

金宇翔,侯雪伟*,洪 蕾,等.碳中和情景下我国 CO₂ 与 O₃ 前体物协同减排特征分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(4):2230-2239.

Jin Y X, Hou X W, Hong L, et al. Analysis on the characteristics of synergistic reduction of CO₂ and O₃ precursors emissions in China under carbon-neutral scenario [J]. China Environmental Science, 2025,45(4):2230-2239.

碳中和情景下我国 CO₂ 与 O₃ 前体物协同减排特征分析

金宇翔¹,侯雪伟^{1*},洪 蕾²,赵天良¹,周逸超¹ (1.南京信息工程大学,气象灾害预报预警与评估协同创新中心,气象灾害教育部重点实验室,气候与环境变化国际合作联合实验室,中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,江苏 南京 210044; 2.生态环境部南京环境科学研究所,江苏 南京 210000)

摘要: 基于中国未来排放动态评估模型(DPEC)预估的排放清单,分析了碳中和情景下二氧化碳(CO₂),挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NO_x)的人为排放时空变化特征,并与共享社会经济路径(SSP)中两个 SSP1 情景进行对比.研究表明,在 DPEC 碳中和情景中,我国 CO₂ 人为排放将在 2030 年达峰,2060 年相比 2020 年将减排 91%,减排量介于两个 SSP 情景(SSP1-1.9 和 SSP1-2.6)预估值之间.VOCs 和 NO_x 的人为排放量自 2020 年起呈持续下降趋势,直至 2060 年分别减排 65%和 88%.相较两个 SSP 情景,DPEC 中 VOCs 减排偏弱而 NO_x 减排偏强.不同行业源对减排的贡献及其空间分布也存在差异,CO₂ 减排主要来自电力源和工业源,VOCs 和 NO_x 交通源减排较明显,2060 年工业源排放将成为 CO₂,VOCs 和 NO_x 的最主要来源.总体而言,DPEC 碳中和情景更为贴近我国未来减排趋势,在相关行业按期达成减排目标的前提下可以体现协同减排特征.

关键词: 碳中和情景; 人为排放; DPEC; SSP

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)04-2230-10

Analysis on the characteristics of synergistic reduction of CO₂ and O₃ precursors emissions in China under carbon-neutral scenario. JIN Yu-xiang¹, HOU Xue-wei^{1*}, HONG Lei², ZHAO Tian-liang¹, ZHOU Yi-chao¹ (1.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2.Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210000, China). *China Environmental Science*, 2025,45(4): 2230~2239

Abstract: The study investigates the spatio-temporal dynamics of anthropogenic emissions in China under a carbon-neutral scenario, with a focus on synergistic reductions in carbon dioxide (CO₂), volatile organic compounds (VOCs), and nitrogen oxides (NO_x). Using the Dynamic Projection model for Emissions in China (DPEC), emissions trends were analyzed and compared with two Shared Socio-economic Pathway (SSP) scenarios (SSP1-1.9 and SSP1-2.6). The findings reveal that under the DPEC carbon-neutral scenario, CO₂ emissions will peak by 2030 and decrease by 91% by 2060 relative to 2020 levels. Emissions of VOCs and NO_x show continuous reductions since 2020, with declines of 65% and 88%, respectively, by 2060. Compared to the two SSP scenarios, the DPEC scenario shows a weaker reduction in VOCs but a stronger reduction in NO_x. Sectoral analysis highlights that CO₂ reductions primarily stem from the energy and industrial sectors, whereas the transportation sector drives notable decreases in VOCs and NO_x. By 2060, the industrial sector will remain the dominant source of emissions for CO₂, VOCs, and NO_x. The results suggest that the DPEC carbon-neutral scenario aligns closely with China's future emission reduction trends, demonstrating significant potential for synergistic emission reductions. Achieving these targets on schedule will require robust policy implementation and sectoral commitment, offering substantial improvements in air quality and environmental outcomes.

Key words: carbon-neutral scenario; anthropogenic emissions; DPEC; SSP

在过去 20 多年间,我国的空气污染形势发生了快速的变化.21 世纪以来随着我国经济社会的快速发展,空气污染问题不断加重,已经对人们的生活产生不利影响.我国政府自 2013 年以来颁布实施了《中华人民共和国大气污染防治法》《大气污染防治行动计划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》

等一系列大气环境治理法律与政策,期望通过调整产业与能源结构,提高环境监管能力等措施有效控

收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3701204);安徽省重点研究与开发计划项目(2022h11020008)

* 责任作者,副教授,houxw@nuist.edu.cn

制我国大气细颗粒物的污染情况.中国环境监测总站的空气质量数据显示,从 2013~2018 年,全国 PM_{2.5} 年平均浓度下降了 30%~50%^[1].然而,这些措施对于臭氧污染的控制有限.近年来,地表臭氧污染事件频发,已经成为当前影响我国空气质量的重要因素^[2].臭氧是一种二次污染物,在大气中主要由一系列光化学反应生成^[3],挥发性有机物(VOCs)和氮氧化物(NO_x)为对流层臭氧主要前体物.臭氧的光化学生成与这两类前体物的浓度之间存在非线性关系^[4].根据局地大气环境变化特征,合理减少这两类物质的人为排放可以有效控制地表臭氧的光化学生成^[5-6].

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出^[7],人类活动已使全球气温上升 1.1°C,以二氧化碳(CO₂)为首的温室气体排放是气候变暖的主要原因,CO₂ 减排将是遏制气候变化的重要举措.2020 年 9 月,我国提出了双碳目标^[8],将在未来几十年内围绕这一目标颁布并落实一系列关于绿色低碳可持续发展的政策和措施.双碳目标主要是为了缓解温室气体大量排放带来的气候变暖趋势,但同时它对我国空气污染情况的变化也有着深远的影响.CO₂ 和臭氧前体物 VOCs 及 NO_x 的人为排放都主要来源于化石燃料燃烧和工业生产等途径,针对 CO₂ 的减排也将伴随着 VOCs 和 NO_x 人为排放量的变化,进而影响对流层臭氧浓度水平.研究^[9]认为,空气污染和气候变化在很大程度上都主要是由矿物燃料燃烧的排放导致,因此减轻和控制空气污染和减排温室气体以保护气候在行动上应是一致的.我国在 2022 年印发《减污降碳协同增效实施方案》^[10],对未来协同减排工作给出规划与指导.这都说明了温室气体与空气污染物两者排放具有“同根同源同步”性.CO₂ 减排将减缓全球变暖,有利于减少极端天气事件的发生.此外,气候和气象条件的变化也会对大气污染物变化的物理化学过程产生影响^[11-12].VOCs 和 NO_x 作为 PM_{2.5} 和臭氧两个主要大气复合污染物的前体物,其减排将有助于降低 PM_{2.5} 和臭氧浓度,改善空气质量^[6].总体而言三类物质的减排对气候和环境都有着积极影响.

温室气体和空气污染物在未来的排放演变趋势也是学界高度关注的问题,排放情景路径被用于描述未来排放的变化趋势.在 IPCC 第 5 次报告期间,国际上多个机构合作构建了代表性浓度路径

(RCP)^[13],按 2100 年全球平均辐射强迫分为 4 种排放情景,但并未设定经济发展路线.其后开发的共享社会经济路径(SSP)^[14]定义了 5 种不同的社会经济情景,并利用综合评估模型定量估计各情景的排放.此后研究^[15]将两者结合为 SSP-RCP 情景,在第 6 次耦合模式比较计划(CMIP6)中被广泛应用^[16],为针对未来气候变化的研究提供数据支持^[17].然而,这类全球排放情景模型通常将国家视为一个整体,难以表征不同区域自然气候以及发展程度的差异^[18].研究^[19]发现 SSP-RCP 情景对中国排放的刻画比较模糊,未充分考虑近十年来我国空气污染的快速治理进程,因此进一步开发了中国未来排放动态评估模型(DPEC),用以研究中国区域未来人为排放变化.DPEC 融合中国多尺度排放清单模型(MEIC)中 700 多种污染源的技术演替过程,根据不同的经济与政策情景模拟未来的技术演替进程及其对排放的影响,同时将不同 SSP 情景下的未来能源供需与技术演替模型逐一映射,实现对中国未来大气成分排放变化的精细化模拟^[19].

本研究利用 DPECv1.2 和 SSPv2.0 排放情景路径,研究碳中和情景下我国 CO₂ 和以 VOCs 及 NO_x 为代表的臭氧前体物排放不同减排情景路径中的差异,估算不同行业源对三类物质减排的贡献大小和减排空间分布特征,以期对我国未来排放情景有更深入的认识并对未来人为有效减排策略提供理论依据.

1 数据及方法

本研究主要使用了两组未来情景人为排放清单数据集,分别是 DPEC 和 SSP 数据集.这两个数据集各自提供了多个综合考虑社会经济发展、全球气候治理、减污降碳协同等相关背景下的未来温室气体及大气污染物人为排放数据.

1.1 DPEC 数据集

DPEC 数据集(http://meicmodel.org.cn/?page_id=1917)由清华大学 MEIC 团队开发.本研究选取的 DPEC 数据集为 2023 年最新发布的 1.2 版本^[20],其包含 5 种减排力度由弱到强的排放情景,分别被命名为 baseline, clean air, on time peak, on time peak-net zero, early peak-net zero.本研究选取其中 on time peak-net zero 情景作为碳中和情景.该情景由遵循绿色、可持续发展的 SSP1 社会经济情景驱动^[21],在

在此基础上逐步叠加最佳污染控制策略,中短期(2020~2030)碳达峰减排政策以及长期碳中和目标减排政策,其中设定到 2060 年我国 CO₂ 人为排放量降至 0.9Gt,并被陆地自然碳汇完全吸收达成碳中和。DPECv1.2 版本的排放基准年更新为 2020 年,其排放数据与 MEICv1.4 对应。本研究选取了 2020~2060 年中国大陆地区 CO₂、VOCs(不包含 CH₄)、NO_x 三类物质的分省排放总量数据以及排放格点数据,时间分辨率为 10a,格点数据空间分辨率为 0.25°×0.25°。此外,该数据集还提供了来自电力、工业、交通、居民四个行业源的排放量数据。

1.2 SSP 数据集

SSP 情景排放数据在 CMIP6 中的情景模式比较计划中被广泛应用。本研究选用 SSP 数据库(<https://tntcat.iiasa.ac.at/SspDb/dsd?Action=htmlpage&page=10>)最新发布的 2.0 版本^[22],并选取 SSP1-1.9、SSP1-2.6 两种低排放情景。这两种情景与 DPEC 碳中和情景都是在 SSP1 社会经济情景^[21]的基础上叠加不同的减排政策而构建的。SSP1-1.9 和 SSP1-2.6 情

景在其各自的共享气候政策假设下将分别在 2100 年达成全球平均 1.9 和 2.6W/m² 的辐射强迫。SSP 数据集的排放基准年为 2015 年。在变量方面与 DPEC 数据集中所选内容对应,选取了 CO₂、VOCs(不包含 CH₄)、NO_x 三类物质于 2020~2060 年在中国大陆地区的排放总量变化数据,时间分辨率为 10a,其中包含电力、工业、交通、居民四类行业源各自的排放数据。

2 结果与讨论

2.1 碳中和情景下我国 CO₂ 人为排放的时空变化特征

图 1 是 DPEC 碳中和情景、SSP1-1.9 以及 SSP1-2.6 情景下我国 CO₂ 排放总量 2020~2060 年的变化图,不同行业源的排放量以不同颜色来区分,柱顶数字代表此年 CO₂ 排放量相比此情景在 2020 年排放量的变化比例,正值表示增排,负值表示减排。需要指出的是,由于 SSP1-1.9 情景中预估的各类碳减排技术与措施的作用较强,因此其电力源 CO₂ 净排放自 2050 年开始转变为负值。

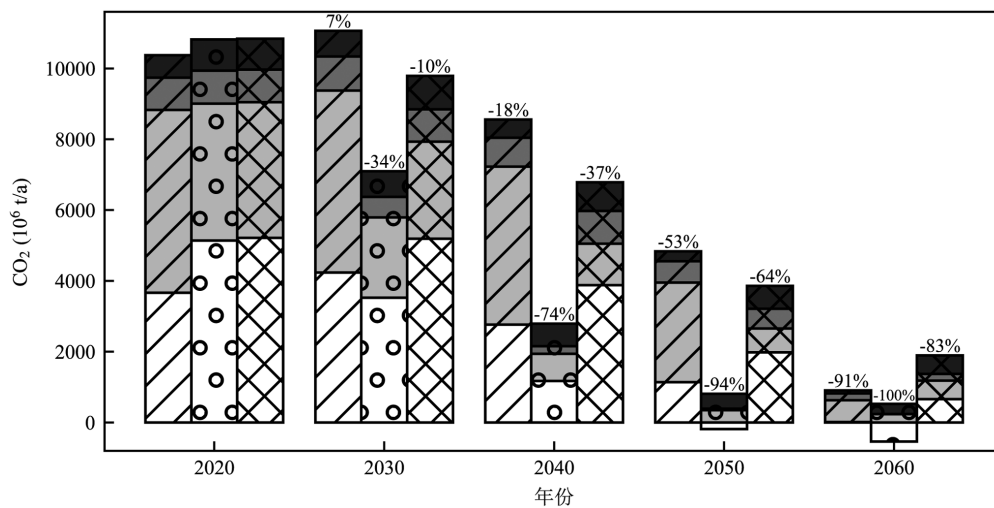


图 1 三个情景中 CO₂ 全国排放总量 2020~2060 年变化对比

Fig.1 Total CO₂ emission for China from 2020 to 2060 under three scenarios

单斜线底纹为 DPEC,圆形底纹为 SSP1-1.9,斜方格底纹为 SSP1-2.6,灰度渐变由浅到深依次是电力、工业、交通、居民

从图 1 可以看出在 DPEC 碳中和情景中 CO₂ 排在 2030 年小幅增长 7%并实现碳达峰,随后迅速减小,到 2060 年达到碳中和时排放总量相比 2020 年降低 91%。而在两个 SSP1 情景中,CO₂ 排在 2020~2060 年均呈现逐年下降趋势。到 2060 年,SSP1-1.9 情景 CO₂ 减排达 100%,SSP1-2.6 情景 CO₂

减排达 83%。其中 SSP1-1.9 情景中 CO₂ 排在 2020~2040 年间下降较快,SSP1-2.6 情景在 2030~2050 年下降较快,而 DPEC 碳中和情景中 CO₂ 排在 2040~2060 年下降较快。在不同行业源的贡献比例上,电力源和工业源是 CO₂ 的两大主要人为排放行业源,在三类情景中这两类排放源都表现出明显

的减排趋势,其中电力源的减排相较而言更彻底。

图 2 显示了 DPEC 碳中和情景下两个主要行业源(电力源及工业源)CO₂ 排放量的时空分布情况,左侧为 2020 年 CO₂ 电力源及工业源的排放空间分布,右侧两列分别为 2030 年减去 2020 年和 2060 年减去 2030 年排放量的差值(深色表示减排,浅色表示增排)。从图 2(a)中可以看出,2020 年 CO₂ 电力源排放高值区主要位于我国大多数大中型城市中,包括长三角、珠三角、京津冀等,以及我国中西部一些煤炭主产区,这些地区的 CO₂ 排放量超过了 4000g/(m²·a)。到 2030 年碳达峰时全国范围内 CO₂ 电力源排放量

相比 2020 年均会有不同程度的上涨,如图 2(b),长三角、珠三角、河南中部、云贵川省会城市以及宁夏和内蒙古部分煤矿主产区为涨幅较大的地区,这些区域的 CO₂ 增排超过了 1000g/(m²·a),仅在山东省和天津市出现 250g/(m²·a)以内的小幅减排。2030~2060 年 CO₂ 电力源的减排在全国范围内都较全面而彻底,如图 2(c),长三角、珠三角、京津冀和中西部煤炭主产区这几个高值区相比 2030 年都有接近或超过 4000g/(m²·a)的减排量,周围的中低排放区也都存在全面的减排。全国范围内仅在上海、北京和天津区域余下 300g/(m²·a)左右的排放。

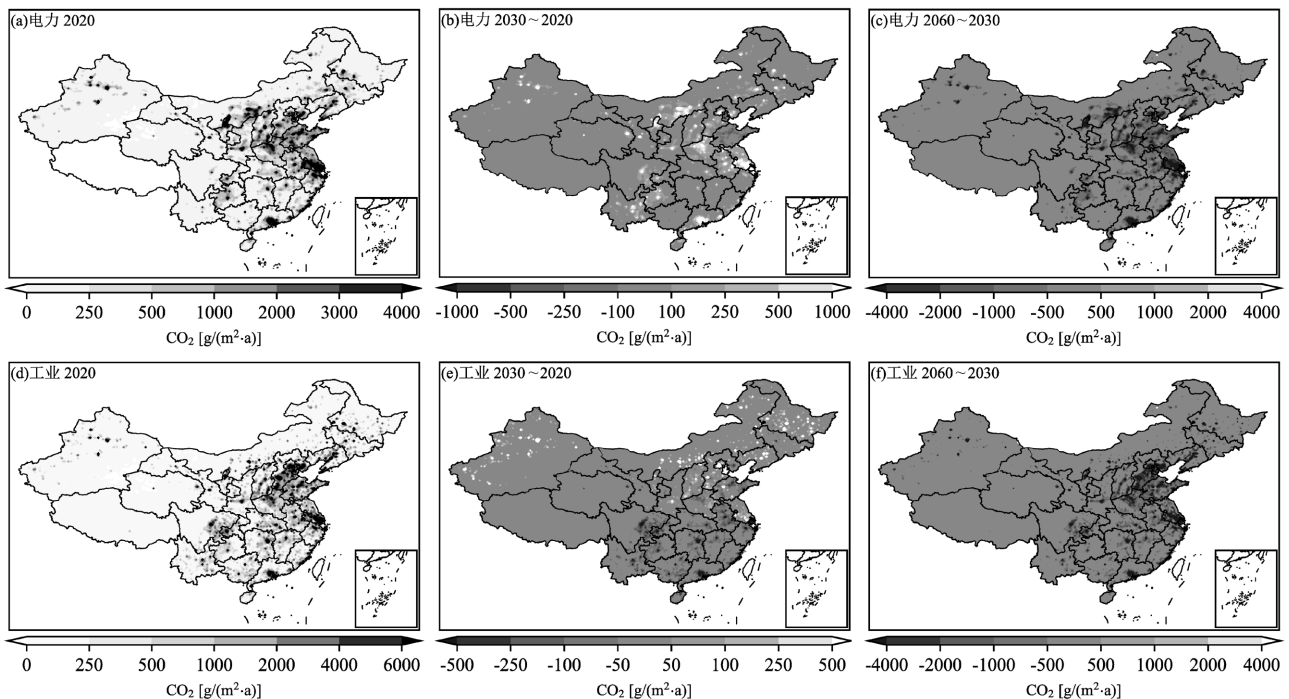


图 2 碳中和情景下 2020 年、2030 年、2060 年主要行业源的 CO₂ 排放空间分布变化情况

Fig.2 The distribution of CO₂ emissions from major sectors in 2020, 2030, 2060 under the carbon-neutral scenario in DPEC

审图号:GS(2024)0650 号

工业源在 2020 年的 CO₂ 排放分布情况与电力源类似,但排放量更高,如图 2(d),排放高值区主要位于长三角、珠三角、京津冀和长江中上游沿线城市群,这些地区排放量超过 4000g/(m²·a),在部分核心地带超过 6000g/(m²·a)。2020~2030 年 CO₂ 工业源排放的变化幅度相对电力源而言较小,如图 2(e),在我国南方的一些城市群中 CO₂ 出现小幅减排,如成渝、长沙和珠三角地区,但在江苏省南部 CO₂ 工业源排放略有上涨,而在北方城市中 CO₂ 排放普遍呈现小范围的小幅上涨趋势,涨幅在 250~500g/(m²·a),如北京、

天津等个别城市涨幅超过 500g/(m²·a)。2030~2060 年 CO₂ 工业源在全国范围内均有明显减排,如图 2(f),减排高值区主要集中在长三角、珠三角和京津冀地区,但减排力度不及电力行业那么彻底,在长三角、珠三角、京津等全国主要城市群中仍存在 2000g/(m²·a)左右或更高的排放,因此最终在 2060 年 CO₂ 人为排放当中工业源排放还是占据了主要贡献(图 1)。

2.2 碳中和情景下我国 VOCs 人为排放的时空变化特征

如图 3 所示(VOCs 数据统计中不包含 CH_4),在对 VOCs 人为排放减排的预估中,三个情景在 2020~2060 年均呈现下降趋势,但 DPEC 碳中和情景中自 2020 年起 VOCs 排放都要明显高于两个 SSP1 情景,到 2060 年 DPEC 碳中和情景中仅有 65% 的减排,而两个 SSP1 情景的减排都达到了 80% 以上.一定程度上是由于 DPEC 模型中调低了对 VOCs 的减排预期^[19],模型团队认为 VOCs 的排放源高度分散,其减排难度相比以化石燃料为主的排放物质要大

得多,因此其预计即使在应用最优减排技术的情况下,VOCs 的减排量仍然比较有限.三类情景对不同行业源减排的预估也产生了一些差异,在 DPEC 碳中和情景中,工业源始终是 VOCs 最主要人为排放源,居民源次之,交通源的减排相对最彻底.而在两个 SSP1 情景中,2020~2030 年间四类行业源都出现明显减排,其中电力源与居民源减排较多.工业源和交通源的减排相对比较弱,2030 年及以后这两者的排放将在 VOCs 人为排放中占据主要地位.

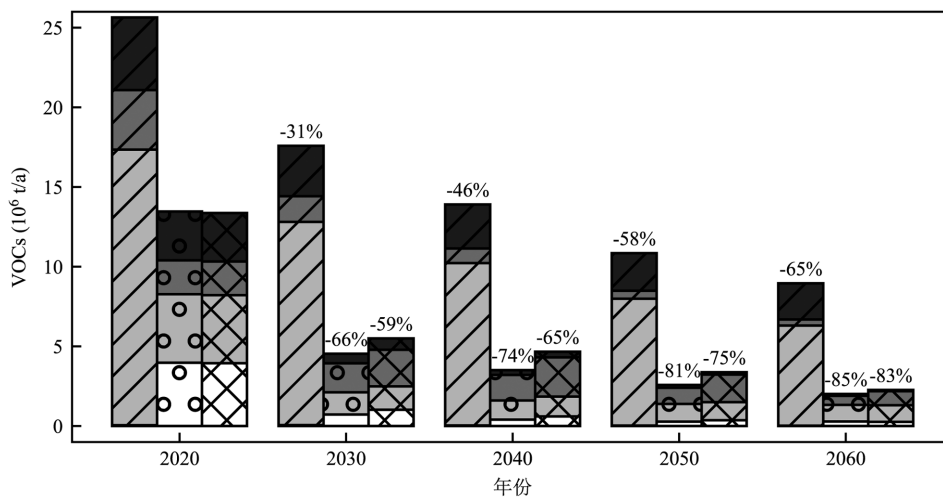


图 3 三个情景中 VOCs 全国排放总量 2020~2060 年变化对比图

Fig.3 Total VOCs emission for China from 2020 to 2060 under three scenarios

图中标记与颜色等含义同图 1

图 4 显示了 DPEC 碳中和情景下不同行业源的 VOCs 排放分布及变化情况,由于电力源的 VOCs 排放量很低,因此不对其进行绘图和分析.工业源在 VOCs 的人为排放中占主导地位.2020 年 VOCs 工业源排放高值区主要位于长三角、珠三角、京津以及长江中游沿线几个主要城市群,如图 4(a),这些地区的排放量均超过 $30\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,其中部分地区超过 $40\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.2020~2030 年工业源 VOCs 在全国均呈现减少趋势,如图 4(b),减排高值区主要位于长三角、珠三角、京津和武汉,减排量超过了 $7\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,其他地区的减排量较少.如图 4(c),2030~2060 年长三角、珠三角等地区继续维持 $7\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上的减排,同时在华北平原多个城市及周围地区也出现了中等幅度的减排,部分城市中心区域有 $7\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上的减排.到 2060 年工业源 VOCs 在我国中东部主要城市区域仍有较明显排放,长三角、珠三角、京津以及长江中上游沿线工业城市仍有

$20\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 左右的排放.

2020 年 VOCs 交通源排放的高值区主要在我国中东部省会城市以及长三角和珠三角,如图 4(d),其排放量超过 $7.5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.2020~2030 年减排高值区位于长三角和珠三角地区,如图 4(e),减排量超过 $3\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,同时在华北平原有较大范围的 $1\sim 2\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的减排.由于 2020~2030 年交通源 VOCs 的减排已经较为彻底,此后的减排空间有限,因此 2030~2060 年减排量相对有所减小,如图 4(f),仅在珠三角和长三角及个别省会城市仍有较明显的减排.到 2060 年我国大部分地区交通源 VOCs 排放低于 $0.5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,仅在珠三角、京津及我国中东部各省会城市存在 $1\sim 3\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的排放.

2020 年 VOCs 居民源排放主要分布在我国中东部地区,如图 4(g),高值区主要分布在人口密度较高的城市如北京、上海等,排放量达到 $7.5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 左右.2020~2030 年在东部沿海省份的许多城市排放明

显增多,如图 4(h),长三角地区出现 $4\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上的增排.中部内陆省份和东北三省区域出现 $2\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 左右的减排.2030~2060 年居民源 VOCs 减排量不大,如图 4(i),主要在东部沿海省份有 $0.5\sim 1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的小幅减排.2060 年居民源 VOCs 排放主要分布在我国东部沿海省份以及内陆一些人口规模较大的城市中,长三角、珠三角等排放高值区存在 $7.5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以

上的排放.居民源 VOCs 排放主要来自人们生活中烹饪、建筑装修等活动,排放源种类较多,减排难度较大,排放量与人口分布密集程度密切相关⁰.因而居民源 VOCs 排放在 2020~2030 年地区分布的改变可能与人口流动有关,人口从内陆省份的农村向我国东部沿海省份城市迁移,随之带来了居民源 VOCs 排放分布的变化.

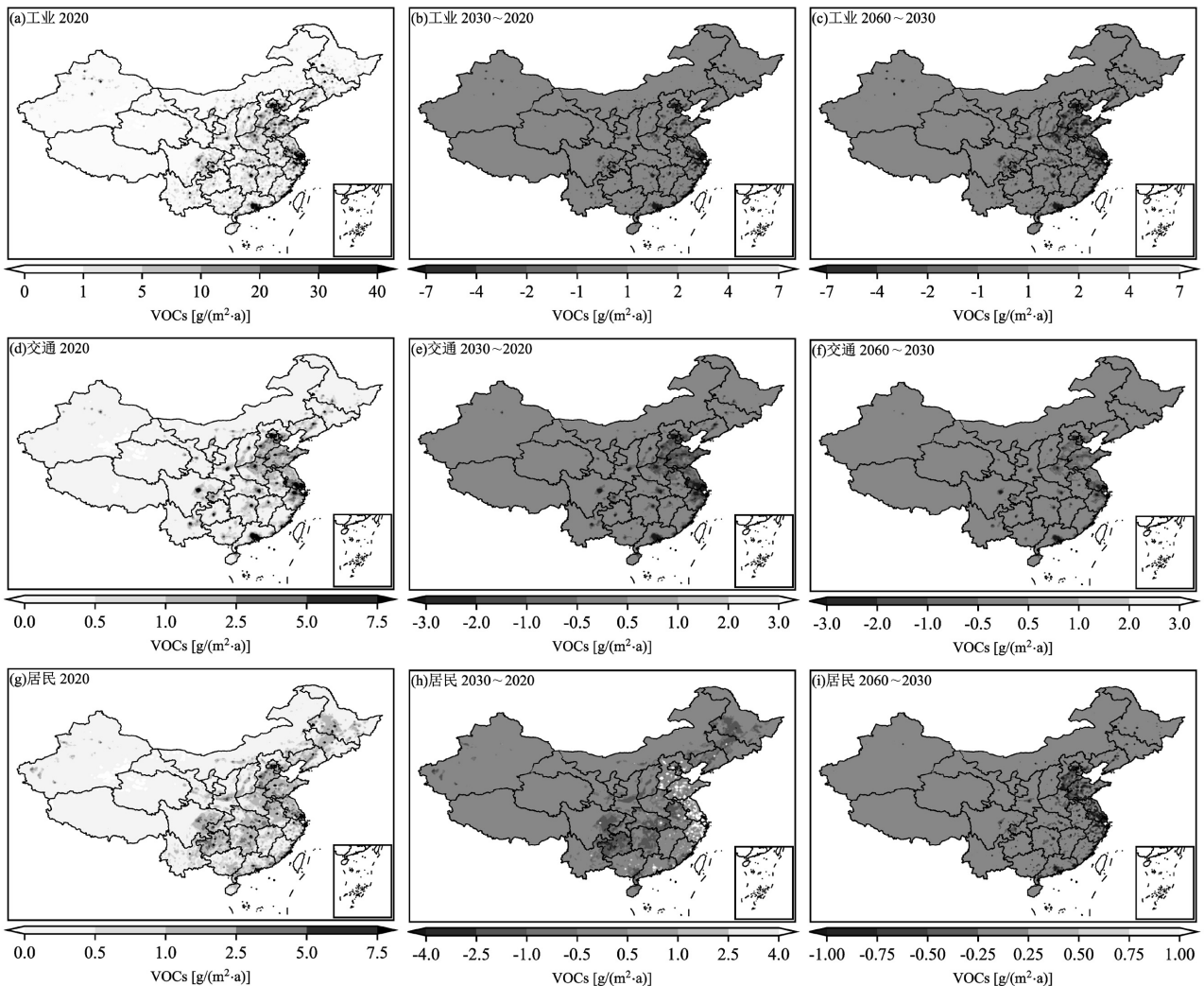


图 4 碳中和情景下 2020 年、2030 年、2060 年主要行业源的 VOCs 排放空间分布变化情况

Fig.4 The distribution of VOCs emissions from major sectors in 2020, 2030, 2060 under the carbon-neutral scenario in DPEC

审图号:GS(2024)0650 号

2.3 碳中和情景下我国 NO_x 人为排放的时空变化特征

如图 5,在对 NO_x 人为排放减排的预估中,2020~2060 年三个情景均呈现下降趋势,到 2060 年 DPEC 碳中和情景的 NO_x 减排幅度达到 88%,两个 SSP1 情景中 NO_x 减排幅度要略低于 DPEC 情景,分

别为 84%(SSP1-1.9)和 80%(SSP1-2.6).在 2020 年两个 SSP1 情景中的 NO_x 人为排放量要明显高于 DPEC 碳中和情景,其高出的部分主要来自电力源的排放,这可能是由于其对我国近 10a 来的大气环境治理政策及成效考虑不足导致的.因此尽管到 2060 年三个情景的减排比例差距较小,但在 2060 年

DPEC 碳中和情景预估的 NO_x 排放只有 SSP1-1.9 情景所预估的一半左右.三类情景对不同行业源排放占比的预估比较类似,电力源、工业源和交通源在 NO_x 排放当中均占据了一定的比例,而居民源排放几乎可以忽略.DPEC 碳中和情景和 SSP1-1.9 情景中电力源和交通源减排相对工业源更强一些,到 2060 年工业源将成为 NO_x 主要人为排放源,而在 SSP1-2.6 情景中电力源和交通源减排则要弱于另外两个情景.

图 6 显示了 DPEC 碳中和情景下 NO_x 不同行业源排放量的时空分布情况.由于居民源排放极少,因此不对其进行绘图和分析.2020 年工业源 NO_x 排放

高值区主要在我国中东部主要工业城市群中,如图 6(a),在长三角、珠三角、京津冀等地区的排放量超过 $15\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.如图 6(b),2020~2030 年工业源 NO_x 在我国大部分省份的主要城市表现为 $1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 左右的小幅减排,在黑龙江、内蒙古、陕西、山西等北部个别省份的主要城市中出现 $1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上的小幅增排.2030~2060 年工业源 NO_x 在全国范围内都呈现较明显的减排趋势,如图 6(c),减排高值区位于长三角、珠三角和京津冀等工业规模较大的城市群,减排量超过 $5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.至 2060 年上海、京津和其他一些工业中心城市中还存在小范围的 NO_x 排放高值区,排放量为 $7.5\sim 10\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.

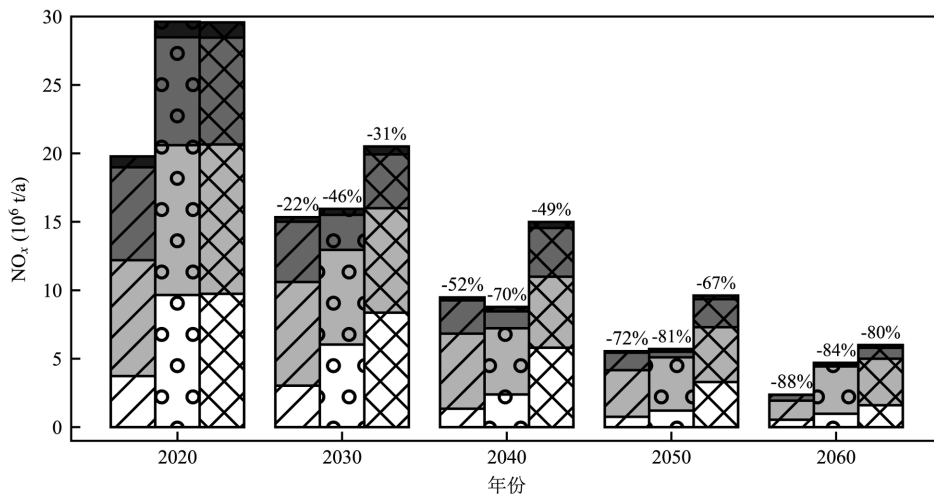


图 5 三个情景中 NO_x 全国排放总量 2020~2060 年变化对比图

Fig.5 Total NO_x emission for China from 2020 to 2060 under three scenarios

图中标记与颜色等含义同图 1

2020 年 NO_x 交通源排放高值区位于长三角、珠三角以及中东部地区省会城市,如图 6(d),这些地区排放量超过 $10\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$,同时在华北平原有大面积的排放量达 $2.5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上的区域.如图 6(e),2020~2030 年在长三角、珠三角以及中东部主要省会城市有超过 $3\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的减排,在华北平原 $1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 左右的减排.2030~2060 年减排比较明显,如图 6(f),在华北平原大部分地区都存在 $1.5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上的减排,其中部分城市区域超过 $3\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.在其他地区省会城市减排仍超过 $3\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$.总之交通源的 NO_x 减排是比较彻底而全面的,到 2060 年仅在珠三角和北京市区存在低于 $2.5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 的排放.

如图 6(g),2020 年 NO_x 电力源排放高值区主要位于长三角、珠三角以及一些省会城市和煤矿产区,排放量达到 $7.5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上.如图 6(h),2020~2030 年电力源 NO_x 减排主要分布在长三角、珠三角、京津冀和山东省,减排量在 $1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 左右,而在青海、四川和广西省个别城市出现局地 $1\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 左右的增排.2030~2060 年在全国绝大多数高排放地区电力源 NO_x 均表现为减排趋势,如图 6(i),这些区域减排都在 $3\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上,但在天津市出现了 $3\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上的增排.到 2060 年电力源 NO_x 排放在除上海、北京、天津、武汉和昆明这几个城市以外的区域都已降至较低水平,而在这几个城市仍有 $7.5\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{a})$ 以上的排放.

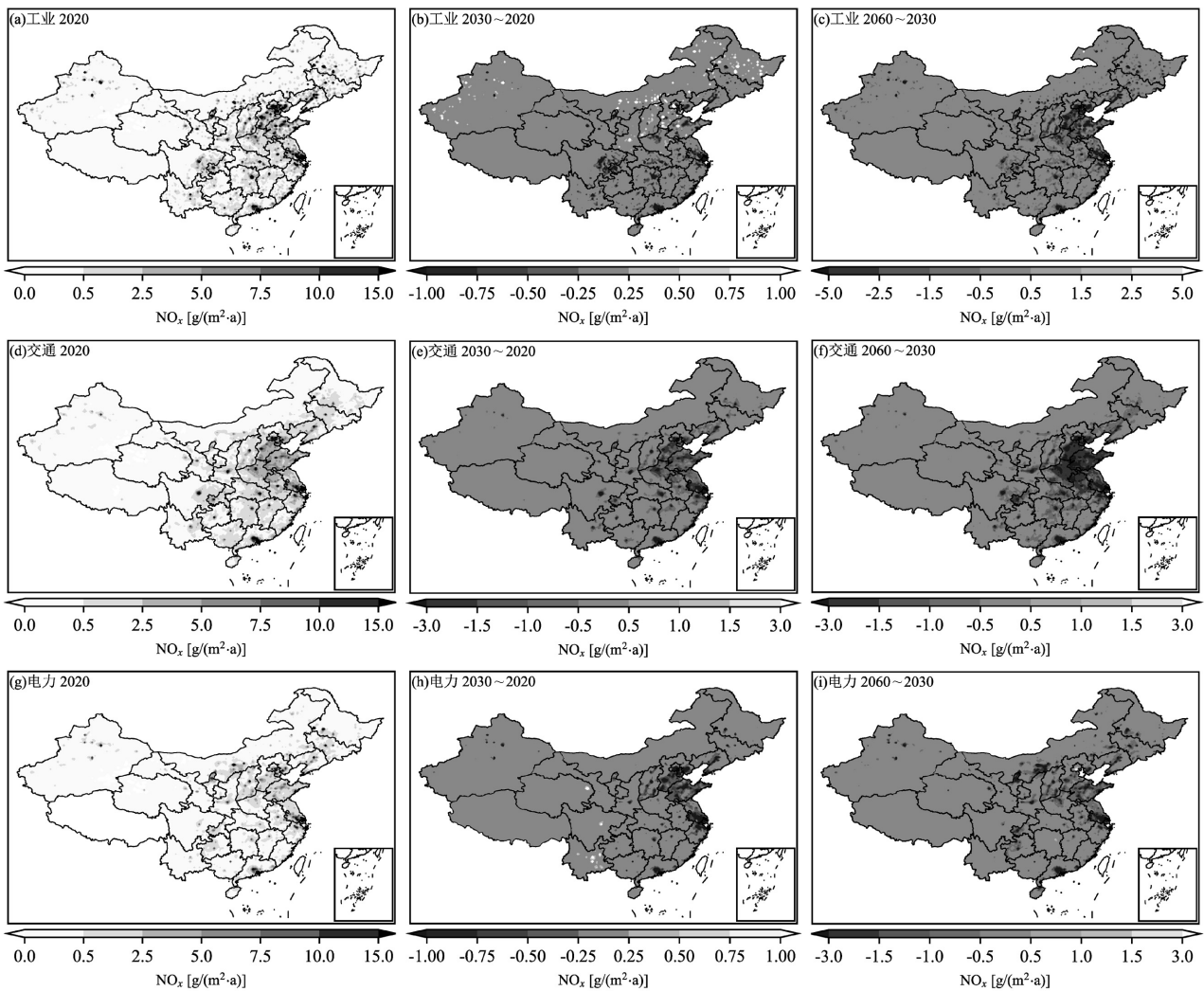


图 6 碳中和情景下 2020 年、2030 年、2060 年不同行业源的 NO_x 排放分布变化情况

Fig.6 The distribution of NO_x emissions from major sectors in 2020, 2030, 2060 under the carbon-neutral scenario in DPEC

审图号:GS(2024)0650 号

2.4 讨论

DPEC 减排情景路径的开发深度融合了 MEIC 中数百种污染源的技术演替过程^[19],充分地考虑了中国在过去 10a 间一系列大气环境治理措施,其对中国当前排放状况的描述更贴近现实,对未来情景的减排路径估计也更迎合我国政策导向和发展预期.在减排情景中,CO₂ 作为碳减排政策的主要目标物质之一,减排幅度较大,而模型中实现规模如此巨大的碳减排的主要手段是能源结构的大幅转变.各类化石燃料燃烧将会大幅减少,因此伴随燃烧过程排放的其他空气污染物如 VOCs 和 NO_x 也会出现减少.其中 VOCs 的种类复杂,主要人为排放来源不仅有燃烧过程,也有各类相关物质在工业生产、储运和使用中的排放,而 NO_x 的排放相对而言更集中在燃

烧过程中,因此仅就碳中和政策而言,本文认为其对 NO_x 的协同减排效果将会相对优于对 VOCs 的减排效果,这一定程度上也对应了 DPEC 在模型中降低了对 VOCs 减排的估计.

在 DPEC 的碳中和情景中,我国 VOCs 和 NO_x 的人为排放总量到 2060 年将出现明显的下降,但不同地区间的减排情况存在较大差异.在北京、上海等人口高度密集,城市化程度极高的大型城市中这两类污染物质的排放仍处于相对较高水平;而在一些人口分布比较分散,工业化程度偏低的城市和乡村中这两类物质的排放将会降到较低水平.这可能会导致特定地区的污染特征发生变化,进而影响当地业务部门的光化学污染控制战略.臭氧等二次污染物的生成过程受到复杂的化学机制控制,而本文仅

探讨了臭氧前体物的减排特征.使用大气化学模式模拟未来情景下特定地区大气污染物的浓度变化,或基于未来排放数据针对双碳情景下局地大气污染特征的变化制定新的污染控制策略可能是更进一步的研究方向.

碳中和目标的实现是一项需要各行各业做出创新和变革的艰巨任务,减排目标能否顺利实现还存在较大不确定性.在 DPEC 所预设的碳中和情景减排路径中,能源结构的大幅转变以及各行业电气化程度的不断加深是达成碳中和目标的重要举措.根据 DPEC 情景路径中给出的估计^[19],在碳中和情景下我国燃煤发电占比将由 2020 年的 70%到 2060 年降至 20%以下,并且余下燃煤电厂将全面应用碳吸收与捕集技术,同时风、光、水能等可再生能源发电占比将超过 60%以上,成为届时我国主要的电力来源.工业行业中电能使用比例将由 2020 年的 20%到 2060 年提升至 70%以上,交通行业的电能使用比例到 2060 年将提升至 50%以上.各行各业向低碳的转型都离不开对电能的清洁高效利用,Li 等^[24]认为,在向可再生能源的转型无法按预期实现的情况下,电动汽车在中国的快速普及并不能使得交通源污染物排放有快速削减.其他一些研究^[25-26]也都认为电力行业向可再生能源的转型将是我国实现碳中和目标的关键一步.截至 2023 年 12 月底,全国可再生能源装机量达到 15.16 亿 kW,占全国总装机量的 51.9%,但当前可再生能源的利用受气象因素和技术条件等限制,发电时数少,发电效率低,2023 年我国非水可再生能源发电比例仅为 17.24%^[27].可再生能源的广泛应用还需要电力行业在发电、并网传输、高效储能、调峰控制等一系列环节开展面向碳中和情景需求的深刻变革^[28-29],构建新型电力系统将面临诸多挑战.

3 结论

3.1 DPEC 碳中和情景中,我国 CO₂ 人为排放量在 2030 年达峰后迅速下降,到 2060 年时相比 2020 年降低 91%,减排比例介于 SSP1-1.9 情景的 100%和 SSP1-2.6 情景的 83%之间,而 VOCs 和 NO_x 的人为排放量自 2020~2060 年均保持下降趋势,其中 VOCs 人为排在 2060 年相比 2020 年降低 65%,NO_x 人为排放相比 2020 年降低 88%.相较两个 SSP 情景而

言,DPEC 碳中和情景中预估的人为 VOCs 减排更弱,而 NO_x 减排更强.DPEC 碳中和情景相比这两个 SSP 情景更充分地考虑了我国当前大气环境治理政策与实际排放的变化,减排路径预估也更迎合我国未来政策导向和发展预期.

3.2 DPEC 碳中和情景中,电力源和工业源在 CO₂ 减排中起主要作用,电力源减排相对更彻底.2060 年人为 CO₂ 排放中工业源的占比将达到 68%,排放高值区位于长三角、珠三角等大型城市群,排放量为 2000g/(m²·a)及以上.工业源和交通源对 VOCs 和 NO_x 的减排均起主要作用,交通源减排比较彻底.尽管工业源排放也在持续下降,但其始终是 VOCs 和 NO_x 的最主要人为源,至 2060 年其占比分别达到 70%(VOCs)和 59%(NO_x).其排放高值区分布在我国长三角、珠三角和京津冀等工业城市群,排放量分别为 20g/(m²·a)左右(VOCs)和 7.5g/(m²·a)以上(NO_x).此外,2060 年居民源 VOCs 排放占比将达到 25%,主要分布在东部沿海人口密集地区.电力源在 NO_x 中占次要地位,仅在天津、上海等几个城市存在 7.5g/(m²·a)以上的排放.

3.3 总体而言,DPEC 碳中和情景中预估的减排路径能够体现 CO₂,VOCs,NO_x 三类物质的协同减排特征,且相比两个 SSP1 情景额外考虑了近年来我国大气环境治理进程,对未来相关政策落实和技术演进也更贴近我国实际情况.但未来实际的排放变化趋势受到多方因素影响,具有较大不确定性.相关行业的科技创新和产业变革,尤其是能源电力行业能否按预期实现减排目标将会是我国实现双碳目标的重要依靠.

参考文献:

- [1] Zhai S, Jacob D J, Wang X, et al. Fine particulate matter (PM_{2.5}) trends in China, 2013~2018: separating contributions from anthropogenic emissions and meteorology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019,19(16):11031-11041.
- [2] Liu Z, Wild O, Doherty R M, et al. Benefits of net-zero policies for future ozone pollution in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2023,23(21):13755-13768.
- [3] Liu Z, Doherty R M, Wild O, et al. Contrasting chemical environments in summertime for atmospheric ozone across major Chinese industrial regions: the effectiveness of emission control strategies [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021,21(13):10689-10706.
- [4] Wu S, Duncan B N, Jacob D J, et al. Chemical nonlinearities in relating intercontinental ozone pollution to anthropogenic emissions [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009,36,L05806.

- [5] Duncan B N, Yasuko Y, Jennifer R O, et al. Application of OMI observations to a space-based indicator of NO_x and VOC controls on surface ozone formation [J]. *Atmospheric Environment*, 2010,44(18): 2213–2223.
- [6] Wang W, Ronald van der A, Ding J, et al. Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021,21(9):7253–7269.
- [7] IPCC. Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2023:184.
- [8] 徐北瑶,王体健,李树,等. “双碳”目标对我国未来空气污染治理和气候变化的影响评估 [J]. *科学通报*, 2022,67(8):784–794.
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 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022,67(8):784–794.
- [9] 丁一汇,李巧萍,柳艳菊,等. 空气污染与气候变化 [J]. *气象*, 2009, 35(3):3–14.
Ding Y H, Li Q P, Liu Y J, et al. Atmospheric aerosols, air pollution and climate change [J]. *Meteorological Monthly*, 2009,35(3):3–14.
- [10] 生态环境部. 关于印发《减污降碳协同增效实施方案》的通知 [EB/OL]. [2022-06-13]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk03/202206/t20220617_985879.html.
Ministry of Ecology and Environment. Notice on the issuance of the “implementation plan for synergistic efficiency improvement of pollution reduction and carbon reduction” [EB/OL]. 2022-06-13. https://www.mee.gov.cn/xxgk/2018/xxgk03/202206/t20220617_985879.html.
- [11] Liu Y and Wang T. Worsening urban ozone pollution in China from 2013 to 2017 – Part 1: The complex and varying roles of meteorology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020,20(11):6305–6321.
- [12] Lu X, Zhang L, Shen L. Meteorology and climate influences on tropospheric ozone: a review of natural sources, chemistry, and transport patterns [J]. *Current Pollution Reports*, 2019,5(4):238–260.
- [13] Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: an overview [J]. *Climatic Change*, 2011, 109(1):5–31.
- [14] Keywan R, Van Vuuren D P, Elmar K, et al. The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview [J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42:153–168.
- [15] Krieglger E, Edmonds J, Hallegatte S, et al. A new scenario framework for climate change research: the concept of shared climate policy assumptions [J]. *Climatic Change*, 2014,122(3):401–414.
- [16] Gidden M J, Riahi K, Smith S J, et al. Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century [J]. *Geoscientific Model Development*, 2019,12(4):1443–1475.
- [17] 张丽霞,陈晓龙,辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划(ScenarioMIP)概况与评述 [J]. *气候变化研究进展*, 2019,15(5):519–525.
Zhang L X, Chen X L, Xin X G. Short commentary on CMIP6 Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2019,15(5):519–525.
- [18] 翁宇威,蔡闻佳,王灿. 共享社会经济路径(SSPs)的应用与展望 [J]. *气候变化研究进展*, 2020,16(2):215–222.
Weng Y W, Cai W J, Wang C. The application and future directions of the Shared Socioeconomic Pathways (SSPs) [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2020,16(2):215–222.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Van Vuuren D P, Elke S, David E H J G, et al. Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm [J]. *Global Environmental Change*, 2017,42:237–250.
- [22] Rogelj J, Popp A, Calvin K V, et al. Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5°C [J]. *Nature Climate Change*, 2018,8:325–332.
- [23] 梁小明,陈来国,沈国锋,等. 中国生活源挥发性有机物排放清单 [J]. *环境科学*, 2021,42(11):5162–5168.
Liang X M, Chen L G, Shen G F, et al. Volatile Organic Compounds (VOCs) emission inventory from domestic sources in China [J]. *Environmental Science*, 2021,42(11):5162–5168.
- [24] Li X, Yan X. Fast penetration of electric vehicles in China cannot achieve steep cuts in air emissions from road transport without synchronized renewable electricity expansion [J]. *Energy*, 2024,301, 131737.
- [25] 金之钧,张川. 面向碳中和的中国能源转型路径思考 [J]. *北京大学学报自然科学版*, 2024,60(4):767–774.
Jin Z J, Zhang C. On China’s energy transition pathway towards carbon neutrality [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2024,60(4):767–774.
- [26] Duan H, Zhou S, Jiang K, et al. Assessing China’s efforts to pursue the 1.5°C warming limit [J]. *Science*, 2021,372(6540):378–385.
- [27] 李双成,王巧玲,刘迎陆. “双碳”目标下的中国可再生能源发展:机遇与挑战 [J]. *气候与环境研究*, 2024,29(3):390–398.
Li S C, Wang Q L, Liu Y L. Renewable energy development in China under dual carbon goal: Opportunities and Challenges [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2024,29(3):390–398.
- [28] 张智刚,康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2022,42(8):2806–2819.
Zhang Z G, Kang C Q. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022,42(8):2806–2819.
- [29] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示 [J]. *中国电机工程学报*, 2021,41(S1): 28–51.
Huang Y H, Ding T, Li Y T, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021,41(S1):28–51.

致谢： 此项工作在国家级计算天津中心的天河新一代超级计算机上完成,感谢“天河新一代超级计算机”的大力支持.本论文也得到了南京信息工程大学高性能计算中心的计算支持和帮助.

作者简介： 金宇翔(2001–),男,江苏苏州人,南京信息工程大学硕士研究生,研究方向为大气物理学与大气环境.202412030238@nuist.edu.cn.