中国PM_{2.5}与O₃协同控制路径

刘鑫¹, 史旭荣¹, 雷宇¹, 薛文博^{1,2*}

1. 生态环境部环境规划院, 空气质量模拟与系统分析中心, 北京 100012;

2. 生态环境部环境规划院, 国家环境保护环境规划与政策模拟重点实验室, 北京 100012

* 联系人, E-mail: xuewb@caep.org.cn

2021-08-16 收稿, 2021-11-15 修回, 2021-11-16 接受, 2021-12-16 网络版发表

国家自然科学基金(72171157)资助

摘要 基于WRF-CAMx(the weather research and forecasting model and the comprehensive air quality model with extensions)空气质量模型定量分析了不同NO_x、挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)在减排情景下全国及重点区域PM_{2.5}与O₃浓度变化情况, 并通过引入敏感度的概念, 评估PM_{2.5}与O₃对NO_x、VOCs减排的敏感性, 直观地揭示了NO_x、VOCs减排对PM_{2.5}与O₃浓度改善效益, 以此提出中国PM_{2.5}与O₃协同控制路径. 模拟结果表明, NO_x减排可有效降低全国及重点区域PM_{2.5}与O₃浓度, 减排比例较小时, PM_{2.5}浓度下降, 但少部分区域O₃浓度升高, 随着减排比例增加, PM_{2.5}与O₃浓度均呈加速下降趋势; VOCs减排过程中, 全国及重点区域PM_{2.5}与O₃浓度一直保持下降趋势. 减排敏感度结果表明, 全国及重点区域PM_{2.5}对NO_x减排敏感度更高; 而O₃有所不同, 对于全国整体而言, 对NO_x减排更敏感; 重点区域中珠江三角洲地区O₃对VOCs减排敏感度更高; “2+26”城市、长江三角洲、汾渭平原地区O₃在减排比例较小时, 对VOCs减排更敏感, 随着减排比例增加, 对NO_x减排敏感度更高. 因此, 建议在中长期大气污染物协同减排路径的设计中, 将NO_x持续减排作为全国及重点区域PM_{2.5}与O₃污染改善的核心, 将VOCs减排作为短期内降低重点区域PM_{2.5}与O₃浓度的关键.

关键词 NO_x, 挥发性有机物, PM_{2.5}, O₃, WRF-CAMx模型

自2013年《大气污染防治行动计划》实施以来, 全国环境空气质量显著好转, 但细颗粒物(PM_{2.5})浓度仍高于世界卫生组织指导值(2015)的3倍以上, 同时臭氧(O₃)浓度上升导致的人群过早死亡和财产损失抵消了部分PM_{2.5}浓度改善带来的环境保护效益, 开展PM_{2.5}与O₃协同防治成为现阶段我国大气污染治理的重要内容^[1-5]. PM_{2.5}由直接排放的一次PM_{2.5}和气态前体物(如SO₂、NO_x、挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)、NH₃等)转化形成的二次PM_{2.5}组成. 已有研究表明, 二次PM_{2.5}已成为我国PM_{2.5}的主要部分, 在重霾污染期间占比可达80%左右; 而近地面O₃除来自平流

层传输外, 主要由NO_x和VOCs在光照下发生光化学反应生成^[6-9]. NO_x和VOCs既是PM_{2.5}的重要前体物, 也是O₃的主要前体物, 开展二者的协同减排是实现PM_{2.5}与O₃协同控制的关键^[1,2,4,10,11]. 本研究从控制PM_{2.5}与O₃共同前体物的角度出发, 量化NO_x和VOCs减排对PM_{2.5}与O₃的控制效果, 并提出中国PM_{2.5}与O₃协同控制路径, 以为管理部门制定PM_{2.5}与O₃协同治理策略提供科学依据.

关于NO_x和VOCs减排对PM_{2.5}与O₃浓度改善效益的相关研究, 有关学者已开展了许多工作. 李红等人^[4]分析了我国PM_{2.5}与O₃成因的关联性及其相互影响, 建

引用格式: 刘鑫, 史旭荣, 雷宇, 等. 中国PM_{2.5}与O₃协同控制路径. 科学通报, 2022, 67: 2089–2099

Liu X, Shi X R, Lei Y, et al. Path of coordinated control of PM_{2.5} and ozone in China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 2089–2099, doi: 10.1360/TB-2021-0832

议我国应加快构建 NO_x 和VOCs治理技术体系, 加大 NO_x 和VOCs的协同减排力度. Xing等人^[12]应用WRF-CMAQ(the weather research and forecasting model and the community multiscale air quality modeling system)模型, 采用过程分析方法, 定量研究气溶胶的直接效应对对流层 O_3 的影响, 进一步揭示了控制 NO_x 对 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 改善的协同效益. Wu等人^[13]基于土地利用回归(Land Use Regression)模型, 估算了2019年珠江三角洲(以下简称珠三角)地区 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度, 并分析了影响两种大气污染物的共同因素. Xiang等人^[14]以京津冀及周边地区作为研究对象, 针对 NO_x 和VOCs, 使用空气质量模型及经验动力学模型, 综合评估了经济有效的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 协同减排策略. 但目前已有研究多是基于统计数据和科学机理的理论研究, 或者空间范围较小, 时间尺度较短, 缺乏全国范围、长时间序列的 NO_x 和VOCs减排与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度响应关系的系统研究.

本研究基于WRF-CAMx(the weather research and forecasting model and the comprehensive air quality model with extensions)模型, 采用情景分析法, 模拟分析了不同 NO_x 、VOCs减排情景下全国和京津冀及周边“2+26”城市(以下简称“2+26”城市)、汾渭平原、长江三角洲(以下简称长三角)、珠三角4个重点区域的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度变化情况, 并引入敏感度的概念, 量化评估 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 对 NO_x 、VOCs减排的敏感性, 直观揭示了 NO_x 、VOCs减排对全国及重点区域 $\text{PM}_{2.5}$ 和 O_3 浓度改善效益.

1 数据和方法

1.1 数据来源

(i) 模型清单. WRF-CAMx模型广泛应用于空气质量预报、模拟等领域^[15-20]. CAMx模型所需排放清单的化学物种主要包括颗粒物(PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 及其组分)、 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 和VOCs等多种污染物. 考虑到2020年受新型冠状病毒疫情影响较为特殊, 选择2019年作为基准情景, 在清华大学2017年MEIC排放清单的基础上(中国多尺度排放清单, <http://www.meicmodel.org>), 使用大气多污染物环境容量三维迭代计算方法对2019年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度观测数据进行反向订正, 得到2019年包括 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_x 、 NH_3 、BC(biochar)、OC(organic carbon)、VOCs(含主要组分)等污染物的人为源排放清单. 此方法在本团队^[21,22]以往研究中多次应用,

迭代订正得到的排放清单较为合理可靠. 生物源VOCs排放清单通过MEGAN天然源排放模型计算获得^[23].

(ii) 空气质量监测数据. 空气质量监测数据包括2019年1月1日至12月31日全国337个地级及以上城市的实际观测 $\text{PM}_{2.5}$ 日均浓度和 O_3 日最大8 h浓度(数据来源: 中华人民共和国生态环境部数据中心).

1.2 模型设置

(i) 模拟时段. 2019年全国337个地级及以上城市 O_3 日最大8 h浓度第90百分位数(以下简称为MDA8-90th)的平均值为 $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 是2015年以来全国 O_3 污染最重的年份. 同时考虑到2020年受新型冠状病毒疫情影响较为特殊, 因此选择2018年12月15日至2019年12月31日为模拟时段, 共372 d, 进行逐日模拟, 其中2018年12月15~30日为Spin-up时间.

(ii) 模拟区域. CAMx模型水平模拟范围: X方向为 $-2690 \sim 2690 \text{ km}$ 、Y方向为 $-2150 \sim 2150 \text{ km}$, 网格间距为 20 km , 模拟范围覆盖全国, 将全国划分成 216×270 个网格. 垂直方向共设置14个气压层, 层间距自下而上逐渐增大. 投影坐标系采用Lambert投影, 中心点经纬度为 103°E , 37°N , 两条平行纬度分别为 25° 和 40°N ^[24-27].

(iii) 气象模拟. 中尺度气象模型WRF为CAMx模型提供所需要的气象场, 其模拟时段和空间投影坐标系与CAMx模型保持一致, 垂直方向共35个气压层, 层间距自下而上逐渐增大. WRF模型的初始场与边界场数据采用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的FNL全球分析资料(6 h一次、 1° 分辨率, <http://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2>), 每日对初始场进行初始化, 每次模拟时长为30 h, Spin-up时间为6 h. 并利用NCEP ADP观测资料进行客观分析与资料同化(<http://rda.ucar.edu/datasets/ds461.0>)^[24-27].

(iv) 模型验证. 本次模型参数设置与本团队^[24,25]以往研究保持一致. 对于区域欧拉网格模型, 使用标准化平均偏差(NMB)、标准化平均误差(NME)以及相关系数(COR)为评价依据来判断模型的准确性. $\text{PM}_{2.5}$ 模拟准确性的评价标准为 $-50\% < \text{NMB} < 80\%$ 、 $\text{NME} < 150\%$ 、 $R^2 > 0.3$; O_3 模拟准确性的评价标准为 $-15\% < \text{NMB} < 15\%$ 、 $\text{NME} < 35\%$ 、 $R^2 > 0.4$ (《环境空气质量模型遴选工作指南(试行)》). 由于本次研究模拟时间长、覆盖范围广、样本数量多, 因此选择“2+26”城市(模拟样本数10192个)、汾渭平原(模拟样本数4004个)、长三角(模拟样本数14921个)、珠三角(模拟样本数3276

个4个重点区域的模拟结果代表本次研究模拟结果,与相应实测数据进行对比验证。验证结果表明:“2+26”城市、汾渭平原、长三角、珠三角地区模拟和实测PM_{2.5}日均浓度的NME分别为35%、36%、39%、51%,NMB分别为16%、-6%、27%、40%,相关系数分别为0.81、0.76、0.81、0.71;模拟和实测O₃日最大8 h浓度的NME分别为21%、29%、22%、28%,NMB分别为-9%、0.4%、2%、4%,相关系数分别为0.88、0.74、0.80、0.76。验证结果说明,本次研究模拟结果较为合理,迭代订正得到的2019年排放清单较为可靠。

(v) 情景设置. 本研究共设置1个基准情景和12个减排情景: (1) 基准情景,即2019年污染物排放现状情景; (2) 6个NO_x减排情景,即在VOCs及其他污染物排放保持不变条件下,在2019年NO_x排放基础上分别削减10%、20%、30%、40%、50%、60%; (3) 6个VOCs减排情景,即在NO_x及其他污染物排放保持不变条件下,在2019年VOCs排放基础上分别削减10%、20%、30%、40%、50%、60%。

(vi) 减排敏感度评估方法. 应用许艳玲等人^[28]有关敏感度的计算方法,评估PM_{2.5}与O₃对NO_x、VOCs减排的敏感性,PM_{2.5}与O₃敏感度计算方法一致。以O₃对

NO_x减排敏感度为例,计算公式如下:

$$S = \frac{(C_0 - C_X) / C_0}{X}, \quad (1)$$

式中, S 为O₃对NO_x减排的敏感度, S 越大表明敏感度越高; X 为NO_x减排比例(%); C_0 为基准情景下O₃浓度(μg/m³); C_X 为NO_x减排比例为 X 时的O₃浓度(μg/m³)。

2 结果与讨论

2.1 NO_x减排对PM_{2.5}与O₃的协同效应

2.1.1 与PM_{2.5}浓度的响应关系

NO_x转化形成的硝酸盐是二次PM_{2.5}的重要前体物^[7,11]。模拟结果表明,当NO_x减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时,全国PM_{2.5}年均浓度相比基准情景分别下降2.3%、4.9%、7.7%、10.7%、13.9%、17.4%。从空间上看(图1),同一减排比例下,中东部地区PM_{2.5}浓度降幅较大,其中河南、湖北、湖南、安徽等农业、畜牧业发达,氨(NH₃)排放量较大的省份,PM_{2.5}浓度下降更为明显^[29-31],如河南省在NO_x减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时,PM_{2.5}年均浓度相比下降2.6%、5.7%、9.1%、12.9%、17.2%、

图1 NO_x减排情景下PM_{2.5}年均浓度相比基准情景PM_{2.5}年均浓度变化(μg/m³)。RR, 减排比例
Figure 1 Changes of PM_{2.5} annual average concentration under the NO_x emission reduction scenario compared with the baseline scenario (μg/m³). RR, reduction ratio

21.8%. 造成这一现象的主要原因是硝酸盐的主要部分是硝酸铵(NH_4NO_3), 而硝酸铵主要由大气中碱性气体 NH_3 中和 NO_x 酸性氧化产物形成, 因此对于上述“富氨”区域来说, 减排 NO_x 对降低其 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度更有效^[28,32].

减排敏感度结果表明(图2), 全国 $\text{PM}_{2.5}$ 对 NO_x 减排的敏感度随着减排比例的增加而增大, 当 NO_x 减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时, 其减排敏感度为0.23、0.25、0.26、0.27、0.28、0.29. 重点区域 $\text{PM}_{2.5}$ 对 NO_x 减排的敏感度同样随着减排比例增加而增大, 同一减排比例下, 长三角地区 $\text{PM}_{2.5}$ 对 NO_x 减排最敏感, 当 NO_x 减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时, 其减排敏感度分别为0.24、0.26、0.28、0.30、0.32、0.34.

2.1.2 与 O_3 浓度的响应关系

O_3 生成与其前体物 NO_x 、VOCs的排放呈复杂的非线性响应关系^[6,11]. 从总体来看, 全国MDA8-90th随着 NO_x 减排比例的增加而下降, 当 NO_x 减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时, 全国MDA8-90th相比下降

1.5%、3.3%、5.7%、8.4%、11.7%、15.6%. 但在 NO_x 减排比例较小时, 存在少部分区域 O_3 浓度“不降反升”的现象(图3), 但随着减排力度加大, NO_x 减排初期 O_3 浓度上升的区域, 其 O_3 浓度逐渐下降. Xing等人^[33]在研究中也发现, 单独减排 NO_x 可能导致 O_3 浓度增加. 造成上述现象的主要原因是, 我国多数城市和近郊区的 O_3 生成属于VOCs控制型或 NO_x -VOCs控制型, 减排 NO_x 会减弱NO对 O_3 的“滴定作用”, 从而使得 O_3 浓度上升, 但 NO_x 排放量的持续下降导致其 O_3 生成逐步转向 NO_x 控制型, 此时减排 NO_x 会降低 NO_2 光解生成 O_3 的强度, 从而使得 O_3 浓度下降^[6,11,34~36]. Huang等人^[37]也发现, 在2020年初新型冠状病毒疫情管控期间, 由于人为活动水平显著下降(尤其是交通排放大幅减少), NO_x 排放减少, NO对 O_3 的“滴定效应”减弱, 从而导致从京津冀到长三角整个东部区域 O_3 浓度的显著增加.

减排敏感度结果表明(图2), 当 NO_x 减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时, 全国 O_3 对 NO_x 减排敏感度为0.15、0.17、0.19、0.21、0.23、0.26. 从重点区域来看, 当减排比例小于20%时, 珠三角地区 O_3 对

图2 全国及重点区域 $\text{PM}_{2.5}$ 与 O_3 对 NO_x 、VOCs减排敏感度

Figure 2 Sensitivity of $\text{PM}_{2.5}$ and O_3 to NO_x and VOCs emission reduction in China and key regions

图 3 NO_x减排情景下MDA8-90th相比基准情景MDA8-90th浓度变化(μg/m³). RR, 减排比例
Figure 3 Changes of MDA8-90th under the NO_x emission reduction scenario compared with the baseline scenario (μg/m³). RR, reduction ratio

NO_x减排相对不敏感, 当NO_x减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时, 其敏感度为-0.05、-0.03、0.03、0.08、0.15、0.22; “2+26”城市、长三角、汾渭平原地区O₃对NO_x减排的敏感度均随着减排比例的增大而增大, 当减排比例高于40%时, 长三角地区O₃对NO_x减排敏感度大于“2+26”城市。

2.2 VOCs减排对PM_{2.5}与O₃的协同效应

2.2.1 与PM_{2.5}浓度的响应关系

VOCs排放对PM_{2.5}浓度变化有重要影响, 一方面因为VOCs是生成二次PM_{2.5}的重要前体物, 另一方面VOCs可以通过影响O₃生成影响大气氧化性, 大气氧化性越强越利于SO₂、NO_x等前体物向二次无机盐转化^[6,11,34,35]。模拟结果表明, 减排VOCs对全国PM_{2.5}浓度改善有一定的促进作用, 当VOCs减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时, 全国PM_{2.5}年均浓度相比下降0.5%、1.0%、1.6%、2.3%、3.1%、4.0%。VOCs减排导致的PM_{2.5}浓度变化具有空间差异性(图4), 降幅明显区主要集中在“2+26”城市及附近区域、长三角地区等。

减排敏感度结果表明(图2), 在减排比例相同时, 汾渭平原、珠三角、长三角、“2+26”城市PM_{2.5}对VOCs减排敏感度依次增大。“2+26”城市PM_{2.5}对VOCs减排敏

感度最高, 当VOCs减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时, 其敏感度为0.11、0.11、0.12、0.12、0.12、0.13。

2.2.2 与O₃浓度的响应关系

模拟结果表明, VOCs减排可有效降低全国O₃浓度, 当VOCs减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时, 全国MDA8-90th相比基准情景下降1.2%、2.6%、4.1%、5.7%、7.3%、9.1%。从空间上来看(图5), “2+26”城市、长三角、珠三角等地区的MDA8-90th降幅较大。因为这些地区大部分城市人为活动密集、工业集中发达, NO_x排放量较大, O₃生成属于VOCs控制型或NO_x-VOCs控制型, 因此减排VOCs对上述地区O₃浓度改善相比其他地区更有效^[6,11]。

减排敏感度结果表明(图2), 重点区域中, 珠三角地区O₃对VOCs减排最敏感, 当VOCs减排10%、20%、30%、40%、50%、60%时, 其减排敏感度为0.36、0.36、0.37、0.38、0.38、0.39。同一减排比例下, 珠三角、长三角、“2+26”城市、汾渭平原地区O₃对VOCs减排敏感度依次减小。

2.3 NO_x和VOCs减排效益对比分析

图6为NO_x、VOCs减排情景下全国及重点区域

图 4 VOCs减排情景下 $PM_{2.5}$ 年均浓度相比基准情景 $PM_{2.5}$ 年均浓度变化($\mu g/m^3$). RR, 减排比例
Figure 4 Changes of $PM_{2.5}$ annual average concentration under the VOCs emission reduction scenario compared with the baseline scenario ($\mu g/m^3$). RR, reduction ratio

图 5 VOCs减排情景下MDA8-90th相比基准情景MDA8-90th浓度变化($\mu g/m^3$). RR, 减排比例
Figure 5 Changes of MDA8-90th under the VOCs emission reduction scenario compared with the baseline scenario ($\mu g/m^3$). RR, reduction ratio

图6 NO_x、VOCs减排情景下PM_{2.5}年均浓度与MDA8-90th相比基准情景变化率

Figure 6 The change rate of PM_{2.5} annual average concentration and MDA8-90th under the NO_x and VOCs emission reduction scenario compared with the baseline scenario

PM_{2.5}年均浓度与MDA8-90th相比基准情景的变化情况。对于PM_{2.5}来说,减排NO_x或VOCs都可有效降低全国及重点区域的PM_{2.5}浓度,在同一减排比例下,减排NO_x对PM_{2.5}浓度改善效果更好。减排敏感度结果也表明,全国及重点区域PM_{2.5}对NO_x减排更敏感。对于O₃来说,不同NO_x、VOCs减排情景下,全国及重点区域O₃浓度变化有所差异。从全国来看,虽然在减排比例较小时,减排NO_x可能导致部分区域O₃浓度上升,但全国整体O₃浓度相比下降,并随着NO_x减排比例增加,O₃浓度呈加速下降趋势。减排VOCs虽然可使全国O₃浓度持续下降,但在减排比例相同时,对O₃浓度改善幅度弱于减排NO_x。对于珠三角地区O₃来说,减排VOCs对其O₃浓度改善的效果更好。对于“2+26”城市、长三角、汾渭平原地区O₃来说,在减排比例较小时,减排VOCs对其O₃浓度改善更有效。但由于天然源VOCs的存在,随着VOCs减排比例增加,人为源VOCs排放量在VOCs排放总量中占比逐步降低,减排VOCs对O₃浓度改善的收益逐渐小于减排NO_x^[38]。从减排敏感度角度来看,全国O₃对NO_x减排更敏感,珠三角地区O₃对VOCs减排敏感度更高。“2+26”城市、长三角、汾渭平原地区O₃在减排比例较小时,对VOCs减排更敏感,随着减排比例增加,如“2+26”城市O₃在单项污染物减排比例大于40%,长三角、汾渭平原地区O₃在单项污染物减排比例大于50%时,对NO_x减排敏感度更高。

因此,从短期来看,减排VOCs可使重点区域O₃浓度快速下降,同时可以降低其PM_{2.5}浓度;从长期来看,

减排NO_x可持续有效改善全国及重点区域的PM_{2.5}与O₃浓度。综上,为平衡好NO_x与VOCs减排在局地与区域、短期与长期上的收益,借鉴美国过去50年O₃污染控制思路,并立足于我国PM_{2.5}与O₃污染并重的特点,建议在中长期大气污染物减排方案的设计中,将NO_x持续减排作为全国及重点区域PM_{2.5}与O₃污染协同控制的核心,将VOCs减排作为短期内降低重点区域PM_{2.5}与O₃浓度的关键。

2.4 讨论

开展我国PM_{2.5}与O₃协同控制路径研究,为管理部门从国家层次整体布局NO_x和VOCs减排中长期路线提供了一定的科学依据。但由于污染源排放清单和大气物理、化学过程在模型模拟中的不确定性,大气化学传输模式模拟的PM_{2.5}与O₃浓度和实际值相比存在一定误差^[39]。本次研究模拟时间长、覆盖范围广,尽管经过模型验证的模拟结果较为合理,但是仍有少部分区域出现异常浓度值,有待在后续开展更为深入细致的研究。

此外,本研究补充模拟了NO_x-VOCs各减排20%情景。在此情景下,全国PM_{2.5}年均浓度相比基准情景下降5.5%,全国MDA8-90th相比基准情景下降5.4%。协同减排20%情景对全国PM_{2.5}浓度改善效果优于NO_x单项减排20%、VOCs单项减排60%情景;对全国O₃浓度改善效果优于NO_x单项减排20%、VOCs单项减排30%情景。因此,有必要在接下来的研究中设计NO_x-VOCs交

叉减排情景,探索有利于全国及重点区域PM_{2.5}与O₃协同控制的NO_x-VOCs最佳减排配比。

3 结论

减排NO_x或VOCs都可降低全国及重点区域的PM_{2.5}与O₃浓度。全国及重点区域PM_{2.5}对NO_x减排更敏感,减排比例相同时,减排NO_x对其PM_{2.5}浓度改善效果更好。对于全国O₃来说,对NO_x减排敏感度相对较高,虽然在NO_x减排比例较小时,部分区域O₃浓度升高,但全国整体O₃浓度呈下降趋势,且在同一减排比例下对O₃

浓度改善效果优于VOCs减排。珠三角地区O₃对VOCs减排更敏感,减排VOCs可使其O₃浓度快速下降。“2+26”城市、长三角、汾渭平原地区O₃在减排比例较小时,对VOCs减排更敏感,随着减排比例增加,对NO_x减排敏感度升高,NO_x减排带来的O₃浓度改善效果逐渐超过VOCs减排。

建议在中长期大气污染物减排方案的设计中,将NO_x持续减排作为全国及重点区域PM_{2.5}与O₃污染协同控制的核心,将VOCs减排作为短期内降低重点区域PM_{2.5}与O₃浓度的关键。

致谢 文中涉及的地图经自然资源部地图技术审查中心审查,审图号为GS(2021)8237号。

参考文献

- 1 Zhang X M, Fan X C, Zhao W J, et al. Some thoughts on the coordinated control of O₃ and PM_{2.5} (in Chinese). *Environ Impact Assess*, 2021, 43: 25–29 [张新民, 范西彩, 赵文娟, 等. 关于O₃和PM_{2.5}协同控制的一些思考. *环境影响评价*, 2021, 43: 25–29]
- 2 Yan G, Xue W B, Lei Y, et al. Situation and control measures of ozone pollution in China (in Chinese). *Environ Protect*, 2020, 48: 15–19 [严刚, 薛文博, 雷宇, 等. 我国臭氧污染形势分析及防控对策建议. *环境保护*, 2020, 48: 15–19]
- 3 Xue T, Liu J, Zhang Q, et al. Rapid improvement of 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: 441–452]
- 4 Li H, Peng L, Bi F, et al. Strategy of coordinated control of 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]
- 5 Shao M, Tang X, Zhang Y, et al. City clusters in China: Air and surface water pollution. *Front Ecol Environ*, 2006, 4: 353–361
- 6 Tang X Y, Zhang Y H, Shao M. *Atmospheric Environmental Chemistry* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2006 [唐孝炎, 张远航, 邵敏. *大气环境化学*. 北京: 高等教育出版社, 2006]
- 7 Quan J N, Xu X D, Jia X C, et al. Multi-scale processes in severe haze events in China and their interactions with aerosols: Mechanisms and progresses (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 810–824 [权建农, 徐祥德, 贾星灿, 等. 影响我国霾天气的多尺度过程. *科学通报*, 2020, 65: 810–824]
- 8 Chen J, Peng J L, Xu Y S, et al. Spatiotemporal distribution of PM_{2.5} and O₃ in Beijing from 2014 to 2020 and health impacts (in Chinese). *China Environ Sci*, 2021, 42: 4071–4082 [陈菁, 彭金龙, 徐彦森, 等. 北京市2014–2020年PM_{2.5}和O₃时空分布与健康效应评估. *环境科学*, 2021, 42: 4071–4082]
- 9 Society T R. *Ground-level Ozone in the 21st Century: Future Trends, Impacts and Policy Implications*. Technical Report. Royal Society Science. 2008
- 10 Chai F H. Long-term efforts for blue sky forever: Pollution co-controlling on PM_{2.5} and ozone (in Chinese). *Environ Sustain Devel*, 2020, 45: 148–149 [柴发合. 久久为功, 蓝天永驻: PM_{2.5}与臭氧协同控制. *环境与可持续发展*, 2020, 45: 148–149]
- 11 Zhang Y H. *China Blue Book on Prevention and Control of Atmospheric Ozone Pollution (2020)* (in Chinese). Technical Report. Professional Committee on Ozone Pollution Control, Chinese Society for Environmental Sciences. 2020 [张远航. 中国大气臭氧污染防治蓝皮书(2020年). 科技报告. 中国环境科学学会臭氧污染控制专业委员会. 2020]
- 12 Xing J, Wang J, Mathur R, et al. Impacts of aerosol direct effects on tropospheric ozone through changes in atmospheric dynamics and photolysis rates. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 1–24
- 13 Wu J, Wang Y, Liang J, et al. Exploring common factors influencing PM_{2.5} and O₃ concentrations in the Pearl River Delta: Tradeoffs and synergies. *Environ Pollut*, 2021, 285: 117–138
- 14 Xiang S, Liu J, Tao W, et al. Control of both PM_{2.5} and O₃ in Beijing-Tianjin-Hebei and the surrounding areas. *Atmos Environ*, 2020, 10.1016/j.atmosenv.2020.117259
- 15 Liu D S, Li J, Su X Q, et al. Source apportionment of ozone in Xining using CAMx-OSAT method (in Chinese). *Acta Sci Circumst*, 2021, 41: 386–394 [刘得守, 李景, 苏筱倩, 等. 基于CAMx-OSAT方法的西宁臭氧来源解析. *环境科学学报*, 2021, 41: 386–394]

- 16 Shao X Y, Wang X Q, Zhong N S, et al. Effects of anthropogenic emission reduction and meteorological conditions on PM_{2.5} pollution in typical cities of Beijing, Tianjin and Hebei in winter (in Chinese). *Environ Sci*, 2021, 42: 4095–4103 [邵玄逸, 王晓琦, 钟巍盛, 等. 京津冀典型城市冬季人为源减排与气象条件对PM_{2.5}污染影响. *环境科学*, 2021, 42: 4095–4103]
- 17 Ge S J, Wang S J, Xu Q, et al. Source apportionment simulations of ground-level ozone in Southeast Texas employing OSAT/APCA in CAMx. *Atmos Environ*, 2021, 10.1016/j.atmosenv.2021.118370
- 18 Zhang Z D, Wang X Q, Zhang H Y, et al. Characteristics of PM_{2.5} transport in autumn and winter in typical cities in Beijing-Tianjin-Hebei region (in Chinese). *China Environ Sci*, 2021, 41: 993–1004 [张智答, 王晓琦, 张晗宇, 等. 京津冀地区典型城市秋冬季PM_{2.5}输送特征研究. *中国环境科学*, 2021, 41: 993–1004]
- 19 Zhang Y, Shen J, Li Y. An atmospheric vulnerability assessment framework for environment management and protection based on CAMx. *J Environ Manage*, 2018, 207: 341–354
- 20 Guo Q Y, Yang X C, Wu Q Z, et al. An analysis of PM_{2.5} regional sources from heavy pollution in the winter of Xi'an based on numerical simulation (in Chinese). *Acta Sci Circumst*, 2020, 40: 3103–3111 [郭庆元, 杨晓春, 吴其重, 等. 基于数值模拟对西安地区冬季一次重污染过程PM_{2.5}区域来源解析. *环境科学学报*, 2020, 40: 3103–3111]
- 21 Xue W B, Shi X R, Yan G, et al. Impacts of meteorology and emission variations on the heavy air pollution episode in North China around the 2020 Spring Festival. *Sci China Earth Sci*, 2021, 64: 329–339 [薛文博, 史旭荣, 严刚, 等. 气象条件和排放变化对2020年春节前后华北地区重污染过程的影响. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51: 314–324]
- 22 Xue W B, Fu F, Wang J N, et al. Modeling study on atmospheric environmental capacity of major pollutants constrained by PM_{2.5} compliance of Chinese cities (in Chinese). *China Environ Sci*, 2014, 34: 2490–2496 [薛文博, 付飞, 王金南, 等. 基于全国城市PM_{2.5}达标约束的大气环境容量模拟. *中国环境科学*, 2014, 34: 2490–2496]
- 23 Guenther A, Karl T, Harley P, et al. Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature). *Atmos Chem Phys*, 2006, 6: 3181–3210
- 24 Lu S Z, Shi X R, Xue W B, et al. Impacts of meteorology and emission variations on PM_{2.5} concentration throughout the country during the 2020 epidemic period (in Chinese). *China Environ Sci*, 2021, 42: 3099–3106 [逯世泽, 史旭荣, 薛文博, 等. 新冠肺炎疫情期间气象条件和排放变化对PM_{2.5}的影响. *环境科学*, 2021, 42: 3099–3106]
- 25 Xue W B, Fu F, Wang J N, et al. Source apportionment of air pollutants in Fuzhou based on the CAMx model (in Chinese). *China Environ Sci*, 2014, 34: 1361–1368 [薛文博, 付飞, 王金南, 等. 中国PM_{2.5}跨区域传输特征数值模拟研究. *中国环境科学*, 2014, 34: 1361–1368]
- 26 Shi X R, Lu S Z, Yi A H, et al. Impact of meteorological conditions on PM_{2.5} in autumn and winter of 2018–2019 in key areas (in Chinese). *China Environ Sci*, 2020, 40: 2785–2793 [史旭荣, 逯世泽, 易爱华, 等. 全国2018~2019年秋冬季气象条件变化对PM_{2.5}影响研究. *中国环境科学*, 2020, 40: 2785–2793]
- 27 Xu Y L, Xue W B, Lei Y. Impact of meteorological conditions and emission change on PM_{2.5} pollution in China (in Chinese). *China Environ Sci*, 2019, 39: 4546–4551 [许艳玲, 薛文博, 雷宇. 气象和排放变化对PM_{2.5}污染的定量影响. *中国环境科学*, 2019, 39: 4546–4551]
- 28 Xu Y L, Xue W B, Lei Y, et al. Sensitivity analysis of PM_{2.5} pollution to ammonia emission control in China (in Chinese). *China Environ Sci*, 2017, 37: 2482–2491 [许艳玲, 薛文博, 雷宇, 等. 中国氨减排对控制PM_{2.5}污染的敏感性研究. *中国环境科学*, 2017, 37: 2482–2491]
- 29 Liu X J, Sha Z P, Song Y, et al. China's atmospheric ammonia emission characteristics mitigation options and policy recommendations (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2021, 34: 149–157 [刘学军, 沙志鹏, 宋宇, 等. 我国大气氨的排放特征、减排技术与政策建议. *环境科学研究*, 2021, 34: 149–157]
- 30 Kong L, Tang X, Zhu J, et al. Improved inversion of monthly ammonia emissions in China based on the Chinese ammonia monitoring network and ensemble Kalman Filter. *Environ Sci Technol*, 2019, 53: 12529–12538
- 31 Cheng L, Guo X R, Cheng S Y, et al. Effect of ammonia emission from agriculture in Beijing-Tianjin-Hebei on PM_{2.5} (in Chinese). *China Environ Sci*, 2018, 38: 1579–1588 [程龙, 郭秀锐, 程水源, 等. 京津冀农业源氨排放对PM_{2.5}的影响. *中国环境科学*, 2018, 38: 1579–1588]
- 32 Xue W B, Xu Y L, Tang X L, et al. Impacts of ammonia emission on PM_{2.5} pollution in China (in Chinese). *China Environ Sci*, 2016, 36: 3531–3539 [薛文博, 许艳玲, 唐晓龙, 等. 中国氨排放对PM_{2.5}污染的影响. *中国环境科学*, 2016, 36: 3531–3539]
- 33 Xing J, Ding D, Wang S X, et al. Development and application of observable response indicators for design of an effective ozone and fine-particle pollution control strategy in China. *Atmos Chem Phys*, 2019, 19: 13627–13646
- 34 Jiang H, Chang H M. Analysis of China's ozone pollution situation, preliminary investigation of the causes and prevention and control recommendations (in Chinese). *Res Environ Sci*, 2021, 34: 1576–1582 [姜华, 常宏咪. 我国臭氧污染形势分析及成因初探. *环境科学研究*, 2021, 34: 1576–1582]
- 35 Yi R, Wang Y L, Zhang Y J, et al. Pollution characteristics and influence factors of ozone in Yangtze River Delta (in Chinese). *Acta Sci Circumst*, 2015, 35: 2370–2377 [易睿, 王亚林, 张殷俊, 等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析. *环境科学学报*, 2015, 35: 2370–2377]
- 36 Wang F, Wang J W, Yang N, et al. Imulation analysis of strong uncertainty of VOCs source on ozone generation and pollution control (in Chinese). *Environ Sci*, 2021, 42: 5713–5722 [王峰, 汪健伟, 杨宁, 等. VOCs源强不确定性对臭氧生成及污染防治影响的模拟分析. *环境科学*, 2021, 42:

5713–5722]

- 37 Huang X, Ding A, Gao J, et al. Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China. *Natl Sci Rev*, 2021, 8: 51–59
- 38 Gao C, Zhang X L, Xiu A J, et al. Spatiotemporal distribution of biogenic volatile organic compounds emissions in China (in Chinese). *Acta Sci Circumst*, 2019, 39: 4140–4151 [高超, 张学磊, 修艾军, 等. 中国生物源挥发性有机物(BVOCs)时空排放特征研究. *环境科学学报*, 2019, 39: 4140–4151]
- 39 Gao M, Saide P E, Xin J Y, et al. Estimates of health impacts and radiative forcing in winter haze in eastern China through constraints of surface $PM_{2.5}$ predictions. *Environ Sci Technol*, 2017, 51: 2178–2185

Summary for “中国PM_{2.5}与O₃协同控制路径”

Path of coordinated control of PM_{2.5} and ozone in China

Xin Liu¹, Xurong Shi¹, Yu Lei¹ & Wenbo Xue^{1,2*}

¹ Center of Air Modeling and Systems Analysis, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China;

² State Environmental Protection Key Laboratory of Environmental Planning and Policy Simulation, Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China

* Corresponding author, E-mail: xuewb@caep.org.cn

Since the *Air Pollution Prevention and Control Action Plan* was issued in 2013, air quality in China has significantly improved. But the concentration of fine particulate matter (PM_{2.5}) remains 3 times higher than the guideline value of the WHO (World Health Organization, 2015), and the rising concentration of ozone (O₃) that has caused premature death and economic losses neutralized the environmental benefits brought in by partial reductions of PM_{2.5}. The coordinated control of PM_{2.5} and O₃, hence, has been put at the top of the agenda for China's air pollution prevention and control. Given nitrogen oxides (NO_x) and volatile organic compounds (VOCs) are major precursors of both PM_{2.5} and O₃, reducing the emissions of NO_x and VOCs is considered as the key to the coordinated control of PM_{2.5} and O₃. Focused on the common precursors of PM_{2.5} and O₃, our research conducted qualitative analysis of the effects of reduced emissions of NO_x and VOCs, and suggested China's path to coordinated control of PM_{2.5} and O₃. The results are expected to be adopted as scientific bases by administrative authorities for relevant policy-making.

Our research was based on the WRF-CAMx model and scenario analysis was used. Different scenarios where NO_x and VOCs emissions were reduced to different degrees were set to simulate the changes of concentrations of PM_{2.5} and O₃ across China and in key areas. The indicator of sensitivity was introduced to quantitatively evaluate the responsiveness of PM_{2.5} and O₃ concentrations to the reduced emissions of NO_x and VOCs. The effects of reduced emissions of NO_x and VOCs on the concentrations of PM_{2.5} and O₃ were revealed directly in the research.

As suggested by simulation results, the reduction of NO_x or VOCs emission can contribute to the decrease of the concentration of PM_{2.5} nationwide and in key areas. If at the same ratio of reduction, the reduction of NO_x emission can lead to a larger decrease of PM_{2.5} concentration. The change of O₃ concentration nationwide or in key areas varies under different NO_x and VOCs emission reduction scenarios. From the perspective of the whole country, a small ratio of NO_x emission reduction may lead to the rise of O₃ concentration in some areas, but the O₃ concentration declines on the whole, and the rate of decline rises with the further reduction of NO_x emission. The reduction of VOCs emission can decrease the O₃ concentration nationwide, but the effect is less obvious than the reduction of NO_x emission. For the Pearl River Delta area, the reduced emission of VOCs is more effective for the decrease of O₃ concentration. For the “2+26” cities, the Yangtze River Delta, and the Fenwei Plain, if on a small scale, the reduction of VOCs is more effective for the decrease of O₃ concentration than that of NO_x. But due to the existence of natural VOCs, the proportion of artificial VOCs to the total emission of VOCs reduces as the artificial VOCs continues to decline, and hence, the benefit of the reduction of VOCs becomes less obvious than that of NO_x. Sensitivity results were in agreement with the concentration changes. Based on the abovementioned results, to realize the balance of the benefits of NO_x and VOCs emissions reduction between the local and global and between the short term and the long term, we suggest that the continuous reduction of NO_x emission should be regarded as the focus of coordinated control of PM_{2.5} and O₃ in terms of both the whole country and key areas and the reduction of VOCs emission is the key to the improvement of O₃ pollutions in key areas in the short term, which should be incorporated in the medium-to-long-term design of China's path to coordinated control of air pollutions.

NO_x, volatile organic compounds, PM_{2.5}, O₃, the weather research and forecasting model and the comprehensive air quality model with extensions (WRF-CAMx)

doi: [10.1360/TB-2021-0832](https://doi.org/10.1360/TB-2021-0832)