



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

决策者摘要

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

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

决策者摘要

2023 年 10 月

余莎¹, Jenna Behrendt^{1*}, 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

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

SUGGESTED CITATION

Yu S., 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: Summary for Policymakers." Center for Global Sustainability, University of Maryland & Tsinghua University. 9pp.

ACKNOWLEDGEMENTS

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持。



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

摘要

应对气候变化与改善空气质量之间有很强的协同作用，采取减污降碳协同战略能够同时应对气候变化、改善空气质量。综合而言，由协同效应带来的空气质量和公共卫生的改善能够有效地推进地方政府在应对气候变化方面采取更强有力的措施，这样的推动效果在短期内尤为重要。在国家层面上，中国政府已经制定了 2060 年前实现碳中和的气候目标，以及 2035 年作为“美丽中国”战略基本要素的空气质量目标。在省级层面上，由于各省的经济结构、能源结构和未来低碳转型潜力均存在差异，其实现净零排放的路径也各不相同。同时各省的气候、人口密度和人口结构特征也各不相同，空气质量及其相关的公共健康问题也存在较大的地区差异。因此，实现国家气候和空气质量目标需要全面评估各个省份具体的减排路径以及所面临的不同挑战。

本研究通过使用包含中国省级细分的全球综合评估模型 (GCAM-China) 首先模拟了实现 2060 年碳中和目标下的省级层面脱碳路径。此外，我们通过 GCAM-China 与大气污染物排放预测模型 (DPEC) 的耦合，深入分析了广东和山东两省在各自脱碳路径下当地空气质量改善的情况。尽管广东和山东均为中国的经济大省，但它们的产业结构存在较大差异，对化石燃料的依赖程度也不同，因此它们所面临的空气污染问题也各不相同。本研究首次评估了针对这两个省份二氧化碳和当地空气污染物减排的政策机会和策略。通过深入探究两个省份的情况，我们量化了其不同脱碳路径下的空气质量和公共健康的改善，为实现中国的碳中和目标提供了有益的参考。

主要研究结论：

- ▶ 为实现中国碳中和目标，需要各省份和各行业在减少排放方面做出重大努力。
- ▶ 鉴于各省的经济、能源结构和资源禀赋差异，因此各省需要采取不同的减排路径。

- ▶ 为实现减排目标，山东省需重点关注电力、工业以及供暖部门的排放。
- ▶ 广东省需要在交通和建筑部门大幅减排，尤其是在近期城市需求增长的情况下，这对应着交通和建筑行业对能源的更高需求，因此需要制定相应的政策和措施来促进清洁能源的应用和能效的提高。
- ▶ 减缓气候变化和能源转型不仅有助于广东和山东两省持续降低 PM_{2.5} 浓度而且是其持续降低 PM_{2.5} 浓度的必要策略，而加强污染末端控制仅可以在短期内带来较大的污染物减排收益。因此，二者结合可以最大限度地释放其污染物减排潜力。
- ▶ 在缺少应对气候变化和能源转型努力的情况下，两省均无法实现世界卫生组织 PM_{2.5} 浓度最严格的标准。即使最大程度上使用污染末端控制，广东省的 PM_{2.5} 浓度也高于世界卫生组织第五阶段标准，山东省则远高于第四阶段标准。
- ▶ 相比于保持当前的气候及空气政策水平，两省通过实施能源转型和更严格的末端控制的措施可以在 2050 年避免约 30 万例与 PM_{2.5} 污染相关的死亡。
- ▶ 不同减排技术的使用会影响健康结果，例如，在不应用碳捕获、利用与封存技术 (CCUS) 的情况下，2050 年与 PM_{2.5} 有关的过早死亡会进一步降低。
- ▶ 在具体不同的气候缓解措施中，有一些策略可以带来更高的空气质量和健康效益，因此可以优先考虑作为近期行动。这些减排策略包括逐步淘汰农村住宅建筑中固体燃料（散煤、传统生物质）的使用，以及针对工业和电力部门的超级污染设施采取优先关停措施。

在中国应对气候变化承诺和改善空气质量目标提出的背景下，采取减污降碳协同政策有助于加强协同效应，协同推进碳减排与空气质量改善。当前，中国已确定“30-60”双碳目标，计划在2030年前实现碳排放达峰，在2060年前实现碳中和。同时，“美丽中国”愿景提出到2035年将PM_{2.5}浓度限制在年均浓度35微克/立方米以下（联合国，2021；Xing等，2020）。中国目前的PM_{2.5}浓度目标仍高于世界卫生组织第四阶段的建议值10微克/立方米，这凸显了持续改善空气质量的必要性（世界卫生组织，2021）。另一方面，自2012年以来，中国在减少空气污染物排放方面取得了显著成就，但多数减排贡献来自末端控制加强，较少通过能源转型和调整经济产业结构等手段实现（Geng等，2021）。然而，随着末端控制的减排潜力在中短期内逐渐枯竭，低碳转型将成为中国实现中长期空气质量改善的关键（Cheng等，2021）。

目前广泛的研究表明，全球气候减缓和地区空气质量改善之间存在着巨大的协同效应（Aunan等，2006；Scovronick等，2019；Yamineva和Liu，2019），但最终能达到的效果取决于所采取的具体减缓技术和政策。例如，推广生物能或碳捕集、利用与封存技术（CCUS），虽然减少了温室气体（GHG）的排放，但由于继续使用化石燃料或增加能源投入，可能会潜在地加剧空气污染（Koornneef等，2011）。因此，整体理解温室气体和空气污染物减排对于更有效地实现气候环境协同治理具有重要意义。

此外，低碳转型和空气质量改善都需要进行省级层面的分析和策略制定。各省实现碳中和的减排路径，既取决于其现有经济能源结构，也取决于其转型潜力（Nilsson等，2021）。由于气候、能源系统、人口密度以及人口分布特征的不同，各省空气质量及其相关的公共健康问题也存在较大的区域差异（Chen等，2020）。省级行动将在减缓气候变化和提高空气质量中发挥关键作用，助力全国目标的实现，而制定一套同时将减污和降碳考虑在内的整体性策略则可以为省级行动和全国目标的实现注入动力。总之，减缓气候变化在空气质量和公共卫生方面的协同效应能对地方政府的气候行动起到激励作用，这种激励作用在短期内尤为明显。

本研究将采用全球综合评估中国省级分解模型（GCAM-China）¹与大气污染物排放预测模型（DPEC）²的耦合方法，预测不同气候政策和清洁空气情景下各省的温室气体和空气污染物减排路径。然后，使用天气研究和预报-社区多尺度空气质量建模系统（WRF-CMAQ）³来估计不同情景下的PM_{2.5}浓度（Cheng等，2021），并用全球疾病负担（GBD）报告的浓度响应函数（GBD，2019）估计对过早死亡的影响（图1）。有关方法的详细信息，请参阅技术附录。

¹ GCAM是一个局部均衡模型，包含能源生产、转化和消费的详细技术模拟，研究社会经济、能源、农业/土地利用和气候等耦合系统的长期变化（GCAM，2022）。GCAM-China是GCAM的一个分支，将中国地区进一步分解为31个区域和6个电网区域。中国的区域细节被嵌入到GCAM模型中，在全球背景约束下实现区域层面上对中国能源和环境系统演变的评估。

² DPEC模型基于技术演替的未来排放变化动态模拟。一方面融合了中国多尺度排放清单模型（MEIC）中700多种污染源的历史技术演替过程，并在此基础上根据不同社会经济发展和政策演进情景模拟未来各类污染源的技术演变进程及其对排放的影响；另一方面无缝衔接全球综合评估模型中国嵌套版本GCAM-China，将社会经济情景（SSP）和气候目标约束（RCP）下的未来能源需求与供应情景与各类污染源的技术演替模型逐一映射，从而实现了在不同社会经济情景和气候目标约束下中国未来大气成分排放变化的精细化模拟。

³ 天气研究和预报模型（WRF）是由国家大气研究中心（NCAR）开发的下一代中尺度数值天气预报系统，用于本研究中的天气模拟。社区多尺度空气质量建模系统（CMAQ）5-2版是美国环境保护局开发的空气质量模型，在本研究中用于离线PM_{2.5}浓度模拟。

为评估气候政策和清洁空气政策的选择对 2060 年脱碳进程与空气污染物减排的影响，我们制定了四种情景，包括三个核心情景和一个补充情景。核心情景由不同的气候政策雄心和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使用 CCUS 技术的情况下实现气候目标对空气和健康的影响（表 1）。具体而言，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 2020 年后立即下降，并在 2050 年实现净零排放，到 2060 年实现温室气体净零排放（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）。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，分别是强化末端控制的¹最佳健康效应（BHE）情景，和当前污染物控制水平的参考情景（BAU）。此外，鉴于 CCUS 技术部署的不确定性，我们还包括了一个敏感性分析，即假设到 2050 年达到二氧化碳净零排放而没有使用 CCUS 技术的情景（NZ2050_BHE_noCCUS）。通过比较这些情景，我们比较了气候减缓目标和污染末端控制政策对碳减排和空气质量改善的影响。

图 1：分析方法和建模工具。

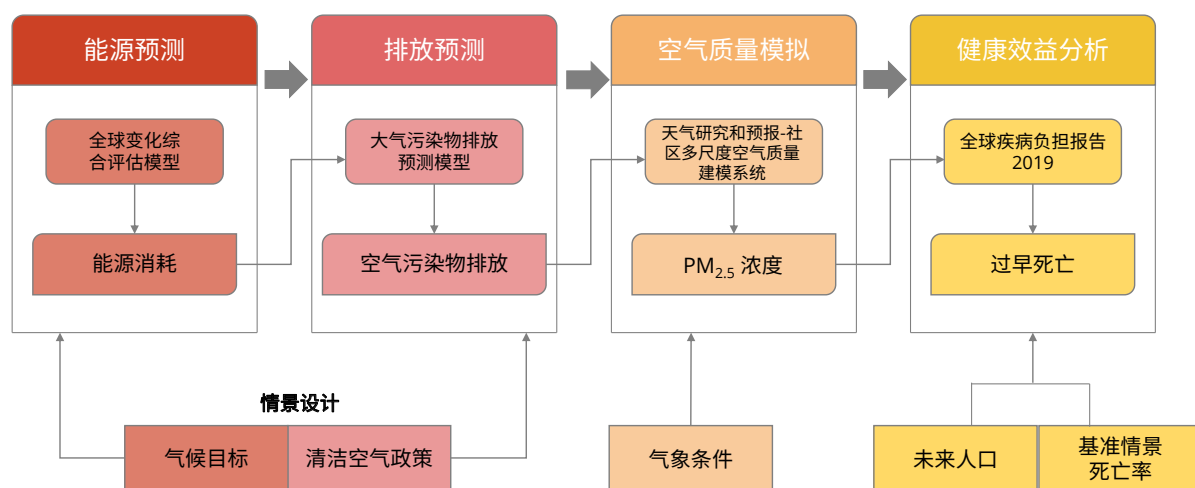
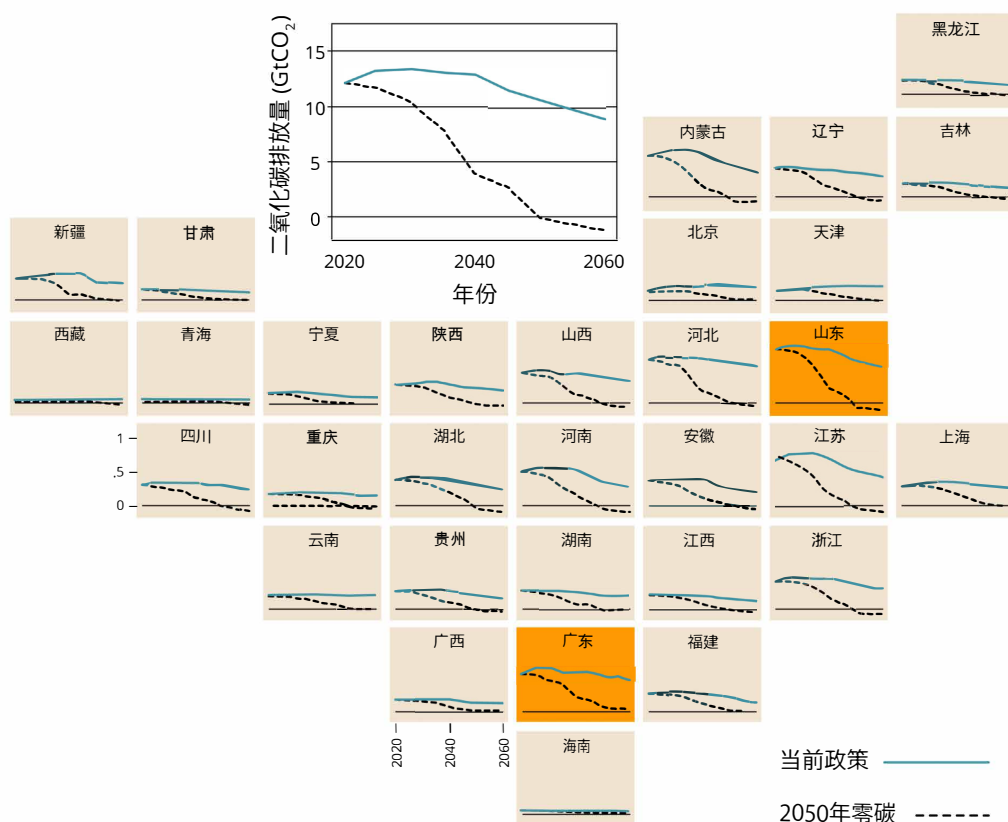


表 1：气候政策和大气污染治理的能源和排放预测情景。

		气候政策情景	
		<i>Net Zero CO₂ 2050</i> (2050 年零碳)	<i>Continued Current Policy</i> (当前政策)
大气污染治理情景	<i>Best Health Effects</i> (最佳健康效应)	NZ2050_BHE	Cpol_BHE
		<i>Sensitivity Analysis:</i> (补充情景灵敏性分析) NZ2050_BHE_noCCUS	
	<i>Business-As-Usual</i> (参考情景)		Cpol_BAU

图 2：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。

注：在 NZ2050 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。



从目前的情景趋势来看，要在 2050 年实现全国二氧化碳净零排放，各省份均需大幅减排，但具体的减排路径存在差异，主要差异包括短期减排水平和实现净零排放的时间（图 2）。在短期内，各省 2020 年至 2030 年的减排率存在较大差异，介于 5% 至 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 年间达到二氧化碳净零排放，多数省份在 2055 年达到净零排放。一些省份则可以在本世纪中叶左右通过部署带碳捕获和储存的生物能（BECCS）或通过增加碳汇等方式实现 NZ2050 情景下的负排放，对抵消二氧化碳和特别是非二氧化碳温室气体的剩余排放至关重要。

在本研究深入研究了广东省和山东省，分析了不同气候环境政策情景下减排路径的差异。广东省和山东省是中国 GDP 第一和第三大省，人口第一和第二大省，但在经济和能源结构方面存在差异，分别是二氧化碳排放第五和第一的省份（《中国统计年鉴》，2020；CEADs, 2023；Guan 等, 2021；Shan 等, 2020）。本研究探讨了广东和山东实现碳中和目标和空气质量改善的路径，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，着重关注两省的温室气体和空气污染物协同减排，为其他面临相同机遇与挑战的省份提供借鉴。

山东和广东空气质量和二氧化碳排放现状

当前广东省和山东省大气污染物和二氧化碳排放差异主要受其能源结构差异的影响。广东和山东处于不同的气候带，面临的供暖和制冷需求存在较大差异。与广东相比，山东的气候更冷，对化石燃料的依赖程度更高，重工业排放量更大，大气扩散条件更差，因此空气污染物和二氧化碳的排放量都更高。

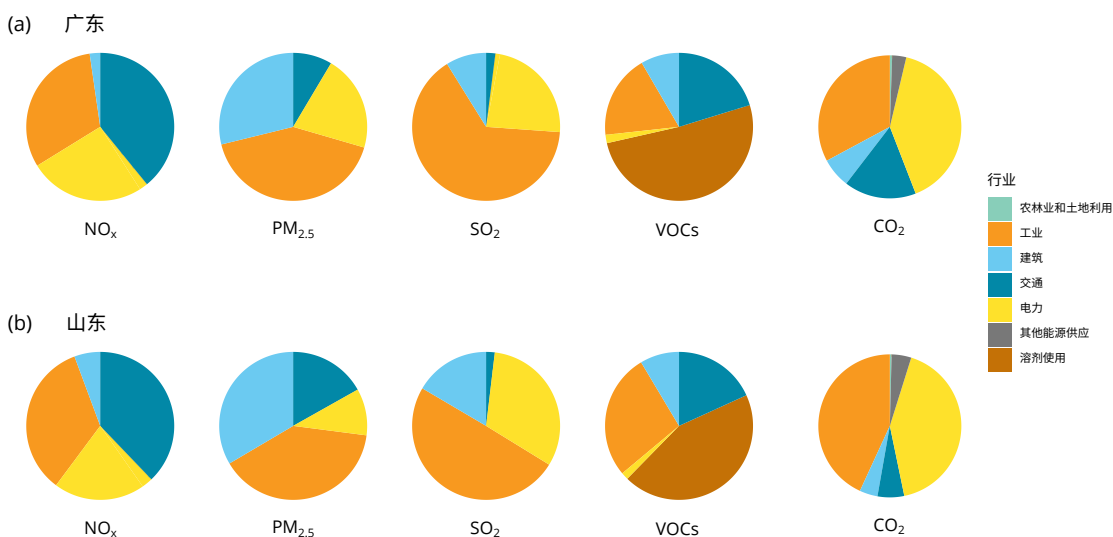
具体而言，在 2020 年，广东的 PM_{2.5} 年均值为 22 微克 / 立方米（广东省生态环境厅，2021 年），符合国家标准（35 微克 / 立方米），低于世界卫生组织第二阶段目标（25 微克 / 立方米），但未达到世界卫生组织第四阶段建议值（10 微克 / 立方米）（世界卫生组织，2021 年）。山东 2020 年的 PM_{2.5} 年平均浓度为 46 微克 / 立方米（山东省人民政府，2021），高于国家标准和世卫组织的建议值。而且山东的二氧化碳排放量几乎是广

东的两倍，两省在 2019 年分别排放了约 9.4 亿和 5.7 亿吨二氧化碳（CEADs，2023 年；Guan 等，2021 年；Shan 等，2020 年）。

能源结构差异会影响空气污染物、PM_{2.5} 前体（氮氧化物（NO_x）、二氧化硫（SO₂）、挥发性有机物（VOCs））和二氧化碳（CO₂）排放（图 3）。对于这两个省来说，工业部门和电力部门在空气污染物和二氧化碳排放中的占比很高，因此是实现碳减排和清洁空气目标的重点部门。特别是 2020 年，工业部门为两省最大或第二空气污染物和二氧化碳排放源，凸显了在该部门实施重点政策的必要性。尽管交通和建筑部门在两个省的二氧化碳排放中所占比例较小（相较而言广东高于山东），但它们产生的一些污染物（如氮氧化物和 PM_{2.5}）的排放比例很高。此外，这两个省目前的挥发性有机物排放主要来自溶剂使用部门。

图 3：2020 年广东和山东空气污染物和二氧化碳排放行业分布。

其他能源供应包括天然气生产、石油炼制、制氢和供热过程。



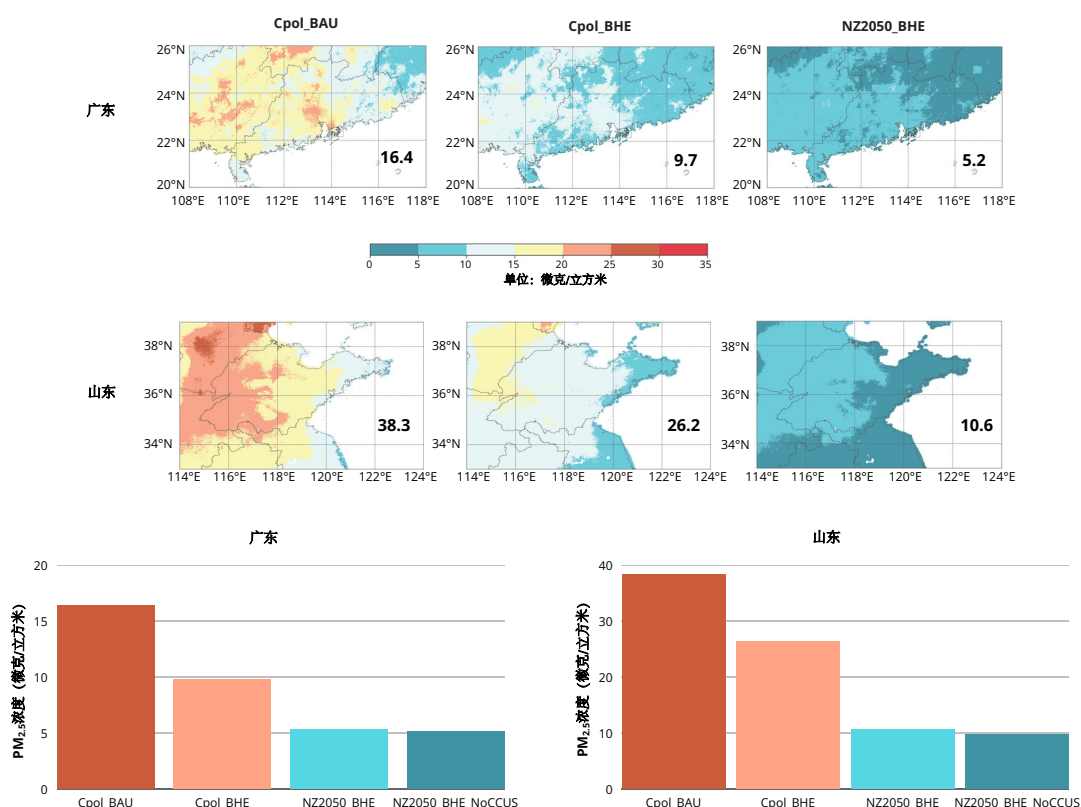
在中国国家层面的碳中和目标下，山东和广东各个部门都需要大幅减少二氧化碳排放。在当前政策延续情景下，两省二氧化碳排放量在 2030 年之前持续增加，并在 2060 年前分别下降至峰值的 36% 和 27%（图 2）。在 2050 年全国零碳路径下，两省的二氧化碳排放量在 2020 年后立即下降，在 2030 年至 2040 年之间实现最大减排幅度，山东在 2050 年达到净零排放，广东在 2050 年相较 2020 年减排 88%，2060 年减少 95%。为此，必须在电力、建筑、工业和交通等领域实现大规模减排，并需要进一步加强行动和政策支持。

然而，由于两省目前和未来的产品服务需求、经济和能源结构以及资源禀赋存在差异，其能源系统转型和减排路径也有所不同。例如，由于难以脱碳的交通等部门大量排放，加上 CCUS 技术的贡献有限，广东在本世纪下半叶仍存在二氧化碳净排放，且其净排在 2050 年后保持正值。相比之下，山东通过电力和制氢行业的 BECCS 技术实现了大量的负排放。随着电力和高煤消耗行业的逐步淘汰，山东将 2030 年后实现更加快速的减排。

除了二氧化碳排放量大幅减少，研究同时发现，在两省深度脱碳的情况下尤其是与增强的末端管制措施相结合时，PM_{2.5} 浓度出现大幅下降当结合最强末端治理措施和气候政策（NZ2050_BHE）时，大气污染物排放的长期减排量最大（图 4）。与当前政策情景相比，NZ2050_BHE 情景中两个省的 PM_{2.5} 浓度最低（图 4）。到 2050 年，两个省份均可达到世界卫生组织 PM_{2.5} 浓度标准（山东可达到第四阶段标准，广东可达到第五阶段标准），但仅限于 NZ2050 情景。在 2050 年，减缓气候变化政策将使广东和山东分别避免 11 万人和 16 万人过早死亡，总计近 30 万人。所以，要实现最大的大气污染物减排量，需要将末端控制和气候变化减缓措施相结合。

减缓气候变化可以改善空气质量，但随后的脱碳途径可能会影响公共健康。在不部署 CCUS 技术的情景下，空气污染物的减排量更大（图 4），且在两省均能避免 1.1 万人的过早死亡。

图 4：不同情景下广东和山东 2050 年 PM_{2.5} 浓度预测。



我们的研究表明，所有部门都需要采取减排措施。这些措施可以同时减少温室气体和空气污染物的排放，但根据中国当前的情况，其中一些措施在减少温室气体排放方面具有更大的潜力（例如发电中逐步减少煤炭使用），另一些则可以产生更大的空气质量和健康效益（例如在交通繁忙的城市地区逐步淘汰柴油卡车）。在制定政策时综合考量气候目标和空气质量，不仅可以评估一项政策对另一项政策的协同效益，还有助于最大限度地实现这两个目标的成果。为促进广东省和山东省的温室气体和空气污染物减排，我们提出了以下表格（表 2）中针对建筑、工业、交通和电力部门的短期和长期政策建议。

在各种缓解策略中，一些具体措施可以带来巨大的空气质量和健康效益，可以优先考虑作为近期行动。在建筑领域，逐步淘汰农村住宅中的固体燃料（传统生物质和散煤）消耗可以减少颗粒物的产生，进而改善空气质量。在工业领域，关闭没有末端控制设备的小型锅炉和超级污染设施可以减少二氧化硫、氮氧化物和 PM_{2.5} 排放，从而对空气质量产生重大影响。在交通运输领域，提高货运车辆（特别是在城市地区运送货物的卡车）中纯电动汽车和燃料电池汽车的比例，有助于减少氮氧化物（PM_{2.5} 的前体）的产生。在电力领域，立即退役对未完成超低排放治理的超污染电厂。其他缓解策略在下面的表 2 中列出。

表 2：广东省和山东省短期和中长期脱碳和空气质量改善政策建议。

根据空气污染物减排潜力，按短期或中长期行动优先级排序。

行业	短期政策建议	中长期战略建议
建筑	<ol style="list-style-type: none"> 1. 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。 2. 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。 3. 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）。 4. 提高新建建筑的能效标准，特别是城市住宅高速增长广东。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 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。 2. 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。 3. 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"> 1. 在高效机器和制造技术领域投资，例如采用 TRT、CDQ 和 Jet BOF⁴。 2. 强化工业产品的二次循环利用，如钢铁、水泥、铝和塑料产品。 3. 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。 4. 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"> 1. 从高炉向电炉转型，并开发电解过程等新的钢铁制造技术。 2. 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"> 3. 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。 4. 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"> 1. 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。 2. 加强各部门合作，维护并继续发展充电基础设施。 3. 针对传统汽 / 柴油汽车征税。
电力	<ol style="list-style-type: none"> 1. 制定相关政策供扩大风能和太阳能装机参考。 2. 通过需求侧管理计划和激励措施提高电网稳定性。 3. 扩大有雄心的海上风力发电计划。 4. 推广集中式和分布式太阳能光伏发电。 5. 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。 6. 投资储能扩容和研发。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 继续增加风能和太阳能发电装机，并提升储能能力。 2. 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。 3. 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。 4. 在山东推广核电建设和小型核电机组的使用。

⁴ 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。

结论和未来展望

省级行动对于实现国家气候目标和改善空气质量至关重要。我们的研究表明，各省在实现国家气候目标方面将发挥重要但有区别的作用。不同省份实现气候目标的战略、政策和措施会存在差异。例如，山东可能更加依赖碳捕集利用和储存技术，因为该省拥有巨大的碳储存能力，并需要集中精力实现供暖的低碳化。而广东作为一个服务业大省，将需要优先考虑利用现有或潜在的技术，尽量减少交通部门的排放，特别是客运车辆的排放。尽管两各省之间存在差异，但有些行动也有共通之处，比如加快轻工业、客运车辆和建筑物供暖/制冷的电气化。二者可以合作制定战略应对这些挑战，共同推动实现国家气候目标的实现。

本研究对末端控制政策、气候目标政策和 CCUS 技术等不同政策途径对空气污染物减排的影响进行了分析。结果表明，末端控制政策能够改善空气质量，但从长远来看，要想在广东和山东达到世界卫生组织 PM_{2.5} 浓度的目标，需要同时强化末端控制政策和气候政策。这些发现表明，脱碳不仅对广东和山东两省的

空气质量有好处，而且由此产生的能源系统转型对实现大气污染物的大幅减排及减少过早死亡至关重要。此外，我们的分析表明，在部署 CCUS 的情况下，PM_{2.5} 浓度更高，这表明制定气候缓解战略时应考虑脱碳政策选择的影响。需要进行更多的研究来了解 CCUS 技术的部署与公共健康的关系。

未来的研究将继续探究各省份之间的空气质量和气候减缓方面的差异，同时将分析范围扩大到中国其他主要地区。同时研究也将关注更多的温室气体和空气污染物，例如甲烷和臭氧，以及如何逐步减少这些温室气体的策略，并评估这些策略对空气质量的影响。此外，未来的研究还将深入探究 CCUS 技术对空气污染的影响。最后，进一步研究污染物浓度及其对健康的影响对于评估关键人口和地区的污染和健康负担至关重要，也有助于国家和地方政府更好地衡量在实现中国气候和空气质量目标方面的协同效益。

参考文献

- 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>
- 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>
- 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>
- Department of Ecology and Environment of Guangdong Province. (2021). 2020 Report on the State of Guangdong Provincial Ecology and Environment. http://gdee.gd.gov.cn/hjzkgb/content/post_3266052.html
- GCAM. (2022). GCAM v6 Documentation: Global Change Analysis Model (GCAM). <https://zenodo.org/record/6619287>
- Geng, G., Zheng, Y., Zhang, Q., Xue, T., Zhao, H., Tong, D., Zheng, B., Li, M., Liu, F., Hong, C., He, K., & Davis, S. J. (2021). Drivers of PM_{2.5} Air Pollution Deaths in China 2002–2017. *Nature Geoscience*, 14(9), Article 9. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00792-3>
- 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>
- 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.
- National Bureau of Statistics. (2020). 2020 China Statistical Yearbook. <https://www.yearbookchina.com/navibooklist-n3020013033-1.html>
- Nilsson, A., Smit, S., & Kuramochi, T. (2021). Non-State and Subnational Climate Action in China. https://newclimate.org/sites/default/files/2022/01/NewClimate_ChinaNSA_Jan22.pdf
- People's Government of Shandong Province. (2021). Ecological Environment Status Bulletin of Shandong Province in 2020. http://www.shandong.gov.cn/art/2021/6/4/art_97560_416343.html
- 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>
- United Nations. (2021). 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>
- 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>
- 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>
- 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>

排版印制 / 136 7111 7637

mirodesign

米罗空间品牌设计