

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.090>



VOCs 排放控制对 SOA 和 O₃ 的减缓作用

马 静¹, 燕莹莹^{1,2*}, 孔少飞^{1,2}, 王五科¹, 童芷萱¹

1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430078

2. 湖北省大气复合污染研究中心, 湖北武汉 430074

摘要: 挥发性有机物(VOCs)是臭氧(O₃)和二次有机气溶胶(SOA)的重要前体物。然而, 目前关于 VOCs 排放控制对 SOA 和 O₃ 缓解作用的研究仍然不足。本研究总结了四大排放源的精细化 VOCs 减排潜力, 进一步利用 WRF-Chem 模型量化了中国主要大气污染区污染事件期间 VOCs 减排对 SOA 和 O₃ 缓解的效益。结果表明, 通过精细化 VOCs 减排, 华北、长三角、华中、珠三角和四川盆地的 SOA 浓度分别降低了 89.2%、81.2%、74.5%、72.0% 和 77.3%。其中, 工业 VOCs 减排是 SOA 缓解的主要贡献因素。然而, 由于 O₃ 及其前体物的非线性光化学过程, 这种 VOCs 减排只能使 O₃ 浓度降低不到 10%。华北、长三角、华中、珠三角和四川盆地的 O₃ 浓度分别降低了 7.55、9.05、7.29、4.31 和 3.15 μg/m³。减少工业、交通和居民 VOCs 排放分别使臭氧平均浓度降低了 3.6% (3.48 μg/m³)、2.2% (2.07 μg/m³) 和 1.1% (0.98 μg/m³)。

关键词: 臭氧; 二次有机气溶胶; 挥发性有机物(VOCs); 大气污染缓解; VOCs 减排; WRF-Chem 模拟。

中图分类号: P404

文章编号: 1000-2383(2025)09-3454-14

收稿日期: 2024-07-29

The Mitigation of SOA and O₃ by VOCs Emission Reduction

Ma Jing¹, Yan Yingying^{1,2*}, Kong Shaofei^{1,2}, Wang Wuke¹, Tong Zhixuan¹

1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430078, China

2. Research Center for Complex Air Pollution of Hubei Province, Wuhan 430074, China

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) are the important precursors of ozone (O₃) and secondary organic aerosols (SOA). However, current research on the mitigation of SOA and O₃ by VOCs emission reduction is still insufficient. In this study, based on previous research and policies, a refined VOCs emission reduction potential covering four major emission sources was summarized. The benefits of VOCs emission reduction on SOA and ozone mitigation during the pollution events for five major air pollution regions in China were quantified using the WRF-Chem model. The results showed that the refined VOCs emission reduction strategy could reduce the SOA concentrations by 89.2%, 81.2%, 74.5%, 72.0%, and 77.3% in the North China Plain region, Yangtze River Delta, Central China, Pearl River Delta and Sichuan Basin, respectively. The reduction potential of industrial VOCs emissions is the main contributor to the SOA mitigation in these five regions. Nevertheless, such VOCs emission reduction could only reduce ozone concentration by less than 10%, due to the nonlinear photochemical processes of ozone and its precursors. The refined VOCs emission reduction strategy could reduce the O₃ concentrations by 7.55, 9.05, 7.29, 4.31, and 3.15 μg/m³ in five areas, respectively. VOCs emission reduction of industry, transportation and residential could reduce the ozone concentration by 3.6% (3.48 μg/m³), 2.2% (2.07 μg/m³) and 1.1% (0.98 μg/m³).

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No.42475186)。

作者简介: 马静(1998-), 男, 博士研究生, 主要研究方向大气环境、臭氧污染成因和来源。ORCID: 0009-0002-0003-166X. E-mail: 2426410516@qq.com

* 通讯作者: 燕莹莹, E-mail: yanyingying@cug.edu.cn

引用格式: 马静, 燕莹莹, 孔少飞, 王五科, 童芷萱, 2025. VOCs 排放控制对 SOA 和 O₃ 的减缓作用. 地球科学, 50(9): 3454-3467.

Citation: Ma Jing, Yan Yingying, Kong Shaofei, Wang Wuke, Tong Zhixuan, 2025. The Mitigation of SOA and O₃ by VOCs Emission Reduction. *Earth Science*, 50(9): 3454-3467.

(0.98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), respectively, on average in the five main air pollution regions.

Key words: ozone; secondary organic aerosols; volatile organic compounds (VOCs); pollution mitigation; VOCs emission reduction; WRF-Chem simulation.

0 引言

当前,中国面临着细颗粒物(PM_{2.5})污染严重和臭氧(O₃)污染日益突出的双重问题.自2013年《大气污染防治行动计划》发布以来,华北平原(NCP)、长江三角洲(YRD)和珠江三角洲(PRD)等主要污染地区的PM_{2.5}污染持续缓解(Zhai *et al.*, 2019; Shen *et al.*, 2021).然而,在秋冬季节,严重的PM_{2.5}污染仍在全国主要城市地区频繁发生.2013年至2022年,北京经历了多次极其严重和持续的PM_{2.5}污染事件(Batterman *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2023b; Yin *et al.*, 2025).与此同时,2013—2022年,中国地表臭氧水平呈上升趋势(Gao *et al.*, 2021a; Li *et al.*, 2021; Wei *et al.*, 2022a; Pan *et al.*, 2023).

挥发性有机化合物(VOCs)是地表O₃的关键前体物(Liu *et al.*, 2021; Ma *et al.*, 2022),也是参与大气化学反应生成二次有机气溶胶(SOA)的重要物质(Guo *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2017),部分VOCs对人类健康有害(祁士华等, 2001).据估计,对流层中约90%的臭氧是由VOCs氧化形成的(Moeller, 2004; Stevenson *et al.*, 2006; Young *et al.*, 2013; Veld *et al.*, 2024).在中国,城市地区的O₃光化学生成对VOCs高度敏感(Wang *et al.*, 2023c; Li *et al.*, 2024).近年来O₃浓度的增加可能与城市区域在VOCs限制条件下NO_x的减少有关.此外,SOA是大气中挥发性和半挥发性有机化合物反应的产物(Hallquist *et al.*, 2009; Ziemann and Atkinson, 2012; Zhu *et al.*, 2017),约占有机气溶胶总量的50%~85%(Jimenez *et al.*, 2009).在中国主要污染地区,雾霾发生时SOA对PM_{2.5}的贡献为30%~77%(Huang *et al.*, 2014).因此,如何约束VOCs排放以保证控制NO_x在降低PM_{2.5}和O₃方面的有效性已成为政策制定中的重要挑战.

以往许多观测和模拟研究都讨论了VOCs减排及其对SOA和O₃浓度的影响.例如,Wei *et al.* (2022b)开展的WRF-Chem敏感性实验结果表明,VOCs减少30%将导致北京地区O₃浓度的总体下

降,中部下降幅度较大,南北部下降幅度较小,但下降幅度都小于2%.张新宇等(2023)对保定市的臭氧污染研究结果显示,在郊区减少35%的VOCs排放能使臭氧浓度最大下降7.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,而在城区相同的减排能使臭氧浓度最大下降44.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.周德荣等(2023)利用WRF-CMAQ研究中国东部地区臭氧污染发现,在设置减少40%的VOCs和20%的NO_x的减排情景下能较好改善臭氧污染情况,各城市臭氧浓度下降5.4~20.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.潘瑞欣等(2024)利用与前者相同的方法对我国工业城市开展模拟研究,结果表明通过设置减少高达80%的人为VOCs排放才使臭氧最大8 h(MDA8 O₃)浓度最大降低6.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,而需要人为VOCs和NO_x协同减排才能明显降低MDA8 O₃浓度,最大减少75.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.Sharma *et al.* (2016)结合WRF-CMAQ对印度的臭氧污染研究发现,减少50%的人为VOCs排放导致臭氧浓度小幅下降2%.此外,Li *et al.* (2022a)利用区域空气质量模型系统(RAQMS)开展的华东地区SOA研究表明,减少全部人为VOCs排放后可使京津冀各城市的SOA减少39%~55%.Azmi and Sharma (2022)利用WRF-Chem对印度地区的生物SOA减排研究表明,减少25%~75%人为VOCs排放,其对生物SOA的控制只有1/10的有效性.这些研究旨在寻找VOCs减排对SOA和O₃的最大效益,而忽略了减排的实际可行性.准确评估一个地区人为VOCs的减排潜力及其协同治理SOA和O₃的效果,是一个迫切需要深入研究的大气环境科学问题.这对未来中国区域大气污染综合治理决策具有重要意义.

此外,VOCs具有种类繁多、时空变异性强、寿命短、测量难度高等特点(Mo *et al.*, 2016; Zhu *et al.*, 2019; Hui *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2022b; Duan *et al.*, 2023; Epping and Koch, 2023).因此,不同地区VOCs的来源和物理化学过程存在显著差异,这对VOCs减排研究的区域代表性提出了挑战.中国主要城市群的交通、工业、住宅和农业活动中大量人为挥发性有机化合物的排放(Wei *et al.*, 2011, 2019; Huang and Hsieh, 2019; Xuan *et al.*, 2021; Simayi *et al.*, 2022)使大气SOA和O₃的来源变得

复杂. 本研究基于中国更精细、更现实、更全面的 VOCs 减排策略, 构建一套涉及工业过程源、固定燃烧源、道路移动源和溶剂产品使用源等人为源 VOCs 综合减排情景; 定量人为源 VOCs 排放对我国 PM_{2.5} 和 O₃ 污染形成的贡献, 并评估人为源 VOCs 减排对 PM_{2.5} 与 O₃ 协同治理的有效性.

1 数据来源和方法

1.1 数据来源

地面 PM_{2.5} 和 O₃ 逐时浓度数据 (2017 年) 来源于中国生态环境部 (<https://data.cma.cn/>). 根据环境空气质量国家 II 级标准, 日最大 8 h 平均值 (MDA8 O₃) 超过 160 μg/m³ 则为臭氧污染日. PM_{2.5} 污染日的定义是 PM_{2.5} 的 24 h 平均浓度超过 75 μg/m³.

笔者使用的逐小时气象数据来自第五代欧洲中期天气预报中心再分析业务全球分析数据 (ERA5; 水平分辨率: 0.25°×0.25°; 时间分辨率: 1 h; <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>).

1.2 模型参数介绍

WRF-Chem 模型是由 NOAA 的预测系统实验室开发的新一代区域空气质量模型, 完全在线耦合了天气预报模型 (WRF) 和化学模型 (Chem). 在模拟实验中, 气象数据使用 NCEP-FNL (<https://rda.ucar.edu/>), 为模拟提供侧边界条件和初始气象场, FNL 数据采用 1°×1° 水平分辨率和 6 h 时间间隔. 所选区域的水平网格为 172×216, 网格大小为 25 km×25 km, 垂直分辨率为 28 层 (从地表到 100 hPa). 主要分析中国污染严重的城市集中地区, 包括 NCP、YRD、华中地区 (CC)、PRD 和四川盆地 (SCB).

物理和化学参数方案的主要选择列于表 1. 用

于模拟 SOA 浓度的气相化学机制是 CB05 并附加了氯化物反应 (Sarwar *et al.*, 2008). 该机制已通过 Kinetic PreProcessor (KPP) 纳入 WRF-Chem, 包括 97 种大气成分, 191 个反应 (其中涉及 60 多种挥发性有机化合物和 120 多个相关反应). 与 RACM 和 MOZART 机制相比, CB05 机制能够模拟更复杂的 VOCs 反应过程, 能够更好地表征冬季条件下 SOA 和 PM_{2.5} 的形成. 此外, 对于 O₃ 的模拟, 笔者使用了 SAPRC-99 气相化学机制 (Carter, 1990). 该机制包括 78 种物质和 211 个化学方程, SAPRC-99 的 VOCs 机制能够重现几乎在所有环境实验中观察到的 VOCs 氧化形成的 O₃. 在该机制中, VOCs 在对流层的消耗过程主要与 OH 自由基发生反应.

1.3 减排情景设置

笔者利用 2017 年中国多分辨率排放清单 (MEIC, 1.3 版, 0.25°×0.25°) 作为 WRF-Chem 的人为排放文件输入. MEIC 清单的人为排放分为五大排放源: 农业、工业、居民住宅、发电部门和交通运输. 生物源排放使用 MEGAN 模型第 2 版进行在线计算. 生物质燃烧排放输入使用 NCAR (FINN) 的火灾清单 (Wiedinmyer *et al.*, 2011).

一般情况下, PM_{2.5} 超标事件一般发生在冬季, 而臭氧超标事件多发生在夏季. 因此, 笔者选取模型模拟 2017 年 2 月 11 日至 17 日 (PM_{2.5} 超标时段) 和 6 月 1 日至 9 日 (O₃ 超标时段) 全国范围内的气象场和污染物时空分布. 在这两个时期, 五个主要区域的核心城市都处于污染状态 (图 1). 模型考虑了一周的启动时间, 以确保消除初始不稳定性 and 不确定性. 为了分析 VOCs 减排对 SOA 和 O₃ 浓度的影响, 分别在人为 VOCs 排放总量减少 20%、40%、60%、80% 和 100% 的情况下各进行了 5 次敏感性模拟 (表 2). 此外, 笔者还设计了另外 5 个 VOCs 排放情景, 分别关闭农业、工业、居民住宅、发电部门和交

表 1 WRF-Chem 物理和化学方案的配置
Table 1 Configuration of the WRF-Chem physical and chemical program

参数方案	WRF-Chem 具体选项	参考来源
微物理	Lin 微物理过程方案	Lin <i>et al.</i> , 1983
长波辐射	RRTM 长波辐射方案	Gallus and Bresch, 2006
短波辐射	Goddard 短波辐射方案	Chou and Suarez, 1999
地表参数化方案	MM5 地表参数化方案	Jiménez <i>et al.</i> , 2012
陆面模型	Noah 陆面模型	Ek <i>et al.</i> , 2003
边界层方案	YSU 边界层方案	Noh <i>et al.</i> , 2003
积云参数化方案	Grell 3D 积云参数化方案	Grell and Dévényi, 2002
化学方案	CB05 机制和 SAPRC-99 机制	Sarwar <i>et al.</i> , 2008 和 Carter, 1990

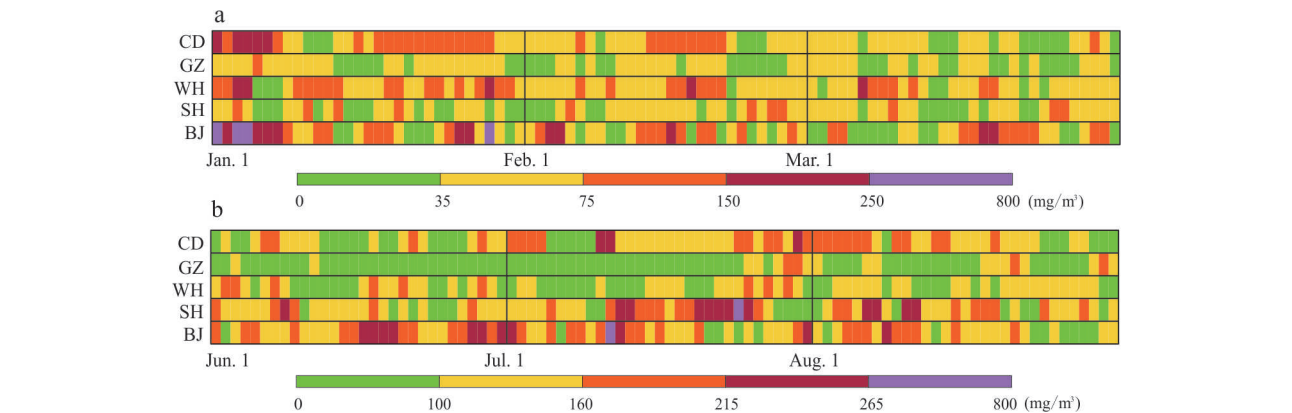


图1 2017年1月至3月五个主要区域的核心城市PM_{2.5}平均观测值(a);2017年6月至8月五个主要区域的核心城市O₃平均观测值(b)

Fig.1 The average observed values of PM_{2.5} in five urban areas from January to March 2017 (a); Average O₃ observations for five urban areas from June to August 2017 (b)

图中橙色、红色和紫色表示污染物超标

表 2 WRF-Chem 模型敏感性试验的描述	
Table 2 Description of sensitivity test of WRF-Chem model	
减排方案	描述
CON	应用原始的排放情况
C20	全国人为 VOCs 污染源排放量减少 20%
C40	全国人为 VOCs 污染源排放量减少 40%
C60	全国人为 VOCs 污染源排放量减少 60%
C80	全国人为 VOCs 污染源排放量减少 80%
C100	全国人为 VOCs 污染源排放量设置为零
AGR	农业 VOCs 排放量设置为零
IND	工业 VOCs 排放量设置为零
POW	发电部门 VOCs 排放量设置为零
TRA	交通运输 VOCs 排放量设置为零
RES	居民住宅 VOCs 排放量设置为零
REAL	根据实际文献和政策总结计算出的减排比例

通运输的 VOCs 排放,以计算每个部门对 SOA 和 O₃ 贡献的相对重要性.

对于 REAL 敏感性试验,笔者从文献中总结了每个源的减排潜力(表 3),并基于 MEIC 排放清单的 5 个源设置了 VOCs 减排比例(Li *et al.*, 2017; Zheng *et al.*, 2018). 基于表 3 的总结,本文的减排方案设置为工业 VOCs 总排放量减少约 55%,交通 VOCs 总排放量减少 53%,居民 VOCs 总排放量减少 90%. 根据 Simayi *et al.* (2021) 和 Wang *et al.* (2023a) 的研究,控制石油化工行业的无组织排放可以使 VOCs 排放减少约 40%. 其中无组织排放的控制方法包括:(1)使用不含 VOCs 的原料和低 VOCs 含量的产品;(2)改进现有工艺,减少生产过程中挥发性有机化合物的逸出;(3)利用泄漏检测

与修复系统定期检测 VOCs 泄漏点. 在 MEIC 清单中,石油化工是 VOCs 的主要来源,水泥厂、钢铁厂和工业锅炉的排放量都相对较小(Xue *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2022; Bai *et al.*, 2023).

溶剂行业主要包括用于汽车和建筑墙壁的工业涂料、工业粘合剂、印刷、脱脂、农药使用、制药和干洗. 根据 Shi *et al.* (2023) 以及 Jiménez-López and Hincapié-Llanos (2022) 的研究,用绿色涂料替代传统涂料可以减少高达 70% 至 80% 的 VOCs 排放. Gao *et al.* (2021b) 认为实施更严格的 VOCs 限制措施可以将工业粘合剂的 VOCs 排放量减少 60%. 此外,在印刷行业,减少 VOCs 的排放可以通过使用低 VOCs 含量的原材料,增加生产过程的气密性,并实施废物收集处理措施(减少 46% 至 66% 的排放量)来实现(You *et al.*, 2023). Zheng *et al.* (2017) 研究发现,吸附/冷凝分离/催化燃烧的应用可使农药排放的 VOCs 量减少 70%~90%,而冷凝分离也可使干洗过程中产生的 VOCs 减少 70%~85%. 此外,利用泄漏检测与修复系统可以将制药过程中 VOCs 的产生减少 55% 至 72% (Zhang *et al.*, 2021).

居民住宅挥发性有机化合物的主要来源是使用固体燃料,包括煤和生物质燃料. He *et al.* (2023) 和 Sun *et al.* (2019) 的研究表明,用半气化炉和煤球组合代替传统的炉子和燃料可以减少高达 90% 的 VOCs 排放. 此外,交通运输通常分为两类:道路交通和非道路交通. 在道路交通方面, Wu *et al.* (2023) 认为,加强排放监测和执行更严格的法律规

表 3 各行业 VOCs 减排策略和减排潜力
Table 3 VOCs emission reduction strategies and emission reduction potential

部门	行业	VOCs 排放控制策略	VOCs 减排潜力	参考文献
工业	石油化工	对失控排放的有效控制(包括泄漏检测与修复系统(LDAR)、过程控制、源头排放控制)	40%	Simayi <i>et al.</i> , 2021 和 Wang <i>et al.</i> , 2023a
	油漆	绿色涂料替代	70%~80%	Shi <i>et al.</i> , 2023
溶剂	工业粘合剂	实施更严格的 VOCs 排放限制	60%	Gao <i>et al.</i> , 2021b
	印刷	使用 VOCs 含量低的原材料	46%~66%	You <i>et al.</i> , 2023
	农药	吸附/冷凝分离/催化燃烧	70%~90%	Zheng <i>et al.</i> , 2017
	干洗	冷凝分离	70%~85%	Zheng <i>et al.</i> , 2017
	制药行业	使用 LDAR 技术	55%~72%	Zhang <i>et al.</i> , 2021
交通运输	道路车辆	摩托车:安装排放控制装置	45%~88%	Dhital <i>et al.</i> , 2019
		乘用车:加强排放监测和执法,并结合车辆数量的监管限制	51%	Wu <i>et al.</i> , 2023
	非道路车辆	船舶:更换燃料	67%	Wu <i>et al.</i> , 2019
居民住宅	固体燃料(煤、生物质燃料等)	清洁供暖技术	90%	He <i>et al.</i> , 2023 和 Sun <i>et al.</i> , 2019

表 4 气象因子模拟结果的对比结果,包括观测和模拟结果的平均偏差(MB)、平均归一化偏差(NMB)、平均误差(ME)和平均归一化误差(NME)

Table 4 Detailed statistics of meteorological factors. Mean bias (MB), normalized mean bias (NMB), mean error (ME) and normalized mean error (NME) of observation and simulation results.

		<i>R</i>	<i>MB</i>	<i>ME</i>	<i>NMB</i> (%)	<i>NME</i> (%)
PM _{2.5} 模拟时段 (2017 年 2 月 11 日至 17 日)	U10	0.80	0.02(m/s)	0.82(m/s)	1.28	2.21
	V10	0.86	-0.45(m/s)	1.05(m/s)	0.78	0.80
	T2	0.95	0.90(K)	1.79(K)	-0.002	0.007
	RH2	0.86	-5.18(%)	11.67(%)	-0.06	0.21
O ₃ 模拟时段 (2017 年 6 月 1 日至 9 日)	U10	0.80	-0.28(m/s)	0.85(m/s)	0.31	-2.93
	V10	0.87	-0.02(m/s)	0.96(m/s)	2.19	-1.79
	T2	0.90	-0.15(K)	1.21(K)	-0.000 6	0.004
	RH2	0.89	-2.52(%)	5.91(%)	-0.04	0.08

定措施,可以有效遏制 51% 的乘用车 VOCs 排放.为摩托车安装排放控制装置可以减少 45%~88% 的 VOCs 排放(Dhital *et al.*, 2019).在非道路运输中,船舶是 VOCs 的主要来源,约占 67%.Wu *et al.* (2019) 明确表示,用清洁燃料替代传统燃料可以减少船舶 VOCs 排放高达 67%.

2 结果与讨论

2.1 模拟结果对比验证

为了更好地评价模型,首先比较了气象因子的模拟结果(表 4).模型能较好地再现各气象要素的时空分布,全国范围各气象要素平均相关系数为 0.80~0.95, *NMB* 和 *NME* 小于 3.0%.风速和风向在整个模拟期间符合 Emery *et al.* (2017) 提出的性能基准.

同时,WRF-Chem 模型能够较好地模拟 PM_{2.5} 和 O₃ 的时空演变,观测数据与模拟结果的相关系数分别为 0.51~0.74(PM_{2.5}) 和 0.70~0.88(O₃),如图 2 所示.WRF-Chem 模式略微高估了 NCP 和 YRD 地区 PM_{2.5} 浓度(*MB* 分别为 2 μg/m³ 和 1 μg/m³),低估了 CC、PRD 和 SCB 地区的 PM_{2.5},特别是 PRD 地区(*MB*=-16 μg/m³).前人的研究也普遍高估 NCP 地区的 PM_{2.5} 浓度(Yang *et al.*, 2020),低估南方地区和 SCB 的 PM_{2.5} 浓度(Liu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2020).然而,WRF-Chem 模式显著高估了臭氧浓度,*MB* 可达 41 μg/m³.Gao *et al.* (2020) 报告称,WRF-Chem 模型会倾向于将 O₃ 浓度预测得更高.

2.2 REAL 减排情景下 SOA、PM_{2.5} 和 O₃ 污染的缓解

图 3a 和 3b 显示了 2 月 11 日至 17 日 REAL 实验

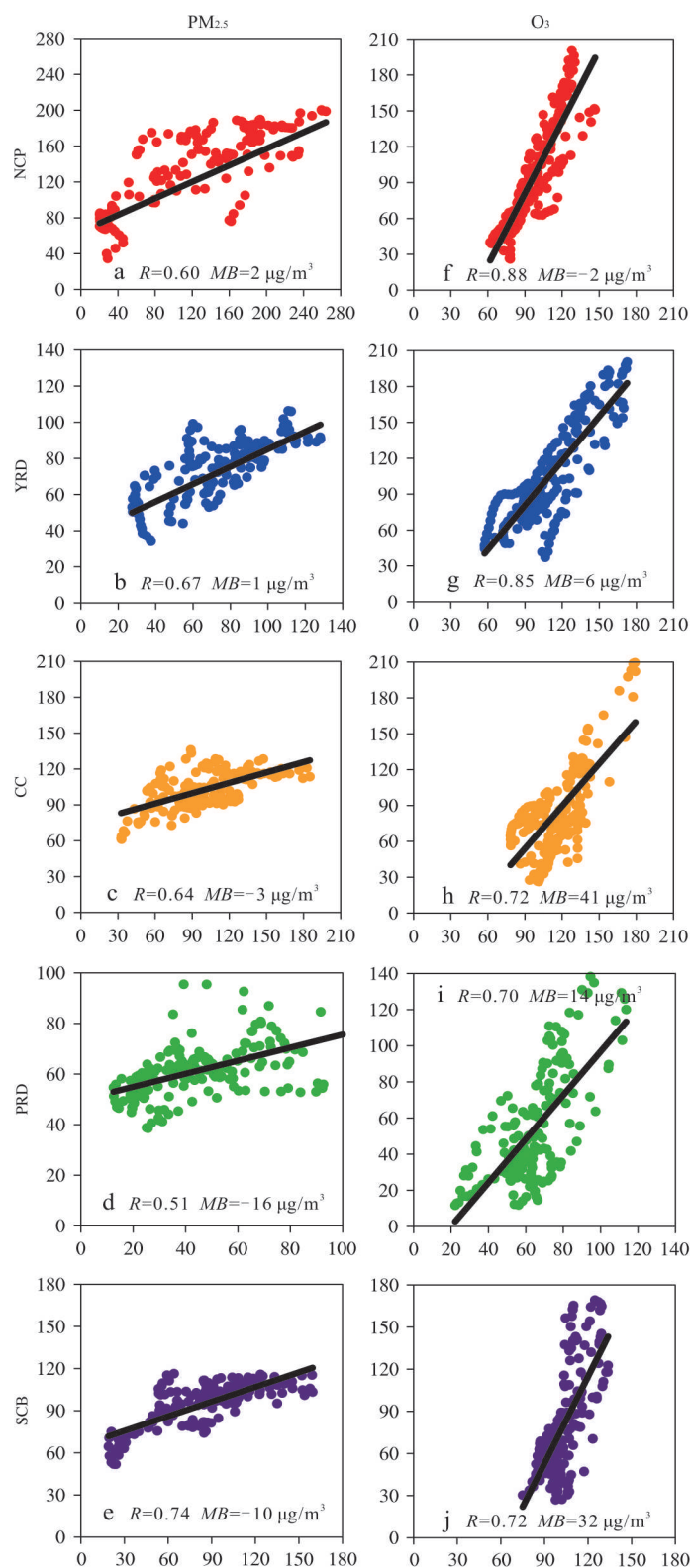


图2 5个城市地区PM_{2.5}(a~e)及O₃(f~j)模拟结果与观测的相关性及平均偏差

Fig.2 The correlation and average deviation between observation and simulation for PM_{2.5} (a~e) and O₃ (f~j) in 5 urban areas
图a、f对应NCP地区,图b、g对应YRD地区,图c、h对应CC地区,图d、i对应PRD地区,图e、j对应SCB地区;(a~e)模拟时间段为2017年2月11日至17日,(f~j)模拟时间段为2017年6月1日至9日;图中横坐标是PM_{2.5}和O₃的观测浓度值,纵坐标是模拟浓度值,单位为μg/m³

与CON实验SOA和PM_{2.5}浓度差异的空间分布.在REAL减排情景下,我国整个中东部地区和南部地

区的SOA浓度有明显的下降.其中浓度下降最大的是SCB地区,成都地区最为明显,SOA浓度下降最

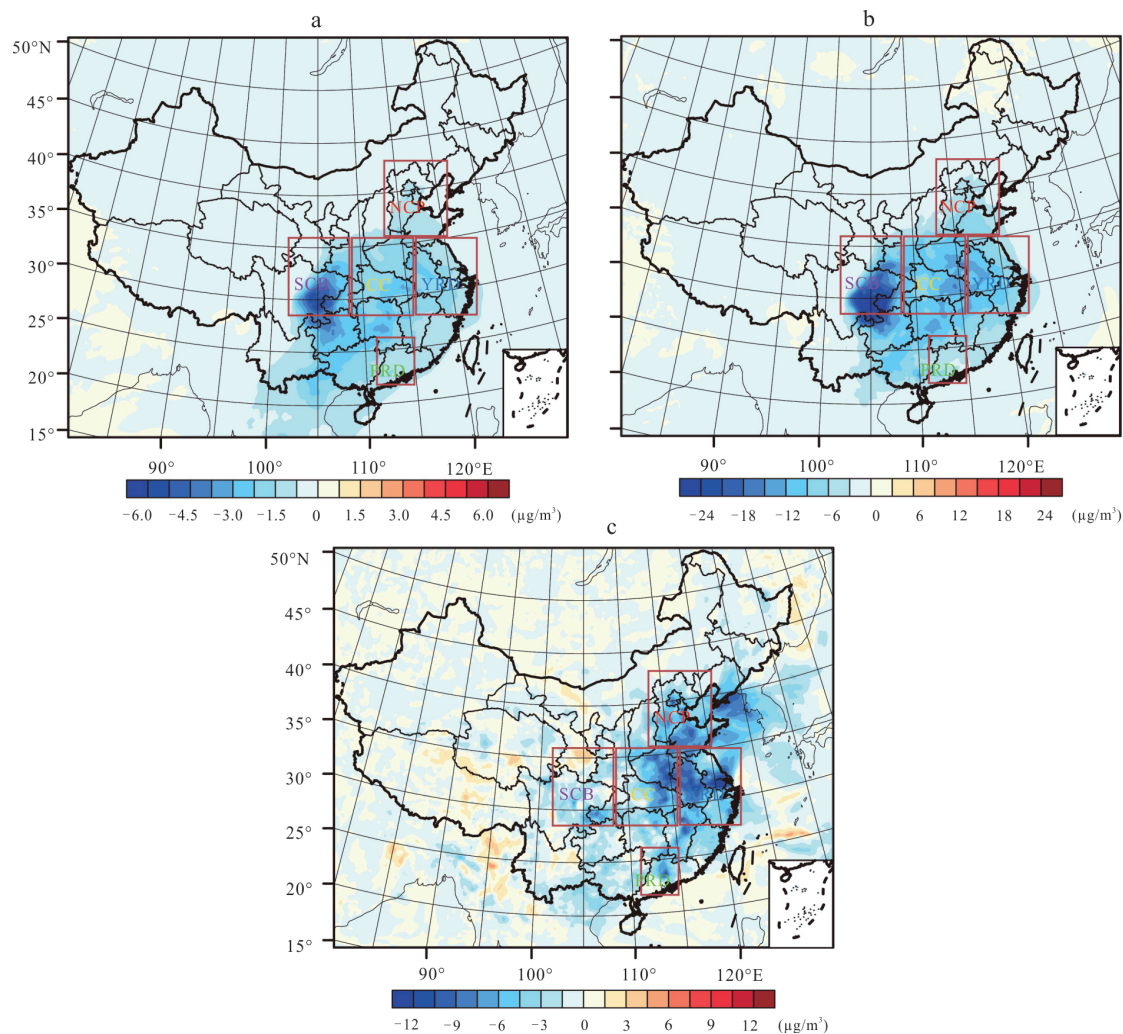


图3 CON和REAL实验SOA(a)、PM_{2.5}(b)和O₃(c)浓度的差异

Fig.3 Difference in SOA (a), PM_{2.5} (b) and O₃ (c) concentration of CON and REAL experimental

大约 $6.34\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. 其次是华中地区、珠三角和长三角地区, SOA 浓度降低的最大值分别是 $3.31\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $2.92\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $2.61\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. 在模拟时间段内, 根据可实施的减排措施设置 VOCs 减排, REAL 减排设置可使 SCB、CC、PRD、YRD 和 NCP 地区 SOA 平均浓度分别显著降低 $2.80\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (77.3%)、 $2.04\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (74.5%)、 $1.49\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (72.0%)、 $1.37\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (80.6%) 和 $0.73\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (88.0%). VOCs 对 PM_{2.5} 的减排效果与 SOA 的结果相似, SCB 地区浓度下降最大, 最大值为 $34.58\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. SCB、CC、PRD、YRD 和 NCP 地区 PM_{2.5} 平均浓度分别显著降低 $14.94\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $10.55\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $7.80\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $5.51\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $3.92\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. 这说明 VOCs 减排措施在我国中东部地区和南部地区对减少 SOA 和 PM_{2.5} 浓度具有显著效果, 特别是在 SCB 地区效果最为明显, 且减排效果在不同区域之间存在差异.

图 3b 显示了 6 月 2 日至 9 日 O₃ 浓度从 CON 到 REAL 的平均变化. 在 REAL 减排情景下, O₃ 浓度有明显的下降, 其中浓度下降最大的是长三角地区, O₃ 浓度下降最大约 $16.74\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. 此外, 华中地区 O₃ 浓度也有明显的降低, 河南的东南部、湖北的东部地区和安徽地区 O₃ 浓度值最大可减少 $11.87\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. 平均而言, 在模拟时间段内, REAL 减排设置可使 YRD、NCP、CC、PRD 和 SCB 地区平均 O₃ 浓度分别降低 $6.11\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (5.1%)、 $4.05\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3.6%)、 $4.00\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (3.2%)、 $3.50\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (4.9%) 和 $1.87\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.5%). Wei *et al.* (2018) 对北京地区设置的减少 30% VOCs 敏感性试验表明, 在工业区和农村地区 O₃ 浓度有一定程度的升高 (5×10^{-9}), 在城市地区有少量的下降 (2×10^{-9}). 当 VOCs 排放设置为 0 时, 工业区臭氧贡献 12.7%, 而对市中心和农村地区贡献仅 1.9% 和 0.4%. Li *et al.* (2020) 利用 WRF-Chem

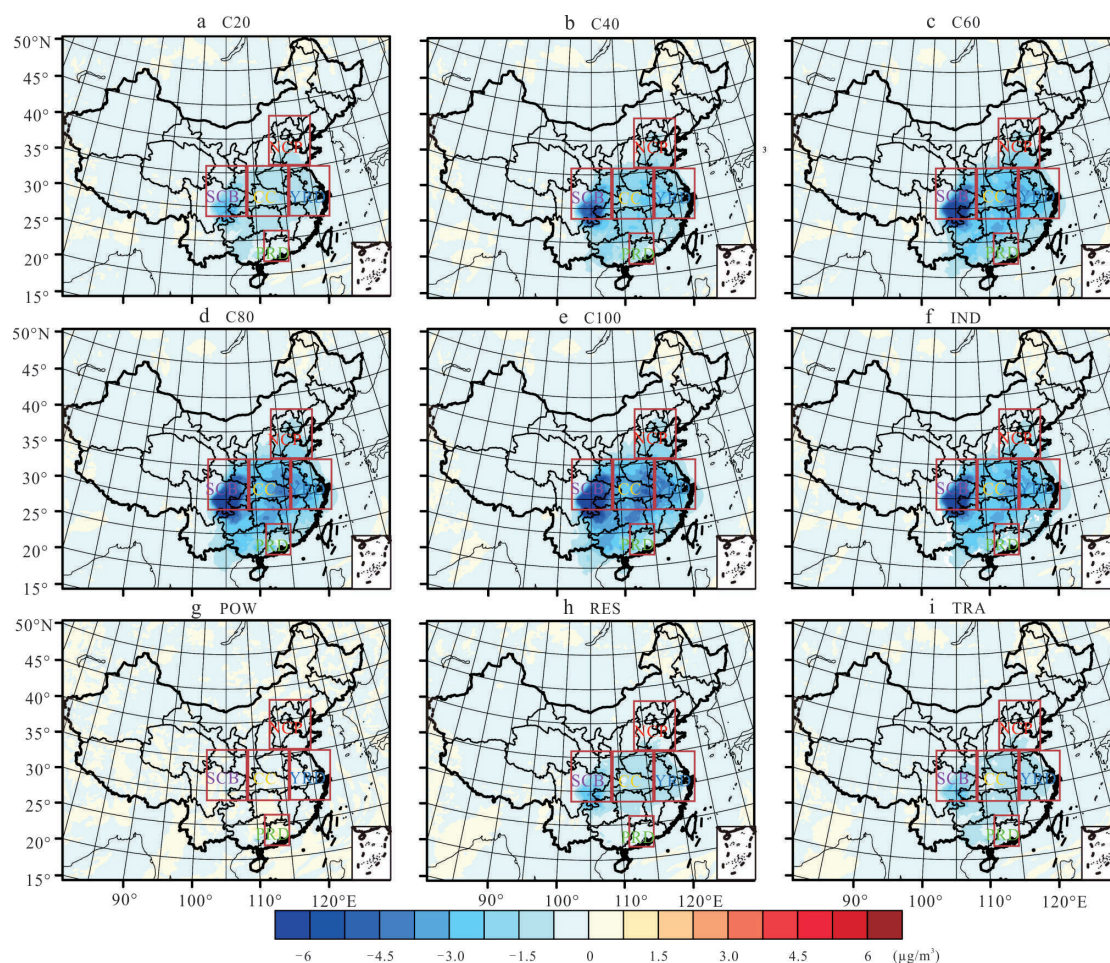


图4 敏感性试验与控制实验SOA浓度的空间差异;模拟时间段为2017年2月11日至17日

Fig.4 Spatial difference of SOA concentration between sensitivity test and control experiment; The simulation period was February 11–17, 2017

对兰州地区臭氧减排研究表明,在臭氧平均浓度高于 $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的背景下,减少 10% 的 TVOC 排放, O₃ 浓度下降了 5%。在他们模拟的时间段内,兰州处于 VOCs 限制,使臭氧浓度明显降低的方案仍是减少 NO_x。要使 O₃ 得到最大程度的改善,需要 NO_x 和 VOCs 协同减排。

2.3 人为源 VOCs 排放对 SOA、PM_{2.5} 和 O₃ 浓度的贡献

为了定量计算人为源 VOCs 排放对 SOA、PM_{2.5} 和 O₃ 浓度的贡献,图 4 和附图 1 显示了不同 VOCs 排放量设置下,SOA 和 PM_{2.5} 平均浓度与控制实验的差异。VOCs 减排比例越大,SOA 和 PM_{2.5} 浓度下降越多(附图 2 和附图 3),其中 SCB 地区减少最为显著(SOA: $1.31 \sim 3.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$; PM_{2.5}: $6.46 \sim 18.95 \mu\text{g}/\text{m}^3$),这与前面的 REAL 试验显示出了类似的结果。通过完全消除人为 VOCs 排放,可使模拟时间段内 5 个地区绝大部分的 SOA 显著降低(NCP: 97.5%、

YRD: 95.8%、CC: 93.8%、PRD: 92.3% 和 SCB: 95.3%)。除 NCP 地区外,其他城市地区 PM_{2.5} 浓度值可减少 13.0%~22.1% (NCP 下降约 3.5%)。SOA 只贡献部分 PM_{2.5},所以 VOCs 对 PM_{2.5} 的贡献更少。对于特定行业的减排结果(附图 2 和附图 3),减少工业 VOCs 排放实现了最显著的 SOA 和 PM_{2.5} 减缓,使 SOA 浓度平均降低了 $1.74 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 浓度平均降低了 $8.78 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。下降最明显的地区是 SCB 地区(SOA: $2.90 \mu\text{g}/\text{m}^3$; PM_{2.5}: $15.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。其次是居民住宅和交通运输,他们对污染物的贡献相似,可分别使 SOA 平均浓度降低 $0.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $0.70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 平均浓度降低 $3.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $3.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。另外值得注意的是,与其他城市地区有所差异的是,珠三角地区交通运输行业排放的 VOCs 比居民住宅对 SOA ($0.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 的贡献更大。由此可见,通过对工业、交通运输和居民住宅 VOCs 排放的

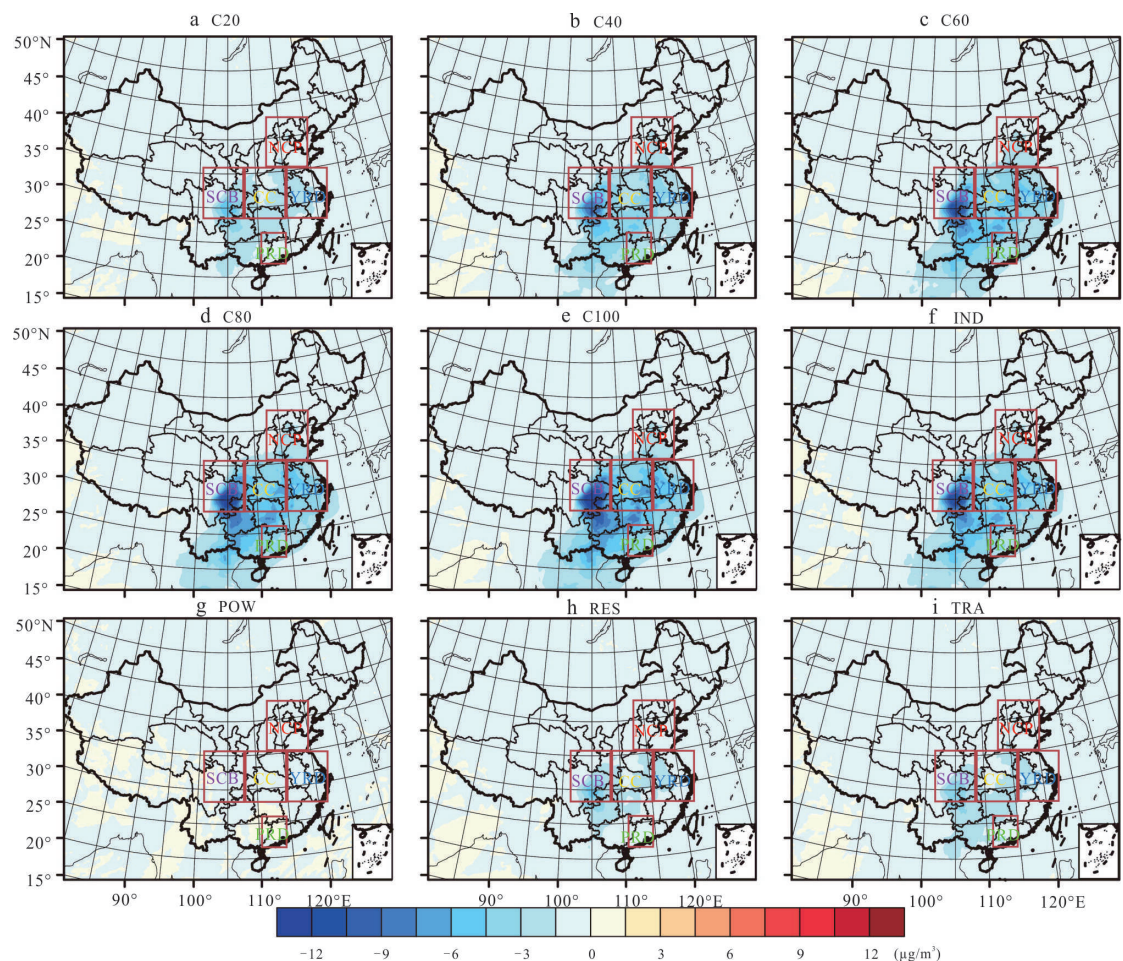


图5 敏感性试验与控制实验 O₃浓度的空间差异;模拟时间段为2017年6月1日至9日

Fig.5 Spatial difference of O₃ concentration between sensitivity test and control experiment; The simulation period was June 1–9, 2017

控制,可以明显改善我国城市地区 SOA 的污染情况.

类似地,图 5 显示了不同 VOCs 排放量设置下, O₃ 平均浓度与控制实验的差异. 结果显示: VOCs 减排比例越大,可使 5 个城市地区 O₃ 平均浓度依次降低 0.49~7.29 μg/m³(附图 4). 其中减少最明显的是 YRD 地区,臭氧浓度减少最大值为 8.42~26.14 μg/m³. 通过完全消除人为 VOCs 排放,5 个城市地区臭氧浓度有一定程度的下降(NCP: 7.55 μg/m³、YRD: 9.05 μg/m³、CC: 7.29 μg/m³、PRD: 4.31 μg/m³ 和 SCB: 3.15 μg/m³). 对于特定行业的减排(附图 4),结果表明减少工业排放 VOCs 实现了最显著的 O₃ 减排,5 个地区 O₃ 浓度平均降低 3.28 μg/m³,下降最明显的地区是 YRD 地区(最大减少 16.00 μg/m³). 其次居民住宅可使臭氧平均浓度降低 2.07 μg/m³(约 2.1%). 然后是交通运输,可以导致臭氧平均浓度减少 0.98 μg/m³(约 1.0%). 值得注意的是,由

于臭氧光化学生成的非线性效应,在 ARG 和 POW 减排情景下,部分地区的臭氧浓度略有增加. 此外,在 MEIC 排放清单的总结中,农业和发电这两个部门对 VOCs 的贡献较少,其中农业对 VOCs 的贡献为 0. 总的来说,仅通过减少 VOCs 排放,对臭氧污染的控制效果不佳,根据前人的经验,可能还需考虑氮氧化物联合制定减排方案.

3 结论

为了清晰全面地了解 VOCs 减排潜力,本研究建立了一套完善的 VOCs 减排策略,实施 2017 年中国五大工业排放源 VOCs 减排设定. 同时,建立不同比例、不同行业的 VOCs 减排情景,与精细化的情景进行对比验证. 使用 WRF-Chem 模型定量分析了 VOCs 控制策略对 SOA 和 O₃ 的缓解作用. 基于 PM_{2.5} 和 O₃ 的空气环境质量的 国家二级标准,选取

PM_{2.5}超标和O₃超标两个时间段进行WRF-Chem模拟,评估VOCs减排对SOA和O₃的影响。

根据MEIC排放清单的总结,工业(工业+溶剂)、交通和居民是人为挥发性有机化合物的主要来源.精细化的VOCs减排策略可使工业VOCs总排放量减少约55%,交通VOCs总排放量减少53%,居民VOCs总排放量减少90%。在此减排配置下,NCP地区的SOA可减少约88.0%,YRD、CC、PRD和SCB地区的SOA浓度可分别减少约80.6%、74.5%、72.0%和77.3%。SCB、CC、PRD、YRD和NCP地区PM_{2.5}平均浓度可分别降低14.94 μg/m³、10.55 μg/m³、7.80 μg/m³、5.51 μg/m³和3.92 μg/m³。然而,本文的实验结果显示VOCs对O₃的影响相对较小。在相同的减排情景下,各城市地区O₃浓度下降幅度均小于10%,但在量级尺度上,可使O₃浓度平均降低3.91 μg/m³,最大减少约16.74 μg/m³,说明控制城市VOCs排放值得人们关注。

为了验证精细化VOCs减排方案的可靠性,笔者另设置了10个敏感性试验进行对比验证。当设置的VOCs减排比例越大时,SOA和PM_{2.5}浓度降低越多。其中,四川盆地减少最为明显。此外,工业排放的VOCs是SOA和PM_{2.5}的主要贡献者,可让5个城市地区的SOA浓度降低0.74~2.90 μg/m³,PM_{2.5}浓度降低3.93~15.33 μg/m³。其次,交通运输和居民住宅排放可以分别减少约0.70 μg/m³和0.66 μg/m³的SOA,以及3.13 μg/m³和3.33 μg/m³的PM_{2.5}。但VOCs对O₃的控制效果不佳,VOCs减排比例越大时,O₃浓度降低越明显。工业VOCs减排对O₃的缓解效果最明显,可使城市地区O₃平均浓度降低约3.48 μg/m³。其次是交通运输和居民住宅,平均浓度分别降低约2.07 μg/m³和0.98 μg/m³。

本次研究结果表明,通过减少VOCs的排放可以一定程度地减少SOA和O₃。此外,VOCs会影响大气中原有的光化学平衡,产生·OH等自由基,进而促进臭氧和二次颗粒物的生成。所以,控制VOCs排放对于减少O₃和PM_{2.5}污染具有关键作用。但由于VOCs和NO_x的减排效果之间存在一定的非线性关系,单一减排VOCs可能无法达到预期的效果。且VOCs的排放源复杂多样,使得全面控制和减少VOCs排放具有一定的难度。NO_x和VOCs是O₃和PM_{2.5}的共同前体物,在很大程度上决定了O₃和PM_{2.5}的浓度。此外,NO_x和VOCs与O₃浓度呈非线性关系,在NO_x限制区减少VOCs的排放可能引起

臭氧浓度的升高。NO_x和VOCs的协同减排,可以在两者之间找到平衡点,实现最佳减排效果。因此,为了进一步控制SOA及PM_{2.5}和O₃浓度,除了控制氮氧化物和颗粒物的排放外,还必须制定减少VOCs排放的策略,本研究结果可为其提供科学依据。

附图见<https://doi.org/10.3799/dqkx.2024.090>。

References

- Azmi, S., Sharma, M., 2022. Preventing Biogenic Secondary Organic Aerosols Formation in India. *Atmospheric Environment*, 290: 119352. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119352>
- Bai, X. X., Liu, W., Wu, B. B., et al., 2023. Emission Characteristics and Inventory of Volatile Organic Compounds from the Chinese Cement Industry Based on Field Measurements. *Environmental Pollution*, 316: 120600. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120600>
- Batterman, S., Xu, L. Z., Chen, F., et al., 2016. Characteristics of PM_{2.5} Concentrations across Beijing during 2013–2015. *Atmospheric Environment*, 145: 104–114. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.060>
- Carter, W. P. L., 1990. A Detailed Mechanism for the Gas-Phase Atmospheric Reactions of Organic Compounds. *Atmospheric Environment Part A General Topics*, 24 (3): 481–518. [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(90\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0960-1686(90)90005-8)
- Chou, M. D., Suarez, M. J., 1999. A Solar Radiation Parameterization for Atmospheric Studies. *NASA Technical Reports Server*, 15:104606.
- Dhital, N. B., Yang, H. H., Wang, L. C., et al., 2019. VOCs Emission Characteristics in Motorcycle Exhaust with Different Emission Control Devices. *Atmospheric Pollution Research*, 10(5): 1498–1506. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.04.007>
- Duan, C. S., Liao, H., Wang, K. D., et al., 2023. The Research Hotspots and Trends of Volatile Organic Compound Emissions from Anthropogenic and Natural sources: A Systematic Quantitative Review. *Environmental Research*, 216: 114386. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114386>
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., et al., 2003. Implementation of Noah Land Surface Model Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D22): 8851. <https://doi.org/10.1029/2002JD003296>
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A. G., et al., 2017. Recom-

- mentations on Statistics and Benchmarks to Assess Photochemical Model Performance. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(5): 582–598. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- Epping, R., Koch, M., 2023. On-Site Detection of Volatile Organic Compounds (VOCs). *Molecules*, 28(4): 1598. <https://doi.org/10.3390/molecules28041598>
- Gallus, W. A. Jr, Bresch, J. F., 2006. Comparison of Impacts of WRF Dynamic Core, Physics Package, and Initial Conditions on Warm Season Rainfall Forecasts. *Monthly Weather Review*, 134(9): 2632–2641. <https://doi.org/10.1175/mwr3198.1>
- Gao, L. B., Wang, T. J., Ren, X. J., et al., 2021a. Subseasonal Characteristics and Meteorological Causes of Surface O₃ in Different East Asian Summer Monsoon Periods over the North China Plain during 2014–2019. *Atmospheric Environment*, 264: 118704. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118704>
- Gao, M. P., Liu, W. W., Wang, H. L., et al., 2021b. Emission Factors and Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Adhesive Application in Indoor Decoration in China. *Science of The Total Environment*, 779: 145169. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145169>
- Gao, M., Gao, J. H., Zhu, B., et al., 2020. Ozone Pollution over China and India: Seasonality and Sources. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(7): 4399–4414. <https://doi.org/10.5194/acp-20-4399-2020>
- Grell, G. A., Dévényi, D., 2002. A Generalized Approach to Parameterizing Convection Combining Ensemble and Data Assimilation Techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14): 38–1–38–4. <https://doi.org/10.1029/2002GL015311>
- Guo, H., Ling, Z. H., Cheng, H. R., et al., 2017. Tropospheric Volatile Organic Compounds in China. *Science of The Total Environment*, 574: 1021–1043. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.116>
- Hallquist, M., Wenger, J. C., Baltensperger, U., et al., 2009. The Formation, Properties and Impact of Secondary Organic Aerosol: current and Emerging Issues. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(14): 5155–5236. <https://doi.org/10.5194/acp-9-5155-2009>
- He, K., Fu, T., Zhang, B., et al., 2023. Examination of Long-Time Aging Process on Volatile Organic Compounds Emitted from Solid Fuel Combustion in a Rural Area of China. *Chemosphere*, 333: 138957. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138957>
- Huang, R. J., Zhang, Y. L., Bozzetti, C., et al., 2014. High Secondary Aerosol Contribution to Particulate Pollution during Haze Events in China. *Nature*, 514(7521): 218–222. <https://doi.org/10.1038/nature13774>
- Huang, Y. S., Hsieh, C. C., 2019. Ambient Volatile Organic Compound Presence in the Highly Urbanized City: source Apportionment and Emission Position. *Atmospheric Environment*, 206: 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.046>
- Hui, L. R., Liu, X. G., Tan, Q. W., et al., 2020. VOC Characteristics, Chemical Reactivity and Sources in Urban Wuhan, Central China. *Atmospheric Environment*, 224: 117340. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117340>
- Jimenez, J. L., Canagaratna, M. R., Donahue, N. M., et al., 2009. Evolution of Organic Aerosols in the Atmosphere. *Science*, 326(5959): 1525–1529. <https://doi.org/10.1126/science.1180353>
- Jiménez, P. A., Dudhia, J., González-Rouco, J. F., et al., 2012. A Revised Scheme for the WRF Surface Layer Formulation. *Monthly Weather Review*, 140(3): 898–918. <https://doi.org/10.1175/mwr-d-11-00056.1>
- Jiménez-López, A. M., Hincapié-Llanos, G. A., 2022. Identification of Factors Affecting the Reduction of VOC Emissions in the Paint industry: Systematic Literature Review-SLR. *Progress in Organic Coatings*, 170: 106945. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106945>
- Li, J. X., Wang, Z. X., Chen, L. L., et al., 2020. WRF-Chem Simulations of Ozone Pollution and Control Strategy in Petrochemical Industrialized and Heavily Polluted Lanzhou City, Northwestern China. *Science of The Total Environment*, 737: 139835. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139835>
- Li, J., Han, Z. W., Wu, J., et al., 2022a. Secondary Organic Aerosol Formation and Source Contributions over East China in Summertime. *Environmental Pollution*, 306: 119383. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119383>
- Li, M. M., Wang, T. J., Shu, L., et al., 2021. Rising Surface Ozone in China from 2013 to 2017: A Response to the Recent Atmospheric Warming or Pollutant Controls? *Atmospheric Environment*, 246: 118130. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118130>
- Li, M., Liu, H., Geng, G. N., et al., 2017. Anthropogenic Emission Inventories in China: A Review. *National Science Review*, 4(6): 834–866. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwx150>
- Li, X. B., Yuan, B., Wang, S. H., et al., 2022b. Variations

- and Sources of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Urban Region: Insights from Measurements on a Tall Tower. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 22(16): 10567–10587. <https://doi.org/10.5194/acp-22-10567-2022>
- Li, Y. F., Wu, Z. H., Ji, Y. Y., et al., 2024. Comparison of the Ozone Formation Mechanisms and VOCs Apportionment in Different Ozone Pollution Episodes in Urban Beijing in 2019 and 2020: Insights for Ozone Pollution Control Strategies. *Science of The Total Environment*, 908: 168332. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168332>
- Lin, Y. L., Farley, R. D., Orville, H. D., 1983. Bulk Parameterization of the Snow Field in a Cloud Model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 22(6): 1065–1092. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1065:bpotsf>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1065:bpotsf>2.0.co;2)
- Liu, J. W., Li, X., Tan, Z. F., et al., 2021. Assessing the Ratios of Formaldehyde and Glyoxal to NO₂ as Indicators of O₃-NO_x-VOC Sensitivity. *Environmental Science & Technology*, 55(16): 10935–10945. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07506>
- Liu, Y. M., Hong, Y. Y., Fan, Q., et al., 2017. Source-Receptor Relationships for PM_{2.5} during Typical Pollution Episodes in the Pearl River Delta City Cluster, China. *Science of The Total Environment*, 596: 194–206. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.255>
- Ma, W., Feng, Z. M., Zhan, J. L., et al., 2022. Influence of Photochemical Loss of Volatile Organic Compounds on Understanding Ozone Formation Mechanism. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(7): 4841–4851. <https://doi.org/10.5194/acp-22-4841-2022>
- Mo, Z. W., Shao, M., Lu, S. H., 2016. Compilation of a Source Profile Database for Hydrocarbon and OVOC Emissions in China. *Atmospheric Environment*, 143: 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.025>
- Moeller, D., 2004. The Tropospheric Ozone Problem. *Archives of Industrial Hygiene and Toxicology*, 55(1): 11–23.
- Noh, Y., Cheon, W. G., Hong, S. Y., et al., 2003. Improvement of the K-Profile Model for the Planetary Boundary Layer Based on Large Eddy Simulation Data. *Boundary - Layer Meteorology*, 107(2): 401–427. <https://doi.org/10.1023/A:1022146015946>
- Pan, R. X., Wang, F. T., Zhao, X. Y., et al., 2024. Modeling Study on Ozone Pollution Event Control Pathways in a Typical Industrial City. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 44(9): 21–31 (in Chinese with English abstract).
- Pan, W. J., Gong, S. L., Lu, K. D., et al., 2023. Multi-Scale Analysis of the Impacts of Meteorology and Emissions on PM_{2.5} and O₃ Trends at Various Regions in China from 2013 to 2020 3. Mechanism Assessment of O₃ Trends by a Model. *Science of The Total Environment*, 857: 159592. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159592>
- Qi, S. H., Sheng, G. Y., Fu, J. M., et al., 2001. PAHs in Aerosols at Dinghushan Natural Protection Zone. *Earth Science*, 26(1): 83–87 (in Chinese with English abstract).
- Sarwar, G., Luecken, D., Yarwood, G., et al., 2008. Impact of an Updated Carbon Bond Mechanism on Predictions from the CMAQ Modeling System: Preliminary Assessment. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(1): 3–14.
- Sharma, S., Chatani, S., Mahtta, R., et al., 2016. Sensitivity Analysis of Ground Level Ozone in India Using WRF-CMAQ Models. *Atmospheric Environment*, 131: 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.036>
- Shen, L. J., Hu, W. Y., Zhao, T. L., et al., 2021. Changes in the Distribution Pattern of PM_{2.5} Pollution over Central China. *Remote Sensing*, 13(23): 4855. <https://doi.org/10.3390/rs13234855>
- Shi, Y. Q., Xi, Z. Y., Lyu, D. Q., et al., 2023. Sector-Based Volatile Organic Compound Emission Characteristics and Reduction Perspectives for Coating Materials Manufacturing in China. *Journal of Cleaner Production*, 394: 136407. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136407>
- Simayi, M., Hao, Y. F., Li, J., et al., 2021. Historical Volatile Organic Compounds Emission Performance and Reduction Potentials in China's Petroleum Refining Industry. *Journal of Cleaner Production*, 292: 125810. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125810>
- Simayi, M., Shi, Y. Q., Xi, Z. Y., et al., 2022. Emission Trends of Industrial VOCs in China since the Clean Air Action and Future Reduction Perspectives. *Science of The Total Environment*, 826: 153994. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153994>
- Stevenson, D. S., Dentener, F. J., Schultz, M. G., et al., 2006. Multimodel Ensemble Simulations of Present-Day and Near-Future Tropospheric Ozone. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 111(D8): D08301. <https://doi.org/10.1029/2005JD006338>
- Sun, J., Shen, Z. X., Zhang, L. M., et al., 2019. Volatile Organic Compounds Emissions from Traditional and Clean Domestic Heating Appliances in Guanzhong Plain, China: Emission Factors, Source Profiles, and Effects on Regional Air Quality. *Environment International*, 133:

105252. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105252>
- Veld, M. I., Seco, R., Reche, C., et al., 2024. Identification of Volatile Organic Compounds and Their Sources Driving Ozone and Secondary Organic Aerosol Formation in NE Spain. *Science of The Total Environment*, 906: 167159. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167159>
- Wang, H. L., Sun, S. M., Nie, L., et al., 2023a. A Review of Whole-Process Control of Industrial Volatile Organic Compounds in China. *Journal of Environmental Sciences*, 123: 127–139. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.02.037>
- Wang, J. Y., Gao, A. F., Li, S. R., et al., 2023b. Regional Joint PM_{2.5}-O₃ Control Policy Benefits Further Air Quality Improvement and Human Health Protection in Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Areas. *Journal of Environmental Sciences*, 130: 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.06.036>
- Wang, P. F., Qiao, X., Zhang, H. L., 2020. Modeling PM_{2.5} and O₃ with Aerosol Feedbacks Using WRF/Chem over the Sichuan Basin, Southwestern China. *Chemosphere*, 254: 126735. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126735>
- Wang, R. P., Wang, X. Q., Cheng, S. Y., et al., 2022. Emission Characteristics and Reactivity of Volatile Organic Compounds from Typical High-Energy-Consuming Industries in North China. *Science of The Total Environment*, 809: 151134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151134>
- Wang, R. Y., Wang, L. L., Xue, M., et al., 2023c. New Insight into Formation Mechanism, Source and Control Strategy of Severe O₃ pollution: The Case from Photochemical Simulation in the Wuhan Metropolitan Area, Central China. *Atmospheric Research*, 284: 106605. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106605>
- Wang, T., Xue, L. K., Brimblecombe, P., et al., 2017. Ozone Pollution in China: A Review of Concentrations, Meteorological Influences, Chemical Precursors, and Effects. *Science of The Total Environment*, 575: 1582–1596. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.081>
- Wei, J., Li, Z. Q., Li, K., et al., 2022a. Full-Coverage Mapping and Spatiotemporal Variations of Ground-Level Ozone (O₃) Pollution from 2013 to 2020 across China. *Remote Sensing of Environment*, 270: 112775. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112775>
- Wei, W., Li, Y., Ren, Y. T., et al., 2019. Sensitivity of Summer Ozone to Precursor Emission Change over Beijing during 2010–2015: A WRF - Chem Modeling Study. *Atmospheric Environment*, 218: 116984. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116984>
- Wei, W., Lv, Z. F., Li, Y., et al., 2018. A WRF - Chem Model Study of the Impact of VOCs Emission of a Huge Petro - Chemical Industrial Zone on the Summertime Ozone in Beijing, China. *Atmospheric Environment*, 175: 44–53. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.058>
- Wei, W., Wang, S. X., Hao, J. M., et al., 2011. Projection of Anthropogenic Volatile Organic Compounds (VOCs) Emissions in China for the Period 2010–2020. *Atmospheric Environment*, 45(38): 6863–6871. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.01.013>
- Wei, W., Wang, X. F., Wang, X. Q., et al., 2022b. Attenuated Sensitivity of Ozone to Precursors in Beijing-Tianjin-Hebei Region with the Continuous NO_x Reduction within 2014–2018. *Science of The Total Environment*, 813: 152589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152589>
- Wiedinmyer, C., Akagi, S. K., Yokelson, R. J., et al., 2011. The Fire Inventory from Near (Finn): A High Resolution Global Model to Estimate the Emissions from Open Burning. *Geoscientific Model Development*, 4(3): 625–641.
- Wu, D., Ding, X., Li, Q., et al., 2019. Pollutants Emitted from Typical Chinese Vessels: Potential Contributions to Ozone and Secondary Organic Aerosols. *Journal of Cleaner Production*, 238: 117862. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117862>
- Wu, T. R., Cui, Y. Y., Lian, A. P., et al., 2023. Vehicle Emissions of Primary Air Pollutants from 2009 to 2019 and Projection for the 14th Five-Year Plan Period in Beijing, China. *Journal of Environmental Sciences*, 124: 513–521. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.11.038>
- Wu, W. J., Zhao, B., Wang, S. X., et al., 2017. Ozone and Secondary Organic Aerosol Formation Potential from Anthropogenic Volatile Organic Compounds Emissions in China. *Journal of Environmental Sciences*, 53: 224–237. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.03.025>
- Xuan, L. C., Ma, Y. N., Xing, Y. F., et al., 2021. Source, Temporal Variation and Health Risk of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Urban Traffic in Harbin, China. *Environmental Pollution*, 270: 116074. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116074>
- Xue, Y. F., Tian, H. Z., Yan, J., et al., 2016. Temporal Trends and Spatial Variation Characteristics of Primary Air Pollutants Emissions from Coal-Fired Industrial Boilers in Beijing, China. *Environmental Pollution*, 213: 717–726. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.03.047>

- Yang, J. H., Kang, S. C., Ji, Z. M., et al., 2020. Investigation of Variations, Causes and Component Distributions of PM_{2.5} Mass in China Using a Coupled Regional Climate-Chemistry Model. *Atmospheric Pollution Research*, 11 (2): 319–331. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.11.005>
- Yin, D. J., Song, Q., Guo, Y. X., et al., 2025. Regional Transport Characteristics of PM_{2.5} Pollution Events in Beijing during 2018–2021. *Journal of Environmental Sciences*, 152: 503–515. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2024.05.044>
- You, G. Y., Liu, H. F., Sun, R., et al., 2023. Characterizing VOCs Emissions of Five Packaging and Printing Enterprises in China and the Emission Reduction Potential of This Industry. *Journal of Cleaner Production*, 420: 138445. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138445>
- Young, P. J., Archibald, A. T., Bowman, K. W., et al., 2013. Pre-Industrial to End 21st Century Projections of Tropospheric Ozone from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(4): 2063–2090. <https://doi.org/10.5194/acp-13-2063-2013>
- Zhai, S. X., Jacob, D. J., Wang, X., et al., 2019. Fine Particulate Matter (PM_{2.5}) Trends in China, 2013–2018: separating Contributions from Anthropogenic Emissions and Meteorology. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(16): 11031–11041. <https://doi.org/10.5194/acp-19-11031-2019>
- Zhang, G. F., Fei, B., Xiu, G. L., 2021. Characteristics of Volatile Organic Compound Leaks from Equipment Components: A Study of the Pharmaceutical Industry in China. *Sustainability*, 13(11): 6274. <https://doi.org/10.3390/su13116274>
- Zhang, X. Y., Wang, X. Q., Wang, C. D., et al., 2023. Ozone Sensitivity and Precursor Emission Reduction Scheme in Baoding City in Summer. *China Environmental Science*, 43(6): 2703–2713 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, B., Tong, D., Li, M., et al., 2018. Trends in China's Anthropogenic Emissions since 2010 as the Consequence of Clean Air Actions. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 18(19): 14095–14111. <https://doi.org/10.5194/acp-18-14095-2018>
- Zheng, C. H., Shen, J. L., Zhang, Y. X., et al., 2017. Quantitative Assessment of Industrial VOC Emissions in China: Historical Trend, Spatial Distribution, Uncertainties, and Projection. *Atmospheric Environment*, 150: 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.023>
- Zhou, D. R., Liu, Y., Gao, J., et al., 2023. Assessment of Ozone Sensitivity and Emission Reduction Scenarios in Typical Pollution Processes in Eastern China. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 46(5): 667–678 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, B., Han, Y., Wang, C., et al., 2019. Understanding Primary and Secondary Sources of Ambient Oxygenated Volatile Organic Compounds in Shenzhen Utilizing Photochemical Age-Based Parameterization Method. *Journal of Environmental Sciences*, 75: 105–114. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.03.008>
- Zhu, J. L., Penner, J. E., Lin, G. X., et al., 2017. Mechanism of SOA Formation Determines Magnitude of Radiative Effects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(48): 12685–12690. <https://doi.org/10.1073/pnas.1712273114>
- Ziemann, P. J., Atkinson, R., 2012. Kinetics, Products, and Mechanisms of Secondary Organic Aerosol Formation. *Chemical Society Reviews*, 41(19): 6582–6605. <https://doi.org/10.1039/C2CS35122F>

中文参考文献

- 潘瑞欣, 王芳婷, 赵秀颖, 等, 2024. 典型工业城市臭氧污染事件调控路径模拟研究. *环境科学学报*, 44(9): 21–31.
- 祁士华, 盛国英, 傅家谟, 等, 2001. 鼎湖山自然保护区大气气溶胶中的PAHs. *地球科学*, 26(1): 83–87.
- 张新宇, 王晓琦, 王传达, 等, 2023. 保定市夏季臭氧生成敏感性及其前体物减排方案. *中国环境科学*, 43(6): 2703–2713.
- 周德荣, 刘伟, 高健, 等, 2023. 中国东部地区典型臭氧污染过程防控敏感性及其减排情景研究. *大气科学学报*, 46 (5): 667–678.