

“双碳”目标实现对中国城市空气质量的影响

王浥尘¹, 董路^{1,2}, 张琳茹¹, 谢梅英¹, 韩潇¹, 曹军骥³

1. 西安交通大学公共政策与管理学院, 西安 710049

2. 西北工业大学重庆科创中心, 重庆 401135

3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘要 阐明了“双碳”目标下新型可再生能源的发展会使中国在PM_{2.5}和O₃污染治理上受益, 总结了电力、采暖、钢铁水泥、交通等行业的能源转型措施, 以及转型后引起的中国城市空气质量改善的健康效益, 并探讨了现有研究的不足之处, 对中国而言, 未来“双碳”目标的研究还应考虑新污染物的治理、个体选择视角以及政策两面性特征等方面, 从而推动中国空气质量持续改善, 助力“双碳”目标不断向纵深推进。

关键词 “双碳”目标; 空气质量; 能源转型

近年来, 中国城市空气质量虽得到明显改善, 但空气污染问题依然严重, 具体表现为: 冬春两季重污染天气频繁发生^[1], 2023年有105个城市大气细颗粒物(PM_{2.5})超标^[2]。“十四五”规划要求: “深入打好污染防治攻坚战, 基本消除重污染天气”。另一方面, 2023年12月发布的《中共中央 国务院关于全面推进美丽中国建设的意见》中明确指出到2035年, 全国PM_{2.5}浓度下降到25 μg·m⁻³以下。因

此, 空气污染治理不容松懈。

现阶段中国城市大气污染治理面临巨大挑战, 以往采用的主要治理措施在当下的减排潜力十分有限。“污染物末端控制”“煤改气”和“煤改电”等措施是2013—2020年城市空气质量改善的主要措施^[3-4]。截至2018年, 先进的末端控制技术已广泛应用于电力和工业领域^[5-6]。例如, 超过90%的燃煤电厂已安装污染物末端处理装置^[3], 利用末端控

收稿日期: 2024-01-03; 修回日期: 2024-06-17

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(71804115); 陕西省软科学一般项目(2022KRM071)

作者简介: 王浥尘, 副教授, 研究方向为能源与环境政策, 电子信箱: wangyichen@xjtu.edu.cn

引用格式: 王浥尘, 董路, 张琳茹, 等. “双碳”目标实现对中国城市空气质量的影响[J]. 科技导报, 2024, 42(19): 59-65;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2024.02.00237

制技术进一步削减污染物排放量的潜力十分有限。截至2020年,京津冀和汾渭平原地区80%以上的用户实现了清洁采暖^[7],采用“煤改气”和“煤改电”降低采暖活动污染物排放的潜力也十分有限。既然末端措施已基本完成其使命,有必要采取新的污染治理措施。中国于2020年9月宣布“CO₂排放力争在2030年前达峰、努力争取在2060年实现碳中和”。“双碳”目标的实现会驱使中国开展能源转型,由于大气污染物和CO₂存在同源性,主要来自传统化石燃料^[8],能源转型被认为是进一步提升空气质量的有效措施。现有针对能源转型带来的空气质量协同改善的研究聚焦特定区域、时段、部门或空气污染物,本文对现有研究进行归纳总结,有助于从整体视角认识“双碳”目标实现对空气质量的影响,并对未来在该领域的研究提出建议。

1 “双碳”目标为中国城市空气污染治理带来新契机

“双碳”目标实现是指通过推动化石燃料向清洁能源(风能、光能、核能、水能和生物质能等)转型,实现CO₂的净零排放。由于空气污染物和温室气体具有同源性^[9],即主要来自化石燃料燃烧。能源转型可以在过往的“污染物末端控制”基础上进一步降低污染物的浓度。

到2030年,为实现“双碳”目标而采取的减缓气候变化措施将使全国近八成人群的PM_{2.5}年均暴露水平低于世界卫生组织(World Health Organization, WHO)空气质量指标(10 μg·m⁻³)^[10]。到2035年,全国地级以上城市PM_{2.5}浓度达标(低于35 μg·m⁻³)占比94%,年均PM_{2.5}浓度降低到23 μg·m⁻³^[11]。到2060年,实现“双碳”目标的政策措施将使中国城市PM_{2.5}浓度水平相较于2020年降低80%以上^[11],将降至8 μg·m⁻³^[10]。近地面臭氧主要受挥发性有机物(VOCs)、氮氧化物(NO_x)等因素共同影响^[12-13],为实现“双碳”目标而开展的能源结构调整可减少VOCs和NO_x的排放,进而降低臭氧浓度^[14-15]。到2030年,“双碳”目标的相关措施实施下,中国O₃浓度相比2015年将下降19.8 μg·m⁻³^[16],

VOCs和NO_x的排放量相比2019年分别减少28%和42%^[11];到2060年,中国VOCs和NO_x的排放量相比2019年分别减少61%和93%,全国年均O₃浓度符合WHO对O₃的100 μg·m⁻³指导范围^[11]。值得注意的是,“双碳”目标驱动的不同VOCs和NO_x的减排情景导致O₃污染改善及其健康效益在各区域存在显著差异,因此在推进“碳中和”目标实现的进程中应采取精准差异化协同管控策略来降低各地区臭氧浓度^[17]。

“双碳”目标的实现对中国城市空气质量的影响会带来显著的健康效益。到2030年,实现“双碳”目标的政策措施产生的空气质量改善可使中国约19万人避免过早死亡^[18],其中PM_{2.5}引起的过早死亡人数与2017年相比将减少约17.7万人^[19],O₃引起的过早死亡人数将减少12324人^[20]。到2050年,PM_{2.5}引起的死亡人数将减少32万至55万人^[20],O₃相关死亡人数将减少约27018人^[20]。到2060年,“双碳”目标的实现可使中国每年262万人避免因空气污染过早死亡,PM_{2.5}污染导致的过早死亡人数将从2020年的每年136万人下降到2060年的每年60万人^[21]。实现“双碳”目标,可大幅度降低因为空气污染造成的疾病负担^[10]。

2 不同行业“双碳”目标实现对空气质量的影响

实现“双碳”目标导致的污染物排放降低主要来自电力、采暖、钢铁水泥和交通4个行业(图1)。现有研究主要通过“双碳”目标实现的情景调整上述4部门的排放清单,进而通过大气污染模式计算各部门实现该目标产生的空气污染物浓度降低的数据^[22]。

2.1 电力

长期以来,中国以火力发电为主的电力结构加剧了空气污染,电厂排放成为中国严重空气污染问题的主要驱动因素之一^[23]。全国火电发电量由2011年的3903亿kW·h增加到2015年的42307亿kW·h^[24]。在“十二五”期间,全国火力发电所使用的煤炭量约占煤炭消费总量的63%,城镇用电量约

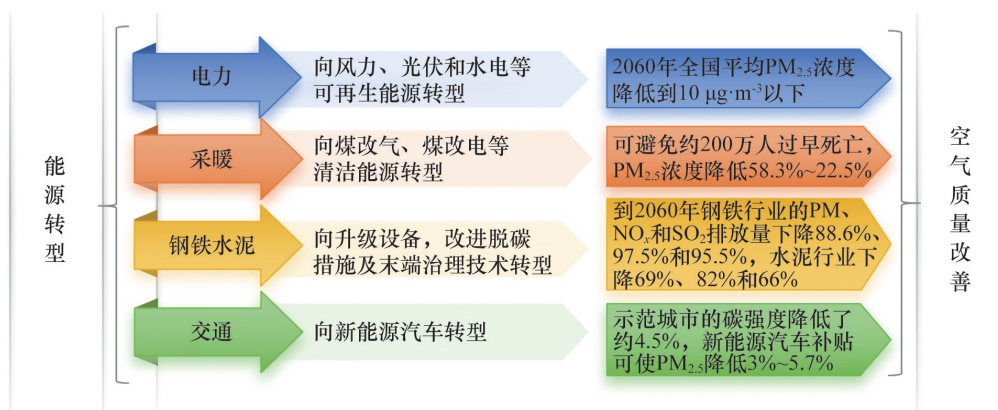


图1 “双碳”目标下不同行业能源转型

占全国电力消费总量的90%^[25],此外,燃煤电厂年均二氧化硫(SO₂)、NO_x和总悬浮颗粒物(TSP)排放量分别约占30%、36.4%和11.8%^[26],自2015年3月国务院发布《进一步深化电力体制改革的若干意见》后,电力行业的能源转型受到广泛关注。截至2023年上半年,全国新能源装机容量突破13亿kW、历史性超过煤电,约占总装机容量的48.8%。这表明新能源在中国电力结构中的比重成为电力装机规模的重要部分。

电力行业的转型必然会产生空气污染物的协同减排,这种减排可以通过可再生能源主导和负排放技术主导2种方案实现,并将产生显著效益。2020—2060年期间,在可再生能源主导的情景中,累计避免过早死亡的人数为3700万人,负排放技术主导的情境中为2700万人^[24]。不同统计寿命价值下最优技术方案会有所不同:当统计寿命价值>620万元时,可再生能源主导路径为最优路径;当统计寿命价值<390万元时,负排放技术主导路径为最优路径。当统计寿命价值为390万~620万元时,最优净比从14%逐渐下降到5%。这意味着如果关注的是健康的协同效益,应使用更多可再生能源的碳中和途径^[27]。

中国电力行业需从传统的以煤电为主转变为以风力、光伏和水电等可再生能源为主,这一转型不仅导致煤电能源结构将在2025—2030年达到峰值后逐渐下降^[28],还会产生显著的空气质量改善效果:到2030年通过转型导致的年均PM_{2.5}浓度低于35 μg·m⁻³的中国国土面积将超过80%^[28],到2060

年产生的大气污染物排放将大幅降低,年均PM_{2.5}浓度会降低到10 μg·m⁻³以下^[27]。并且,当可再生能源供电比例超过28.22%时,对空气质量改善的积极影响还会产生明显的空间溢出效应,在中国东部、中部、西南部和西北部将会有更多城市的空气质量得到改善^[23]。

2.2 采暖

传统燃煤采暖是中国北方空气污染的主要贡献源。传统采暖方式对京津冀地区PM_{2.5}浓度贡献超过35%^[29]。Ebenstein等^[30]通过将淮河以北地区为实验组、淮河以南地区为对照组,采用断点回归分析方法量化了冬季采暖政策对北方居民寿命降低的影响,结果发现采暖政策使北方人均寿命缩短了3.1年,死亡率集中发生在那些罹患心血管疾病的人口中。截至2016年底,中国北方地区取暖面积达206亿m²,其中城镇建筑取暖面积占比远超农村地区,达到了68.4%。在供暖方式上,城镇地区主要采用集中供暖系统,而城乡接合部和农村地区则多使用柴灶、火炕、炉子或土暖气等分散供暖方式。此外,中国北方地区的清洁取暖比例偏低。截至2016年底,北方地区的清洁取暖总面积仅占总取暖面积的34%,不足70亿m²^[31]。2017年中国10个部委出台政策《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)》以来,各地积极采用的清洁采暖(例如:煤改气、煤改电)显著降低了北方空气污染物的排放。

清洁采暖有助于减少平均PM_{2.5}排放,提高整体空气质量指数,同时可避免约200万人过早死

亡,并产生显著经济收益^[32-33]。然而,在清洁能源供应能力、政策实施方式和效果方面仍存在争议。部分地区未能科学评估当地资源供应和制定发展规划,缺乏因地制宜的清洁取暖方案,导致清洁取暖政策实施困难,例如一些地区面临天然气供应不足、电网负荷无法满足取暖需求以及成本较高的问题,使“双替代”措施遭遇瓶颈。此外,清洁采暖政策具有两面性。首先,北方采用天然气供暖造成南方冬季缺少天然气,进而造成南方居民使用传统化石燃料,导致南方空气污染加剧^[34]。其次,天然气燃烧产生水汽,水汽释放到大气中增加了大气湿度,促进生成的二次颗粒物浓度为 $4.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,进而降低空气质量^[35-36]。尽管煤改气政策促进了二次颗粒物的生成,整体来看该政策显著改善了中国北方的空气质量,PM_{2.5}浓度降低22.5%~58.3%^[37]。

2.3 钢铁水泥

中国是全球最大的钢铁生产国,占全球产量的一半,排放污染更是不容小觑。为此,中国持续收紧钢铁大气污染物排放标准限值:2012年,中国引入钢铁烟尘、SO₂和NO_x的最高排放浓度限值;2015年,中国实施新标准,规定其限值最大分别下降60%、67%和40%;2019年,中国提出比美国、欧盟等发达国家和地区更为严苛的“超低排放标准”。2014—2018年中国钢铁产量增加14%,但其烟尘和SO₂排放量分别下降47%和42%,NO_x仅上升3%,其关键减排手段为末端治理技术改进^[38]。

中国钢铁行业预计到2060年前可以实现碳中和目标。中国钢铁行业在实现碳中和目标的过程中,化石能源消耗对空气污染物排放具有显著的共生效益。尽管化石能源强度降低了34.2%,从基准值555 kg标准煤/t降至2060年的365 kg标准煤/t,但在减少空气污染物排放方面有更高的协同效应。到2060年,PM、NO_x和SO₂的排放量相较于2020年分别下降88.6%、97.5%和95.5%^[39],这种污染物排放强度的下降是由脱碳措施的应用推动的,而不是末端污染物减排措施导致的^[39]。

作为世界上最大的水泥生产国,中国的水泥行业产生大量的空气污染和CO₂排放。为应对这些排放,中国于2015年对水泥行业实施了更严格的

空气污染排放标准。在2015年标准政策下,2014—2018年中国水泥厂的烟尘、SO₂和NO_x分别下降了50%、43%和34%,而CO₂排放上升5%^[40]。预计到2060年,在超低标准和碳中和政策的协同作用下,通过淘汰落后产能、升级生产设备、发展清洁能源,以及提高能源效率等关键减排手段,中国水泥企业的烟尘、NO_x、SO₂和CO₂排放将分别降低69%、66%、82%和62%^[40]。

2.4 陆地交通

汽车尾气排放污染空气,对人体健康造成不利影响。汽车尾气是中国PM_{2.5}的来源之一。汽车行业在城市层面较早开展了能源转型。2009年,中国中央政府计划在未来3年内每年挑选大约10个城市(最终总共有25个城市),以推广1000辆新能源汽车,被称为“数千辆车,10个城市”。新能源汽车的推广使示范城市的碳强度降低了约4.5%,降低了试点城市交通部门的能源消费总量,提高了试点城市的能源效率^[41]。为刺激消费者购买新能源汽车,自2009年起政府实施了公共服务部门的新能源汽车补贴政策,并自2013年起扩大到私营部门的新能源汽车补贴。研究表明中国对新能源汽车的补贴显著改善了空气质量^[41]。私营部门新能源汽车补贴使当年的PM_{2.5}浓度降低了3%,2年后降低了3.2%^[42]。补贴对空气质量的影响随城市人口数量、车辆数量和企业数量的变化而变化。城市人口每多1万人,私营部门补贴实施2年后PM_{2.5}浓度将额外降低5.7%;城市每多100万辆民用车,私营部门补贴实施2年后的PM_{2.5}浓度将再降低3.1%;此外,如果城市本身空气质量恶化25%,则当年和2年后实施的私营部门补贴分别将使PM_{2.5}浓度再降低1.6%和3.4%^[42]。公共部门的新能源汽车补贴使PM_{2.5}浓度在政策实施的当年降低5%。驾驶和购买限制对公共部门补贴与空气质量的因果关系有显著影响^[42]。

着眼未来,新能源汽车替代传统化石燃料交通工具是“双碳”战略下交通部门的必经之路。而不同政策措施下消费者对新能源汽车的购买意向决定着“双碳”目标实施过程中城市交通部门的空气污染物排放量。基于演化博弈方法,可以分析不同

政策措施情景下的个体对新能源汽车、公共交通以及共享单车的选择,进而量化不同措施造成的交通部门的温室气体和污染物排放的降低^[43]。

3 结论

本研究评估“双碳”目标对电力、采暖、钢铁水泥、陆地交通等行业能源转型后空气质量改善的效益,通过分析各行业在实施“双碳”目标后产生的影响,可以为未来制定更科学、有效的环保政策提供依据。

现有研究聚焦“双碳”目标实现对常规空气污染物(比如 $PM_{2.5}$ 、 O_3)的影响。而新污染物(包括持久性有机物、微塑料等)具有生物毒性、环境持久性、生物累积性等特征,对生态环境或人体健康存在较大风险。能源转型可能会在许多行业带来新的污染物,例如:在电动汽车制造领域,虽然电动汽车本身不会产生尾气排放,但是其电池生产和回收过程中可能会释放出有害物质;在可再生能源领域,风力发电和太阳能发电需要大量稀土金属和硅等材料,这些材料的开采、加工和废弃处理都可能对空气质量造成影响,因此,在推进能源转型的同时,也需要重视新污染物的管控与治理,未来研究应关注“双碳”目标实现对新污染物的影响。

现有研究更多地分析“双碳”目标产生的积极影响,而在能源转型过程中,实现“双碳”目标可能会引发一系列环境问题,比如新能源设施建设所占用的土地资源,可能会对当地生态系统造成影响,且和粮食安全问题存在权衡关系。新技术开发过程中可能产生大量废弃物,导致土地资源浪费和生态破坏。电力行业的能源转型可能产生废弃物处理和储存难题,同时由于技术更新换代需要大量投资,也可能导致资源浪费和环境压力增加;采暖行业的清洁能源替代传统燃煤取暖可能需要大量投入,在清洁能源供应不足时仍需依赖传统化石能源,并可能影响当地动植物种群;钢铁水泥行业的能源转型可能引起大量 CO_2 排放和固体废弃物产生,技术改造过程中可能面临高成本和技术难题;交通领域由传统内燃机车辆向新能源汽车转型将

涉及充电基础设施建设不足和废旧车辆报废处理等挑战。因此,在推动这些行业的能源转型时,需要充分考虑环境保护与可持续发展之间的平衡,并制定相应政策和措施来解决潜在的环境问题。

现有研究更多从宏观角度分析“双碳”目标实现对空气质量的影响,而外在条件对个体的影响也会影响空气质量。例如:不同政策情景(惩罚 vs. 补贴)下居民对新能源汽车的购买意愿差异;在交通部门,个体的选择十分重要,从新能源车到充电桩设施的补贴都会影响消费者的购买行为,进而产生不同的空气污染物排放结果。

现有研究关注到了碳中和目标驱使下能源转型政策的两面性;例如:煤改气促进二次颗粒物的生成^[36]。除此之外,在中国发电依然以煤电为主的背景下,全生命周期地分析新能源汽车的污染物排放影响也十分必要。另外,能源转型会发生供求关系的变化,有可能提高生产力和消费者的购买力,进而产生温室气体和污染物排放的回弹^[44]。未来研究需考虑回弹效应对能源转型过程中空气污染物排放的影响。本文归纳总结了针对能源转型带来的空气质量协同改善的研究,有助于从整体视角认识“双碳”目标实现对空气质量的影响,并对未来在该领域的研究提出建议。

参考文献(References)

- [1] Huang X, Ding A J, Gao J, et al. Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China[J]. National Science Review, 2021, 8(2): 51-59.
- [2] 中华人民共和国生态环境部. 2023 中国生态环境状况公报 [R/OL]. (2024-06-05) [2024-06-13]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjz>.
- [3] Zhang Q, Zheng Y X, Tong D, et al. Drivers of improved $PM_{2.5}$ air quality in China from 2013 to 2017[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(49): 24463-24469.
- [4] Yu C Y, Kang J J, Teng J, et al. Does coal-to-gas policy reduce air pollution? Evidence from a quasi-natural experiment in China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 773: 144645.
- [5] Zheng B, Tong D, Li M, et al. Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean

- air actions[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(19): 14095–14111.
- [6] Xing J, Lu X, Wang S X, et al. The quest for improved air quality may push China to continue its CO₂ reduction beyond the Paris Commitment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(47): 29535–29542.
- [7] 自然资源保护协会. 中国散煤综合治理研究报告 2020 [R/OL]. (2020-09-23)[2024-06-13]. <http://www.nrdc.cn/information/informationinfo?id=292&cook=2>.
- [8] Shindell D, Smith C J. Climate and air-quality benefits of a realistic phase-out of fossil fuels[J]. *Nature*, 2019, 573(7774): 408–411.
- [9] Agee M D, Atkinson S E, Crocker T D, et al. Non-separable pollution control: Implications for a CO₂ emissions cap and trade system[J]. *Resource and Energy Economics*, 2014, 36(1): 64–82.
- [10] 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[J]. *National Science Review*, 2021, 8(12): 63–73.
- [11] Shi X R, Zheng Y X, Lei Y, et al. Air quality benefits of achieving carbon neutrality in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 795: 148784.
- [12] Yang G F, Liu Y H, Li X N. Spatiotemporal distribution of ground-level ozone in China at a city level[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 7229.
- [13] Guo X R, Shen Y Q, Liu W W, et al. Estimation and prediction of industrial VOC emissions in Hebei Province, China[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(5): 530.
- [14] 钟美芳, 李智博, 黄皓旻, 等. “双碳”背景下工业源 VOCs 排放特征与减排潜力研究[J]. *环境科学学报*, 2022, 42(10): 12–25.
- [15] 刘春景, 吕建焱, 赵汶畅, 等. 两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(7): 3375–3385.
- [16] 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[J]. *科学通报*, 2022, 67(8): 784–794.
- [17] Liu Z Y, Zhang Y, Wang Y H, et al. Cost-effectiveness of NO_x and VOC co-operative controls for PM_{2.5} and O₃ mitigation in the context of China's carbon neutrality[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2023, 10(11): 1109–1116.
- [18] Qu C F, Yang X, Zhang D, et al. Estimating health co-benefits of climate policies in China: An application of the regional emissions-air quality-climate-health (reach) framework[J]. *Climate Change Economics*, 2020, 11(3): 2041004.
- [19] Yue H B, He C Y, Huang Q X, et al. Stronger policy required to substantially reduce deaths from PM_{2.5} pollution in China[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1462.
- [20] Wang Y S, Xie M J, Wu Y Z, et al. Ozone-related Co-benefits of China's Climate mitigation Policy[J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 182: 106288.
- [21] Cheng J, Tong D, Liu Y, et al. A synergistic approach to air pollution control and carbon neutrality in China can avoid millions of premature deaths annually by 2060[J]. *One Earth*, 2023, 6(8): 978–989.
- [22] Tong D, Cheng J, Liu Y, et al. Dynamic projection of anthropogenic emissions in China: Methodology and 2015–2050 emission pathways under a range of socio-economic, climate policy, and pollution control scenarios[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(9): 5729–5757.
- [23] Zhang G X, Yang Y, Su B, et al. Electricity production, power generation structure, and air pollution: A monthly data analysis for 279 cities in China (2015–2019)[J]. *Energy Economics*, 2023, 120: 106597.
- [24] Jiang P, Alimujiang A, Dong H J, et al. Detecting and understanding synergies and co-benefits of low carbon development in the electric power industry in China[J]. *Sustainability*, 2019, 12(1): 297.
- [25] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2016[M]. 北京: 中国统计出版社, 2016.
- [26] 中华人民共和国环境保护部. 《中国环境统计年报 2015》[M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [27] Zhang S H, An K X, Li J, et al. Incorporating health co-benefits into technology pathways to achieve China's 2060 carbon neutrality goal: A modelling study[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2021, 5(11): e808–e817.
- [28] Cai W J, Hui J X, Wang C, et al. The Lancet Countdown on PM_{2.5} pollution-related health impacts of China's projected carbon dioxide mitigation in the electric power generation sector under the Paris Agreement: A modelling study[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2018, 2(4): e151–e161.
- [29] Liu J, Mauzerall D L, Chen Q, et al. Air pollutant emissions from Chinese households: A major and underappreciated ambient pollution source[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(28): 7756–7761.
- [30] Ebenstein A, Fan M Y, Greenstone M, et al. New evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River Policy [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(39): 10384–

- 10389.
- [31] 北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)[R]. 北京: 发展改革委, 能源局, 财政部, 2017.
- [32] Zhang M J, Gao L, Wang Q D, et al. Methane leakage measurement of natural gas heating boilers and greenhouse gas emissions accounting of "coal-to-gas" transition for residential heating in rural Beijing[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2023, 10(1): 93–97.
- [33] Zhou M, Liu H X, Peng L Q, et al. Environmental benefits and household costs of clean heating options in Northern China[J]. *Nature Sustainability*, 2022, 5(4): 329–338.
- [34] Wang S W, Su H, Chen C C, et al. Natural gas shortages during the "coal-to-gas" transition in China have caused a large redistribution of air pollution in winter 2017[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(49): 31018–31025.
- [35] Xing M, Liu W G, Li X, et al. Vapor isotopic evidence for the worsening of winter air quality by anthropogenic combustion-derived water[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(52): 33005–33010.
- [36] Wu J R, Bei N F, Liu W G, et al. Why is the air humid during wintertime heavy haze days in Beijing? [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 853: 158597.
- [37] 空气质量评估报告(九)[R]. 北京: 北京大学统计科学中心, 北京大学光华管理学院, 大数据分析与应用技术国家工程实验室, 2022.
- [38] Bo X, Jia M, Xue X D, et al. Effect of strengthened standards on Chinese ironmaking and steelmaking emissions [J]. *Nature Sustainability*, 2021, 4(9): 811–820.
- [39] Huang D, Ding C D, Tao Y, et al. Quantitative analysis of net-zero transition pathways and synergies in China's iron and steel industry[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 183: 113495.
- [40] Tang L, Ruan J H, Bo X, et al. Plant-level real-time monitoring data reveal substantial abatement potential of air pollution and CO₂ in China's cement sector[J]. *One Earth*, 2022, 5(8): 892–906.
- [41] Wang K L, Zheng L J, Zhang J Z, et al. The impact of promoting new energy vehicles on carbon intensity: Causal evidence from China[J]. *Energy Economics*, 2022, 114: 106255.
- [42] Li S Y, Wang S X, Wu Q R, et al. Emission trends of air pollutants and CO₂ in China from 2005 to 2021[J]. *Earth System Science Data*, 2023, 15(6): 2279–2294.
- [43] Sun Q Q, Chen H, Long R Y, et al. Who will pay for the "bicycle cemetery"? Evolutionary game analysis of recycling abandoned shared bicycles under dynamic reward and punishment[J]. *European Journal of Operational Research*, 2023, 305(2): 917–929.
- [44] Kern F, Peuckert J, Lange S, et al. Designing effective and acceptable policy mixes for energy transitions: Countering rebound effects in German industry[J]. *Energy Research & Social Science*, 2022, 90: 102680.

Impact of "double carbon" goal on urban air quality in China

WANG Yichen¹, DONG Lu^{1,2}, ZHANG Linru¹, XIE Meiyang¹, HAN Xiao¹, CAO Junji³

1. School of Public Policy and Administration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

2. Chongqing Innovation Center, Northwestern Polytechnical University, Chongqing 401135, China

3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract This paper firstly clarifies that development of new renewable energy under "dual carbon" goal will benefit urban areas in PM_{2.5} and O₃ pollution, and then summarizes such improvements in air quality in terms of the energy transitions in electric power, heating, steel and cement, transportation and other industries. In addition, limitations of the current research are also addressed. Future research should focus on the governance of new pollutants, the perspective of individual selection and the two-sided characteristics of policies, so as to promote continuous improvement of air quality in China and help the "dual carbon" goal continue to advance in depth.

Keywords "double carbon" goal; air quality; energy transition ●



(责任编辑 徐丽娇)