长江三角洲区域大气PM_{2.5}和臭氧污染协同控制路径

戴海夏¹, 安静宇¹, 黄成^{1*}, 王红丽¹, 周敏¹, 乔利平¹, 胡磬遥¹, 楼晟荣¹, 杨超¹, 严茹莎¹, 姜克隽², 朱松丽²

1. 上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233;

2. 中国宏观经济研究院能源研究所, 北京 100038

* 联系人, E-mail: Huangc@saes.sh.cn

2021-07-31 收稿, 2021-11-12 修回, 2021-11-15 接受, 2021-11-17 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFC0213800, 2016YFC0207506)和上海市生态环境局重大科研项目(2020-03)资助

摘要 国家“碳达峰、碳中和”战略目标(以下简称“双碳”目标)的提出对长江三角洲(以下简称长三角)高质量一体化发展赋予了新的要求. 本文基于长三角区域精细化排放清单和WRF-CMAQ模型, 模拟了不同政策情景下区域空气质量改善情况. 结果显示, 绿色低碳情景(CP)较趋势照常情景(BAU)和末端强化情景(EP)具有更大的减排潜力, 是实现绿色美丽长三角目标的重要路径. CP情景下, 与2017年相比, 预计2025年SO₂、NO_x、NMVOCs(non-methane volatile organic compounds)、一次PM_{2.5}排放将分别下降55.1%、26.5%、25.2%、27%; 2035年, 则将分别下降66%、56.4%、36.1%、39.4%. 截至2035年, 区域PM_{2.5}年均值和臭氧日8 h最大值第90百分位数(O₃-8 h 90th)将分别达到26和129 μg m⁻³, 50%地级市PM_{2.5}年均浓度将达到世界卫生组织第二阶段指导值. 综合模拟结果, 中长期全国和区域持续同步推动主要污染物的减排, 将有望实现PM_{2.5}浓度持续改善和臭氧浓度的同步改善, 实现协同减排的目标. 近中期, 绿色美丽长三角政策驱动的以末端治理为主的大气污染治理措施仍将继续对污染减排具有重要贡献, 而中长期, 由“双碳”目标驱动的能源、产业、交通结构调整措施对污染减排具有关键作用. 持续大力推动NO_x和NMVOCs全面减排是实现PM_{2.5}与臭氧协同控制的关键. 在延续现有严格的末端控制政策的基础上, 进一步强化工业涂装、石化化工、橡塑、医药等涉挥发性有机物排放行业的产业结构调整, 以及深入推进交通运输结构调整与加强新能源车船推广是中长期区域协同控制PM_{2.5}和臭氧的重要抓手.

关键词 长江三角洲, 空气质量, PM_{2.5}, 臭氧, 协同控制, 数值模拟

近年来, 随着我国大气污染防治行动计划、打赢蓝天保卫战三年行动计划的深入推进, 空气质量总体呈现好转^[1-3]. 然而以细颗粒物(PM_{2.5})和臭氧为特征的区域复合型大气污染形势依然严峻. 尽管“十三五”期间, 我国大气PM_{2.5}污染防治取得坚实的成效, 然而, 全国年均人口加权PM_{2.5}暴露浓度水平(2019年, 48 μg m⁻³), 仍然超出世界卫生组织(World Health Organization, WHO)指导值近4倍, 99%的人口暴露在超过WHO指导值的大气环境中^[4]. PM_{2.5}污染的归因疾病负

担由于人口老龄化等影响依然存在上升风险^[5-7]. 未来, PM_{2.5}中二次组分浓度的削减成为PM_{2.5}浓度持续改善的关键和难点; 同时, 臭氧污染日益显现^[8], 并呈现影响范围扩大, 污染季延长的演变态势^[9]. 根据生态环境部发布的《中国生态环境状况公报》(<http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb>), 2020年, 全国337个城市臭氧最大8 h浓度第90百分位数的平均值为138 μg m⁻³, 比2015年上升12.6%. 根据研究, 未来中国近地面臭氧的健康危害在气候变化的驱动下将更加严峻, 尤其是在

引用格式: 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

Dai H X, An J Y, Huang C, et al. Roadmap of coordinated control of PM_{2.5} and ozone in Yangtze River Delta (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 2100–2112, doi: 10.1360/TB-2021-0774

人口密集、空气污染严重的地区^[10-12]。PM_{2.5}与臭氧已经成为制约中国下一步空气质量改善和影响人民群众健康的重要因子^[13,14]。另一方面,自习近平总书记在第七十五届联合国大会的讲话中提出中国“碳达峰、碳中和”战略目标(简称“双碳”目标)之后,科学制定“碳达峰、碳中和”行动路线图成为当前我国关注的重点。随着大气环境治理难度的加大,我国大气污染防治逐渐迈入深水区和瓶颈区,需要结合气候应对目标系统谋划大气污染防治战略。

长江三角洲(以下简称长三角)区域是我国社会发展的强劲活跃的增长极。2019年,长三角区域国内生产总值(GDP)总量达23.6万亿(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/>),占全国GDP近1/4,人口密集、集聚的产业链和密集的交通网络给区域带来了巨大的环境压力。根据中国多尺度排放清单模型(multi-resolution emission inventory for China, MEIC, <http://meicmodel.org/>),2019年长三角区域的氮氧化物(nitrogen oxides, NO_x)和非甲烷挥发性有机物(non-methane volatile organic compounds, NMVOCs)单位面积排放量均居全国前列。根据生态环境部发布的《中国生态环境状况公报》,2020年,尽管受到新冠肺炎疫情影响,长三角区域仍分别有46%和32%的地级市PM_{2.5}、臭氧年评价价值未达到国家空气质量标准。同时,研究表明,PM_{2.5}中的硝酸盐和有机物等二次组分占比以及大气氧化性逐年上升,已经成为制约长三角地区空气质量进一步改善的瓶颈问题^[15-20]。自2018年长三角一体化发展上升为国家战略之后,长三角一体化高质量发展迈入快车道。作为全国发展的示范区和样板区,长三角区域如何在气候应对的背景率先实现PM_{2.5}和臭氧的协同改善,走出一条特色的绿色低碳发展之路,是科学界和公众共同关注的问题。Cheng等人^[21]通过组合不同气候目标下的能源和污染治理情景,对全国及重点区域中长期空气质量改善路径开展研究。他们发现,在碳中和-最佳可行技术组合情景下,长三角区域2060年人口加权PM_{2.5}暴露浓度可降至7.4 μg m⁻³,较现有目标情景(国家自主减排贡献-现有末端控制政策组合)将削减62%,提出碳中和目标下的深度低碳能源转型措施将成为我国及重点区域PM_{2.5}达到WHO推荐值的必由之路。Yang等人^[22]通过集成能源-经济、空气质量模型、暴露反应关系模型,采用情景分析的方法评价了碳排放与大气污染物控制政策的环境和健康效益。研究发现,能源替代和污染控制组合情景较基准情景相比,全国PM_{2.5}平均浓度降低约

46%,臭氧浓度降低10%以上。目前,基于长三角区域精细化排放清单的空气质量协同改善路径的研究较为缺乏,仍需进一步深入研究导致PM_{2.5}和臭氧增长的关键前体物的减排潜力及其协同防控机制。为此,我们以长三角区域为研究对象,基于长三角区域精细化排放清单,依据国家对长三角区域空气质量改善目标的总体部署,设立不同的能源政策与污染防治政策情景组合,通过基于天气模式(weather research and forecasting, WRF)和通用多尺度空气质量模型(community multi-scale air quality, CMAQ)数值模拟与情景分析方法,预测未来不同空气质量改善路径下,区域环境空气质量水平,从而为指导我国重点区域中长期空气质量持续改善和保护人群健康提供技术支撑。

1 数据和方法

1.1 方法概述

为探索未来长三角区域社会经济发展、大气污染排放对空气质量演变的影响,本文调研了国家国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要(http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)、长江三角洲区域一体化发展规划纲要(http://www.gov.cn/zhengce/2019-12/01/content_5457442.htm)、长江三角洲区域生态环境共同保护规划等政策文件。我们参考Jiang等人^[23,24]开发的IPAC-AIM/Local经济-能源模型对中长期长三角区域社会经济发展和能源转型的总体趋势测算结果,结合An等人^[25]开发的长三角区域2017年高精度大气污染源排放清单,采用情景分析法、弹性系数法^[26,27]等,对长三角区域工业、交通、建筑、社会生活、农业等领域活动水平进行细化预测。并通过实地和文献^[21,28,29]调研确定未来长三角重点领域、行业在末端排放控制及结构调整方面实施的大气污染治理政策与技术,从而估算长三角区域目标年主要大气污染物排放水平的变化,并通过空气质量模型模拟预测不同情景下区域空气质量的变化。

1.2 情景设置

以2017年为基准年,设计长三角区域2018~2035年大气污染排放控制情景,共分成三类排放情景,即趋势照常(business as usual, BAU)情景、末端强化(end of pipe, EP)情景和绿色低碳(comprehensive policy, CP)情

景. BAU情景下, 延续“十三五”末国家和长三角区域大气污染防治既定政策, 包括重点领域结构调整和末端控制政策等. EP情景是在BAU情景基础上, 重点领域及行业采用更为高效的末端治理措施或实施最佳可行的治理技术(best available technology, BAT). CP情景则考虑在“双碳”目标政策体系的影响下, 在EP情景基础上, 电力、产业、交通、建筑等重点领域进一步实施清洁能源利用、结构优化调整和绿色转型升级措施. 为了考察不同类型措施的影响, CP情景下还设置了两个子情景: 绿色低碳-能源转型情景(CPE)和绿色低碳-结构转型情景(CPI). 情景定义、社会经济发展驱动力指标和主要能源利用参数见表1和2, 不同情景下重点领域和行业大气污染防治措施和参数设置见表S1.

1.3 空气质量模拟

研究以An等人^[25]开发的长三角区域2017年高精度大气污染源排放清单为基础, 作为人为源排放清单输

入多尺度区域空气质量模型CMAQ(Ver5.3.2), 开展多情景空气质量模拟, 预测未来长三角区域大气PM_{2.5}和臭氧浓度水平. 该清单基于环境统计、统计年鉴等活动水平资料, 结合本地实测排放因子与源谱数据研究, 对长三角41个地级市的固定燃烧源、工艺过程、溶剂使用、机动车、非道路移动机械、船舶、扬尘源、民用源和农业源等主要污染源排放的二氧化硫(sulfur dioxide, SO₂)、NO_x、一次PM_{2.5}、NMVOCs和氨(ammonia, NH₃)等主要大气污染物2017年的排放水平进行了计算分析. 该清单不确定性分析表明, 各类污染物不确定性在-58%~114%之间, 对电厂、锅炉、钢铁、水泥等工业行业排放计算的不确定性较Huang等人^[30]之前的研究显著降低, 但对活动水平较为复杂的非道机械、扬尘等源类, 其排放不确定性仍有待后续进一步降低. SO₂、NO_x、PM_{2.5}和O₃城市浓度数值模拟结果显示, 验证统计偏差在可接受范围.

空气质量模型采用的气象场由WRF(Ver3.7)提供, 模式垂直方向设为27层, 模式顶层为100 hPa. 气象初始

表 1 不同政策情景定义

Table 1 The definition of different policy scenarios

情景名称	缩写	情景定义
趋势照常	BAU	延续“十三五”末国家和区域大气污染防治既定政策, 包括能源、产业、交通、建筑等领域结构调整与末端控制措施
末端强化	EP	BAU情景基础上, 重点领域和行业采取更为高效的末端治理措施或实施BAT
绿色低碳-能源转型	CPE	EP情景基础上, 电力、工业、交通、建筑等重点领域实施“双碳”目标政策背景下清洁能源的转型
绿色低碳-结构转型	CPI	EP情景基础上, 工业、交通、建筑等重点领域实施“双碳”目标政策背景下产业结构、交通运输结构调整等绿色转型升级措施
绿色低碳	CP	CPE、CPI情景措施合集. 即EP情景基础上, 电力、工业、交通、建筑等重点领域实施“双碳”目标政策背景下清洁能源利用、结构优化调整和绿色转型升级措施

表 2 不同政策情景驱动力和能源利用的主要参数

Table 2 The major parameters of driving forces and energy consumption in different policy scenarios

指标	基准年2017	BAU/EP			CP		
		2025年	2030年	2035年	2025年	2030年	2035年
GDP(亿元)	198447	324144	418446	512437	324144	418446	512437
人口(亿人)	2.24	2.32	2.35	2.36	2.32	2.35	2.36
城镇化率(%)	66	73	75	77	73	75	77
能源消费总量(Tgce)	770.66	870.75	931.64	905.71	841.84	879.92	887.13
煤炭占一次能源比重(%)	57	51	41	36	46	35	30
石油占一次能源比重(%)	20	24	18	17	16	14	13
天然气占一次能源比重(%)	8	11	14	18	14	19	20
粗钢产量(Tg)	159.6	212.9	229.14	238.35	168.74	151.70	133.11
水泥产量(Tg)	425.34	423.13	426.71	429.29	370.62	318.91	274.63

场和侧边界资料选用NCEP/NCAR的 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球再分析场资料, 边界条件每6 h更新一次。模拟区域采用3层网格嵌套, 其网格精度分别为 $36 \text{ km} \times 36 \text{ km}$ (D01)和 $12 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ (D02), 最内层覆盖了整个长三角及周边中国东部区域。内层网格的初始场(IC)和边界场(BC)均来自于上层嵌套网格的模拟结果。最外层网格边界场(BC)取自MOZART全球模式数据(<https://www.acom.ucar.edu/wrf-chem/mozart.shtml>)。研究采用的空气质量模型选用SAPRC07气相化学机制、RADM水相化学机制、ISO-RROPIA无机盐化学机制和AERO6气溶胶化学机制, 采用14层垂直分层, 以2017年气象为基准开展模拟, 模拟时段为1、4、7和10月, 分别代表冬、春、夏、秋4个季节。根据浓度实测值与不同情景下浓度较基准情

景的变化率计算得到不同情景下浓度预测值。

2 结果与讨论

2.1 不同政策情景下主要大气污染物排放变化和源类减排贡献

根据区域排放清单的测算结果, 2017年长三角区域主要大气污染物 SO_2 、 NO_x 、NMVOCs和一次 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放量分别为1552、3235、4875和1597 Gg。图1展示了不同政策情景下, 长三角区域电力、工业、机动车、非道路移动源、船舶、民用源、扬尘源、农业源、其他源等污染物排放源在基准年和预测目标年主要大气污染物的排放变化情况。

图1 不同政策情景下长三角区域九类污染源主要大气污染物的排放变化趋势。(a) SO_2 排放量; (b) NO_x 排放量; (c) NMVOCs排放量; (d) 一次 $\text{PM}_{2.5}$ 排放量

Figure 1 Changes in emissions of major air pollutants from nine sources under different policy scenarios in the Yangtze River Delta. (a) SO_2 emissions; (b) NO_x emissions; (c) NMVOCs emissions; (d) primary $\text{PM}_{2.5}$ emissions

从预测结果来看,在BAU情景下,即在现有政策约束下,各主要污染物排放在2017~2020年间下降显著。然而,截至2025年,由于重点工业行业超低排放改造等既定政策措施基本完成,而随着产业、交通发展和用能需求增长,在无额外控制政策约束的情况下,各污染物的减排空间将逐渐变小,甚至呈现增长趋势。截至2025年,SO₂、NO_x、一次PM_{2.5}排放量较2017年分别削减34.5%、7.4%、11.9%,但NMVOCs排放量上升,增幅0.2%。截至2035年,SO₂、一次PM_{2.5}降幅进一步收窄,较2017年分别削减26.3%和6.3%,而NO_x、NMVOCs排放量上升,增幅分别为0.1%和26.7%。尤其是NMVOCs,随着规划发展的重点行业和新兴产业的快速发展,以及机动车保有量的持续增加,截至2035年,其排放量将较基准年出现明显的增长,而排放管控却缺乏有效的手段。

EP情景考虑了更为严格的末端控制政策,例如:实施全行业的锅炉、窑炉超低排放改造治理措施,进一步提升重点行业挥发性有机物收集治理效率及泄漏检测与修复(leak detection and repair, LDAR)覆盖率和运行稳定率,适度推广低挥发性有机物含量原辅料源头替代,机动车在2028年前后实施更为严格的排放标准,实施船舶低硫油提升计划和NO_x排放控制区等政策。截至2025年,SO₂、NO_x、NMVOCs、一次PM_{2.5}减排比例较基准情景相比,有所提升,较2017年可分别下降46.1%、9.6%、14.4%、15.7%。然而,由于这些末端控制措施的减排潜力在2030年后将基本耗尽,后续进一步削减污染物排放量的难度加大。截至2035年,上述污染物除了NO_x受益于船舶氮氧化物控制区政策以外,减排力度均有所下降,SO₂、NO_x、NMVOCs、一次PM_{2.5}较2017年分别下降41%、24.4%、7.3%、12.2%。尤其是NMVOCs,由于排放源的新增量大,并且以分散类、多样化的源类为主,难以通过末端严控措施加以有效控制,在EP情景下,2025~2035年,区域NMVOCs排放量仍将较2020年增长2%~6%。

CP情景反映了在碳达峰、碳中和背景下,实施深度能源产业绿色升级转型和最佳污染防治技术措施组合情景。该情景在EP情景的基础上,进一步加大了能源结构、产业结构、交通结构等领域的结构调整类措施力度,例如电源结构清洁化,工业行业清洁能源替代,高污染、高耗能产业淘汰和升级转型,新能源车、船、非道机械推广等相关措施,各污染物控制水平较EP情景有进一步增强。截至2025年,SO₂、NO_x、

NMVOCs、一次PM_{2.5}较2017年可分别下降55.1%、26.5%、25.2%、27%,反映出绿色转型措施在中短期污染排放控制中同样具有重要作用。截至2035年,由于实施更为彻底的能源和产业结构转型措施,各类污染物排放量又有进一步下降,SO₂、NO_x、NMVOCs、一次PM_{2.5}较2017年分别下降66%、56.4%、36.1%、39.4%。分解能源转型情景(CPE)和结构转型情景(CPI),发现能源转型类措施对于SO₂的减排贡献更大,结构转型类措施则对NMVOCs和一次PM_{2.5}的减排贡献更大。

由于氮氧化物和挥发性有机物排放对大气PM_{2.5}和臭氧污染形成具有重要影响,两者协同减排对于实现空气质量达标具有重要意义。而根据长三角排放清单研究^[25],NO_x排放主要来自移动源(57.5%)、火电(13.8%)、工艺过程(13.4%)和锅炉(12.9%)等;NMVOCs则主要来源于工业源排放,包括工艺过程和工业溶剂使用(61.4%)、移动源(19.5%)等。为此,以下针对NO_x和NMVOCs协同削减的重点源类,进一步分析中长期不同情景下工业源的行业减排贡献和机动车不同车型的减排贡献,从而深入分析重点源类的减排潜力。

2.2 不同政策情景下重点源关键污染物减排贡献

2.2.1 工业源

图2展示了不同政策情景下,长三角区域工业源NO_x和NMVOCs的变化情况。从NO_x排放变化情况来看,EP情景实施的末端强化措施不足以抵消新增排放,仅在CP情景中,工业源NO_x排放实现逐步下降。从NO_x排放贡献行业来看,电力、钢铁、水泥建材、石化化工等高耗能行业实施能源、产业结构调整措施是NO_x减排的主要贡献因子。然而,即使是在CP情景,工业用电增长和重点行业使用天然气等因素会致使区域中短期NO_x排放量增大。

从NMVOCs排放情况来看,EP、CPE和CPI情景下实施的减排措施均只能基本抵消排放新增量,抑制NMVOCs排放增长,仅CP情景可实现NMVOCs的稳步下降。从CP情景工业源NMVOCs减排行业贡献来看,工业涂装、石化化工、橡塑、医药、木材家具等行业实施产业结构调整是NMVOCs减排的主要贡献因素。此外,这些行业排放的NMVOCs中有不少物种具有较高的臭氧生成潜势(OFP)和二次有机气溶胶(SOA)生成潜势,对PM_{2.5}和臭氧生成具有重要贡献^[31~33]。因此,为了加强区域中长期PM_{2.5}和臭氧协同防控,工业源的防控

图 2 长三角区域工业源各情景 NO_x 和NMVOCs排放变幅及行业贡献. (a) 工业源 NO_x 排放较基准年变幅. (b) 不同工业行业对 NO_x 的减排贡献. (c) 工业源NMVOCs排放较基准年变幅. (d) 不同工业行业对NMVOCs的减排贡献

Figure 2 Changes in NO_x and NMVOCs emissions from industrial sources and contribution of each industrial sector to emission reductions under different scenarios in the Yangtze River Delta. (a) The changes in NO_x emissions from industrial sources compared to the base year under different scenarios. (b) The contributions of each industrial sector to NO_x emission reductions under different scenarios. (c) The changes in NMVOCs emissions from industrial sources compared to the base year under different scenarios. (d) The contributions of each industrial sector to NMVOCs emission reductions under different scenarios

策略除了进一步提升挥发性有机物末端治理和源头替代水平之外, 需更加注重推进石化化工、工业涂装、橡塑、木材家具等行业产业结构的优化调整.

2.2.2 机动车

图3展示了机动车在不同政策情景 NO_x 和NMVOCs排放的变化情况. 从各情景污染物的排放变化趋势来看, BAU情景下, 考虑未来区域机动车保有量仍呈现增长趋势、国六排放标准实施和老旧车辆不断淘汰更新政策实施等影响因素, 机动车 NO_x 和NMVOCs的排放将呈现小幅波动并略有增长趋势. EP情景下, 考虑中重型货车、轻型车等在2028年前后进一步实施国七新标准的影响, 区域中长期机动车 NO_x 排放将保持下降趋势. CPE情景下, 考虑蓄电池技术、氢燃料电池技术的扩大应用^[34], 新能源和清洁能源机动车的推广将明显加快, 中重型货车、公交车、大中型客车等 NO_x 排放出现显著的削减, 同时小微型客车的NMVOCs排放也会明显减少. CPI情景考虑高污染车淘汰和大宗货物运输

公转铁、公转水、发展多式联运等交通运输结构调整政策, 使中重型货车 NO_x 排放量进一步减少; 倡导绿色公共出行等政策, 也将使小微型客车的NMVOCs排放有所削减. 在能源转型和结构调整两类措施组合的CP情景下, 机动车 NO_x 和NMVOCs排放量较BAU情景分别削减了71%和63%. 从减排效果看, 机动车能源清洁化举措对 NO_x 和NMVOCs的减排作用更大, 高污染车辆淘汰等车型结构优化举措对 NO_x 的减排贡献也较大. 因此, 中长期区域机动车的深入减排, 需多措并举, 包括持续提升排放标准、加大推进车队清洁能源推广、加快高污染重型货车淘汰更新, 以及持续推进交通运输结构调整, 尤其是货物运输结构的优化.

2.3 重点领域减排措施对污染物减排贡献的分析

为了鉴别重点领域中长期大气污染防治政策的减排潜力, 对长三角区域2018~2035年重点领域和行业的既定、可行减排措施进行分类梳理与测算, 绘制了CP

图3 长三角区域机动车各情景 NO_x 和NMVOCs排放变幅与车型贡献。(a)不同情景下机动车 NO_x 排放较基准年变幅。(b)不同情景下各车型 NO_x 减排比例。(c)不同情景下机动车NMVOCs排放较基准年变幅。(d)不同情景下各车型对NMVOCs的减排贡献

Figure 3 Changes in NO_x and NMVOCs emissions from motor vehicles and contributions of each vehicle model to emission reductions under different scenarios in the Yangtze River Delta. (a) The changes in NO_x emission of motor vehicles compared to the base year under different scenarios. (b) The contribution of each vehicle model to NO_x emission reductions under different scenarios. (c) The changes in NMVOCs emission of motor vehicles compared to the base year under different scenarios. (d) The contribution of each vehicle model to NMVOCs emission reductions under different scenarios

情景下,不同减排政策或措施对 SO_2 、 NO_x 、NMVOCs、一次 $\text{PM}_{2.5}$ 四类污染物的减排贡献图,并对重点污染物 NO_x 和NMVOCs减排措施的减排贡献进行了排序(图4)。

从图4可以看出,末端治理类措施在2030年前仍将发挥重要作用。但随着先进末端治理技术在电力、工业和交通等部门的广泛应用,其带来的环境收益将逐渐减少;而“双碳”目标政策驱动下的能源转型和结构调整措施,不仅在近中期通过抑制化石能源消费发挥一定的减排贡献,并且在2030年之后,减排贡献将逐渐增强。

从关键污染物 NO_x 和NMVOCs的变化趋势来看,随着区域社会经济发展和人口增长,未来两种污染物排放量均会保持明显的增长趋势,近中期机动车、船、机械升级提标对 NO_x 的削减作用显著。而2030年之后,末端治理措施的减排潜力逐渐降低,机动车船能源结构优化、交通运输结构调整,以及高耗能产业的结构调整将对 NO_x 的持续削减起到至为关键的作用;对于NMVOCs,污染排放削减仍面临较大的挑战。一方面,

预测未来涉挥发性有机物排放的诸如石化化工、溶剂使用等传统行业,以及电子信息等新兴行业的产品需求仍将稳定增长,致使NMVOCs新增排放继续增长。另一方面, NMVOCs排放削减与电力、工业等领域清洁能源转型的关系较小,并且NMVOCs排放源过于分散和多样化,末端控制难度较大。要进一步削减其排放,需要从产业绿色转型升级、低挥发性原辅料源头替代、全过程精细化管理等方向继续深入挖掘减排空间。

从 NO_x 和NMVOCs主要减排措施的减排贡献排序结果看,在用车标准提升、非道路移动机械电动化、非道路移动机械标准提升、新能源车推广和产业结构调整是 NO_x 减排潜力较高的措施。而挥发性有机物治理与源头替代、产业结构调整、在用车标准提升、新能源车推广、非道机械电动化是NMVOCs减排潜力较高的措施。其中,在用车标准提升、非道路移动机械电动化、新能源车推广、产业结构调整具有较好的 NO_x 和NMVOCs协同控制作用。

图4 不同减排政策或措施对主要污染物的减排贡献。(a)~(d) 结构调整和末端控制措施对SO₂、NO_x、NMVOCs、一次PM_{2.5}的减排贡献。(e)、(f) NO_x和NMVOCs各项减排措施的减排贡献排序

Figure 4 Contributions of different policies or measures to emission reductions of major air pollutants. (a)~(d) Contributions of restructuring measures and end of pipe controls to emission reduction of SO₂, NO_x, NMVOCs, and primary PM_{2.5}. (e), (f) Ranking of contributions of each measure to emission reductions of NO_x and NMVOCs

2.4 不同情景下长三角区域空气质量的预测结果

2.4.1 模型验证

基于长三角各个城市国控点的PM_{2.5}日均浓度和臭氧日最大8 h浓度实测数据, 选取平均分数偏差(mean fractional bias, MFB)和平均分数误差(mean fractional error, MFE)两个指标^[35], 对基准年份模式模拟性能进行统计验证。如图5所示, PM_{2.5}和臭氧各个月份MFB指标的第25与第75百分位数基本都分布在标准值范围, MFE指标则更多都达到了目标值范围^[35], 表明多数城市模拟结果处于可接受范围, 模式模拟性能基本可靠。

2.4.2 模拟结果

区域外围减排比例依据Shi等人^[36]的研究结果作为边界条件。基于空气质量模型方法, 针对长三角中长期不同情景下区域PM_{2.5}年均浓度和臭氧日最大8 h第90百分位浓度进行了预测。不同情景下区域预测浓度变化趋势见图6, 区域PM_{2.5}浓度随着各情景减排力度的加强而逐步下降。2025年, 在BAU和EP情景下, 长三角区域PM_{2.5}年均浓度可分别达到38和36 μg m⁻³, 仍高于国家二级标准限值(35 μg m⁻³); 仅在CP情景下, PM_{2.5}年均浓度将达到34 μg m⁻³, 实现区域平均达标, 区域41

图5 2017年长三角地区城市的PM_{2.5}和臭氧8 h最大值模拟与观测数据平均浓度的MFB(a)和MFE(b)

Figure 5 MFB (a) and MFE (b) between the simulation and observation data for average concentrations of PM_{2.5} and ozone 8 h maximum of the cities in the YRD region in 2017

图6 各政策情景下区域PM_{2.5}与臭氧预测浓度分布

Figure 6 Predicted regional PM_{2.5} and O₃ concentration distribution under different policy scenarios

个城市中将有24个(59%)城市达标,主要集中在区域中南部地区。截至2035年,CP情景下,区域PM_{2.5}年均浓度将达到26 $\mu\text{g m}^{-3}$,基本实现区域全面达标。从臭氧浓度指标来看,改善幅度总体将显著低于PM_{2.5},然而,不同情景改善幅度也随着减排幅度的增加而小幅增长。在BAU情景下,前体物的减排力度虽然相对较弱,但由于考虑了全国层面NO_x和NMVOCs同步减排,2025和

2035年区域臭氧浓度也将呈现5%和10%的下降。在CP情景下,2025年区域臭氧平均浓度约为149 $\mu\text{g m}^{-3}$,较2017年下降了10%,28个城市实现达标($\leq 160 \mu\text{g m}^{-3}$);2035年,区域臭氧平均浓度约为129 $\mu\text{g m}^{-3}$,较2025年CP情景进一步下降了13%,所有城市臭氧浓度实现达标。由分析结果可知,边界背景对臭氧浓度影响不容忽视。由于本研究不同情景下的边界条件设置一致,因此,

若将BAU情景下臭氧浓度的改善视为背景减排贡献,将CP情景与BAU情景下臭氧浓度的改善差异视为长三角区域内臭氧改善贡献,区域外减排对长三角区域臭氧的改善贡献可达50%。由此可见,全国和区域的协同减排对控制臭氧污染更为有效。综合以上模拟结果来看,中长期全国和区域持续大力协同推进主要污染物减排,将有望推进PM_{2.5}浓度的持续改善和臭氧浓度的同步改善,从而实现两者的协同控制。

本研究基于长三角区域精细化排放清单,通过构建绿色美丽长三角政策和“双碳”目标政策驱动下的不同情景,分析了长三角区域中长期大气污染排放以及空气质量变化趋势,并且绘制了主要污染物实施既定和可行减排措施的减排路径与关键污染物减排措施的潜力排序图。相关研究结果可为未来我国重点区域空气质量持续改善和应对气候变化双重挑战的发展路径提供有价值的参考。

通过情景设计,本研究重点探讨了PM_{2.5}和臭氧的重要前体物——NO_x和NMVOCs在不同协同减排情景下对长三角区域空气质量改善的影响。BAU情景下,考虑延续“十三五”末大气污染控制政策,即NO_x和NMVOCs减排与SO₂和颗粒物的减排力度存在差距,尤其是NMVOCs减排存在明显短板的情况(NO_x减排比例为0~7%,NMVOCs呈现增长趋势)。EP情景下,实施末端增强措施,如重点行业锅炉炉窑全面完成超低排放改造、轻型汽油车和重型柴油车提升至国七排放标准、实施船舶排放NO_x控制区以及VOCs治污设施综合治理效率提升等,NO_x和NMVOCs减排比例均有所提升,但NMVOCs减排力度仍显不足(NO_x减排比例为10%~24%,NMVOCs减排比例为7%~14%)。空气质量模拟结果显示,BAU和EP情景下,2025年区域PM_{2.5}平均浓度仍然无法实现达标。CP情景下,实施深度能源和产业结构调整措施,NO_x和NMVOCs的减排力度均较

BAU情景下得到明显提升(NO_x减排比例为26%~56%,NMVOCs减排比例为25%~36%)。CP情景测算的主要污染物削减比例与Tong等人^[28]和Shi等人^[36]对全国中长期绿色低碳和大气污染防治强化组合情景的削减比例类似(表3)。模拟结果表明,随着前体物减排力度的加大,区域大气PM_{2.5}和臭氧可实现双达标(CP情景下,2035年PM_{2.5}年均浓度为26 μg m⁻³,O₃-8 h 90th为129 μg m⁻³)。这与Shi等人^[36]对长三角区域空气质量模拟结果接近(2035年,CAEP-CP情景下PM_{2.5}年均浓度为25 μg m⁻³,O₃-8 h 90th为132 μg m⁻³)。

本研究还存在一定的局限性:一是本文研究时段还未对“双碳”目标政策规划的完整时间段进行预测,并且未纳入碳排放控制技术的分析,因此可能存在对能源政策环境效益的低估;二是情景构建主要依据当前既定以及对未来可预见的减排技术或政策措施的组合,尚未能对NO_x和挥发性有机物分级优化减排方案进行详细探讨;三是未开展不同情景方案下主要措施实施的成本效益分析,未能对区域减排方案的经济成本提出参考依据;四是尚未基于长三角区域内部污染物传输特征和污染水平空间分布,深入分析“分区施策”管控PM_{2.5}和臭氧重要前体物的量化方案。

3 结论

基于绿色美丽长三角政策和“双碳”目标政策构建的绿色低碳情景(CP)与基准情景(BAU)和末端强化情景(EP)相比,可以带来更多减排和空气质量改善的效益。以2017年为基准年,在CP情景下,2025年SO₂、NO_x、NMVOCs和一次PM_{2.5}将分别减排55.1%、26.5%、25.2%、27%;2035年SO₂、NO_x、NMVOCs和一次PM_{2.5}将分别减排66%、56.4%、36.1%、39.4%;并可实现2035年区域大气PM_{2.5}和O₃双达标。

2030年之前,绿色美丽长三角驱动的大气污染末

表3 CP情景主要污染物排放变化与其他同类研究的对比

Table 3 Comparison of emission changes of major pollutants under CP scenario with other studies

文献	基准年	预测年	情景名称	研究区域	污染物减排比例(%)			
					SO ₂	NO _x	NMVOCs	PM _{2.5}
本研究	2017	2030	CP	长三角	44	48	32	35
本研究	2017	2035	CP	长三角	66	58	36	40
[28]	2015	2030	SSP1-26-BHE	全国	66	56	34	58
[36]	2019	2030	CAEP-CP	全国	42	42	28	44
[36]	2019	2035	CAEP-CP	全国	57	58	42	60

端控制政策在区域的大气污染减排中具有主导作用,近中期仍需继续执行更严格的大气污染末端治理政策。2030年之后,传统末端控制政策带来的环境收益将逐渐减少,“双碳”目标政策驱动的结构调整类措施将在区域中长期空气质量持续改善中起到关键的核心驱动作用,应进一步深入推进能源产业绿色低碳转型。

持续大力推动 NO_x 和NMVOCs全面减排是实现

$\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧协同控制的关键。为实现 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧双达标,长三角区域应在强化工业与交通领域末端控制水平的基础上,重点关注石化化工、工业涂装、木材家具等工艺过程源和溶剂使用源的产业结构调整与源头替代、机动车船机械的能源结构优化,区域 NO_x 和NMVOCs排放分别应在2017年基础上降低56%和40%以上。

参考文献

- Zhang Q, Geng G N. Impact of clean air action on $\text{PM}_{2.5}$ pollution in China. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 1845–1846 [张强, 耿冠楠. 中国清洁空气行动对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50: 439–440]
- Xue T, Liu J, Zhang Q, et al. Rapid improvement of $\text{PM}_{2.5}$ pollution and associated health benefits in China during 2013–2017. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 1847–1856 [薛涛, 刘俊, 张强, 等. 2013–2017年中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的快速改善及其健康效益. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50: 441–445]
- Zhang X Y, Xu X D, Ding Y H, et al. The impact of meteorological changes from 2013 to 2017 on $\text{PM}_{2.5}$ mass reduction in key regions in China. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 1885–1902 [张小曳, 徐祥德, 丁一汇, 等. 2013–2017年气象条件变化对中国重点地区 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度下降的影响. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50: 483–500]
- Health Effects Institute. State of Global Air 2020: A Special Report on Global Exposure to Air Pollution and its Health Impacts. 2020
- Wang Q, Wang J, Zhou J, et al. Estimation of $\text{PM}_{2.5}$ -associated disease burden in China in 2020 and 2030 using population and air quality scenarios: A modelling study. *Lancet Planet Health*, 2019, 3: 71–80
- Wang Q, Zhu H H, Du P, et al. Health benefit of “14th Five-Year” and medium & long-term $\text{PM}_{2.5}$ control targets in Beijing-Tianjin-Hebei and its surrounding areas (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2021, 34: 220–228 [王倩, 朱欢欢, 杜鹏, 等. 京津冀及周边地区“十四五”及中长期 $\text{PM}_{2.5}$ 污染控制目标的健康效益预估研究. *环境科学研究*, 2021, 34: 220–228]
- Rafaj P, Kieseewetter G, Krey V, et al. Air quality and health implications of 1.5°C–2°C climate pathways under considerations of ageing population: A multi-model scenario analysis. *Environ Res Lett*, 2021, 16: 045005
- Wang Y, Gao W, Wang S, et al. Contrasting trends of $\text{PM}_{2.5}$ and surface-ozone concentrations in China from 2013 to 2017. *Natl Sci Rev*, 2020, 7: 1331–1339
- Li H, Peng L, Bi F, et al. Strategy of coordinated control of $\text{PM}_{2.5}$ and ozone in China (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2019, 32: 1763–1778 [李红, 彭良, 毕方, 等. 我国 $\text{PM}_{2.5}$ 与臭氧污染协同控制策略研究. *环境科学研究*, 2019, 32: 1763–1778]
- Chen K, Fiore A M, Chen R, et al. Future ozone-related acute excess mortality under climate and population change scenarios in China: A modeling study. *PLoS Med*, 2018, 15: e1002598
- Westervelt D M, Ma C T, He M Z, et al. Mid-21st century ozone air quality and health burden in China under emissions scenarios and climate change. *Environ Res Lett*, 2019, 14: 074030
- Guan Y, Xiao Y, Wang Y, et al. Assessing the health impacts attributable to $\text{PM}_{2.5}$ and ozone pollution in 338 Chinese cities from 2015 to 2020. *Environ Pollut*, 2021, 287: 117623
- Guo Y, Jiang Y D, Huang B Z, et al. Health impact of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 and forecasts for next 10 years in China (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2021, 34: 1023–1032 [郭云, 蒋玉丹, 黄炳昭, 等. 我国大气 $\text{PM}_{2.5}$ 及 O_3 导致健康效益现状分析及未来10年预测. *环境科学研究*, 2021, 34: 1023–1032]
- Wang Y, Hu J, Zhu J, et al. Health Burden and economic impacts attributed to $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 in China from 2010 to 2050 under different representative concentration pathway scenarios. *Resour Conserv Recycl*, 2021, 173: 105731
- Ding A, Huang X, Nie W, et al. Significant reduction of $\text{PM}_{2.5}$ in eastern China due to regional-scale emission control: Evidence from SORPES in 2011–2018. *Atmos Chem Phys*, 2019, 19: 11791–11801
- Li K, Jacob D J, Liao H, et al. Anthropogenic drivers of 2013–2017 trends in summer surface ozone in China. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, 116: 422–427
- Li K, Jacob D J, Shen L, et al. Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: Anthropogenic and meteorological influences. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20: 11423–11433
- Tan Z, Lu K, Jiang M, et al. Daytime atmospheric oxidation capacity in four Chinese megacities during the photochemically polluted season: A case study based on box model simulation. *Atmos Chem Phys*, 2019, 19: 3493–3513
- Wang Y S, Li W J, Gao W K, et al. Trends in particulate matter and its chemical compositions in China from 2013–2017. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 1857–1871 [王跃思, 李文杰, 高文康, 等. 2013–2017年中国重点区域颗粒物质量浓度和化学成分变化趋势. *中国科学: 地球科学*,

- 2020, 50: 453–468]
- 20 Geng G N, Xiao Q Y, Zheng Y X, et al. Impact of China's Air Pollution Prevention and Control Action Plan on PM_{2.5} chemical composition over eastern China. *Sci China Earth Sci*, 2019, 62: 1872–1884 [耿冠楠, 肖清扬, 郑逸璇, 等. 实施《大气污染防治行动计划》对中国东部地区PM_{2.5}化学成分的影响. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50: 469–482]
 - 21 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, nwab078
 - 22 Yang J, Zhao Y, Cao J, et al. Co-benefits of carbon and pollution control policies on air quality and health till 2030 in China. *Environ Int*, 2021, 152: 106482
 - 23 Jiang K J, Chen S, He C, et al. Energy transition, CO₂ mitigation, and air pollutant emission reduction: Scenario analysis from IPAC model. *Nat Hazards*, 2019, 99: 1277–1293
 - 24 Jiang K J, He C M, Jiang W Y, et al. Transition of the Chinese economy in the face of deep greenhouse gas emissions cuts in the future. *Asian Econ Policy Rev*, 2021, 16: 142–162
 - 25 An J, Huang Y, Huang C, et al. Emission inventory of air pollutants and chemical speciation for specific anthropogenic sources based on local measurements in the Yangtze River Delta region, China. *Atmos Chem Phys*, 2021, 21: 2003–2025
 - 26 Chang S C, Zheng Y J, Zeng W T, et al. Strategies for PM_{2.5} in Guangdong Province to achieve the WHO-II air quality target from the perspective of synergistic control with CO₂ (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2021, 34: 2105–2112 [常树诚, 郑亦佳, 曾武涛, 等. 碳协同减排视角下广东省PM_{2.5}实现WHO-II目标策略研究. *环境科学研究*, 2021, 34: 2105–2112]
 - 27 Hao J M, Yin W L, Cen K F. Strategies and Approaches for PM_{2.5} Pollution Prevention and Control in China (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016. 585–605 [郝吉明, 尹伟伦, 岑可法. 中国大气PM_{2.5}污染防治策略与技术途径. 北京: 科学出版社, 2016. 585–605]
 - 28 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. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20: 5729–5757
 - 29 Xing J, Lu X, Wang S, et al. The quest for improved air quality may push China to continue its CO₂ reduction beyond the Paris Commitment. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 29535–29542
 - 30 Huang C, Chen C H, Li L, et al. Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11: 4105–4120
 - 31 Meng B W, Li Y B, Meng J, et al. Industrial emission characteristics and control countermeasures of VOCs in Chinese rapid economic development areas (in Chinese). *Environ Sci*, 2021, 42: 1023–1038 [孟博文, 李永波, 孟晶, 等. 我国经济快速发展区工业VOCs排放特征及管控对策. *环境科学*, 2021, 42: 1023–1038]
 - 32 Jing S A, Gao Y Q, Shen J D, et al. Characteristics and reactivity of ambient VOCs in urban Hangzhou, China (in Chinese). *Environ Sci*, 2020, 41: 5306–5315 [景盛翱, 高雅琴, 沈建东, 等. 杭州市城区挥发性有机物污染特征及反应活性. *环境科学*, 2020, 41: 5306–5315]
 - 33 Feng N, Tang M X, Li M L, et al. Research on the influence of VOCs on the coupling generation of PM_{2.5} and O₃ in Shenzhen (in Chinese). *China Environ Sci*, 2021, 41: 11–17 [冯凝, 唐梦雪, 李孟林, 等. 深圳市城区VOCs对PM_{2.5}和O₃耦合生成影响研究. *中国环境科学*, 2021, 41: 11–17]
 - 34 International Energy Agency. Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector. Special Report, 2021
 - 35 Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models. *Atmos Environ*, 2006, 40: 4946–4959
 - 36 Shi X, Zheng Y, Lei Y, et al. Air quality benefits of achieving carbon neutrality in China. *Sci Total Environ*, 2021, 795: 148784

补充材料

表S1 不同政策情景下重点部门和行业大气污染防治措施和参数设置

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “长江三角洲区域大气PM_{2.5}和臭氧污染协同控制路径”

Roadmap of coordinated control of PM_{2.5} and ozone in Yangtze River Delta

Haixia Dai¹, Jingyu An¹, Cheng Huang^{1*}, Hongli Wang¹, Min Zhou¹, Liping Qiao¹, Qingyao Hu¹, Shengrong Lou¹, Chao Yang¹, Rusha Yan¹, Kejun Jiang² & Songli Zhu²

¹ State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China;

² Energy Research Institute, Chinese Academy of Macro-Economy Research, Beijing 100038, China

* Corresponding author, E-mail: Huangc@saes.sh.cn

As dynamic growth engine of the economy of China, the Yangtze River Delta (YRD) region is one of the most densely populated regions around the globe with advanced industrial cluster and developed transportation network, which has brought the problem of high intensity of air pollutant emissions including nitrogen oxides (NO_x), volatile organic compounds (VOCs), etc. Although PM_{2.5} air quality tremendously improved in recent years, ozone concentration showed an increasing trend, resulting in air pollution characterized by simultaneous high concentrations of PM_{2.5} and ozone. According to the 2020 Chinese Ecological and Environment Quality Bulletin issued by the Ministry of Ecology and Environment of China, 46% and 32% of the YRD cities are still above the Chinese air quality standards for PM_{2.5} and ozone respectively. Thus, coordinated control of PM_{2.5} and ozone has become the focus of improving air quality within the region. Facing the challenges of both climate change and air pollution, as a leading demonstration area in China, how can the YRD region first achieve the goal of simultaneous mitigating PM_{2.5} and ozone in the context of coping with climate change? In this study, based on a socio-economic development forecast framework coupled with the high-resolution air pollution emission inventory for the YRD region and the WRF-CMAQ air quality model, we simulated the improvement of regional air quality under different policy scenarios. The results show that the green low-carbon scenario (CP) has higher emission reduction potential than the business-as-usual (BAU) scenario and the more progressive scenario of end-of-pipe (EP) control policy, making it an important path in building a beautiful and green Yangtze River Delta in the long term. Under the CP scenario, compared to 2017, it is estimated that SO₂, NO_x, non-methane volatile organic compounds (NMVOCs), and primary PM_{2.5} emissions will decrease by 55.1%, 26.5%, 25.2%, and 27% in 2025; and 66%, 56.4%, 36.1% and 39.4% in 2035. The annual average PM_{2.5} concentration and the 90th percentile of daily maximum 8-h average ozone concentration (O₃-8 h 90th) in YRD will reach 26 and 129 μg m⁻³, respectively by 2035, with 50% of 41 municipal cities in the region will even meet the standards in WHO IT-2. We show that to continuously improve the regional air quality, nationwide collaborations in the implementation of the strengthened abatement measures are needed in the medium and long-term attempts to simultaneously mitigate PM_{2.5} and ozone pollution. In the short- and medium-term, the end-of-pipe control scenario driven by the goal of “beautiful and green Yangtze River Delta” will play an important role in air pollution control. Starting from 2030, low-carbon policies driven by carbon neutral goals are expected to contribute significantly to the further reductions of both PM_{2.5} and ozone. To summarize, continuous and vigorous abatement in NO_x and NMVOCs is the key to mitigate PM_{2.5} and ozone pollution, and to achieve the current national air quality standard for both PM_{2.5} and ozone, the NO_x and NMVOCs emissions are expected to be reduced at least by 56% and 40% respectively, compared to 2017. The existing end-of-pipe control policy, in combination with other measures, including industrial restructuring, especially for NMVOCs-emission related industries (i.e., industrial coating, petrochemical, chemical, rubber and plastics, pharmaceuticals), transportation restructuring, as well as the promotion of clean energy vehicles, non-road vehicles and ships are thus important means to the pollution control in the medium and long-term development in YRD region.

Yangtze River Delta (YRD), air quality, PM_{2.5}, ozone, coordinated control, numerical simulation

doi: [10.1360/TB-2021-0774](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0774)