科学通报 2024 年 第 69 卷 第 10 期: 1373 ~ 1384
论 文
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

我国典型区域二氧化碳和细颗粒物精细化协同减排路径

赵焕[1,2], 许博[1,2], 徐晗[1,2], 王振宇[1,2], 高洁[1,2], 黄俊波[1,2], 戴启立[1,2], 冯银厂[1,2], 史国良[1,2*]

1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300350;
2. 南开大学环境科学与工程学院, 中国气象局-南开大学大气环境与健康研究联合实验室, 天津 300350
* 联系人, E-mail: nksgl@nankai.edu.cn

2023-08-11 收稿, 2023-10-12 修回, 2023-12-22 接受, 2023-12-25 网络版发表
国家自然科学基金(42077191)、天津市研究生科研创新项目(2022SKY002)和国家重点研发计划(2022YFC3703400)资助

摘要 随着碳达峰、碳中和目标的提出, 我国环境保护进入减污降碳协同治理新阶段. 目前研究主要探寻空气质量政策或气候政策对二氧化碳和细颗粒物的减排效益. 而从二氧化碳和细颗粒物排放终端能源消费重点行业、主要能源以及主导因素等角度出发, 来探究我国典型区域协同减排路径精细化方法的研究则鲜见报道. 本研究基于2000~2020年我国京津冀、长江三角洲、珠江三角洲典型区域能源消耗数据, 首先探明了3个典型区域二氧化碳和细颗粒物终端能源消费的重点排放行业均为工业; 并进一步甄别了终端能源消费重点行业中$PM_{2.5}$排放主要能源为煤类能源, 而CO_2排放主要能源由煤类能源逐渐转向煤、气类能源, 但煤类仍为主导地位; 随后使用因素分解模型解析了能源强度、技术进步等主导因素对单位国内生产总值的二氧化碳以及细颗粒物的影响效应; 最终利用能源-环境核算预测模型, 基于上述研究识别的终端能源消费重点行业、主要能源以及主导因素进行情景分析, 旨在判断典型区域不同情景下碳达峰情况, 进而寻找协同减排最优路径. 结果发现, "技术进步"因素在前期减排效果最好; "能效提升"因素的减排效果在长时期碳污协同减排将起到关键作用, 表明未来针对工业排放等终端能源消费重点行业, 关注煤、气类等主要能源, 采取能效提升、技术进步等手段措施, 能够对减污降碳协同增效目标的实现产生最佳收益. 希望本研究能为我国典型区域二氧化碳和细颗粒物合理化、精细化协同减排和管控提供科学证据.

关键词 二氧化碳, 细颗粒物, LEAP模型, 情景分析, 协同控制, 精细化

温室效应和空气污染是当今气候和大气环境面临的两项重要挑战[1,2]. 大气中的二氧化碳(CO_2)不断吸收红外线并将其转化为热量, 使大气的整体温度上升[3,4], 造成温室效应[5], 影响全球气候变化[6,7]. 细颗粒物($PM_{2.5}$)作为重要的大气污染物[8,9], 会影响区域空气质量[10,11]、危害人体健康[12,13]. CO_2和$PM_{2.5}$具有高度同根[14]、同源[15]、同过程[16]以及同排放时空[17]的特征, 联系紧密且关系复杂[18]. 众多研究均证明了温室气体减排和空气质量改善之间具有协同性[19~23], 温室气体减排和清洁空气措施均可以减少CO_2和$PM_{2.5}$的排放. 因此, 探寻我国典型区域CO_2和$PM_{2.5}$排放行业、能源以及影响因素, 掌握碳污长时间序列排放规律并进行科学预测, 进而寻找协同减排最优路径, 有利于温室气体的有效减缓和大气环境的长效改善.

目前研究大多从政策措施入手, 自上而下探究减缓气候变化和改善空气质量政策对二氧化碳和细颗粒物减排产生的协同效益[24,25]. Cheng等人[26]在全球和中国的气候缓解路径与当地清洁空气政策联系起来的组合情景下, 评估了2015~2060年中国$PM_{2.5}$空气质量的路径, 提出如果中国在2030年后大幅减少空气污染, 碳中

引用格式: 赵焕, 许博, 徐晗, 等. 我国典型区域二氧化碳和细颗粒物精细化协同减排路径. 科学通报, 2024, 69: 1373–1384
Zhao H, Xu B, Xu H, et al. Refined pathway for collaborative reduction of carbon dioxide and fine particulate matter in China's key areas (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 1373–1384, doi: 10.1360/TB-2023-0828

© 2023《中国科学》杂志社

和目标至关重要. Shi等人[27]评估了中国2013~2020年严格的清洁空气行动对能源使用和二氧化碳排放的影响, 表明中国在控制空气污染的同时可以实现二氧化碳减排协同效益. Qian等人[28]评估了空气质量改善带来的气候共同效益, 表明能源强度调整可以将颗粒物和二氧化碳排放最多减少46%和50%. 上述研究均表明, 减缓温室气体的措施可以显著改善空气质量[29~32], 清洁空气措施通过影响能源系统进而减少二氧化碳的排放[33]. 但是, 随着碳污协同减排管理需求的日益提升, 需要对我国典型区域协同减排路径精细化方法进行研究. 这就需要对二氧化碳和细颗粒物排放终端能源消费重点行业、主要能源以及影响排放主导因素提出针对性的管控政策. 然而, 目前针对我国重点行业、主要能源以及主导因素的二氧化碳和细颗粒物协同减排路径精细化方法的研究却鲜见报道.

能源活动是CO_2和$PM_{2.5}$排放的主要来源[34]. 为提出我国典型区域二氧化碳和细颗粒的协同减排路径精细化研究方法, 本研究首先探究了京津冀、长江三角洲(简称长三角)、珠江三角洲(简称珠三角)等区域排放二氧化碳和细颗粒物的终端能源消费重点行业与主要能源; 随后使用因素分解模型解析了对单位国内生产总值(gross domestic product, GDP)二氧化碳和细颗粒物产生贡献的影响因素; 最后利用能源-环境核算预测模型, 基于上述研究识别的终端能源消费重点行业、主要能源以及主导因素进行情景分析, 模拟分析了4种减排情景, 预测了我国典型区域CO_2和$PM_{2.5}$排放情况, 旨在分析典型区域不同情景下的碳达峰情况, 进而寻找二氧化碳和细颗粒物协同减排最优路径.

1 数据和方法

1.1 数据来源

本研究基于2000~2020年我国京津冀、长三角和珠三角三大典型区域中的能源平衡表数据及其对终端能源消费部门的划分方法, 将能源消费行业划分为农业、工业、建筑业、交通运输业、商业、其他行业和居民生活7类行业; 将21个能源终端品种整合为煤、油、气3类一次能源品类. 二氧化碳和细颗粒物的排放量通过排放系数法核算, 能源、经济数据主要来自中国能源统计年鉴[35]. 排放因子数据主要来自《城市大气污染物排放清单技术手册》[36]、《综合能耗计算通则》[37]、《省级温室气体清单编制指南(试行)》[38]、《中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》[39]、《2006年IPCC国家温室气体清单指南》[40]等. 研究过程所涉及的模型核心参数和情景设置核心参数来自《长期能源可替代规划系统模型LEAP使用手册》[41]、《中国能源展望2060》[42]等.

1.2 模型概述

1.2.1 排放因素分解模型

研究表明, 经济和产业结构、能源结构、技术手段等因素对单位GDP二氧化碳和GDP细颗粒物会产生影响[43,44]. 为分析上述因素产生的贡献, 本研究利用对数平均迪氏指数(Stata module to compute logarithmic mean divisia index, LMDI)模型, 将总指标分解为若干预定义影响因素, 进而量化各因素的影响效应. 该方法在相关研究中得到了广泛的应用[45,46], 分解过程为

$$A_{\mathrm{p}}=\frac{C_{\mathrm{p}}}{\mathrm{GDP}}=\frac{\sum_i C_i}{\mathrm{GDP}}=\frac{\sum_i E_i\times\lambda_i}{\mathrm{GDP}}=\sum_i^3\sum_j^7\frac{E_i}{S_j}\times\frac{S_j}{E}\times\frac{E}{\mathrm{GDP}}\times\lambda_i, \tag{1}$$

式中, A_{p}为单位GDP的CO_2或$PM_{2.5}$排放量(万吨/亿元); C_{p}为CO_2或$PM_{2.5}$排放量(万吨); C_i为i能源CO_2或$PM_{2.5}$排放量(万吨); E_i为i能源消耗量(万吨标煤); S_j为j产业能源消耗量(万吨标煤); E为能源消费总量(万吨标煤); λ_i为i能源CO_2或$PM_{2.5}$排放系数; E_i/S_j为j产业中i能源使用比例(%); S_j/E为能源消耗总量中j产业占比(%); E/GDP为能源强度(万吨标煤/亿元). 本研究最终选取能源结构、产业结构、能源强度、技术进步指标作为影响因素进行影响效应研究.

为进一步量化所选指标对单位GDP二氧化碳和细颗粒物产生的影响, 本研究利用LMDI的加法形式计算影响因素年际变化量, 并采用对数平均函数量化上述影响因素的效应:

$$\Delta A=A_t-A_0=\Delta\mathrm{IE}+\Delta\mathrm{IS}+\Delta\mathrm{IY}+\Delta\lambda_i, \tag{2}$$

$$\Delta X=\sum_i^3\sum_j^7\frac{A_{i,j}^t-A_{i,j}^0}{\ln A_{i,j}^t-\ln A_{i,j}^0}\times\ln\left(\frac{X_t}{X_0}\right), \tag{3}$$

式中, ΔA表示单位GDP二氧化碳和细颗粒物的年际变化量(万吨/亿元); A_t和A_0分别表示t年和基准年单位GDP的二氧化碳和细颗粒物排放量(万吨/亿元); ΔIE表示能源结构效应, 即能源结构变化产生的年际影响; ΔIS表示产业结构效应, 即产业结构变化产生的年际影

响; ΔIY表示终端产业能源强度效应, 即能源强度变化产生的年际影响; $\Delta\lambda_i$表示技术效应, 即技术进步产生的年际影响, X表示式(2)中的各个效应.

1.2.2 能源-环境核算预测

为预测我国典型区域未来CO_2和$PM_{2.5}$排放量, 本研究使用长期能源替代规划(long-range energy alternatives planning system, LEAP)模型, 进行不同情景下排放量预测分析, LEAP模型是一个基于情景分析的自下而上的能源-环境核算模型, 广泛应用于碳和污染物排放预测研究[47,48].

预测CO_2和$PM_{2.5}$排放量的核心在于情景分析[49]. 本研究结合国家发展目标、政策要求等作出合理的假设预想, 创建2021~2060年间不同发展情景, 从而模拟未来可能的发展方向, 在理论假设框架内合理推理发展指标, 构思相应措施, 从而确保协同减排目标的实现. 具体模拟情景参数设置参考《中国能源展望2060》[42]及文献[50]等, 例如, 能效提升情景下假设2020年后我国GDP按6%增长等.

依据分解结果和当前政策环境与规划目标, 选取对节能减排有积极作用的可行性措施手段, 综合设定基准情景和污染物控制、能效提升、产业结构优化、能源结构优化4种减排情景, 将其输入LEAP模型, 实现因素分解模型与预测模型的耦合. 基准情景即延续现阶段国家和大气污染防控既定政策, 减排情景即在工业、交通、建筑等终端能源消费重点行业进一步实施污染物控制、能效提升、产业结构优化和能源结构优化调整升级措施[51].

2 结果与讨论

2.1 二氧化碳和细颗粒物的精细化来源识别

为实现二氧化碳和细颗粒物的精细化来源识别, 本研究自下而上识别二氧化碳和细颗粒物排放量较大的终端能源消费重点行业, 进而探究终端能源消费重点行业中的主要能源品类, 为针对性提出协同减排路径提供科学基础.

2.1.1 终端能源消费重点行业的二氧化碳和细颗粒物排放量

为了识别我国典型区域协同减排终端能源消费重点行业, 本研究分析了京津冀、长三角和珠三角地区2000~2020年能源数据, 核算了上述区域各行业CO_2和$PM_{2.5}$排放量, 如图1所示.

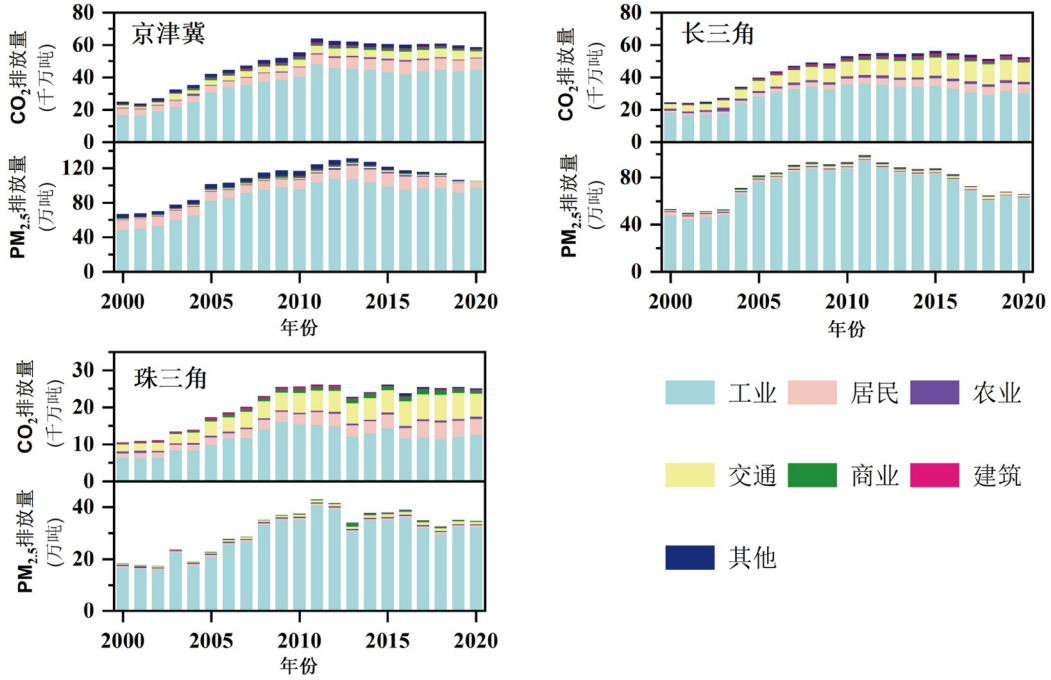


图 1 京津冀、长三角和珠三角地区各终端能源消费行业CO_2与$PM_{2.5}$排放量

Figure 1 CO_2 and $PM_{2.5}$ emissions by different end-use energy consumption sector consumption sectors in Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delt

结果表明，京津冀地区CO_2排放总量由2000年的24.9千万吨上升到2020年的58.5千万吨. 众多终端能源消费行业当中，工业是CO_2排放的主要行业，2020年工业部门CO_2排放量约占总排放量的77%. 2000~2013年京津冀地区$PM_{2.5}$排放量持续增加，总增长率约为97%; 2013年后则呈现下降趋势. 工业部门是$PM_{2.5}$排放量较多的部门，其排放波动明显，且工业部门$PM_{2.5}$排放变化趋势更是决定了京津冀地区$PM_{2.5}$总排放量的变化趋势. 长三角地区CO_2排放量呈增加态势，2020年CO_2总排放量约达50千万吨. 长三角地区工业部门$PM_{2.5}$的排放量基本与京津冀地区持平，但其他行业$PM_{2.5}$的排放量与京津冀地区相比明显较低. 珠三角地区CO_2排放量为京津冀地区的一半左右，排放量整体呈先增加后稳定的趋势，2015年CO_2排放量达到26千万吨，其中工业行业排放占比约为54%. 此外，由于珠三角地区交通体系逐渐庞大，该区域交通CO_2排放量上升较快，由1.9千万吨上升到6.2千万吨. 珠三角地区$PM_{2.5}$排放量在2011年最高，其中工业$PM_{2.5}$排放量占比一直在90%以上，而居民生活$PM_{2.5}$排放占比较京津冀地区偏低. 由上述相关讨论可知，工业是上述3个典型区域CO_2和$PM_{2.5}$终端能源消费重点行业中排放量最大的共同行业. 本研究与同类研究结果一致，Liu等人[52]认为，CO_2排放主要归因于其基于化石燃料的能源和基于制造业的工业系统; Fatima等人[53]认为，中国的能源消耗和不断增加的二氧化碳排放主要集中在工业部门; Sun等人[54]认为，工业$PM_{2.5}$排放量变化对中国$PM_{2.5}$排放总量变化的影响远高于其他行业，占据主导地位.

2.1.2 CO_2和$PM_{2.5}$排放量来源的主要能源

针对CO_2和$PM_{2.5}$排放量最大的终端能源消费重点行业——工业，本研究进一步精细化分析了工业行业主要能源. 京津冀、长三角和珠三角地区工业行业主要能源品种CO_2与$PM_{2.5}$排放量如图2所示.

上文分析表明，京津冀地区煤类能源是工业行业中CO_2排放量最大的能源品类; 而随着煤改气工程的推进，气类能源的CO_2排放量有所增加. 长三角地区工业行业气类能源CO_2排放量持续增加，煤类、油类能源CO_2排放量则在2011年左右出现峰值后，又呈下降趋势. 珠三角地区工业行业CO_2排放量与京津冀地区工业行业CO_2排放量相差较为明显，2013年以来，该地区工业行业煤类能源的CO_2排放量保持稳定而且出现下降的趋势; 工业行业气类能源和油类能源的CO_2排放量呈现增加的趋势.

对于$PM_{2.5}$来说，京津冀地区和长三角地区工业行业$PM_{2.5}$排放总量基本相同. 原煤、焦炭等煤类能源是工业行业$PM_{2.5}$排放量最大的能源品类，大部分的$PM_{2.5}$排放量来自煤类能源; 油类能源的$PM_{2.5}$排放量相对较

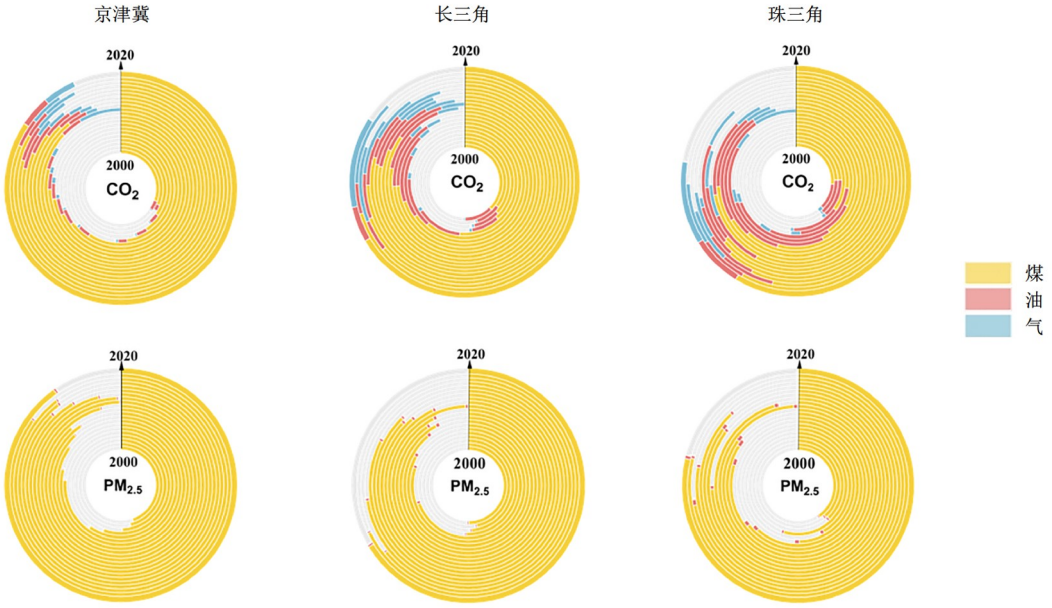


图 2 2000(内环)~2020年(外环)，京津冀、长三角和珠三角地区工业行业主要能源品种CO_2与$PM_{2.5}$排放量占比

Figure 2 CO_2 and $PM_{2.5}$ emissions from major industrial energy types in the Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta, from 2000 (inner circle) to 2020 (outer circle)

少, 而气类能源几乎不直接排放$PM_{2.5}$. 珠三角地区煤类能源也是工业行业$PM_{2.5}$排放最大的能源品类, 但与京津冀和长三角地区不同的是, 珠三角地区2000~2020年间平均排放总量不到0.5万吨.

由上述相关讨论可知, 尽管CO_2和$PM_{2.5}$排放的终端能源消费重点行业相同(工业), 但是主要能源品类却不尽相同: $PM_{2.5}$排放的主要能源品类以煤类能源为主; 而CO_2排放的主要能源品类则由“煤类能源主导”转向“煤、气类能源协同影响, 但煤类仍为主导地位”. 结果与同类研究结论相似, Lai等人[55]认为, 我国煤炭消费出现了很大的“斜坡”, 煤炭市场需求持续改善; 同时, 国家加大了环境治理力度, 积极推进新能源研发, 替代传统化石能源, 减轻环境负担.

2.2 主导影响因素分析

上文识别出终端能源消费重点行业、主要能源, 本研究进一步探究影响单位GDP的CO_2和$PM_{2.5}$排放的主导因素. 利用LMDI模型量化能源强度、产业结构、能源结构和技术进步等影响因素的影响效应, 并分别从驱动效应、时间跨度、区域尺度三方面对2000~2010和2010~2020年时间段内重要区域单位GDP的CO_2和$PM_{2.5}$排放进行分析, 结果如图3和4所示.

2.2.1 单位GDP的CO_2主导因素分析

按驱动效应分析, 2000~2010年期间, 能源结构效应对各地区单位GDP的CO_2排放量有较高的负驱动作用, 表明在此期间能源结构的调整对碳排放的降低起到了重要作用; 2010~2020年期间, 能源强度效应、技术效应对各地区单位GDP的CO_2排放量则产生了负驱动作用, 表明在此期间能源的高效利用以及新技术的研发和应用开始对碳减排起到了积极的作用. 其中, 技术效应一方面来自末端控制技术的进步使单位GDP的CO_2排放量下降, 另一方面来自2013年后中国实施更加严格的空气政策使单位GDP的CO_2排放量下降. Guan等人[56]得出能源强度的下降和技术的进步导致中国二氧化碳排放量下降并获得一定经济效益的相似结论. Yang等人[57]研究表明, 《大气污染防治行动计划》实施后, 空气质量有了显著改善, 促进绿色出行和低碳生活方式, 减少了单位GDP的碳排放. 上述研究佐证了本研究的结果.

按时间跨度梳理, 能源强度对长三角地区和珠三角地区单位GDP的CO_2排放量在2000~2010年和2010~2020年间均为负驱动, 表明产生同向负驱动作用; 而对京津冀地区单位GDP的CO_2排放量有异向驱动作用. 能源结构效应对珠三角地区单位GDP的CO_2排放量有同向负驱动作用, 对京津冀、长三角地区单位GDP的CO_2排放量有异向驱动作用. 产业结构对京津冀地区单位GDP的CO_2排放量有异向驱动作用, 但对长三角和珠三角地区单位GDP的CO_2排放量有同向正驱动作用. 这是由于长三角和珠三角地区产业结构比例变化幅度较低, 第二产业一直占据主导位置, 其发展需以大量的能源消费为支撑[58]. 上述结果表明, 随着经济和技术的发展, 各驱动因素在不同时期对各地CO_2减排具有不同的主导影响效应.

按区域尺度探究, 2000~2010年经济快速发展以及工业化进程的加快驱动了京津冀地区CO_2排放. 在此期间, 由于经济发展与能源消耗匹配性较差, 导致单位GDP的CO_2排放量有所提高; 但能源结构调整所带来的单位GDP的CO_2排放量降低所产生的积极影响, 仍使单位GDP下CO_2排放总量最终下降约52%. 2010~2020年, 能源结构带来单位GDP的CO_2排放量略有上升, 但其余各影响因素仍使单位GDP的CO_2排放量最终减少, 约为18千吨/亿元. 2000~2010年, 长三角地区产业结构的改变提高了单位GDP的CO_2排放量, 能源结构改变、能源强度增加所带来的单位GDP的CO_2排放量减少, 最终使单位GDP的CO_2排放量下降约58%. 2010~2020年, 能源强度对单位排放的减少和能源结构对单位排放的增加大致相抵, 由于技术进步对单位CO_2排放的减少作用显著, 最终使得单位GDP下CO_2排放仍然减少约10千吨/亿元. 研究期间内珠三角地区产业结构变化造成单位GDP的CO_2排放量略微上升, 其余各影响效应均使单位GDP的CO_2排放量减少, 2010年较2000年下降约49%, 2020年较2010年下降约59%.

2.2.2 单位GDP的$PM_{2.5}$主导因素分析

按驱动效应分析, 2000~2010年, 能源结构效应对各地区单位GDP的$PM_{2.5}$排放均有负驱动作用, 表明各地区从以煤为主的能源结构转向可再生能源等多种能源占比提升的多元化能源结构[59], 有利于降低细颗粒物排放强度. 2010~2020年能源强度效应和技术效应对各地区GDP的$PM_{2.5}$排放则产生了负驱动作用, 表明能源的高效利用和技术进步在此期间对细颗粒物的减排产生了推动作用[60].

按时间跨度梳理, 产业结构对长三角地区和珠三角地区单位GDP的$PM_{2.5}$具有同向正驱动作用, 而对京津冀地区产生异向驱动作用. 能源强度对长三角和珠

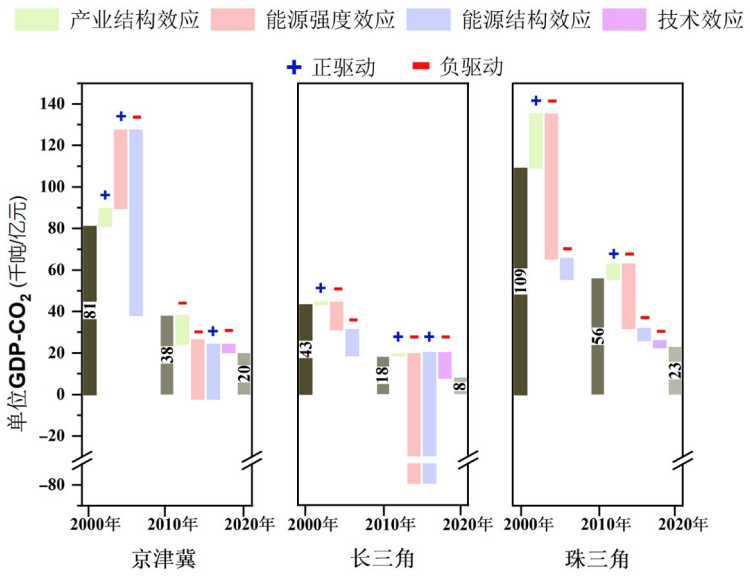


图 3 京津冀、长三角和珠三角地区单位GDP的CO_2排放量的影响因素
Figure 3 Influencing factors of CO_2 emissions (per unit GDP) in Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta

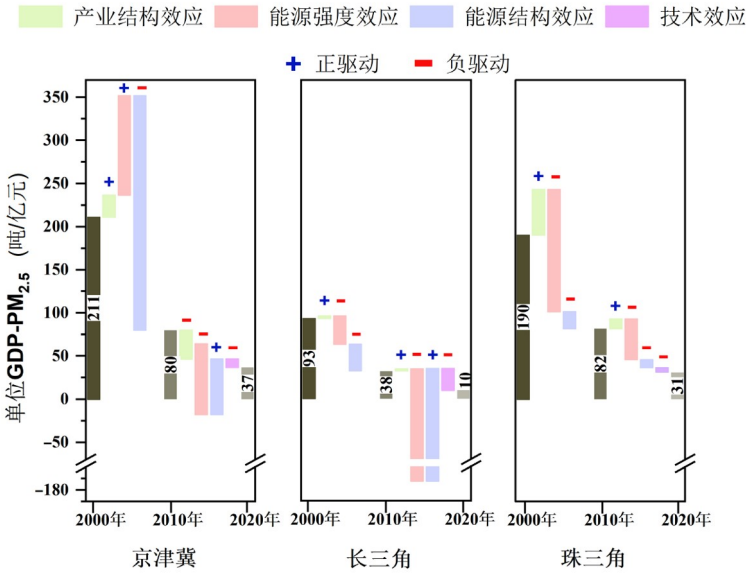


图 4 京津冀、长三角和珠三角地区单位GDP-$PM_{2.5}$影响因素
Figure 4 Influencing factors of $PM_{2.5}$ emissions (per unit GDP) in Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta

三角地区为同向负驱动作用，对京津冀地区呈现异向驱动作用. 能源结构效应对珠三角地区一直产生同向负驱动作用，对京津冀地区和长三角地区则具有异向驱动作用. 上述结果表明, 能源结构优化前期有助于降低各区域细颗粒物排放强度; 而随着经济发展, 各区域经历了较好的能源消费结构调整[61]，减排效果对能源消费结构的依赖开始减弱, 长期来看, 各地区均需要采取能源的高效利用和技术进步等措施.

按区域尺度探究，2000~2010年京津冀地区，产业结构、能源强度的改变对单位GDP的$PM_{2.5}$排放量的提高有所影响，但能源结构调整所带来的单位GDP的$PM_{2.5}$有效减排，仍最终使京津冀地区单位GDP的$PM_{2.5}$排放量下降约62%. 长三角地区，2000~2010年产业结构变化造成单位GDP的$PM_{2.5}$排放量上升，而能源强度增加和能源结构变化所带来单位GDP的$PM_{2.5}$排放量减少，最终使单位GDP的$PM_{2.5}$排放量下降约59%.

2010~2020年产业结构和能源结构的改变提高了单位GDP的$PM_{2.5}$排放量，而由于能源强度和技术进步使单位GDP的$PM_{2.5}$减排呈现显著影响，使得单位GDP的$PM_{2.5}$排放量最终下降28吨/亿元. 在研究期间内，珠三角地区产业结构的改变提高了单位GDP的$PM_{2.5}$排放量，而其余各影响效应均带来单位GDP的$PM_{2.5}$排放量减少，最终使2010年较2000年排放量下降约57%，2020年较2010年排放量下降约62%.

综上所述，2000~2020年随着国家经济发展以及工业化进程加快，带来了CO_2和$PM_{2.5}$的排放增加. 在此阶段，产业结构、能源结构、能源强度和技术效应使京津冀、长三角、珠三角单位GDP的CO_2和$PM_{2.5}$排放量有不同程度的增加或减少. 但整体来看，三大区域单位GDP的CO_2和$PM_{2.5}$排放总量较2000年均显著下降. 因此，我国在注重能源结构调整方向，重点发展能源逐步转换到清洁能源的同时，应注重能源的高效利用和技术改进，进而实现能源低碳清洁高效利用.

2.3 CO_2和$PM_{2.5}$减排路径分析

为了比较不同情景相较于基准情景的减排潜力，以寻求最优减排路径，本研究在结合前文分析获得的终端能源消费重点行业、主要能源以及主导因素的基础上，依据当前政策环境与规划目标，选取对节能减排有积极作用的可行性措施，综合设定污染物控制、能效提升、产业结构优化、能源结构优化4种减排情景，模拟比较不同节能减排路径发展趋势. 基于上文情景分析，分别预测三大典型区域2021~2060年CO_2和$PM_{2.5}$的排放量，得出如下结论，如图5所示.

对于京津冀地区来说，产业结构优化情景下，CO_2排放量会持续上升，到2030年趋于平稳，预测2060年CO_2排放量较基准情景增加3.5亿吨左右. 能源结构优化情景在2030年CO_2排放量达到峰值，随后CO_2排放量逐年下降，到2060年排放量低于基准情景. 能效提升情景以及污染控制情景对CO_2排放始终呈现显著的抑制作用：2020~2060年在该地区CO_2排放量均始终呈现下降趋势，到2060年低于其他减排情景，表明能效提升情景减排效果更好. 产业结构优化情景下，$PM_{2.5}$排放量到2032年达到最高，到2060年$PM_{2.5}$排放量较基准情景虽有所下降，但幅度较小. 污染物控制情景下，2013年后至2020年期间$PM_{2.5}$排放量显著降低，但之后若无进一步更新的控制技术，则会趋于平稳. 能源结构优化情景在2020年后，$PM_{2.5}$含量逐渐降低，到2060年，$PM_{2.5}$含量低于污染物控制情景以及产业结构优化情景. 所有情景中，能效提升情景对$PM_{2.5}$排放量的降低效果最好，到2060年$PM_{2.5}$排放量在4种减排情景中为最低，减排量达90%.

对于长三角地区而言，4种减排情景下CO_2排放量差异较大，产业结构优化情景下，2020年后CO_2排放量持续升高，2020~2030年间CO_2排放量上升速度较快；2030年后速度有所减缓，到2060年CO_2排放量预计仍将

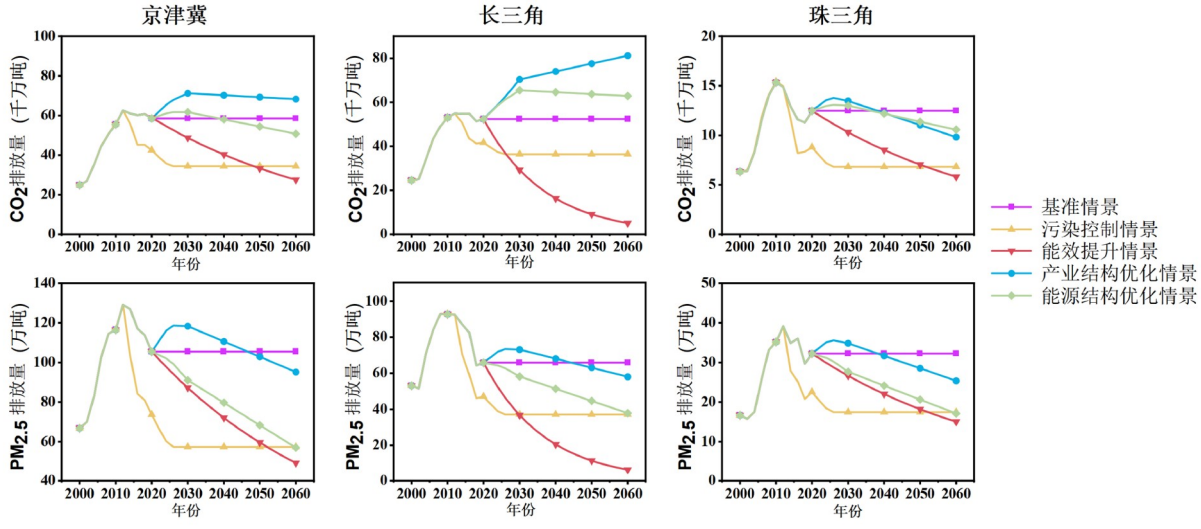


图 5 京津冀、长三角和珠三角地区基准情景和4种减排情景下CO_2和$PM_{2.5}$排放量预测

Figure 5 CO_2 and $PM_{2.5}$ emission projections under baseline scenarios and four emission reduction scenarios for Beijing-Tianjin-Hebei, Yangtze River Delta and Pearl River Delta

达到8亿吨. 能源结构优化情景碳排放量于2030年达到峰值后缓慢下降, 2060年碳排放量与基准情景下的碳排放量相比略有上升. 能效提升情景对于CO_2的减排效果同样十分显著, 预计到2060年CO_2的排放量将低于其余3种减排情景. 产业结构优化情景下, $PM_{2.5}$排放量到2030年达到最高, 2045年$PM_{2.5}$排放量开始低于基准情景, 到2060年$PM_{2.5}$排放量虽然较基准情景有所下降, 但减排效果不理想, 仅减少7万吨左右. 污染物控制情景下, 2013年后$PM_{2.5}$排放量显著降低; 能源结构优化情景下, 2020年后$PM_{2.5}$含量逐渐降低, 到2060年, $PM_{2.5}$排放量低于污染物控制情景以及产业结构优化情景. 所有情景中, 能效提升情景对$PM_{2.5}$排放量的降低效果最好, 到2060年$PM_{2.5}$排放量为4种减排情景中的最低值.

对于珠三角地区来说, 能源结构、产业结构优化情境下, CO_2排放量只有小幅上升, 两种情景下CO_2排放量均在2026年前后达到拐点. 值得注意的是, 2024年后, 产业结构优化情景的减排效果开始优于能源结构优化情景. 能效提升情景下, 2060年CO_2排放量预计与2000年保持一致. 产业结构优化情景下, $PM_{2.5}$排放量到2026年达到最高, 2040年后$PM_{2.5}$排放量开始低于基准情景. 污染物控制情景下, $PM_{2.5}$前期减排量最多, 但若没有新的污染排放控制技术, 后期减排效果难以有显著的提升. 而能效提升情景、能源结构优化情景对$PM_{2.5}$的减排果最好, 但2060年$PM_{2.5}$排放量与2000年$PM_{2.5}$排放量基本持平, 减排手段并没有对珠三角地区产生明显效果, 这可能是由于珠三角地区相对较好的空气质量所致[23].

综上所述, 技术手段的进步对减排前期不可或缺, 而能效提升情景对于我国三大重点区域CO_2和$PM_{2.5}$的长期减排具有更好的效果. 王少剑等人[59]发现, 优化能源结构与利用效率降低能源强度, 有利于减少后期碳排放. Shi等人[27]认为, 管道末端控制措施对$PM_{2.5}$减排短期有效, 但是达不到长期目标, 从而验证了本研究结论的合理性. 因此, 未来应针对工业排放等终端能源消费重点行业, 关注煤、气类等主要能源, 采取能效提升、技术进步等手段和措施, 能够对减污降碳协同增效目标的实现产生最佳效益. 此外, 研究对SO_2、NO_X和挥发性有机物做了同样的分析, 得到相似的结论.

3 结论

为寻求CO_2和$PM_{2.5}$减排路径, 本研究从能源角度出发采用自下而上的方法, 对终端能源消费重点行业、主要能源、主导因素等方面进行精细化解析和预测, 得到的主要结论如下.

(1) 从2000~2020年, 3个区域CO_2的排放量均呈现先上升后平稳的趋势, $PM_{2.5}$的排放量均呈现先上升后下降的趋势. 而单位GDP的CO_2排放量和单位GDP的$PM_{2.5}$排放量均有所下降, 表明经济的高质量发展能够带来良好的气候和环境效益.

(2) 工业行业是3个区域共同的终端能源消费重点行业. 3个区域$PM_{2.5}$排放量主要由煤主导; CO_2排放量由煤类能源主导逐渐转向煤、气类能源共同排放, 但煤类仍为主导地位. 这表明我国工业行业CO_2和$PM_{2.5}$协同控制重心在煤类, 而气类能源的合理利用对我国实现碳达峰也能起到积极的作用.

(3) 产业结构、能源结构、能源强度以及技术进步均是影响单位GDP的CO_2和$PM_{2.5}$排放的主要因素. 技术进步和能效提升等路径对今后的减污降碳效果较好, 技术进步在前期减排效果明显; 能效提升的减排对于长时期的碳污协同减排将起到关键作用.

(4) 应针对工业排放等终端能源消费重点行业, 关注煤、气类等主要能源, 采取能效提升、技术进步等方法措施, 助力减污降碳协同增效目标的实现.

此外, 论文研究过程存在一定的不确定性, 主要为排放量核算和模型预测两方面. 例如, 能源数据、排放系数的缺失、LEAP模型情景参数设置、不同政策的应用率等因素都会对研究结果产生一定的不确定性. 但同时, 其他相关报道的结论与本研究的结果具有一致性[59,61], 印证了本研究结果的可靠性.

参考文献

1 Shindell D, Smith C J. Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels. Nature, 2019, 573: 408–411

2 Dong F, Wang Y, Su B, et al. The process of peak CO_2 emissions in developed economies: A perspective of industrialization and urbanization. Resour Conserv Recycl, 2019, 141: 61–75

3 Xu B Y, Wang T J, Li S, et al. Assessment of the impact of "dual-carbon" goal on future changes in air pollution and climate in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 784–794 [徐北瑶, 王体健, 李树, 等. "双碳"目标对我国未来空气污染和气候变化的影响评估. 科学通报, 2022, 67:

784–794]
4 He J H, Cai Y L, Qin P. Spatial and temporal variations of carbon dioxide and its influencing factors (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 194–202 [何江浩, 蔡玉林, 秦鹏. 二氧化碳的时空变化规律与影响因素分析. 科学通报, 2020, 65: 194–202]
5 Gambhir A, George M, McJeon H, et al. Near-term transition and longer-term physical climate risks of greenhouse gas emissions pathways. Nat Clim Chang, 2022, 12: 88–96
6 Chen J, Li C, Ristovski Z, et al. A review of biomass burning: Emissions and impacts on air quality, health and climate in China. Sci Total Environ, 2017, 579: 1000–1034
7 Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. Nature, 1990, 344: 529–531
8 Liu J Y, Woodward R T, Zhang Y J. Has carbon emissions trading reduced $PM_{2.5}$ in China? Environ Sci Technol, 2021, 55: 6631–6643
9 McDuffie E E, Martin R V, Spadaro J V, et al. Source sector and fuel contributions to ambient $PM_{2.5}$ and attributable mortality across multiple spatial scales. Nat Commun, 2021, 12: 3594
10 Chen Y C, Wu Y, Qi Y, et al. Cell death pathways: The variable mechanisms underlying fine particulate matter-induced cytotoxicity. ACS Nanosci Au, 2023, 3: 130–139
11 An Z, Huang R J, Zhang R, et al. Severe haze in northern China: A synergy of anthropogenic emissions and atmospheric processes. Proc Natl Acad Sci USA, 2019, 116: 8657–8666
12 Coscieme L, Mortensen L F, Anderson S, et al. Going beyond gross domestic product as an indicator to bring coherence to the Sustainable Development Goals. J Clean Prod, 2020, 248: 119232
13 Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. Nature, 2015, 525: 367–371
14 Li Q, Jiang J K, Qi J, et al. Improving the energy efficiency of stoves to reduce pollutant emissions from household solid fuel combustion in China. Environ Sci Technol Lett, 2016, 3: 369–374
15 Zhang W S, Xu Y, Hui J X. The spatio-temporal impacts and driving factors of the synergistic effects of reducing pollution and carbon emissions in cities of China (in Chinese). Chin J Environ Manag, 2023, 15: 38–47 [张为师, 徐颖, 惠婧璇. 中国城市CO_2排放和空气质量协同变化特征及驱动因素研究. 中国环境管理, 2023, 15: 38–47]
16 Jiang B Y, Long D. Promoting the synergistic effect of reducing pollution and carbon emissions through law-based environmental governance (in Chinese). World Environ, 2023, 201: 38–40 [蒋博雅, 龙迪. 以环境法治推进减污降碳协同增效. 世界环境, 2023, 201: 38–40]
17 Liang S, Zhao J, He S, et al. Spatial econometric analysis of carbon emission intensity in Chinese provinces from the perspective of innovation-driven. Environ Sci Pollut Res, 2019, 26: 13878–13895
18 Zhang X Y, Sun J Y, Wang Y Q, et al. Factors contributing to haze and fog in China (in Chinese). Chin Sci Bull (Chin Ver), 2013, 58: 1178–1187 [张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾-霾成因及其治理的思考. 科学通报, 2013, 58: 1178–1187]
19 Cai W J, Hui J X, Gong P, et al. China's challenges and policy recommendations for addressing climate change and improving public health (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 1205–1210 [蔡闻佳, 惠婧璇, 宫鹏, 等. 中国应对气候变化和改善公众健康的挑战与政策建议. 科学通报, 2018, 63: 1205–1210]
20 Chen W, Tang H, He L, et al. Co-effect assessment on regional air quality: A perspective of policies and measures with greenhouse gas reduction potential. Sci Total Environ, 2022, 851: 158119
21 Li N, Chen W Y, Rafaj P, et al. Air quality improvement co-benefits of low-carbon pathways toward well below the 2°C climate target in China. Environ Sci Technol, 2019, 53: 5576–5584
22 Jiao J, Huang Y, Liao C. Co-benefits of reducing CO_2 and air pollutant emissions in the urban transport sector: A case of Guangzhou. Energy Sustain Dev, 2020, 59: 131–143
23 Jiang J J, Ye B, Shao S, et al. Two-tier synergic governance of greenhouse gas emissions and air pollution in China's megacity, Shenzhen: Impact evaluation and policy implication. Environ Sci Technol, 2021, 55: 7225–7236
24 Cai B, Bo X, Zhang L, et al. Gearing carbon trading towards environmental co-benefits in China: Measurement model and policy implications. Glob Environ Change, 2016, 39: 275–284
25 Thompson T M, Rausch S, Saari R K, et al. A systems approach to evaluating the air quality co-benefits of US carbon policies. Nat Clim Chang, 2014, 4: 917–923
26 Cheng J, Tong D, Zhang Q, et al. Pathways of China's $PM_{2.5}$ air quality 2015–2060 in the context of carbon neutrality. Natl Sci Rev, 2021, 8: nwab078
27 Shi Q, Zheng B, Zheng Y, et al. Co-benefits of CO_2 emission reduction from China's clean air actions between 2013–2020. Nat Commun, 2022, 13: 5061
28 Qian H, Xu S, Cao J, et al. Air pollution reduction and climate co-benefits in China's industries. Nat Sustain, 2021, 4: 417–425
29 Huang X Y, Srikrishnan V, Lamontagne J, et al. Effects of global climate mitigation on regional air quality and health. Nat Sustain, 2023, 6: 1054–

1066
30 West J J, Smith S J, Silva R A, et al. Co-benefits of mitigating global greenhouse gas emissions for future air quality and human health. Nat Clim Chang, 2013, 3: 885–889
31 Nemet G F, Holloway T, Meier P. Implications of incorporating air-quality co-benefits into climate change policymaking. Environ Res Lett, 2010, 5: 014007
32 Bell M L, Davis D L, Cifuentes L A, et al. Ancillary human health benefits of improved air quality resulting from climate change mitigation. Environ Health, 2008, 7: 41
33 Fang D, Chen B, Hubacek K, et al. Clean air for some: Unintended spillover effects of regional air pollution policies. Sci Adv, 2019, 5: eaav4707
34 Liu Z Y, Dong M T, Xue W B, et al. Interaction patterns between climate action and air cleaning in China: A two-way evaluation based on an ensemble learning approach. Environ Sci Technol, 2022, 56: 9291–9301
35 Department of Energy Statistics, National Bureau of Statistics. China Energy Statistical Yearbook (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2022 [国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2022]
36 He K B. Technical Manual of Urban Air Pollutant Emission Inventory (in Chinese). 2015, https://www.doc88.com/p-3337324265982.html [贺克斌. 城市大气污染物排放清单技术手册. 2015, https://www.doc88.com/p-3337324265982.html]
37 State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. General Rules for Calculation of the Comprehensive Energy Consumption: GB/T 2589-2020 (in Chinese). Beijing: Standards Press of China, 2020 [国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 综合能耗计算通则: GB/T 2589-2020. 北京: 中国标准出版社, 2020]
38 National Development and Reform Commission. Guidelines for the Preparation of Provincial Greenhouse Gas Inventories (Pilot) (in Chinese). 2010, http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf [国家发展和改革委员会. 省级温室气体清单编制指南(试行). 2010, http://www.cbcsd.org.cn/sjk/nengyuan/standard/home/20140113/download/shengjiwenshiqiti.pdf]
39 National Development and Reform Commission. Accounting Methods and Reporting Guidelines for Greenhouse Gas Emissions of Coal Production Enterprises in China (Trial) (in Chinese). 2015, http://lzeeex.com/kdtr/attached/file/20150210/20150210161089008900.pdf [国家发展和改革委员会. 中国煤炭生产企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行). 2015, http://lzeeex.com/kdtr/attached/file/20150210/20150210161089008900.pdf]
40 IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006, https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html
41 Stockholm Environment Institute. LEAP User Manual, Long-Term Energy Alternative Planning System Model. 2010, https://www.doc88.com/p-4089733021408.html
42 National Energy Group. China Energy Outlook 2060 (in Chinese). Beijing: Science Press, 2023 [国家能源集团. 中国能源展望2060. 北京: 科学出版社, 2023]
43 Dong F, Yu B, Pan Y. Examining the synergistic effect of CO_2 emissions on $PM_{2.5}$ emissions reduction: Evidence from China. J Clean Prod, 2019, 223: 759–771
44 Geng G, Zheng Y, Zhang Q, et al. Drivers of $PM_{2.5}$ air pollution deaths in China 2002–2017. Nat Geosci, 2021, 14: 645–650
45 Jiang P, Gong X, Yang Y, et al. Research on spatial and temporal differences of carbon emissions and influencing factors in eight economic regions of China based on LMDI model. Sci Rep, 2023, 13: 7965
46 Wang M, Wu L, Guo X. Application of grey model in influencing factors analysis and trend prediction of carbon emission in Shanxi Province. Environ Monit Assess, 2022, 194: 542
47 Wu Q, Ma H, Ren H B, et al. Medium and long-term carbon emission projections and emission reduction potential analysis of Lingang special area based on the LEAP model (in Chinese). Environ Sci, 2024, 45: 721–731 [吴琼, 马昊, 任洪波, 等. 基于LEAP模型的临港新片区中长期碳排放预测及减排潜力分析. 环境科学, 2024, 45: 721–731]
48 Yang F, Zhang G C, Sun J, et al. Study of peak carbon emission of a city in Yangtze River Delta based on LEAP model (in Chinese). Environ Sci, 2024, 45: 104–114 [杨峰, 张贵驰, 孙佶, 等. 基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景. 环境科学, 2024, 45: 104–114]
49 Xu G, Schwarz P, Yang H. Determining China's CO_2 emissions peak with a dynamic nonlinear artificial neural network approach and scenario analysis. Energy Policy, 2019, 128: 752–762
50 Yuan R, Ma Q, Zhang Q, et al. Coordinated effects of energy transition on air pollution mitigation and CO_2 emission control in China. Sci Total Environ, 2022, 841: 156482
51 Dai H X, An J Y, Huang C, et al. Roadmap of coordinated control of $PM_{2.5}$ and ozonein Yangtze River Delta (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 2100–2112 [戴海夏, 安静宇, 黄成, 等. 长江三角洲区域大气$PM_{2.5}$和臭氧污染协同控制路径. 科学通报, 2022, 67: 2100–2112]
52 Liu Z, Deng Z, He G, et al. Challenges and opportunities for carbon neutrality in China. Nat Rev Earth Environ, 2022, 3: 141–155
53 Fatima T, Xia E, Cao Z, et al. Decomposition analysis of energy-related CO_2 emission in the industrial sector of China: Evidence from the LMDI approach. Environ Sci Pollut Res, 2019, 26: 21736–21749

54 Sun H, Huang C, Ni S. Driving factors of consumption-based $PM_{2.5}$ emissions in China: An application of the generalized Divisia index. Environ Dev Sustain, 2022, 24: 10209–10231
55 Lai W, Hu Q, Zhou Q. Decomposition analysis of $PM_{2.5}$ emissions based on LMDI and Tapio decoupling model: Study of Hunan and Guangdong. Environ Sci Pollut Res, 2021, 28: 43443–43458
56 Guan D, Meng J, Reiner D M, et al. Structural decline in China's CO_2 emissions through transitions in industry and energy systems. Nat Geosci, 2018, 11: 551–555
57 Yang X, Yang X, Zhu J, et al. Synergic emissions reduction effect of China's "Air Pollution Prevention and Control Action Plan": Benefits and efficiency. Sci Total Environ, 2022, 847: 157564
58 Gao L, Zheng Y W, Yang D T, et al. Criterial equation of carbon neutrality for power systems (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3932–3936 [高林, 郑雅文, 杨东泰, 等. 构建碳中和电力系统——碳中和公式. 科学通报, 2021, 66: 3932–3936]
59 Wang S J, Mo H B, Fang C L. Carbon emissions dynamic simulation and its peak of cities in the Pearl River Delta Urban Agglomeration (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 670–684 [王少剑, 莫惠斌, 方创琳. 珠江三角洲城市群城市碳排放动态模拟与碳达峰. 科学通报, 2022, 67: 670–684]
60 Wu Q, Tu K, Zeng Y F. Research on China's energy strategic situation under the carbon peaking and carbon neutrality goals (in Chinese). Chin Sci Bull, 2023, 68: 1884–1898 [武强, 涂坤, 曾一凡. "双碳"目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考. 科学通报, 2023, 68: 1884–1898]
61 Pei J, Niu Z, Wang L, et al. Spatial-temporal dynamics of carbon emissions and carbon sinks in economically developed areas of China: A case study of Guangdong Province. Sci Rep, 2018, 8: 13383

Summary for “我国典型区域二氧化碳和细颗粒物精细化协同减排路径”

Refined pathway for collaborative reduction of carbon dioxide and fine particulate matter in China’s key areas

Huan Zhao[1,2], Bo Xu[1,2], Han Xu[1,2], Zhenyu Wang[1,2], Jie Gao[1,2], Junbo Huang[1,2], Qili Dai[1,2], Yinchang Feng[1,2] & Guoliang Shi[1,2*]

[1] *State Environment Protection Key Laboratory of Urban Particulate Air Pollution Prevention, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;*
[2] *CMA-NKU Cooperative Laboratory for Atmospheric Environment-Health Research, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China*
* Corresponding author, E-mail: nksgl@nankai.edu.cn

Air pollution and climate change are two major challenges that have emerged in the recent century. Carbon dioxide (CO_2), known for absorbing infrared radiation, contributes to global warming and climate change. Fine particulate matter ($PM_{2.5}$), one of the most important air pollutants, adversely affects regional air quality and poses significant health risks. Numerous studies have established that CO_2 and $PM_{2.5}$ share common emission sources from human activities. Therefore, identifying and understanding these common sources is crucial for developing effective collaborative strategies to reduce ambient levels of CO_2 and $PM_{2.5}$. However, while current research focuses primarily on separate reduction strategies for air quality (targeting fine particulate matter) or climate policies (targeting carbon dioxide), there is a notable gap in comprehensive studies that address the synergistic reduction of both $PM_{2.5}$ and CO_2 especially in key regions in China. Specifically, detailed investigations into the major energy consumption sectors, predominant energy types, and driving factors influencing $PM_{2.5}$ and CO_2 in these regions remain scarce. This underscores the need for refined, integrated approaches to address these two interlinked environmental issues.

In this work, we examined energy consumption data from 2000 to 2020 in three distinct regions in China: The Beijing-Tianjin-Hebei region, the Pearl River Delta region, and the Yangtze River Delta region. Our objective was to dissect the energy consumption sectors, energy types, and driving factors contributing to $PM_{2.5}$ and CO_2 emissions. We found that industrial emissions were the primary energy consuming sector among seven end-use energy consumption sectors in all three typical regions for both of $PM_{2.5}$ and CO_2. We then further analyzed the main energy type within this key sector. Our analysis shows that coal was the predominant energy source for $PM_{2.5}$ emissions throughout 2000 to 2020. In contrast, for CO_2 emissions, coal dominated from 2000 to 2010, but from 2010 to 2020, both coal and gas (with coal still being relatively dominant) were significant contributors.

To further understand the factors driving carbon dioxide and fine particulate matter emissions per unit GDP, we employed a factor decomposition model. The decomposition model found that “energy structure effect” was the key driving factor for both of $PM_{2.5}$ and CO_2 from 2000 to 2010; while “energy efficiency improvement” and “energy efficiency improvement” were two driving factor for both of $PM_{2.5}$ and CO_2 from 2010 to 2020. Building on this analysis, we utilized an energy-environment accounting prediction model for scenario analysis. This approach allowed us to simulate $PM_{2.5}$ and CO_2 emission trends under different scenarios in the three regions, aiming to identify the most effective pathway for collaborative reduction. Our model results indicate that in the early stage, “technological improvement” is a critical driver for reducing emissions. However, as we look towards long-term strategies, “energy efficiency improvement” emerges as a pivotal factor for sustained collaborative emission reduction.

In summary, the comprehensive results of this study provide robust quantitative evidence that future efforts should prioritize the key end-use energy consumption sector (industrial emissions), major energy types (coal and gas), and driving factors (energy efficiency improvement and technological improvement). And the prediction results show that the factor of “technological improvement” has the best emission reduction effect in the early stage; “energy efficiency improvement” factor will play a key role in the long-term reduction. By focusing on these areas, significant benefits can be achieved in synergistically reducing air pollution and CO_2 emissions. This study offers valuable scientific insights for formulating effective strategies to reduce carbon dioxide and fine particulate matter, particularly in key areas of China.

carbon dioxide, fine particulate matter, LEAP model, scenario analysis, synergistic control, refinement

doi: 10.1360/TB-2023-0828