采用了一系列针对气候减缓和空气质量改善的行动措施。在“十三五”规划期间, 广东省成功实现了单位GDP的二氧化碳排放量减少25.5%的目标 (People's Government of Guangdong Province, 2022a)。其开展的“蓝天保卫战百日冲刺行动”, 致力于从关键环节和行为上减少空气污染物排放, 包括产生挥发性有机化合物 (VOCs) 的企业、储罐、油罐车和加油站, 以及机动车、扬尘、露天焚烧和工业排放源, 使用不合格成品柴油车等行为, 以及工业窑炉排放、现场扬尘和道路扬尘等因素 (Department of Ecology and Environment of Guangdong Province, 2021b)。此外, 《广东省碳达峰实施方案》也制定了一系列旨在改善空气质量和减缓气候变化的举措 (People's Government of Guangdong Province, 2022b)。在气候减缓方面, 山东省的可再生能源装机容量从2015年到2020年增加了17.7%, 其中太阳能和生物质发电装机容量在全国排名第一, 海阳市更是成为中国首个利用核能实现零碳供热的城市 (Energy Administration of Shandong Province, 2022; B. Zhou, 2022)。在减少空气污染方面, 山东省制定了钢铁企业超低排放差别电价政策、钢铁企业超低排放改造、涉挥发性有机物企业综合治理和提标改造等一系列措施。2020年, 治理扬尘源1.4万个, 并加强了市县公路机扫率, 淘汰国三及以下排放标准柴油货车19万余辆 (People's Government of Shandong Province, 2021)。

在这些行动的基础上, 两个省份均需要采取额外措施来进一步改善空气质量, 实现气候减缓目标。评估广东和山东气候减缓和空气质量改善的政策机遇和挑战对于实现这两个政策目标都非常重要。

3. 研究方法

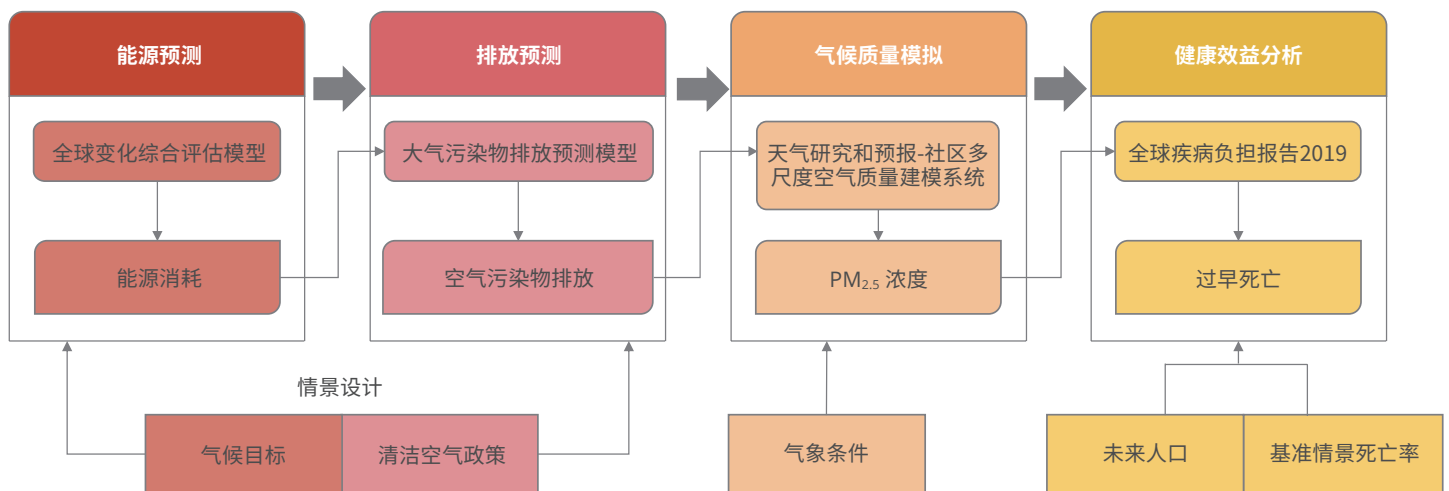
在本报告中,我们将全球综合评估模型(GCAM-China)和中国排放动态预测模型(DPEC)进行耦合,根据不同的气候目标和清洁空气政策,生成省级的温室气体和空气污染物排放路径。然后,我们利用空气质量模型WRF-CMAQ¹来评估不同情景下PM_{2.5}浓度(Cheng et al, 2021),最后利用全球疾病负担报告中污染暴露响应方程计算过早死亡影响(GBD 2019 Risk Factors Collaborators, 2020)(图3.1)。有关方法学的细节详见技术附录。

3.1. 情景设计

本研究共采用四个情景来评估不同气候和清洁空气政策组合对2060年碳和空气污染物排放的影响,其中包括三个核心情景和一个补充情景灵敏性分析。三个核心情景由不同的气候政策雄心 and 不同强度的空气污染治理措施组合而成,补充情景则探讨了没有采用CCUS技术的情况下实现气候目标对空气质量和健康的影响(表3.1)。

本研究包含两种气候政策情景:第一种情景假设全国二氧化碳排放量在2050年实现净零排放,到2060年实现温室气体净零排放,同时各省份可以采取不同的减排路径(NZ2050);第二种情景假设气候政策延续现行政策,不考虑额外新的政策措施(Cpol),作为参考情景。在NZ2050情景中,设定了2050年国家二氧化碳净零排放的约束条件,但各省份没有设定具体的气候变化减缓目标。在Cpol情景中,不考虑国家气候减缓目标及先进的部门减排政策,并对其近期趋势进行校准以反映当前转型趋势,包括电力生产中的煤炭消费和可再生能源比例以及工业中的煤炭使用,并模拟延续当前政策情况下的未来路径。在所有NZ2050的情景中,2020年后二氧化碳排放迅速下降。这些情景包含一系列具体的行业政策,比如电力和建筑部门的煤炭淘汰、建筑部门的电气化、工业和交通部门的电气化,以及交通和工业部门的氢能部署。更多有关GCAM-China建模的信息,请参阅附录。

图 3.1: 能源、排放、污染浓度和健康影响评估的分析方法和建模工具。



¹ WRF是由美国国家大气研究中心(NCAR)开发的下一代中尺度数值天气预报系统,在本研究中用于气象模拟。CMAQ是由美国环保署开发的空气质量模型,在本研究中用于PM_{2.5}浓度模拟。

在大气污染治理方面，我们也考虑了两种不同的大气污染物控制情景，分别反应会不同的末端控制政策。其中，最佳健康效应(BHE)情景采用了加强的末端控制政策，而参考情景(BAU)采用了现有的空气质量控制政策。我们的研究主要聚焦在BHE情景下，以展示同时实施末端控制和气候减缓政策时对空气质量的影响。

需要注意的是，实现2060年碳中和的具体路径存在不确定性。通过选择不同的技术、政策和经济路径，将对社会各个部门过渡到净零排放的方式以及对空气质量协同效益产生不同影响。碳捕获、利用和封存(CCUS)技术在二氧化碳去

除过程中并不能去除所有的空气污染物，并且如果应用到依靠化石燃料供能的生产设施中，可能导致化石燃料的继续使用而非减少。此外，运行CCUS需要消耗更多的能源，可能会加剧空气污染的(Koornneef et al, 2011)。鉴于CCUS技术在本世纪中期部署的不确定性，我们还包括了一个敏感性分析，假设到2050年达到二氧化碳净零排放而没有使用CCUS技术，即NZ2050_BHE_NoCCUS情景，来进一步分析不同气候减缓路径对空气质量的影响。相比之下，采用CCUS技术的情景将在2060年实现净零温室气体排放(碳中和)。我们的四种情景比较了气候减缓目标和末端控制政策对脱碳和空气质量的影响。

表 3.1: 气候政策和大气污染治理的能源和排放预测情景。

		气候政策情景	
		Net Zero CO ₂ 2050 (2050 年零碳)	Continued Current Policy (现行政策)
大气污染治理情景	Best Health Effects (最佳健康效应)	NZ2050_BHE	Cpol_BHE
	Sensitivity Analysis: (补充情景灵敏性分析) NZ2050_BHE_noCCUS		
	Business-as-Usual (参考情景)		Cpol_BAU

4. 减排路径

4.1. 全国和省级减排路径

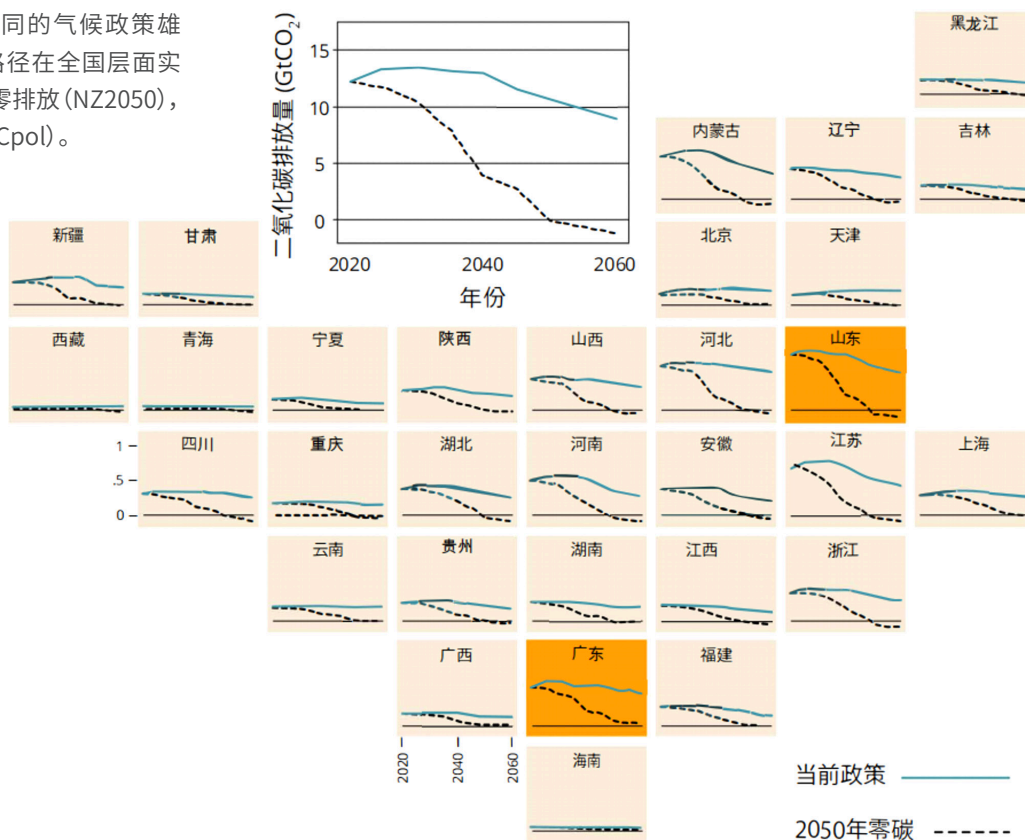
通过制定不同的气候目标情景，我们模拟各个省份可能采取的碳减排路径。在全国层面实现2050年二氧化碳净零排放的目标所有省份都需要大幅降低碳排放水平，但具体减排路径有所不同，包括短期内的减排幅度和实现净零排放年份(图4.1.1)。在近期内，各省2020年到2030年的减排率各不相同，介于5%到42%之间。此外，各省实现净零排放的年份也不同，几乎所有省份都在2045-2065年之间实现二氧化碳净零排放，多数省份在2055年前达到这一目标。此

外，一些省份可以在本世纪中叶左右通过部署生物质能源与碳捕获与封存技术(BECCS)或通过增加碳汇等方式实现NZ2050情景下的净负排放，以抵消其它省份的二氧化碳以及非二氧化碳温室气体的剩余排放，从而实现全国层面的净零排放。

本报告深入研究了广东省和山东省在不同气候目标情景下减排路径的差异。这两个省份均具有经济和人口规模高的特点，但在经济和能源结构方面又存在差异。我们通过探讨两省实现碳中和与改善空气质量的不同途径，提出协同应对气候变化和减少空气污染物排放的政策建议，为其他面临类似机遇和挑战的省份提供借鉴。

图 4.1.1: 现行政策 (CPOL) 和2050年零碳 (NZ2050) 情景下全国和各省的二氧化碳排放路径。

气候目标情景反应不同的气候政策雄心，通过各省份不同路径在全国层面实现2050年二氧化碳净零排放 (NZ2050)，或延续当前政策趋势 (Cpol)。



注:在2050年零碳情景中，二氧化碳排放量在2025年之前达到峰值，早于国家自主贡献在2030年之前达到峰值的目标。

广东省与其他省份相比,经济以服务业为主,能源生产活动相对较少,总体二氧化碳排放水平相对较低。因此,虽然工业和电力是实现减排的关键部门,但广东省的建筑和交通部门的减排潜力也很显著。此外,由于本省条件限制,广东需要依靠其他省份通过负排放技术来抵消剩余的温室气体排放,从而实现全国层面净零排放目标。因此,促进广东全行业减排对于实现国家碳中和至关重要。

与其他省份相比,广东省通过CCUS和土地碳汇的负排放潜力相对有限,在本省实现净零排放目标有很大挑战。据估计,广东的陆地碳储存能力不足1亿吨二氧化碳(MtCO₂),而其他省份的储存能力约为1000亿吨二氧化碳(Yu et al, 2019)。由于有限的碳储存能力,难以在广东省内使用负排放抵消剩余为温室气体并实现净零排放。在NZ2050情景下,到2050年,广东省通过生物能源与碳捕获与封存技术(BECCS)和土地利用变化(LUC)实现1600万吨二氧化碳负排放,净二氧化碳排放量比2020年减少88%。在NZ2050_NoCCUS情景下,一部分交通和工业部门的排放被LUC的负排放抵消,2050年二氧化碳净排放比2020年减少93%。与NZ2050情景相比,LUC负排放增加了160%(图4.2.1)。在NoCCUS情景下,不仅土地利用变化产生的负排放增长,工业和交通部门的剩余排在2050年也进一步下降。CCUS技术的采用会使得一些省份和部门留有更高的排放空间/或保留较少的土地碳汇。

尽管各个部门的减排时机、幅度和持续时间各不相同,但均需实现大幅度减排。到2050年,在NZ2050情景下,广东电力部门排放量比2020年减少了100%以上,但交通部门仍有相当大的一部分剩余正排放(约60%)(图4.2.1)。尽管乘用车可以快速实现电动化,但对于某些交通方式,如航空和重型卡车,脱碳方式有限。工业排放直到2040年才开始显著下降。到2050年,80%的减排量来自工业和电力部门(约5亿吨二氧化碳),17%的减排来自建筑和交通部门(约1亿吨二氧化碳)。到2050年,NZ2050情景中剩余排放量主要集中在交通和工业部门,需要通过负排放进行抵消。

尽管不同情景下的排放路径各不相同,但都表明所有部门,尤其是电力部门,需要进行大量减碳工作。在Cpol情景中,2050年二氧化碳排放量几乎是NZ2050和NZ2050_NoCCUS情景中正排放的六倍。要实现净零排放,到2050年,建筑、工业、电力和交通部门分别需要减排99%、85%、103%和48%。Cpol情景中,2050年排放规模与2020年相当,但交通排放比2020年增加了79%,电力排放比2020年减少了65%。这表明,保持当前政策和市场趋势,电力部门会实现一定程度的碳减排,但其他部门的排放量将保持相对稳定或,尤其是交通部门,快速增长。

广东实现碳中和目标需要全行业的努力。确定各个部门在短期和长期的减排重点对于促进能源系统转型和减碳至关重要。为了更好地了解这些策略,我们进一步详细评估了NZ2050情景的能源转型路径。

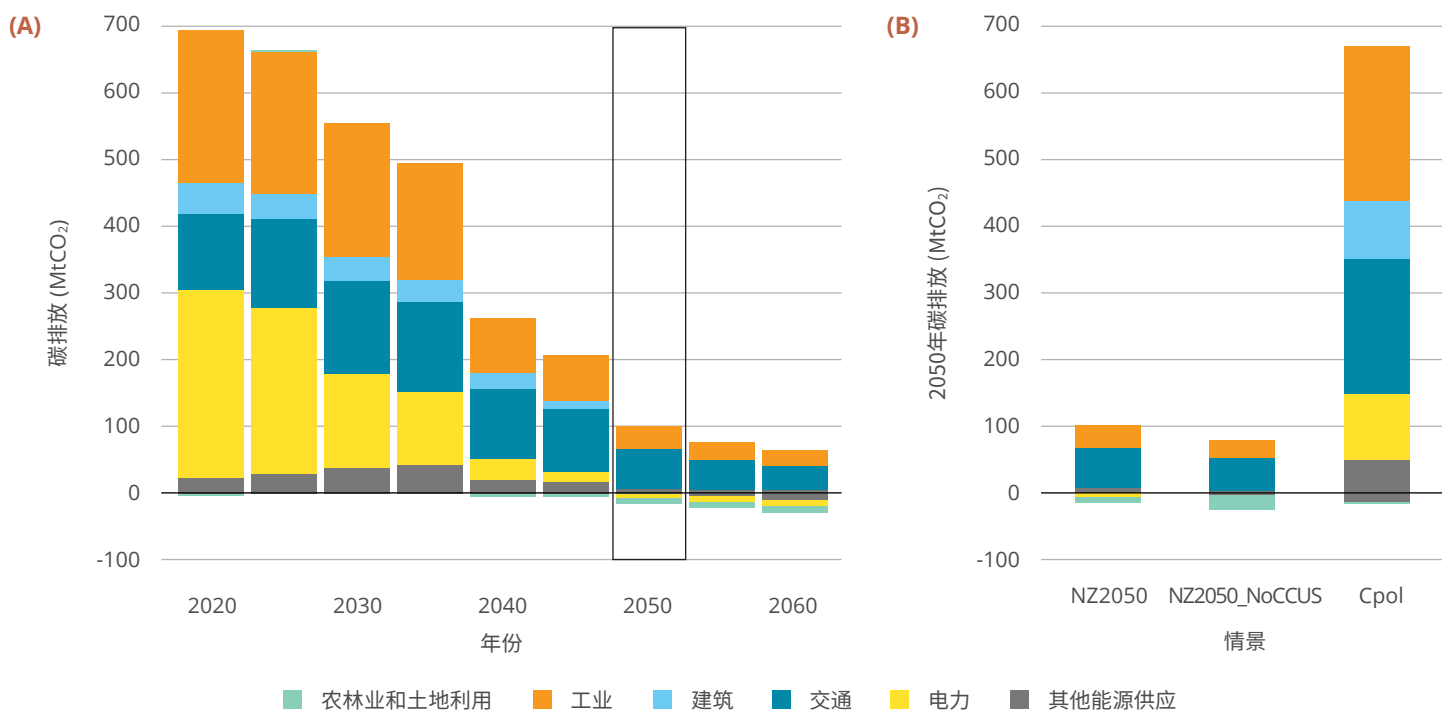
4.2. 广东省能源转型与碳减排路径

广东省与其他省份相比,经济以服务业为主,能源生产活动相对较少,总体二氧化碳排放水平相对较低。因此,虽然工业和电力是实现减排的关键部门,但广东省的建筑和交通部门的减排潜力也很显著。此外,由于本省条件限制,广东需要依靠其他省份通过负排放技术来抵消剩余的温室气体排放,从而实现全国层面净零排放目标。因此,促进广东全行业减排对于实现国家碳中和至关重要。

与其他省份相比,广东省通过CCUS和土地碳汇的负排放潜力相对有限,在本省实现净零排放目标有很大挑战。据估计,广东的陆地碳储存能力不足1亿吨二氧化碳(MtCO₂),而其他省份的储存能力约为1000亿吨二氧化碳(Yu et al, 2019)。由于有限的碳储存能力,难以在广东省内使用负排放抵消剩余为温室气体并实现净零排放。在NZ2050情景下,到2050年,广东省通过生物能源与碳捕获与封存技术(BECCS)和土地利用变化(LUC)实现1600万吨二氧化碳负排放,净二氧化碳排放量比2020年减少88%。在NZ2050_NoCCUS情景下,一部分交通和工业部门的排放被LUC的负排放抵消,2050年二氧化碳净排放比2020年减少93%。与NZ2050情景相比,LUC负排

图 4.2.1: 广东省分部门二氧化碳排放量。(A) NZ2050情景下2020年至2060年各部门的二氧化碳排放量, (B) NZ2050、NZ2050_NOCCUS和Cpol情景下2050年各部门的二氧化碳排放量。

其他能源供应包括天然气生产、石油炼制、制氢和供热过程。



放增加了160% (图4.2.1)。在NoCCUS情景下, 不仅土地利用变化产生的负排放增长, 工业和交通部门的剩余排放在2050年也进一步下降。CCUS技术的采用会使得一些省份和部门留有更高的排放空间/或保留较少的土地碳汇。

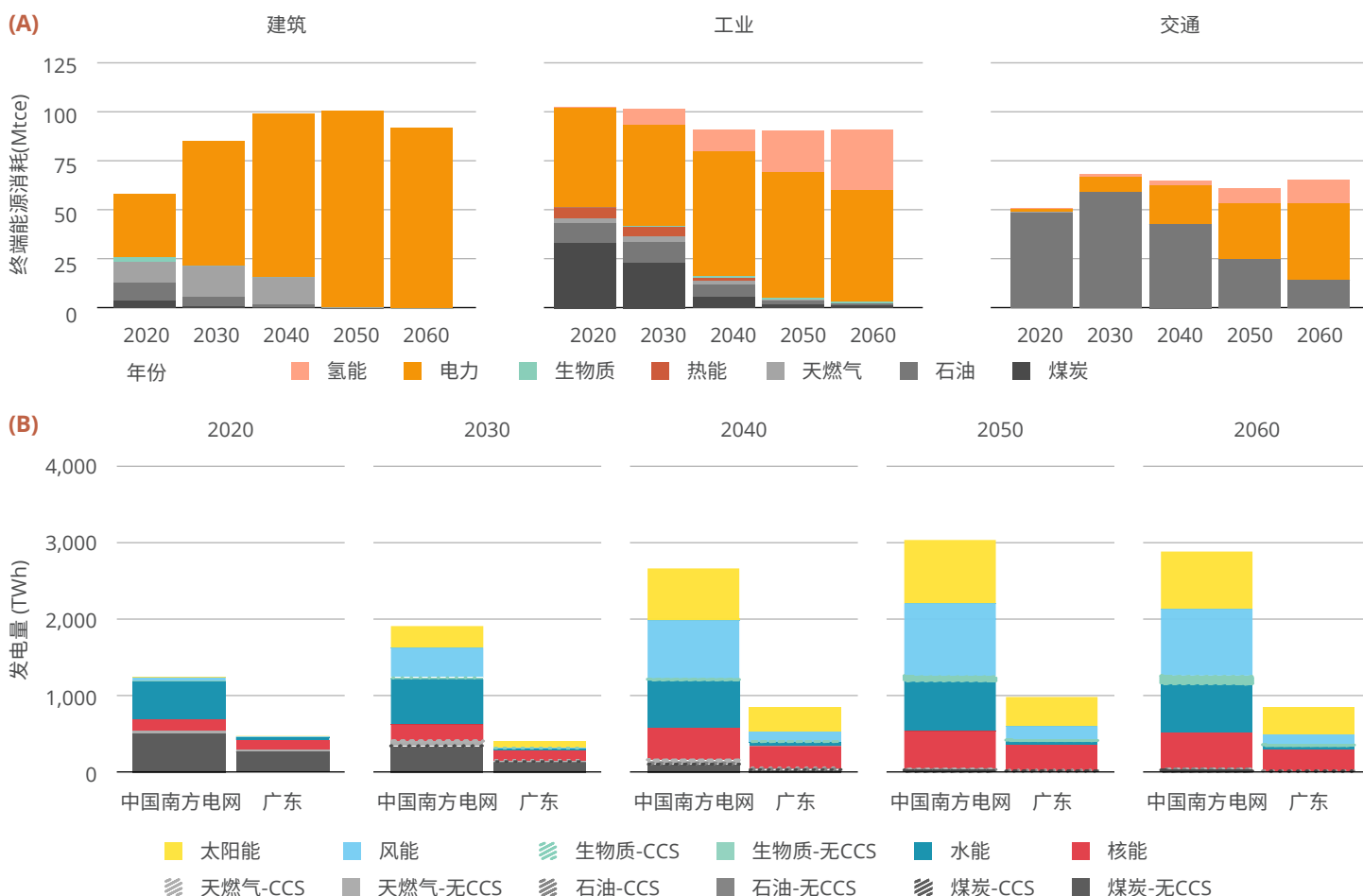
尽管各个部门的减排时机、幅度和持续时间各不相同, 但均需实现大幅度减排。到2050年, 在NZ2050情景下, 广东电力部门排放量比2020年减少了100%以上, 但交通部门仍有相当大的一部分剩余正排放 (约60%) (图4.2.1)。尽管乘用车可以快速实现电动化, 但对于某些交通方式, 如航空和重型卡车, 脱碳方式有限。工业排放直到2040年才开始显著下降。到2050年, 80%的减排量来自工业和电力部门 (约5亿吨二氧化碳), 17%的减排来自建筑和交通部门 (约1亿吨二氧化碳)。到2050年, NZ2050情景中剩余排放量主要集中在交通和工业部门, 需要通过负排放进行抵消。

尽管不同情景下的排放路径各不相同, 但都表明所有部门, 尤其是电力部门, 需要进行大量减碳工作。在Cpol情景中, 2050年二氧化碳排放量几乎是NZ2050和NZ2050_NoCCUS情景中正排放的六倍。要实现净零排放, 到2050年, 建筑、工业、电力和交通部门分别需要减排99%、85%、103%和48%。Cpol情景中, 2050年排放规模与2020年相当, 但交通排放比2020年增加了79%, 电力排放比2020年减少了65%。这表明, 保持当前政策和市场趋势, 电力部门会实现一定程度的碳减排, 但其他部门的排放量将保持相对稳定或, 尤其是交通部门, 快速增长。

广东实现碳中和目标需要全行业的努力。确定各个部门在短期和长期的减排重点对于促进能源系统转型和减碳至关重要。为了更好地了解这些策略, 我们进一步详细评估了NZ2050情景的能源转型路径。

图 4.2.2: NZ2050情景下广东省的能源系统转型。(A) 各部门最终能源使用(按能源分类), (B) 中国南方电网(CSG)和广东省的发电量(按发电技术分类)。

广东地区位于CSG的范围内。



广东省终端建筑部门的能源需求将不断增长,预计到2060年占总能源需求的三分之一以上。因此,住宅和商业建筑部门将成为近期和长期减排的重要组成部分。尽管广东省已经实现了较高的建筑部门电气化率,2018年为55%,而全国的平均电气化率仅为28%(International Energy Agency, 2022),但仍需继续减少化石燃料的使用。在NZ2050情景下,广东省2030年煤炭在建筑部门的使用量减少80%,并在本世纪中叶淘汰所有化石燃料在终端建筑部门的使用(图4.2.2)。在短期内,天然气的使用量可能会略有增加,但到本世纪中叶将逐渐淘汰,到2050年将实现近100%的建筑部门电气化。

2020年广东的总终端能源消耗中,工业部门占了近一半(图4.2.2),因此在工业部门采取减排政策至关重要。由于工业产品需求减少和能源效率的提高,工业能源需求将在2030年至2050年期间下降。根据NZ2050情景,低碳能源转换是工业部门脱碳的重要手段。到2050年,广东将主要通过电力和氢能取代化石燃料和热能。通过燃料转换和能效提高,广东省工业部门的煤炭使用量到2030年将比2020年下降约30%,到2050年下降约94%。

交通部门是广东省能源需求及能源需求增长的主要来源。全省交通能源消费在2030年之前持续增长,然后在2030年至

2050年之间下降,之后再次上升(图4.2.2)。NZ2050情景显示,通过快速电气化,尤其是在乘用车领域,到2050年,客运终端能耗的77%将来自电力。客运领域剩余石油消耗主要用于国内航空和航运。在货运领域,广东省在2040年后大规模部署燃料电池电动汽车(FCEV)技术,特别是用于大中型卡车和航运。由于许多货运方式难以减碳,到2050年,石油仍将是货运运输的主要能源。到2050年,电力和氢能将分别占货运终端用能的10%和28%,整个交通部门的电气化率将达到47%。为了进一步减少交通部门的排放,需要在扩大客车电气化的同时,为货运运输探索可行的能源替代方案。

在能源转型过程中,建筑、工业和交通等各个终端部门实现大规模电气化,进一步增加电力生产(图4.2.2)。NZ2050情景下,广东省的终端电气化率将从2020年的约40%增加到2050年的约76%。由于碳中和目标下电力需求的增加,相应地,广东省电力生产持续增长,在2050年达到峰值,在本世纪下半叶开始下降。

在高度电气化的背景下,确保电力部门成功脱碳对于实现碳中和目标至关重要(图4.2.2)。在2020年,广东省电力总产量中燃煤发电约占60%,其中有超过半数的电力来自2010年后建设的煤电厂。NZ2050情景下,没有碳捕获利用与封存技术

(CCUS)的煤电将在2040年左右淘汰,这表明2010年后建成的煤电厂需要提前退役。在省级和电网区域级别上,风能、太阳能和核能发电以及在较小程度上带CCUS生物质能发电将取代煤电并满足增长的电力需求。广东省的核能发电大幅增长,预计到2050年达到343太瓦时(TWh)(占总发电量的35%)。到2050年,广东省风电和太阳能发电的总量达到约560太瓦时(TWh),约占全省总发电量的57%,南方电网区域(除广东外,还包括云南、广西、贵州和海南)风电和太阳能发电合计达到1770太瓦时(TWh),约占全网总发电量的62%。

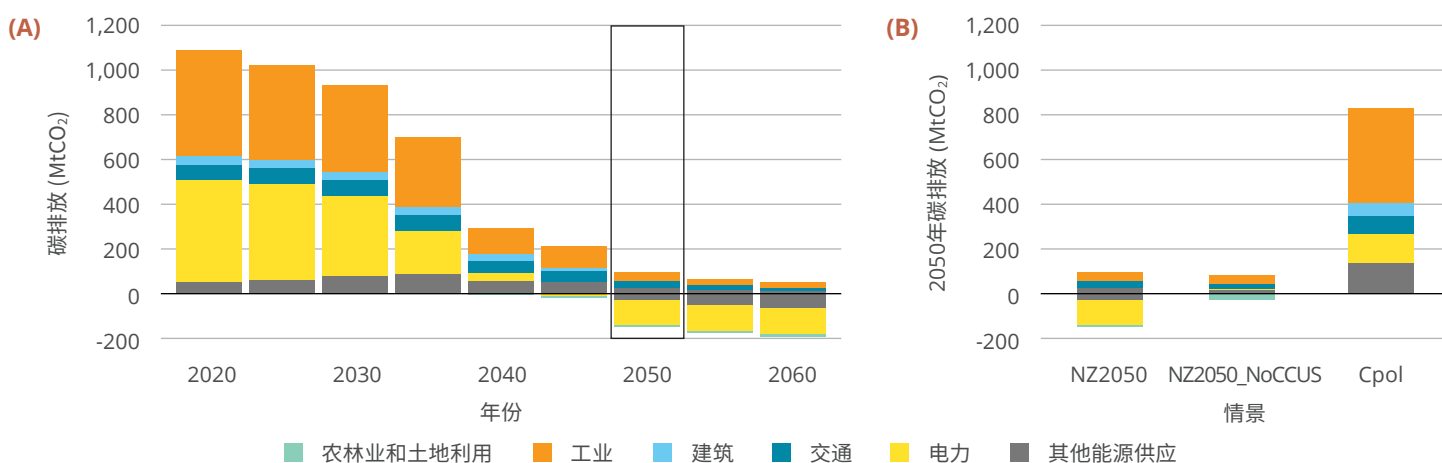
作为电力净输入省份,除在省内实施电力部门的减排措施,广东省还需要考虑南方电网地区其他省份的减排举措。预计在2030年左右,广东省来自电网的用电量将超过其自身发电量。在2020-2050年期间,广东省用电量将达到本省发电量的140%至240%,依赖中国南方电网区域内其他省份生产的电力。实现整个电网区域的减排目标需要与其他省份建立政策、投资等方面的合作关系。

4.3. 山东省能源转型与碳减排路径

山东是重要的能源和物质资料生产地区,并具有一定的CCUS潜力。工业和电力部门是山东省的脱碳重点行业(图4.3.1)。

图 4.3.1: 山东省分部门二氧化碳排放量。(A) NZ2050情景下2020年至2060年各部门二氧化碳排放量, (B) NZ2050、NZ2050_NOCCUS和CPOL情景下的2050年各部门二氧化碳排放量。

其他能源供应包括天然气生产、石油炼制、制氢和供热过程。



提高山东省CCUS能力不仅有助于抵消省内的剩余排放，并可以帮助其他负排放潜力较低或剩余排放较高的省份。在国家碳中和目标下，山东省需在各个行业采取行动，具体路径取决于政策选择、技术可用性和成本。

CCUS在山东省的脱碳进程中可以发挥重要作用(见图4.3.1)。据估计，山东省的二氧化碳存储能力高达1000亿吨(Yu et al, 2019)，特别在电力、水泥和制氢行业减排潜力较高。在NZ2050情景中，到2050年，山东省大部分负排放来自BECCS，少部分来自土地利用变化。在没有CCUS部署的情况下，山东省很难实现净零排放。在NZ2050_NoCCUS情景下，山东省2050年二氧化碳净排放量减少95%，没有达到净零。与NZ2050情景相比，2050年的土地利用变化负排放量增加了140%，工业和交通排放量分别减少了8%和14%。这说明负排放技术可用性可能会间接影响土地利用部门和减排难度大的部门的排放水平。

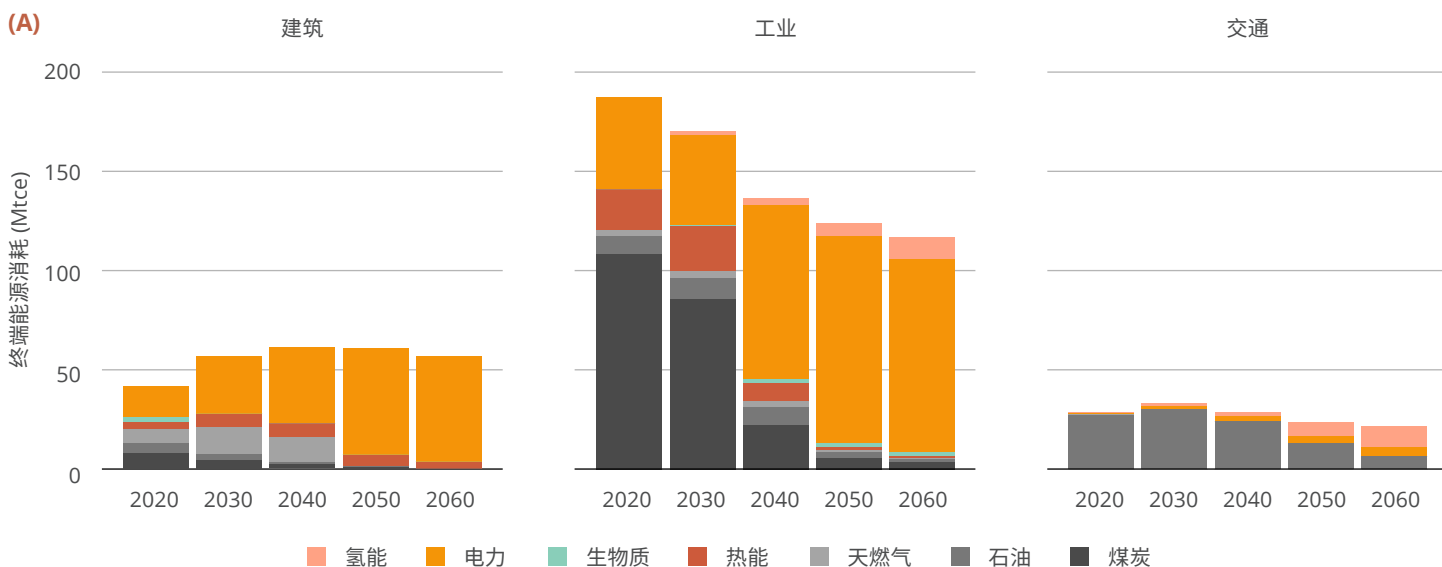
与其他省份相比，山东省目前的二氧化碳排放相对较高，特别是在电力和工业部门。因此，电力和工业部门是山东省的减

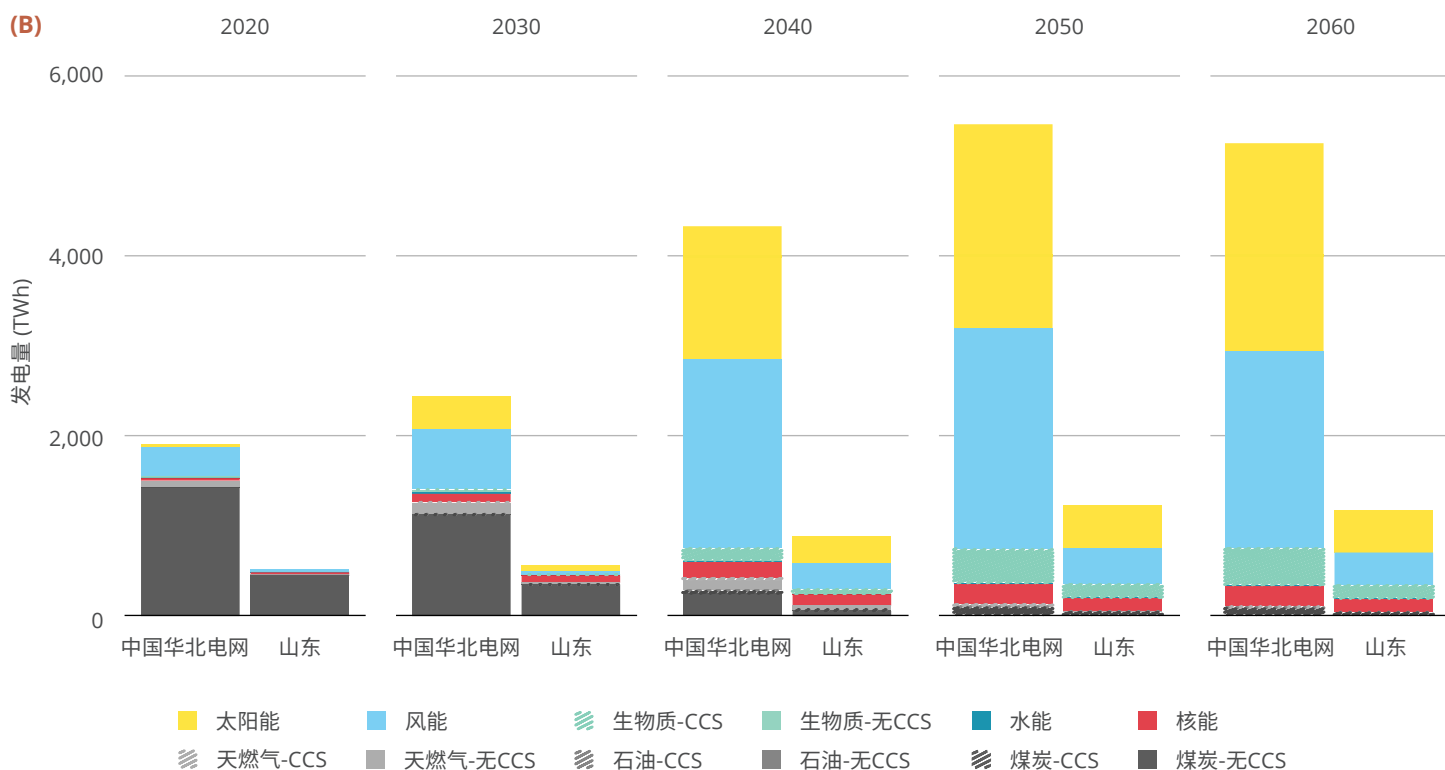
排重点(图4.3.1)。到2050年，山东省的电力部门排放较2020年下降124%。尽管2020年交通部门的排放水平较低，仅占总排放的约6%，但2050年的剩余排放中有相当一部分(30%)来自交通部门。工业排放将从2030年开始降低，到2050年占总排放的25%。全省在2050年实现净零排放。2020到2050年间，电力和工业部门的减排量约为10亿吨二氧化碳，占总减排量的88%，而建筑和交通部门的减排仅占总减排量的7%。在2050年后，电力和工业部门是负排放的重要来源。

实现山东省碳中和目标需要在各个部门采取减排措施。如果不设定二氧化碳净零排放的目标，2050年Cpol情景下的正排放是NZ2050情景下正排放的大约8倍。其他能源供应源的排放量到2050年增长180%(图4.3.1)。要实现二氧化碳净零排放，到2050年，建筑、工业、电力和交通部门的排放都需要大幅减少，降幅分别为93%、93%、124%和57%。Cpol情景中，2050年的排放略低于2020年，减少的排放量主要来自电力部门，减排幅度为71%，这表明即使不设定雄心勃勃的气候减缓目标，电力部门仍将发生一定程度的减排。

图 4.3.2: NZ2050情景下山东省的能源系统转型。(A) 各部门最终能源使用(按能源分类)，(B) 中国华北电网和山东省的发电量(按发电技术分类)。

山东省位于中国华北电网范围内。





建筑部门脱碳面临挑战,尤其是在山东省的农村地区,需要进行能源供暖和烹饪方式的燃料转换,由传统的生物质和/或化石燃料转向电力。长期以来,农村地区家庭通常使用生物质、煤炭或天然气进行取暖(Ma et al, 2021; Zou et al, 2022)。因此,在满足不断增长的能源需求的同时,逐步淘汰固体燃料转而使用电力,对于实现国家减排目标至关重要。根据2020年数据,建筑部门是山东省第二大终端能源消耗部门。能源使用量预计将在2030年前继续增长,到2050年开始下降,这表明在需求增长的近期进行脱碳将至关重要(图4.3.2)。在NZ2050情景中,山东省建筑终端部门的,在2030年逐步淘汰传统生物质的使用,到本世纪中叶淘汰所有化石燃料的使用,2050年电气化率接近89%。到2030年,山东的建筑用煤将减少42%,该部分煤炭主要用于建筑供暖。尽管天然气在建筑部门中的使用量在短期内(2030年)增长,但到本世纪中叶会逐步淘汰。集中供热在建筑部门保持增长,在2050年后有所下降,2060年仍然用于城市住宅供暖和部分商业供暖。

山东省2020年工业能源消费约占全省最终能源消耗总量的73%(图4.3.2)。电气化以及能效提升是工业部门降碳的主要策略。由于能效的提高,以及工业产品需求量的下降(J. Zhang&Wen, 2022),山东省工业能源消耗在2020年后开始下降(图4.3.2)。到2050年,化石燃料和热能在很大程度上将被电力和氢能所取代。其中,煤炭使用在2030年减少约20%,到2050年将减少90%以上。在工业领域,水泥是山东的重要产业,山东是中国第二大水泥生产地,水泥产量约占全国总产量的7%,占世界总量的近4%,2020年中国的水泥产量已超过世界总量的一半(Shandong Provincial Bureau of Statistics, 2021; Statista, 2023)。2020年,山东省水泥生产用能占终端能源使用总量的10%。在NZ2050情景中,2020年到2050年,水泥生产行业将减少83%的煤炭使用,能源消耗总量减少72%。水泥生产是工业部门的煤炭的主要消耗者,其脱碳方法包括使用生物质和生物废料等替代燃料进行水泥生产(Rahman et al, 2015)。

电力和氢能是交通部门脱碳的主要路径。到2050年,山东省交通部门的用电量和用氢量将分别达到交通总能耗的16%和29%(图4.3.2)。从2060年开始,石油不再是交通运输的主要燃料。乘客运输领域的电气化程度尤其高,到2050年将实现79%的电气化。乘用车中剩余的石油消耗主要用于国内航空和海运。在货运领域,到2050年,电力和氢能分别占货运最终能源总量的10%和32%。山东省计划在2040年后大规模部署燃料电池电动汽车,特别是在大中型卡车和航运领域。然而,到2050年,石油仍将是货运运输的主要能源来源。这是因为许多货运方式难以实现脱碳。山东的运输需求相对较低,但我们的研究表明,商业工业运输中的重型车辆以及国际航运将在现有水平上有所增长。因此,在商业运输领域制定战略和寻找可行的替代方案对山东尤为重要。

电力部门脱碳缓慢,将会限制终端电气化的实际减排作用。要实现气候目标,快速实现电力部门的脱碳至关重要,同时还需要扩大产能以满足终端部门日益增长的需求。随着各终端部门的电气化,电力需求将增加,电力在终端能源总量中的占比将从2020年的24%增加到2050年的78%。为满足这一需求,

发电量将增加并在2050年达到峰值,然后在本世纪下半叶开始下降。这一发展是实现碳中和目标的重要步骤。

在NZ2050情景下,山东省在2045年前逐步淘汰未加装CCUS的燃煤发电,由太阳能、风能、核能和部署CCUS的电力发电技术所取代。与广东等其他省份相比,山东省在2020年主要依赖煤炭发电,约有90%的发电量来自燃煤发电,并超过三分之二的发电量来自2010年以后建成的电厂。因此,在2045年前淘汰燃煤发电要求一些燃煤电厂提前退役。煤炭发电量的减少将被不断增加的风能和太阳能发电以及在较小程度上的核电、带CCUS的生物质发电和带CCUS的煤炭发电所弥补。到2050年,预计山东省的风能和太阳能发电将达到877太瓦时,约占总发电量的72%;而华北电网地区(除山东外,还包括天津、山西、内蒙古、河北和北京)的风能和太阳能发电量预计合计约为4731太瓦时,约占总发电量的87%。此外,山东的核能发电量预计也将大幅增长,将从2020年的约20太瓦时增至2050年的约150太瓦时,占总发电量的13%。这些措施将有助于减少电力部门的碳排放,推动山东省实现碳中和目标。

5. 空气质量改善协同效益

实现碳中和目标的主要策略包括逐步淘汰化石燃料发电、增加低碳能源发电、提高终端部门的电气化程度。与此同时，化石燃料的燃烧是多种主要空气污染物的主要来源，因此，这些减排策略对减少空气污染物排放也具有重要作用。我们的研究表明，能源转型是显著降低主要空气污染物排放、长期提高空气质量的必要途径。因此，统筹结合末端治理政策和气候变化减缓政策，可以最大程度地实现空气污染物和温室气体的协同治理。

5.1. 广东省空气质量改善协同效益

随着工业从高能耗部门向服务型部门转移，总体工业活动和PM_{2.5}排放会逐步减少。即使在没有气候变化减缓或强有力的清洁空气政策的情况下，PM_{2.5}的浓度也将逐渐下降。在Cpol_BAU情景下，PM_{2.5}浓度将从2020年的19.8μg/m³

下降到2030年的16.6μg/m³和2050年的16.4μg/m³。在Cpol_BHE情景下，通过强化末端治理政策，PM_{2.5}浓度将进一步下降至12.6μg/m³（2030年）和9.7μg/m³（2050年）（图5.1.1）。在NZ2050_BHE情景下，随着能源系统的转型以及到2050年二氧化碳净零排放气候目标的实现，再加上强化的末端控制政策，PM_{2.5}浓度将在2030年和2050年进一步下降，分别降至10.2μg/m³和5.2μg/m³，接近世界卫生组织在2050年建议的5μg/m³标准。这些结果表明，末端治理在短期内改善空气质量方面将发挥重要作用，但也指出要最大程度地降低PM_{2.5}的浓度需要同步进行清洁能源转型。

在实现气候减缓目标的同时，随着PM_{2.5}浓度的降低，过早死亡率也会降低。在Cpol_BAU情景下，尽管未来PM_{2.5}浓度有所降低，但由于人口增长和年龄结构的变化，预计到2030年广东省与PM_{2.5}相关的死亡人数将达到7万人，并在2050年增至12万人（图5.1.2）。通过加强末端治理Cpol_BHE情景

图5.1.1: 不同情景下2050年广东省PM_{2.5}浓度。

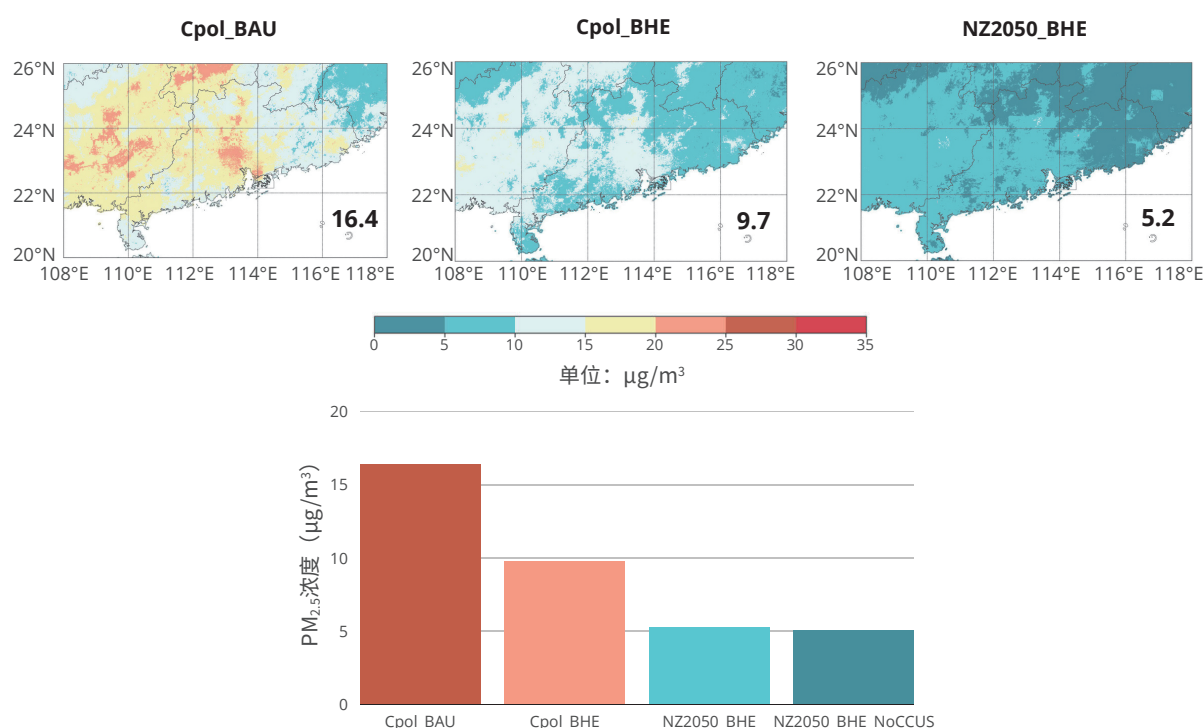


图5.1.2: 不同情景下广东省与PM_{2.5}污染暴露相关的过早死亡人数。

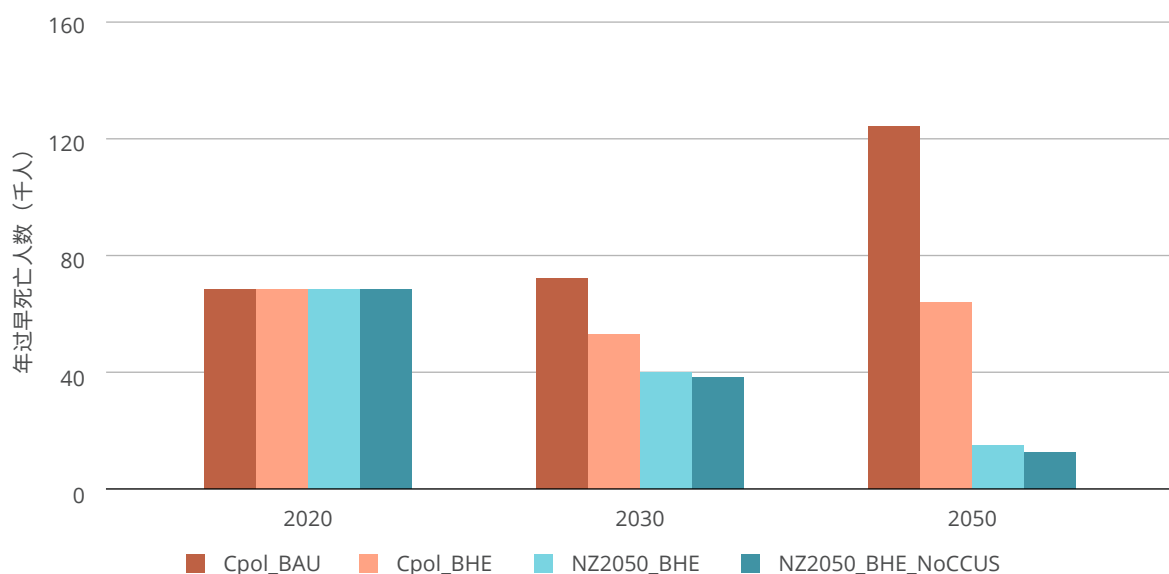
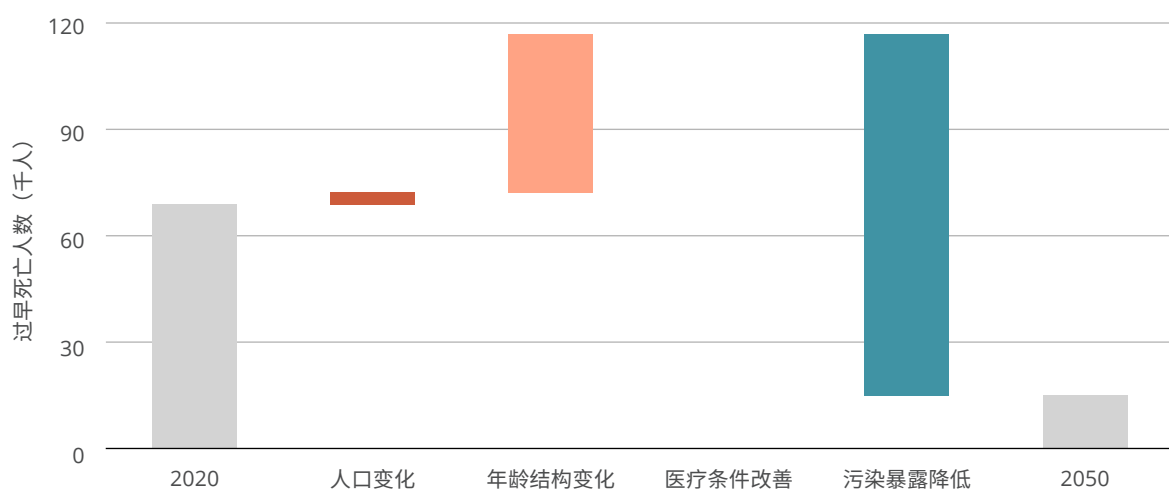


图5.1.3: 广东省与PM_{2.5}污染暴露相关的过早死亡人数贡献分解。



与Cpol_BAU情景相比, 2050年的过早死亡人数将比2020年减少6万人。然而, 由于人口结构的变化, 过早死亡人数从2030年的5万人增加到2050年的6万人, 从2020年到2050年, 过早死亡人数仅减少了4千人。通过实施气候变化减缓目标, NZ2050_BHE情景分别与Cpol_BAU和Cpol_BHE情景

相比, 在2050年可以避免11万和5万例PM_{2.5}相关的过早死亡。尽管老龄化人口不断增加, 但在NZ2050_BHE情景下, 由于空气质量改善显著, 过早死亡率显著下降(图5.1.3), 证明了改善空气质量对避免由人口数量和结构变化带来的过早死亡率上升尤为重要。

我们的研究表明减缓气候变化有助于改善空气质量,但对于具体脱碳技术路径的选择也会影响空气和健康结果。在补充情景灵敏性分析(N2050_BHE_noCCUS)中,PM_{2.5}浓度较N2050_BHE情景更低。在不使用CCUS技术的情况下,2030年和2050年的PM_{2.5}浓度可以分别进一步降低0.5μg/m³和0.2μg/m³,并减少2050年的过早死亡约2千人。

5.2. 山东省空气质量改善协同效益

山东省目前面临较为严重的空气污染问题,而空气质量的改善对其具有重大益处。在Cpol_BAU情景下,山东省的PM_{2.5}浓度将从2020年的45.9μg/m³略微下降到2030年的39.7μg/m³和2050年的38.3μg/m³(图5.2.1)。然而,这仍然超过了世界卫生组织建议的限值,表明仅靠现行的空气质量控制政策无法实现空气质量显著改善。因此,有必要进一步加强污染控制政

策。通过强化空气质量控制政策,如Cpol_BHE情景所示,2030年PM_{2.5}浓度将降至31.1μg/m³,而在2050年降至26.2μg/m³。随着能源产业转型,并在2050年实现净零排放,PM_{2.5}浓度在2030年和2050年将分别降至28.7μg/m³和10.6μg/m³,这表明能源转型可以对PM_{2.5}浓度产生显著长期影响。

在Cpol_BAU情景下,山东省与PM_{2.5}相关的过早死亡人数将大幅增加,在2050年达到约22万人(图5.2.2)。与Cpol_BAU相比,强化末端控制政策将在2050年减少年度过早死亡人数约5万人。然而,当国家气候目标实现时,如NZ2050_BHE情景所示,每年的PM_{2.5}相关死亡人数会进一步减少。在2050年,与Cpol_BAU情景相比,雄心勃勃的减排情景成功减少了约16万人的过早死亡。在NZ2050_BHE情景下,尽管人口年龄结构发生变化,但过早死亡率显著下降(图5.2.3),这凸显了改善空气质量对避免过早死亡的重要性。

图5.2.1:不同情景下2050年山东省的PM_{2.5}浓度。

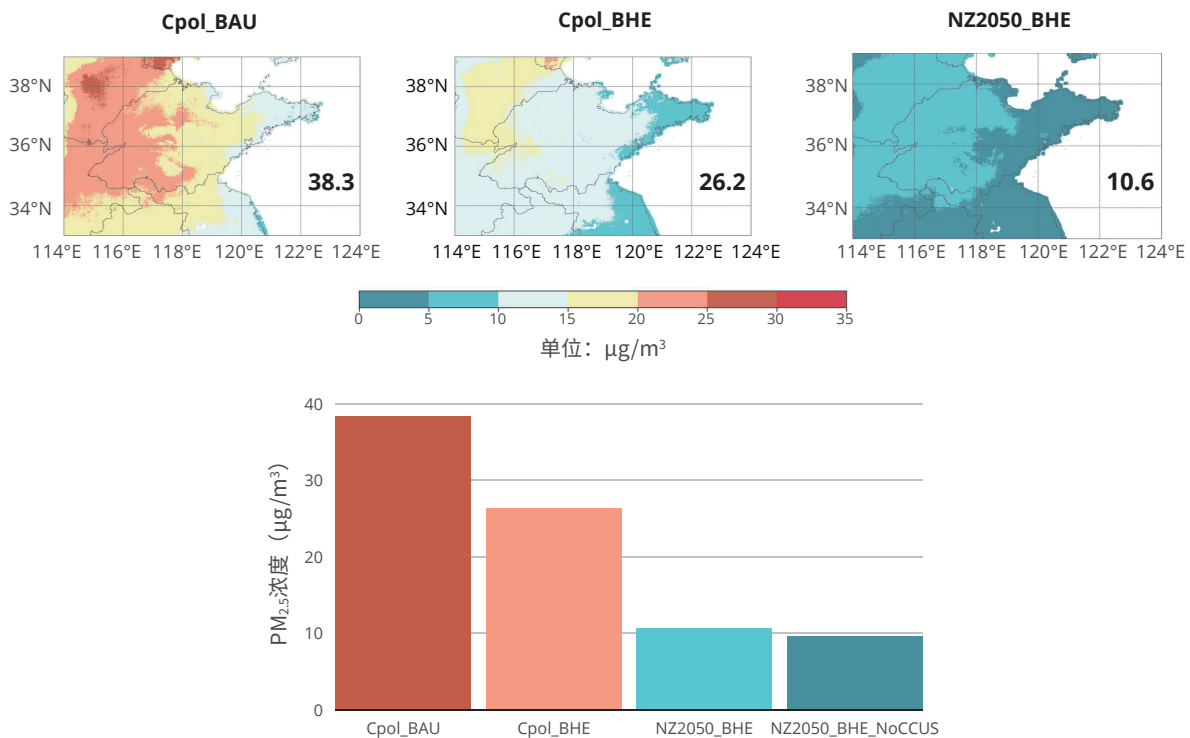


图5.2.2: 不同情景下山东省与PM_{2.5}污染暴露相关的过早死亡人数。

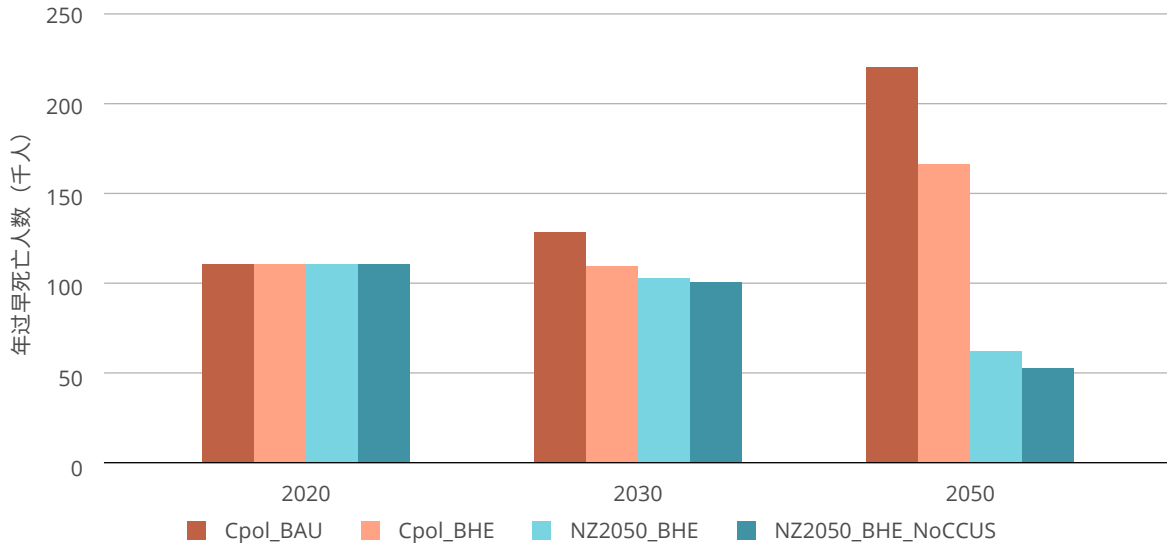
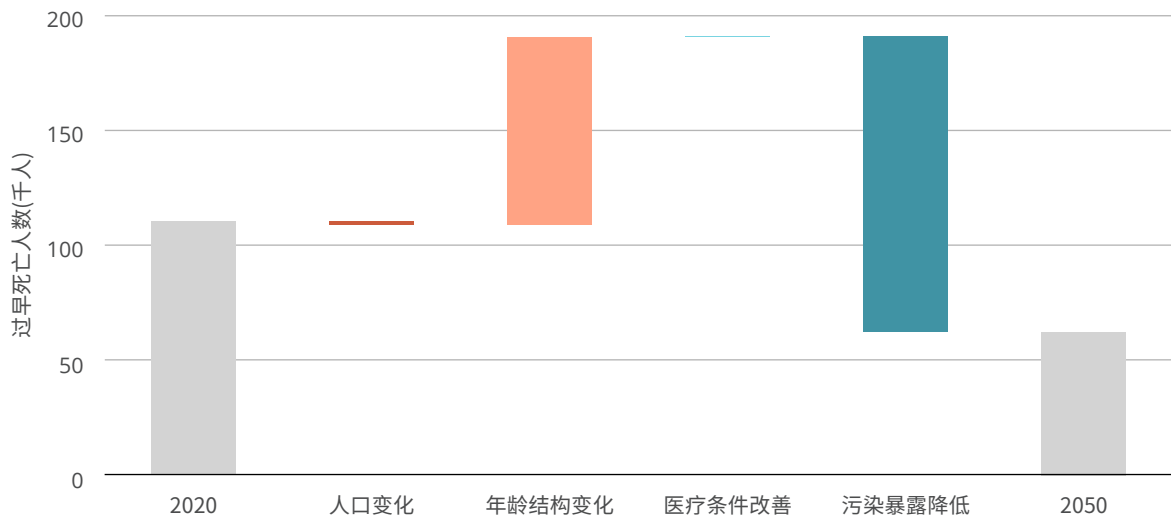


图5.2.3: 山东省与PM_{2.5}污染暴露相关的过早死亡人数贡献分解。



研究表明,气候变化减缓措施可以改善过早死亡情况,但其改善效果在不同的脱碳途径下存在差异。灵敏性分析情景测试了CCUS技术对空气质量的影响,结果表明,如果不采用CCUS技术,2030年和2050年的PM_{2.5}浓度可以进一

步降低至27.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和9.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。与NZ2050_BHE情景相比,不采用CCUS技术的情景进一步降低了每年约9千人过早死亡,这表明脱碳战略中具体技术路径的选择可能会对健康结果产生不同影响。

6. 政策建议

我们的研究表明,实现碳中和目标各个部门都需要采取减排措施(表6.1)。将顶层政策设计与具体部门、设施层面的行动相结合,对于改善空气质量至关重要(P. Wang et al, 2023)。虽然绝大多数措施均可以实现温室气体和大气污染物协同减排,但有些措施在减少温室气体排放方面具备更大的潜力(例如,在电力部门中逐步淘汰煤电),有些则可以产生更大的空气质量和健康效益(例如,在交通拥挤的城市地区逐步淘汰柴油卡车)。综合考虑气候减缓和空气质量政策可以增强协同效益,有助于最大限度同时实现气候和环境目标。具体而言,在制定不同气候减缓政策策略的实施优先次序时,结合考虑其空气质量的协同效益有助于提升公共健康,通过实现多重目标激励短期行动。

6.1. 广东省空气质量改善与气候变化应对政策建议

建筑: 广东省建筑部门面临的主要挑战之一是不增长的住宅和商业需求,尤其是在城市住宅区。我们的研究表明,广东省建筑用能电气化程度已经很高,并有望在2050年实现近100%的电气化率。《广东省碳达峰行动实施方案》强调了电气化激励政策的重要性,如通过对电热水器和电炉实施补贴减少建筑用能的碳排放(People's Government of Guangdong Province, 2022b)。在建筑领域的各种减排战略中,扩大分布式光伏(PV)在建筑中的应用可以减少化石燃料的使用,从而减少燃烧所产生的颗粒物,进一步来改善空气质量。

此外,国家应继续制定针对建筑行业的政策,提高建筑能效,实现建筑存量增长的同时不增加排放。在这一领域,中国有望在现有建筑规范的基础上进一步发展。比如,目前三星级绿色建筑标识认证(LEED)是对所有新建城市和商业建筑的强制性要求,在此基础上,中国可将其合规范围扩大至农村地区(Yu et al, 2014)。此外,中国可进一步发展其《绿色建筑行动方案》,该计划此前已设定了到

2015年在住宅和商业领域进行改造的建筑面积目标(Yu et al, 2014),要求仅使用电灶、热水器和其他电器设备。广东可以在这些国家政策的基础上进一步扩展,并制定适用于本省的具体措施,以减少新建建筑的空气污染和温室气体排放。

工业: 工业是PM_{2.5}前体物质排放最多的部门之一,它也是2050年二氧化碳排放量占比第二大的部门,这凸显了工业部门的污染物减排的艰巨性。我们的研究表明,减少煤炭使用和提高工业能源效率对于实现气候目标至关重要。工业部门的能源效率在脱碳战略中与燃料转换相辅相成,因为它可以有效减少工业部门总能源消耗。在某些工业子部门中,没有商业上可行的替代能源替代化石燃料,因此,在这些部门能源效率提升与燃料转换就尤为重要。高温工业流程的一些部分可能会继续使用化石燃料作为主要能源,这将需要其他部门的排放抵消。电气化轻工业以及开发高温和重工业的替代燃料可以对空气质量产生显著影响,通过减少化石燃料的燃烧,从而减少SO₂、NO_x和PM_{2.5}排放。优先采取这些政策行动,特别是在空气污染严重的地区,可以最大限度地保护公众健康。

尽管《大气污染防治行动计划》等政策确实将这些不同的途径结合在一起,但仍需要额外的支持。考虑到并非所有的工业流程都能轻易实现电气化,应将工作重点放在低温工业流程的电气化上,同时将部分高温工业流程改用氢能。造纸、纺织和电气设备制造业是重要的能源消耗行业,但其主要能源往往用于提供低温热能和机械动力,因此有必要进一步推动这些行业的电气化(Guangdong Provincial Bureau of Statistics, 2021)。钢铁和化工行业目前的能源消耗主要发生在氧化还原反应中,根据最新的政策支持,这些行业可能在长期内广泛采用清洁氢能(Falcone et al, 2021; Guangdong Provincial Bureau of Statistics, 2021)。电子设备和电气机械行业约占整个工业部门能源消耗的10%,这表明加强该行业的电气化非常重要。建议在“十四五”期间继续加强《工业绿色发展规划》,以降低碳排放和污染物排放强度,提高能源效率和资源利用效率。

交通: 广东城市人口众多, 交通需求量大。减少交通排放是广东省改善空气质量和实现气候目标的重要一环。到2060年, 交通部门的二氧化碳排放将成为剩余排放的最大来源。有些交通子行业的减排困难高, 建议优先考虑提高道路电气化程度。我们的研究表明, 到2050年, 包括铁路、航空和公路在内的客运交通可实现77%的电气化。省市级政府应优先考虑推广电动汽车 (EV) 技术的激励措施和政策, 包括设定公共或市政车辆的电气化目标, 增设公共电动汽车充电基础设施。中国在《节能与新能源汽车产业发展规划》中已经着手实施更为严格的燃料消耗标准, 同时扩大电动汽车的生产和销售规模, 计划到2025年时, 新能源汽车销售占新车销售的20% (The State Council, 2020)。这些标准应持续提高, 政策也应得到强化, 以促进乘用车电气化。

为减少交通需求, 广东省应侧重通过完善和奖励公共交通、实施居家办公政策, 以及进行社区规划。考虑到货运运输部门的能源消耗日益增长, 广东还应积极推动氢燃料电池汽车和其他生物燃料替代品在航运、航空和卡车领域的部署。扩大纯电动汽车 (BEV) 和燃料电池电动汽车 (FCEV) 在货运车辆, 特别是城市地区的货运车辆中的使用, 有助于减少PM_{2.5}的前体物NO_x的排放。虽然中国已出台了多项政策来推动FCEV的应用, 但多数政策都侧重于供应侧而非需求侧, 因此需要进一步制定政策来降低成本并实现长距离燃料电池的商业化 (F. Zhao et al, 2020)。

电力: 随着电气化程度的不断提高, 电力系统的清洁化成为改善气候和健康状况至关重要的一环。制定相关政策提高可再生能源的使用, 增加储能容量, 有助于减少化石燃料燃烧产生的空气污染物。广东近期新建的燃煤电厂 (Energy Bureau of Guangdong Province, 2023) 对碳减排目标、空气质量和公众健康构成了潜在威胁。因此, 淘汰燃煤电厂对于实现气候变化减缓目标和减少空气污染物排放至关重要, 短期内针对空气污染物排放强度不达标的燃煤电厂进行关停, 可以最大程度地改善空气质量 (Cui et al, 2022)。这些策略的实施可以依托现有政策框架, 如《中共中央国务

院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》, 该政策规定, 对于重点地区内不具备完成超低排放改造条件的燃煤电厂, 应逐步退出运营。此外, 减少现有煤电厂的利用率也有助于减少排放。

在广东及其电网相连的邻近省份, 扩大风电和太阳能装机对于碳减排至关重要。我们的研究表明, 在NZ2050情景中, 到2025年和2030年, 所消耗电力中的可再生能源比例将分别达到约23%和36%, 高于国家能源局 (NEA) 制定的12.5%和20.6%的激励目标 (National Development and Reform Commission, 2021)。而在Cpol情景中, 到2025年和2030年, 这一比例约为14%和19%, 表明广东可以将其省级可再生能源发电目标提高, 贴近NZ2050情景。此外, 核能发电也是广东的发电结构中的重要组成部分, 因此有必要确保拟建核电站能够按计划建设。我们的研究表明, 到2050年, 广东省核电总装机容量将达到约44吉瓦, 与世界核协会统计的该省已规划或拟议建设的所有核电站总量 (装机容量为52吉瓦) 接近 (World Nuclear Association, 2022)。

此外, 作为一个净能源进口地区, 广东将依赖于南方电网的其他省份的电力产能来满足其电力需求。因此, 广东的政策制定者应积极与统一电网区域内以及其他电网区域内的相关合作, 共同推进各种能源项目和规划工作。建设更多的长距离输电线路对广东尤为重要, 因为随着清洁能源需求的增加, 广东的能源消耗可能会远超其能源生产, 而这些输电线路将有助于满足其不断增长的电力需求。

6.2. 山东省空气质量改善与气候变化应对政策建议

建筑: 在改善山东省空气质量的过程中, 应优先考虑淘汰农村居住建筑中煤炭和传统生物质燃料。我们的研究表明, 到2050年, 山东省的建筑部门将淘汰化石燃料, 电力将主要取代煤碳、石油和天然气等传统燃料。2020年, 传统生物质燃料仍在农村建筑中被大量使用, 在政策路径

下, 2030年之前迅速淘汰传统生物质燃料在农村建筑部门的使用对室内空气质量和公众健康产生显著影响。因此, 山东省政府和地方政府需要集中政策努力实现农村取暖和烹饪燃料的重大转变。比如通过财政支持和教育宣传来推广电供暖和电烹饪设备的使用, 并进一步加强《大气污染防治行动计划》, 将其覆盖范围从淘汰煤炭扩大至家用石油、天然气和传统生物质。

此外, 山东省多采用集中供暖方式, 因此需要降低其碳排放强度。特别是对热电联产和余热回收加强支持并提高标准, 同时鼓励开发地热系统和小型模块化反应堆等技术手段, 以降低集中供暖碳排放水平。总的来说, 实现建筑的全面电气化需要更严格和全面的政策, 这不仅有助于实现气候目标, 还有益于人类健康。此外, 山东省应继续制定针对建筑行业的政策, 提高新建建筑和现有建筑的能源效率。

工业: 山东省的重工业和轻工业、以及整个工业部门的增长速度持续下降 (Shandong Provincial Bureau of Statistics, 2021)。此外, 预计未来对某些产品, 如水泥 (J. Zhang & Wen, 2022) 的需求将会减少, 而山东正是水泥的主要生产地。工业行业是PM_{2.5}前体污染物和温室气体排放量最高的行业之一, 也将是未来半个世纪温室气体和空气污染物排放的重要来源。优先实现轻工业电气化, 并为高温过程生产行业重工业开发替代燃料, 可以减少化石燃料的燃烧, 从而带来显著的空气质量改善和共同效益。同时, 对于难以电气化的工业子部门, 应引入替代燃料使用, 并结合提高能源效率, 以降低碳排放和减少空气污染。

《大气污染防治行动计划》等政策确实将这些不同的减污降碳的途径结合在一起, 但还需要额外的支持。建议以汽车和电子制造业为重点进一步实现电气化。按企业数量计算, 该省约有一半的工业属于重工业, 包括化工、有色金属和非金属制造业以及煤炭开采和洗选业等众多领域 (Shandong Provincial Bureau of Statistics, 2021)。在化工、铝加工和钢铁工业等行业中, 采用氢燃料替代部分燃料的方式可能是一种可行的方法 (Kovač et al, 2021)。

此外, 建议加强《工业绿色发展计划》, 进一步提高能效水平, 从而减少工业原料的使用来减少资源消耗。

交通: 山东的货运需求占比较大, 在城市地区提供运送货物和服务的卡车会排放PM_{2.5}前体污染物NO_x等, 因此建议优先考虑货运领域的协同减排, 例如为卡车制定低碳燃料标准, 以此在短期内改善空气质量。我们的研究结果表明, 在2020年, 山东省69%的交通服务总量来自货运, 到2060年, 51%的服务总量可实现电气化或使用氢能等低碳方式。货运领域的脱碳的时间跨度可能较长, 尤其是长途运输, 应当尽早对关键技术进行投资和研发, 进一步扩大和增加当前一些省份的氢燃料电池和/或生产示范项目或部署了试点项目 (F. Zhao et al, 2020) 和有针对性的政策。

此外, 优先考虑扩大乘用车电动汽车技术的激励措施和政策, 如设定公共或市政车辆电气化目标和扩大公共电动汽车充电基础设施, 也将有助于脱碳和改善空气质量。我们的研究结果表明, 到2050年, 80%的乘用车交通可以实现电气化。

电力: 扩大可再生能源的规模部署并增加储能容量有助于减少化石燃料燃烧产生的空气污染物。基于空气污染物排放强度来规划燃煤电厂的淘汰路径和方案, 可以最大程度地改善空气质量 (Cui et al, 2022)。因此, 需要继续实施《中共中央国务院关于全面加强生态环境保护坚决打好污染防治攻坚战的意见》等政策, 减少燃煤发电, 逐步退役关键地区无法完成超低排放改造的燃煤电厂。山东省最近新建的燃煤电厂对实现碳减排目标构成了威胁, 增加了资产搁浅的风险, 并加剧了PM_{2.5}、NO_x和SO₂等污染物的排放。因此, 为了实现碳中和目标并减少空气污染, 迫切需要淘汰燃煤电厂或通过其他方式逐步减少现有燃煤发电厂的利用率。

用清洁能源替代煤炭对碳减排至关重要。我们的研究结果表明, 在山东省用电中, 可再生能源比例将分别在2025年和2030年达到约37%和44% (N22050情景), 以及27%和34%

(Cpol情景)。这两种情景中的比例都高于国家能源局制定的20.2%和28.4%的激励目标(National Development and Reform Commission, 2021),这表明山东省应考虑提高其省级可再生能源发电目标。鉴于山东需要大规模部署可再生能源,且2060年可再生能源潜力相对较高(Lou et al, 2022),在山东和可再生能源部署不足的省份之间建设跨省

输电线路,有助于增加电网能源组合的多样性,减少间歇性能源的浪费,并减少弃风弃光现象的发生。此外,我们的研究结果还表明,到2050年,山东省总核能装机达到约19.7吉瓦,略高于世界核协会统计的该省所有规划或拟建的核电站装机容量(19.1吉瓦)(World Nuclear Association, 2022),可考虑进一步加强核电能力的部署。

表6.1: 广东省和山东省中短期与长期碳减排和空气质量改善政策建议。

行业	短期政策机遇	中长期战略建议
建筑	<ol style="list-style-type: none"> 通过补贴激励农村燃料转换,特别是针对山东省的传统生物质燃料和燃煤供暖方式。 制定补贴政策,以促进热泵、太阳能光伏发电设备和储能设施的推广。 提升家用电器/建筑设备的能效标准(广东和山东),采取集中供热采暖设施(山东)。 提高新建建筑的能效标准,特别是城市住宅高速增长的广东。 	<ol style="list-style-type: none"> 在建筑中部署分布式光伏、太阳能热水系统等可再生能源设施。 通过补贴和其他投资机制,进一步提高采暖和家庭热水的电气化水平。 改造现有建筑,建设超低能耗和近零能耗建筑,以减少建筑能源消耗并降低排放。
工业	<ol style="list-style-type: none"> 在高效机器和制造技术领域投资,例如采用TRT、CDQ和Jet BOF²。 强化工业产品的二次循环利用,如钢铁、水泥、铝和塑料产品。 实现轻工业电气化,包括广东的造纸、纺织、装备制造和山东的电子、汽车等。 加快工业企业数字化改造,例如建立运营效率数据库,为低效率业务配备能源使用检测仪器。 	<ol style="list-style-type: none"> 从高炉向电炉转型,并开发电解过程等新的钢铁制造技术。 转换高温生产工艺(化学、金属和钢铁)及其他重工业燃料,使用氢燃料,特别是在山东。
交通	<ol style="list-style-type: none"> 加强研发投入,加快航空、航海和其他货运车辆的替代燃料的研发,包括长途重型运输,特别是山东,考虑到其货运车规模。 增加公共充电设施建设,特别是在广东,考虑到其乘用车规模。 	<ol style="list-style-type: none"> 扩大氢燃料电池的开发和大规模推广,激励消费者和企业购买氢燃料电池汽车,特别是在山东,考虑到其货运车规模。 加强各部门合作,维护并继续发展充电基础设施。 针对传统汽/柴油汽车征税。
电力	<ol style="list-style-type: none"> 制定相关政策扩大风能和太阳能装机。 通过需求侧管理计划和激励措施提高电网稳定性。 扩大有雄心的海上风力发电计划。 推广集中式和分布式太阳能光伏发电。 鉴于其现有核电容量,增加广东的核电投资,保障核电安全,提升发电效率。 投资储能扩容和研发 	<ol style="list-style-type: none"> 继续增加风能和太阳能发电装机,并提升储能能力。 支持其他省份开发清洁电力供应来源,扩大在广东的进口基础设施。 开发其他替代清洁能源来源,如发展生物质能、垃圾焚烧发电、农林生物质能发电、沼气项目等清洁能源技术。 在山东推广核电建设和小型核电机组的使用。

² TRT、CDQ和Jet BOF都是具有高效率的制造技术。TRT是高炉顶部煤气回收汽轮机,CDQ是焦炭干熄技术,而BOF是氧气顶吹转炉。

7. 总结与展望

空气污染，尤其是与PM_{2.5}暴露相关的死亡和疾病，是造成健康负担的重要因素。我们的研究采用不同的末端治理政策、气候目标和CCUS技术应用的情景路径，评估这些不同政策路径对广东和山东这两个重点省份空气污染物减排的影响。我们的结果表明，减碳不仅有利于改善广东和山东空气质量，而且减碳和由此产生的能源系统转型，对实现温室气体和空气污染物的大幅减排至关重要。研究发现，末端治理政策能够实现空气质量改善，但从长远来看，要在广东和山东实现最大程度的空气质量改善并降低过早死亡率，需要同时采取末端治理和气候变化减缓措施。相较于仅增强末端控制的情景（Cpol_BHE），结合最佳健康效应和气候变化减缓措施情景（NZ2050_BHE）的PM_{2.5}浓度和过早死亡人数更低。此外，我们的分析显示，在碳中和情景下PM_{2.5}浓度在使用CCUS技术的路径中更高，这表明在制定气候缓解策略时应考虑脱碳政策选择对空气质量的影响。下一步需要开展更多的研究来深入了解减排技术选择，包括CCUS部署，与公共健康影响之间的关系。

在广东和山东，省级行动可以帮助实现气候目标并改善空气质量。我们的研究结果表明，这两个省份将在实现国家气候目标方面发挥重要但有区别的作用，并将依靠不同的战略、政策和措施来实现气候目标。例如，山东拥有巨大的碳储存能力，可以在一定程度上依赖碳捕获、利用和封存技术；与此同时，该省还需要重点关注从化石燃料取暖向其他能源的过渡。而广东作为一个服务业发达的省份，将需要在近期和长期内利用商业化技术和正在开发的技术，最大限度地减少交通部门的排放。尽管各省之间存在一些差异，但所需采取的许多行动是相似的，如促进轻工业、乘用车和建筑供暖制冷的电气化。各省就这些共同的挑战和战略开展交流与合作将有助于实现国家目标。

采取雄心勃勃的行动可以同时实现空气质量目标和气候减缓目标。广东应重点提高可再生能源在电力能源供应中的比例，并在电力、建筑、工业和交通领域逐步淘汰化石燃料

的使用，同时实施末端治理政策。制定更多双管齐下的政策有助于同时实现这两个政策成果，例如关闭老旧、低效和高污染的煤电厂。广东应在短期内优先实现建筑、乘用车和轻工业等关键领域的电气化，同时研究货运和重工业等减排难度大的领域的脱碳方法。

山东的燃煤发电和工业排放水平较高，因此面临着空气污染和温室气体减排的双重挑战。山东可以通过电力行业的脱碳和促进终端使用部门的电气化来改善空气质量和实现气候变化减缓目标。为实现这些目标，山东应制定省级环境空气质量改善目标和省级碳达峰和碳中和时间表。主要政策措施包括加快煤炭削减步伐，扩大可再生能源部署；促进工业低碳发展和产业优化升级，特别是在钢铁、有色金属、建材和化工行业，并在各领域扩大低碳创新和数字化转型。

虽然广东和山东在脱碳路径和当前PM_{2.5}和二氧化碳排放水平方面存在差异，但它们都需要采取一些类似的策略。例如逐步淘汰化石燃料、扩大可再生能源的使用以及终端使用部门的电气化，是两省按照国家碳中和目标实现减排以及实现世卫组织空气质量目标的关键。山东作为CCUS能力较强的省份，将有助于抵消广东等人口密集省份的碳排放，同时山东也可以学习广东在电气化和电动汽车充电基础设施建设方面的成功经验。

需要对更多省份和部门的脱碳和末端控制进行进一步评估，因为各级政府和部门需要采取不同的方法来实现有雄心的气候目标并改善空气质量。此外，空气污染物排放的空间分布在各省可能有所不同，更高精度的分析对于了解公共健康影响非常有价值。在本报告中，我们没有考虑臭氧浓度或非二氧化碳排放，这将是未来研究评估实现气候目标和由此产生的空气质量影响的一个新领域。此外，“30-60”目标在碳达峰和碳中和时间表方面存在一些模糊性。我们只评估了对该目标的一种解释，即在2030年前达到峰值，并在2060年前实现温室气体净零排放，但评估另一种较晚的达峰时间可能会得出不同的结果。同时，由于缺

乏详细的分部门模型结果，我们的研究缺少对工业部门转型路径的深入讨论，更详细的子行业信息有助于更全面地研究气候和健康影响以及政策路径。在本报告中我们也未能模拟各省的氢气生产情况，因此没有将其纳入本讨论。最后，模型预测存在很大的不确定性，包括预计的能源需求、技术成本、GDP和人口增长。针对中国（尤其是广东和山东）的更多研究和建模分析将有助于比较我们的研究成果，并确定未来研究的领域。



SCHOOL OF
PUBLIC POLICY
CENTER FOR GLOBAL
SUSTAINABILITY



清华大学地球系统科学系
Department of Earth System Science, Tsinghua University

References

- Agency of Environmental Protection, & General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. (2013, September 17). *Limits and Measurement Methods for Emissions from Light-Duty Vehicles*. <https://perma.cc/DJ2U-P2WK>
- Aunan, K., Fang, J., Hu, T., Seip, H. M., & Vennemo, H. (2006). Climate Change and Air Quality—Measures with Co-Benefits in China. *Environmental Science & Technology*, 40(16), 4822–4829. <https://doi.org/10.1021/es062994k>
- Cai, W., Hui, J., Wang, C., Zheng, Y., Zhang, X., Zhang, Q., & Gong, P. (2018). 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. *The Lancet Planetary Health*, 2(4), e151–e161. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(18\)30050-0](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(18)30050-0)
- Carbon Emission Accounts and Datasets. (2023). *Province*. CEADs. <https://www.ceads.net/data/province/>
- Chen, H., Zhang, L., Zou, W., Gao, Q., & Zhao, H. (2020). Regional Differences of Air Pollution in China: Comparison of Clustering Analysis and Systematic Clustering Methods of Panel Data Based on Gray Relational Analysis. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 13(10), 1257–1269. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00880-0>
- Chen, Y., Ebenstein, A., Greenstone, M., & Li, H. (2013). Evidence on the Impact of Sustained Exposure to Air Pollution on Life Expectancy from China's Huai River Policy. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(32), 12936–12941. <https://doi.org/10.1073/pnas.1300018110>
- 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. (2021). Pathways of China's PM_{2.5} Air Quality 2015–2060 in the Context of Carbon Neutrality. *National Science Review*, 8(12), nwab078. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab078>
- Cong, S. (2020, November 25). How Strong Is Shandong Industry? Comparing These Three Indicators of Guangdong, Jiangsu and Zhejiang, the Actual Situation Is as Follows. *Souhu News*. https://www.sohu.com/a/www.sohu.com/a/434318851_443730
- Cui, R., Cui, X., Cui, D., Song, J., Zhang, X., Dai, F., Gordon, J., Chen, Z., Hultman, N., & Kammen, D. (2022). *A Decade of Action: A Strategic Approach to Coal Phase-down for China* (p. 35). Center for Global Sustainability. <https://cgs.umd.edu/sites/default/files/2022-03/A%20Decade%20to%20Act-Main%20Report-March%202022.pdf>
- Department of Ecology and Environment of Guangdong Province. (2021a, June 30). Notice on Issuing the “*Guidelines for Governance of Key Industries Involving Volatile Organic Compounds (VOCs) in Guangdong Province*.” http://gdee.gd.gov.cn/shbtwj/content/post_3349256.html
- Department of Ecology and Environment of Guangdong Province. (2021b, July 12). *Notice of the Department of Ecology and Environment of Guangdong Province on the Key Work of Comprehensive Renovation of Industrial Furnaces and Boilers in 2021*. http://gdee.gd.gov.cn/shbtwj/content/post_3450860.html
- Energy Administration of Shandong Province. (2022, March 3). *Shandong Province Promotes the High-Quality Development of Renewable Energy and Accelerates the Construction of a Clean, Low-Carbon, Safe and Efficient Modern Energy System*. http://nyj.shandong.gov.cn/art/2022/3/3/art_59966_10291753.html
- Energy Bureau of Guangdong Province. (2023, May 22). *Notice from the Energy Bureau of Guangdong Province on Issuing the Implementation Plan for Promoting High-Quality Energy Development in Guangdong Province*. http://drc.gd.gov.cn/ywtz/content/post_4186277.html

- Falcone, P. M., Hiete, M., & Sapio, A. (2021). Hydrogen Economy and Sustainable Development Goals: Review and Policy Insights. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 31, 100506. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100506>
- GBD 2019 Risk Factors Collaborators. (2020). Global Burden of 87 Risk Factors in 204 Countries and Territories, 1990–2019: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet*, 396(10258), 1223–1249. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30752-2](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30752-2)
- GCAM. (2022). *GCAM v6 Documentation: Global Change Analysis Model (GCAM)* [dataset]. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6619287>
- 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_{2.5} Retrievals from Multisource Data Fusion. *Environmental Science & Technology*, 55(17), 12106–12115. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c01863>
- Guan, Y., Shan, Y., Huang, Q., Chen, H., Wang, D., & Hubacek, K. (2021). Assessment to China's Recent Emission Pattern Shifts. *Earth's Future*, 9(11), e2021EF002241. <https://doi.org/10.1029/2021EF002241>
- Guangdong Provincial Bureau of Statistics. (2021, October 8). *Guangdong Statistical Yearbook in 2021*. http://stats.gd.gov.cn/gdtjnj/content/post_3557537.html
- He, K., & Li, X. (2018). *China Air Pollution Prevention and Control Review and Prospect Report 2018* (China Coal Consumption Cap Plan and Policy Research Project, p. 60). Natural Resources Defense Council. <https://www.china5e.com/download/2018n-rdc/%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%A4%A7%E6%B0%94%E6%B1%A1%E6%9F%93%E9%98%B2%E6%B2%BB%E5%9B%9E%E9%A1%BE%E4%B8%8E%E5%B1%95%E6%9C%9B%E6%8A%A5%E5%91%8A2018.pdf>
- Hsu, A., Widerberg, O., Weinfurter, A., Chan, S., Roelfsema, M., Lütkehermöller, K., & Bakhtiari, F. (2018). *Bridging the Emissions Gap—The Role of Non-State and Subnational Actors* (In The Emissions Gap Report 2018). United Nations Environment Programme. https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26093/NonState_Emissions_Gap.pdf?sequence=1
- International Energy Agency. (2022). *Data and Statistics*. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics>
- Koornneef, J., van Harmelen, T., van Horssen, A., & Ramirez, A. (2011). Carbon Dioxide Capture and Air Quality. In *Chemistry, Emission Control, Radioactive Pollution and Indoor Air Quality*. IntechOpen.
- Kovač, A., Paranos, M., & Marcuš, D. (2021). Hydrogen in Energy Transition: A Review. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10016–10035. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.256>
- Li, D., & Wang, C. (2007). The Relationship between Economic Growth and Atmospheric Pollutant Emissions in China: An Empirical Study Based on Provincial Panel Data. *Finance & Economics*, 2, 43–50. <http://www.cqvip.com/qk/96436x/200702/23779446.html>
- Liu, J., Mauzerall, D. L., Chen, Q., Zhang, Q., Song, Y., Peng, W., Klimont, Z., Qiu, Xi., Zhang, S., Hu, M., Lin, W., Smith, K. R., & Zhu, T. (2016). Air Pollutant Emissions from Chinese Households: A Major and Underappreciated Ambient Pollution Source. *PANS*, 113(28), 7756–7761. <https://doi.org/10.1073/pnas.1604537113>
- Lou, J., Yu, Y., & Adofoli, V. (2022). *On the Road to Carbon Neutrality: Green Investment Needs in China*. Center for Global Sustainability. https://cgs.umd.edu/sites/default/files/2022-05/%E6%8E%92%E7%89%88%E7%A8%BF05062022_Green%20Investment%20Needs%20in%20China.pdf
- Ma, X., Wang, M., Chen, D., & Li, C. (2021). Energy Choice in Rural Household Cooking and Heating: Influencing Factors and Transformation Patterns. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(27), 36727–36741. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13213-0>

- Ministry of Ecology and Environment. (2016, December 23). Limits and Measurement Methods for Emissions from Light-Duty Vehicles (CHINA 6). https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzwb/dqhjbh/dqdywrrwfbz/201612/t20161223_369476.shtml
- Ministry of Ecology and Environment. (2017, December 12). *The Technical Guidance for Motor Vehicle Pollution Prevention and Control*. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/W020171218567003818136.pdf>
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. (2006, March 7). Assessment Standard for Green Buildings. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/tzgg/200603/20060314_155889.html
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. (2014, April 15). *Assessment Standard for Green Buildings*. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/tzgg/201404/20140416_224219.html
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. (2018, November 28). *Standard for Indoor Environmental Pollution Control of Civil Building Engineering*. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/zqyj/201811/20181128_238548.html
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. (2019, March 13). *Assessment Standard for Green Buildings*. https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzdgknr/tzgg/201905/20190530_240717.html
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development. (2020, January 16). *Standard for Indoor Environmental Pollution Control of Civil Building Engineering*. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-07/28/content_5530688.htm
- Ministry of Industry and Information Technology. (2016, June 30). *Industrial Green Development Plan (2016-2020)*. <http://www.scio.gov.cn/xwfbh/xwfbh/wqfbh/33978/34888/xgzc34894/Document/1484864/1484864.htm>
- Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Finance, Ministry of Commerce, General Administration of Customs, & General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. (2017, September 27). *Measures on Parallel Administration of Passenger Car Enterprise Average Fuel Consumption and New Energy Vehicle Credit*. <https://perma.cc/L2CP-5XTS>
- Ministry of Science and Technology. (2021, January 29). *Notice of the Ministry of Science and Technology on Issuing the "Implementation Plan for the Green Development Special Action of the National High-tech Zone."* http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-02/02/content_5584347.htm
- National Bureau of Statistics. (2020). *2020 China Statistical Yearbook*. <https://www.yearbookchina.com/navibooklist-n3020013033-1.html>
- National Development and Reform Commission. (2021). *Weights of Renewable Energy Power Consumption Responsibility of Provinces (Autonomous Regions and Municipalities) in 2021*. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202105/P020210525543049894822.pdf>
- Nilsson, A., Smit, S., & Kuramochi, T. (2021, December). *Non-State and Subnational Climate Action in China*. https://newclimate.org/sites/default/files/2022/01/NewClimate_ChinaNSA_Jan22.pdf
- People's Government of Guangdong Province. (2022a, June 12). *The Transaction Volume and Transaction Value of Carbon Emissions Allowances in Guangdong Province Ranked First in China*. http://dfz.gd.gov.cn/sqyl/gmjj/content/post_3948474.html
- People's Government of Guangdong Province. (2022b, June 23). *Guangdong Province Carbon Peak Implementation Plan*. http://www.ncsc.org.cn/xwtd/gnxw/202302/t20230208_1015731.shtml
- People's Government of Shandong Province. (2021, June 4). *Ecological Environment Status Bulletin of Shandong Province in 2020*. http://www.shandong.gov.cn/art/2021/6/4/art_97560_416343.html

- Rahman, A., Rasul, M. G., Khan, M. M. K., & Sharma, S. (2015). Recent Development on the Uses of Alternative Fuels in Cement Manufacturing Process. *Fuel*, 145, 84–99. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.12.029>
- Scovronick, N., Budolfson, M., Dennig, F., Errickson, F., Fleurbaey, M., Peng, W., Socolow, R. H., Spears, D., & Wagner, F. (2019). *The Impact of Human Health Co-Benefits on Evaluations of Global Climate Policy*. *Nature Communications*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09499-x>
- Shan, Y., Huang, Q., Guan, D., & Hubacek, K. (2020). China CO₂ Emission Accounts 2016–2017. *Scientific Data*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0393-y>
- Shandong Provincial Bureau of Statistics. (2021). *Shandong Statistical Yearbook 2021*. <http://tjj.shandong.gov.cn/tjnj/nj2021/zk/indexch.htm>
- Shaw, R., Luo, Y., Cheong, T. S., Halim, S. A., Chaturvedi, S., Hashizume, M., Insarov, G. E., Ishikawa, Y., Jafari, M., Kitoh, A., Pulhin, J., Singh, C., Vasant, K., & Zhang, Z. (2022). Asia. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_Chapter10.pdf
- Statista. (2023). *Share of Global Cement Produced in China from 2015 to 2020*. <https://www.statista.com/statistics/1285624/china-share-of-global-cement-production/>
- Tang, R., Zhao, J., Liu, Y., Huang, X., Zhang, Y., Zhou, D., Ding, A., Nielsen, C. P., & Wang, H. (2022). Air Quality and Health Co-Benefits of China's Carbon Dioxide Emissions Peaking Before 2030. *Nature Communications*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-28672-3>
- The State Council. (2013a, June 14). *The Executive Meeting of the State Council Deploys Ten Measures for the Prevention and Control of Air Pollution*. https://www.gov.cn/ldhd/2013-06/14/content_2426237.htm
- The State Council. (2013b, September 10). *Air Pollution Prevention and Control Action Plan*. http://www.gov.cn/zwggk/2013-09/12/content_2486773.htm
- The State Council. (2017, January 5). *The 13th Five-Year Comprehensive Work Plan for Energy-Saving and Emissions Reduction*. <https://www.iea.org/policies/7909-13th-five-year-comprehensive-work-plan-for-energy-saving-and-emission-reduction>
- The State Council. (2018a, June 16). *Recommendations on Comprehensively Strengthening Protection for Ecological Environment and Against Pollution*. http://www.gov.cn/zhengce/2018-06/24/content_5300953.htm
- The State Council. (2018b, June 27). *Three-Year Action Plan for Making China's Skies Blue Again*. http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-07/03/content_5303158.htm
- The State Council. (2020, October 20). *Notice of the State Council on Issuing the Development Plan for Energy-Saving and New Energy Automobile Industry (2021-2025)*. https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-11/02/content_5556716.htm
- The State Council. (2022, January 24). *The 14th Five-Year Plan for the Comprehensive Work on Energy Conservation and Emissions Reduction*. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/content_5670202.htm
- United Nations. (2015). *Paris Agreement*. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- United Nations. (2021, September 21). *China Headed Towards Carbon Neutrality by 2060; President Xi Jinping Vows to Halt New Coal Plants Abroad*. *UN News*. <https://news.un.org/en/story/2021/09/1100642>
- Vandyck, T., Rauner, S., Sampedro, J., Lanzi, E., Reis, L. A., Springmann, M., & Dingenen, R. V. (2021). Integrate Health into Decision-Making to Foster Climate Action. *Environmental Research Letters*, 16(4), 041005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abef8d>

- Wang, P. (2021). China's Air Pollution Policies: Progress and Challenges. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 19, 100227. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2020.100227>
- Wang, P., Lin, C.-K., Wang, Y., Liu, D., Song, D., & Wu, T. (2021). Location-Specific Co-Benefits of Carbon Emissions Reduction from Coal-Fired Power Plants in China. *Nature Communications*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27252-1>
- Wang, P., Liu, D., Mukherjee, A., Agrawal, M., Zhang, H., Agathokleous, E., Qiao, X., Xu, X., Chen, Y., Wu, T., Zhu, M., Saikawa, E., Agrawal, S. B., & Feng, Z. (2023). Air Pollution Governance in China and India: Comparison and Implications. *Environmental Science & Policy*, 142, 112–120. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2023.02.006>
- Wang, Y., Xie, M., Wu, Y., Zhang, X., Wang, M., Zhang, Y., & Xie, Y. (2022). Ozone-Related Co-Benefits of China's Climate Mitigation Policy. *Resources Conservation and Recycling*, 182, 106288. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106288>
- World Health Organization. (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide*. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240034228>
- World Nuclear Association. (2022, November). *Nuclear Power in China*. <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx>
- Xing, J., Lu, X., Wang, S., Wang, T., Ding, D., Yu, S., Shindell, D., Ou, Y., Morawska, L., Li, S., Ren, L., Zhang, Y., Loughlin, D., Zheng, H., Zhao, B., Liu, S., Smith, K. R., & Hao, J. (2020). The Quest for Improved Air Quality May Push China to Continue Its CO₂ Reduction Beyond the Paris Commitment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(47), 29535–29542. <https://doi.org/10.1073/pnas.2013297117>
- Yamineva, Y., & Liu, Z. (2019). Cleaning the Air, Protecting the Climate: Policy, Legal and Institutional Nexus to Reduce Black Carbon Emissions in China. *Environmental Science & Policy*, 95, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.01.016>
- Yin, P., Brauer, M., Cohen, A. J., Wang, H., Li, J., Burnett, R. T., Stanaway, J. D., Causey, K., Larson, S., Godwin, W., Frostad, J., Marks, A., Wang, L., Zhou, M., & Murray, C. J. L. (2020). The Effect of Air Pollution on Deaths, Disease Burden, and Life Expectancy Across China and Its Provinces, 1990–2017: An Analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet Planetary Health*, 4(9), e386–e398. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(20\)30161-3](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(20)30161-3)
- Yu, S., Evans, M., & Shi, Q. (2014). Analysis of the Chinese Market for Building Energy Efficiency. *Pacific Northwest National Laboratory*. <https://doi.org/10.2172/1126340>
- Yu, S., Horing, J., Liu, Q., Dahowski, R., Davidson, C., Edmonds, J., Liu, B., Mcjeon, H., McLeod, J., Patel, P., & Clarke, L. (2019). CCUS in China's Mitigation Strategy: Insights from Integrated Assessment Modeling. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 84, 204–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2019.03.004>
- Yuan, Y., & Zhou, J. (2021). Influence of Multi-Dimensional Characteristics and Evolution of Industrial Structure on Carbon Emissions at Provincial Scale in China. *Journal of Natural Resources*, 36(12), 3186–3202. <http://www.jnr.ac.cn/EN/10.31497/zrzyxb.20211213>
- Zhang, J., & Wen, H. (2022, January 18). *China's Top Industries Can Peak Collective Emissions in 2025*. NRDC. <https://www.nrdc.org/experts/jake-schmidt/chinas-top-industries-can-peak-collective-emissions-2025>
- Zhang, L., Wu, P., Niu, M., Zheng, Y., Wang, J., Dong, G., Zhang, Z., Xie, Z., Du, M., Jiang, H., Liu, H., Cao, L., Pang, L., Lv, C., Lei, Y., Cai, B., & Zhu, Y. (2022). A Systematic Assessment of City-Level Climate Change Mitigation and Air Quality Improvement in China. *Science of The Total Environment*, 839, 156274. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156274>

- Zhang, Q., Yin, Z., Lu, X., Gong, J., Lei, Y., Cai, B., Cai, C., Chai, Q., Chen, H., Dai, H., Dong, Z., Geng, G., Guan, D., Hu, J., Huang, C., Kang, J., Li, T., Li, W., Lin, Y., ... He, K. (2023). Synergetic Roadmap of Carbon Neutrality and Clean Air for China. *Environmental Science and Ecotechnology*, 16, 100280. <https://doi.org/10.1016/j.ese.2023.100280>
- Zhang, Q., Zheng, Y., Tong, D., Shao, M., Wang, S., Zhang, Y., Xu, X., Wang, J., He, H., Liu, W., Ding, Y., Lei, Y., Li, J., Wang, Z., Zhang, X., Wang, Y., Cheng, J., Liu, Y., Shi, Q., ... Hao, J. (2019). Drivers of Improved PM_{2.5} 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, S. (2017, May 1). *Study on the Correlation between Industrial Structural Adjustment and Changes in Air Quality in Beijing*. <https://cdmd.cnki.com.cn/Article/CDMD-10038-1017200624.htm>
- Zhang, W., Zhao, B., Gu, Y., Sharp, B., Xu, S.-C., & Liou, K.-N. (2020). Environmental Impact of National and Subnational Carbon Policies in China Based on a Multi-Regional Dynamic CGE Model. *Journal of Environmental Management*, 270, 110901. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110901>
- Zhao, F., Mu, Z., Hao, H., Liu, Z., He, X., Victor Przesmitzki, S., & Ahmad Amer, A. (2020). Hydrogen Fuel Cell Vehicle Development in China: An Industry Chain Perspective. *Energy Technology*, 8(11), 2000179. <https://doi.org/10.1002/ente.202000179>
- Zhao, X. (2015, December 17). *Mechanism and Policy Research on Industrial Structure Optimization under Low-carbon Transformation Target: A Case Study of Guangdong Province*. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C447WN1SO36whLpCg h0R0Z-iv9r0YoQXild4v9BfOE9rDou0-6hBj9wFqD4Rs3-Wc_OAoyaB7Jg1EFCQ5w32sEOh&uniplatform=NZKPT
- Zhou, B. (2022, January 23). *2022 Shandong Provincial Government Work Report*. <http://www.china-cer.com.cn/guwen/2022020516669.html>
- Zhou, M., Wang, H., Zeng, X., Yin, P., Zhu, J., Chen, W., Li, X., Wang, L., Wang, L., Liu, Y., Liu, J., Zhang, M., Qi, J., Yu, S., Afshin, A., Gakidou, E., Glenn, S., Krish, V. S., Miller-Petrie, M. K., ... Liang, X. (2019). Mortality, Morbidity, and Risk Factors in China and Its Provinces, 1990–2017: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *The Lancet*, 394(10204), 1145–1158. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)30427-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)30427-1)
- Zou, C., Wang, J., Hu, K., Li, J., Yu, C., Zhu, F., & Huang, H. (2022). Distribution Characteristics and Source Apportionment of Winter Carbonaceous Aerosols in a Rural Area in Shandong, China. *Atmosphere*, 13(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/atmos13111858>

