

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征

张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铎, 侯思宇



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年7月

第43卷 第7期
Vol.43 No.7

目次

两种模式下中国未来发电行业发展情景及其环境效益分析	刘春景, 吕建毅, 赵汶畅, 徐卿, 金玉佳 (3375)
基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟	庞可, 张芊, 马彩云, 祝禄祺, 陈恒葵, 孔祥如, 潘峰, 杨宏 (3386)
基于半级别的城市空气质量预报评估方法探讨	王晓彦, 朱莉莉, 许荣, 高愈霄, 朱媛媛, 汪巍, 刘冰 (3396)
厦门港大气 PM _{2.5} 中重金属污染特征及健康风险评价	肖思晗, 蔡美君, 李香, 黄屋, 王坚, 朱清墩, 吴水平 (3404)
南京北郊大气降水中水溶性无机氮和有机氮沉降特征	张佳颖, 于兴娜, 张毓秀, 丁铖, 侯思宇 (3416)
晋中盆地主要城市冬季 PM _{2.5} 传输特征分析	王小兰, 王雁, 闫世明, 岳江, 郭伟, 郝振荣 (3423)
鄂尔多斯市夏秋季黑碳气溶胶时间演变特征及其来源解析	孔祥晨, 张连霞, 张彩云, 王红磊, 许晶, 郑佳峰 (3439)
济源冬季 VOCs 污染特征、来源和 SOAP	王芳, 李利霞, 王红果, 赵宗生, 张建平, 张栋 (3451)
长株潭城区 8 月 VOCs 污染特征及来源分析	罗达通, 张青梅, 刘湛, 尤翔宇, 黄杰, 宋云飞, 张敬巧 (3463)
2019 年 7 月石家庄市 O ₃ 生成敏感性控制策略解析	朱家贤, 王晓琦, 欧盛菊, 张新宇 (3473)
华北平原 AOD 时空演化与影响因素	郭霖, 孟飞, 马明亮 (3483)
基于地基太阳光度计观测的长安区气溶胶光学特性变化及其与颗粒物浓度的关系	郑玉蓉, 王旭红, 崔思颖, 冯子豪, 张秀, 刘康 (3494)
基于长时序“地-星”数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征	王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 李炬, 李青春, 孟春雷, 李威 (3508)
近十年洪泽湖富营养化状态变化趋势及原因分析	陈天宇, 刘常清, 史小丽, 李云, 范子武, 贾本有, 廖轶鹏 (3523)
高原湖泊周边浅层地下水: 磷素时空分布及驱动因素	杨恒, 李桂芳, 叶远行, 陈清飞, 崔荣阳, 张丹, 陈安强 (3532)
三峡水库不同支流库湾蓄水期溶解氧分层特性及差异性	纪道斌, 方娇, 龙良红, 杨正健, 赵星星, 杨霞, 郭亚丽 (3543)
典型喀斯特城市湖泊溶解性有机质成分特征及来源解析	倪茂飞, 周慧, 马永梅, 苏印, 王晓丹, 王志康 (3552)
骆马湖表层水和沉积物中全氟化合物赋存特征、来源及健康风险评估	黄家浩, 吴玮, 黄天寅, 陈书琴, 项颂, 庞燕 (3562)
千岛湖浮游植物群落结构的垂向分布特征及其影响因素	王吉毅, 霍翟, 国超旋, 朱广伟, 龚志军, 范亚文, 王建军 (3575)
泗河水系沉积物磷的存在形态及其空间分布特征	张子涵, 张鑫茹, 贾传兴, 甘延东, 王世亮 (3587)
降雨径流过程中土地利用优化配置对磷流失的影响	周豪, 陈方鑫, 罗义峰, 龙翼, 周继, 王小燕, 李丹丹, 陈晓燕 (3597)
典型生物滞留设施重金属累积分布特征与风险评价	储杨阳, 杨龙, 周媛, 王喜龙, 王嗣禹, 张敏 (3608)
筑坝蓄水对不同水深浮游微生物群落结构和种间互作模式的影响	王洵, 张佳佳, 袁秋生, 胡斌, 刘胜 (3623)
天津独流减河流域不同等级河流沉积物细菌区系及功能辨识	刘嘉元, 丰玥, 杨雪纯, 张彦, 李德生, 刘福德 (3635)
地表水悬浮态多环芳烃时空变化特征及主要输入源响应机制	彭珂醒, 李瑞飞, 周亦辰, 卓泽铭, 张晋, 李梅, 李雪 (3645)
北京市通州区河流中微塑料组成的空间分布及潜在来源解析	门聪, 李頔, 左剑恶, 邢薇, 刘梦瑶, 魏凡钦, 胡嘉敏, 谢珍雯, 邢鑫, 沈杨贵 (3656)
微塑料对鲫鱼生长、肝脏损伤和肠道微生物组成的影响	胡嘉敏, 左剑恶, 李金波, 张艳艳, 艾翔, 龚大惠, 张继文, 孙丁明 (3664)
不同类型脱水药剂对底泥固化效果和理化性质的影响	任俊, 殷鹏, 王威振, 唐婉莹, 尹洪斌, 朱丽娟 (3672)
微纳米粒径生物炭的结构特征及其对 Cd ²⁺ 吸附机制	马文艳, 裴鹏刚, 高歌, 孙约兵 (3682)
不同生物炭对磷的吸附特征及其影响因素	连宁海, 张树楠, 刘锋, 邢宏霖, 吴金水 (3692)
Mg-La-Fe/沸石复合材料的制备及其处理低浓度含磷废水的性能	印学杰, 宋小宝, 丁陈蔓, 冯彦房, 杨根, 何世颖, 薛利红 (3699)
一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化工艺污泥膨胀发生和恢复过程中微生物群落演替及 PICRUS2 功能预测分析	李亚男, 闫冰, 郑蕊, 姚丽, 隋倩雯, 魏源送 (3708)
丝状菌膨胀污泥好氧颗粒化稳定性及微生物多样性	高春娣, 杨箫阳, 欧家丽, 韩颖璐, 程阳阳, 彭永臻 (3718)
2000~2020 年长江流域植被 NDVI 动态变化及影响因素探测	徐勇, 郑志威, 郭振东, 宴世卿, 黄雯婷 (3730)
近 40 年来福建省水稻土有效磷富集效应及潜在生态风险评估	陈中星, 邱龙霞, 陈瀚闾, 范协裕, 毋亭, 沈金泉, 邢世和, 张黎明 (3741)
土地利用变化对西南喀斯特土壤团聚体组成、稳定性以及 C、N、P 化学计量特征的影响	何宇, 盛茂根, 王轲, 王霖娇 (3752)
长江经济带矿山土壤重金属污染及健康风险评价	张浙, 卢然, 伍思扬, 贾智彬, 王宁 (3763)
煤矸石堆积区周边土壤重金属污染特征与植物毒性	尚誉, 桑楠 (3773)
燃煤工业区不同土地利用类型土壤汞含量污染评价	李强, 姚万程, 赵龙, 张朝, 张恩月, 苏迎庆, 刘庚 (3781)
广州市南沙区第四剖面镉富集特征及生物有效性	王芳婷, 包科, 黄长生, 赵信文, 顾涛, 曾敏 (3789)
黔西北山区耕地重金属健康风险评价及环境基准	徐梦琪, 杨文毅, 杨利玉, 陈勇林, 景灏楠, 吴攀 (3799)
土壤重金属生物可利用性影响因素及模型预测	张加文, 田彪, 罗晶晶, 吴凡, 张聪, 刘征涛, 王晓南 (3811)
添加有机物料对豫中烟田土壤呼吸的影响	鲁琪飞, 叶协锋, 韩金, 潘昊东, 张明杰, 王晶, 杨佳豪, 姚鹏伟, 李雪利 (3825)
不同稻作系统土壤的 CH ₄ 产生潜力与产生途径	沈皖豫, 黄琼, 马静, 张广斌, 徐华 (3835)
东部平原矿区复垦土壤微生物群落特征及其组装过程	马静, 董文雪, 朱燕峰, 肖栋, 陈浮 (3844)
同质环境下不同锦鸡儿属植物根际土壤细菌群落结构差异及其影响因素	李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (3854)
岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较	肖筱怡, 靳振江, 冷蒙, 李雪松, 熊丽媛 (3865)
紫色土中微生物群落结构及功能特征对土壤 pH 的差异响应	王智慧, 蒋先军 (3876)
有机物料还田对稻田土壤 DOM 碳源代谢能力的影响	肖怡, 李峥, 黄容, 汤奥涵, 李冰, 王昌全 (3884)
《环境科学》征订启事 (3403) 《环境科学》征稿简则 (3462) 信息 (3493, 3655, 3834)	

2019年7月石家庄市O₃生成敏感性及其控制策略解析

朱家贤, 王晓琦*, 欧盛菊, 张新宇

(北京工业大学环境与生命学部, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 基于石家庄市2019年7月近地面污染物和气象观测数据, 分析夏季O₃污染状况及其影响因素; 结合WRF-CMAQ模式和O₃浓度等值线(EKMA曲线), 探究不同区域O₃-VOCs-NO_x的非线性响应关系, 旨在探究最佳的前体物减排方案。结果表明, 观测期间, 石家庄市市区MDA8 O₃超标率高达70.9%。污染天期间, 伴随着高温、低湿、小风, 且以南风和东南风为主。石家庄市市区属于VOCs控制区, 郊县为NO_x和VOCs协同控制区。在臭氧污染时段, 市区在仅削减NO_x排放, 且削减比例超过50%时, 持续减排NO_x使得O₃浓度呈逐渐下降趋势。在非臭氧日时段, 市区在VOCs和NO_x的削减比例大于1倍时, O₃浓度才不会出现反弹。对于市区应考虑以仅削减VOCs为先; 对于郊区区域而言, 不同的NO_x和VOCs削减比例下, O₃浓度均会下降, 建议减排比例(VOCs:NO_x)为1:2。

关键词: WRF-CMAQ; 臭氧(O₃); 石家庄市; 敏感性分析; 控制策略

中图分类号: X515 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2022)07-3473-10 **DOI:** 10.13227/j.hjxx.202110085

Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019

ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi*, OU Sheng-ju, ZHANG Xin-yu

(Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, Faculty of Environmental and Life, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The pollution characteristics of surface ozone and its response to meteorological factors were studied based on monitoring in July 2019 in Shijiazhuang City, China. Furthermore, the WRF-CMAQ model coupled with O₃ isopleths (EKMA curves) were applied to explore the non-linear response relationship of O₃ to precursors VOCs and NO_x, aiming to identify a suitable precursor control strategy. The results showed that the days with the maximum daily 8-hour average ozone concentration (MDA8 O₃) exceeded the standard by 70.9%. The nonattainment days were usually accompanied by higher temperature, lower relative humidity, and low winds, and the south and southeast winds occurred frequently. The O₃ formation was in the strong VOC-limited regime in the urban area of Shijiazhuang, whereas it was in the NO_x and VOCs transition regime in suburban areas. As for the urban area, under the condition of single NO_x emission reduction, O₃ pollution improved when continuous NO_x emission reduction was higher than 50% during the nonattainment days. By contrast, during the non-polluted days, O₃ concentrations would not rebound when the reduction ratio of NO_x and VOCs was higher than 1. In conclusion, VOCs reduction should be the priority for emission reduction plans in urban areas, whereas all different NO_x and VOCs ratios led to a decline in O₃ concentration in the suburban areas, and a VOCs:NO_x of 1:2 was recommended.

Key words: WRF-CMAQ; ozone (O₃); Shijiazhuang City; sensitivity analysis; control strategy

自我国2013年实施《大气污染防治行动计划》以来, PM_{2.5}浓度持续下降, 空气质量得到明显改善, 然而臭氧(O₃)污染逐渐加重, 难以遏制并呈现蔓延态势^[1,2], 尤其是在京津冀^[3~6]、长三角^[7,8]和珠三角^[9]等城市群所在地区的O₃涨幅更为显著。“十四五”期间, 空气质量改善的重点是在降低PM_{2.5}浓度的同时, 遏制O₃浓度上升。对于O₃污染防治, 主要在于其前体物(NO_x和VOCs)的管控, 一般情况下, 前体污染物浓度越高、气温越高且光照越强, 则发生的光化学反应越强烈, O₃浓度越高^[10~12]。而由于化学机制复杂, 排放分布和气象的区域差异, O₃与其前体物(NO_x和VOCs)呈现高度非线性的相互作用^[13~16], 控制单一的NO_x或VOCs污染物可能无法有效改善O₃污染, 因此, 了解不同区域的O₃生成敏感性, 科学制定前体物的减排比例是O₃污染防治的关键。

研究O₃生成敏感性的方法主要有指示剂法、源示踪法和敏感性测试法^[12]。敏感性测试法是基于空气质量模型, 模拟在不同排放情景下O₃浓度的变

化, 以此来确定不同前体物的敏感性贡献。使用一系列情景分析对NO_x和VOCs不同排放组合绘制O₃生成等浓度(empirical kinetic modeling approach, EKMA)曲线, 能更详细地确定O₃与其前体物排放之间的非线性关系^[17,18], 并且能够评估不同减排比例降低O₃浓度的有效程度, 广泛用于设计O₃污染控制的减排途径^[19~22]。Guo等^[23]的研究利用WRF/CMAQ模式系统, 对中国2013年夏季的O₃污染状况进行模拟, O₃等浓度曲线表明中国大部分地区为NO_x控制区, 减少VOCs对O₃浓度的影响较小, 不同地区的O₃控制策略应根据其对NO_x和VOCs排放变化的敏感性而有所不同。严茹莎^[24]的研究利用WRF-CAMx耦合的HDDM模块, 分析期间德州O₃敏感性特征及减排方案。结果表明, 在空间上, 德州市中心城区为VOCs控制区, 而郊区为

收稿日期: 2021-10-12; 修订日期: 2021-12-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51638001)

作者简介: 朱家贤(1997~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境规划管理与污染防治, E-mail: zhujiaxian@emails.bjut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wangxq@bjut.edu.cn

NO_x 与 VOCs 协同控制区,对于城区减排方案应考虑以仅 VOCs 削减为优先,而郊区由于 NO_x 和 VOCs 对 O_3 减排效果相当,建议以 $\text{NO}_x:\text{VOCs}=1:1$ 为优.

石家庄市域跨太行山地和华北平原两大地貌单元,位于京津冀大气污染传输通道中的西南传输通道,主要表现为风速小,逆温频繁,空气污染程度严重,是京津冀区域的主要污染源区之一^[25~27].石家庄市在2019年全国169个重点城市空气质量排名中排倒数第三, O_3 污染严重,亟待治理.目前对于石家庄市不同区域 O_3 生成敏感性的研究较少,缺乏对不同区域前体物减排控制方案的探究.本文选择石家庄 O_3 污染较重的7月份^[28~30],利用 WRF/CMAQ 建模系统对2019年7月河北石家庄地区进行模拟,研究石家庄市不同区域 O_3 生成敏感性,通过 O_3 浓度等值线的分析,考察 O_3 浓度对 NO_x 和 VOCs 前体物排放之间的非线性关系,探究最佳的前体物减排方案,有助于制定有效的排放控制策略,对控制 O_3 污染和改善空气质量具有重要意义.

1 材料与方法

1.1 污染物浓度及气象数据来源

石家庄市 O_3 小时浓度数据来源于石家庄市的

9个环境质量监测点(包括职工医院、高新区、西北水源、西南高教、世纪公园、人民会堂、平山冶河、行唐启明中学和赞皇中学),其中平山冶河、行唐启明中学和赞皇中学位于郊县,其余6个环境质量监测点分散位于市区(新华区、桥西区、长安区和裕华区),观测时间为2019年7月1~31日;气象数据来自石家庄市气象局,包括温度、相对湿度、风向和风速.

1.2 模式系统介绍

本文采用 WRF-CMAQ 耦合模式系统对石家庄市夏季臭氧开展研究,气象场由中尺度气象模式 WRFv4.2.2 (weather research and forecasting) 提供^[31].模拟区域采用双层嵌套网格,外层网格(D01)分辨率12 km,内层网格(D02)分辨率为4 km,如图1所示.模式顶高设置为5 000 Pa,垂直方向设为33层,气象初始场和边界条件采用 NCEP 提供的 $1^\circ \times 1^\circ$ 全球再分析场资料.

本研究所采用的空气质量模式为 CMAQ5.3.2 版本,模型选用 CB6r3 气象化学机制^[32],京津冀地区使用自下而上建立并逐年更新的京津冀高分辨率大气污染源排放清单^[33],物种包括 SO_2 、 CO 、 NO_x 、 NH_3 、VOCs、 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} ,京津冀区域外采用清华大学研发的 MEIC 清单^[34].

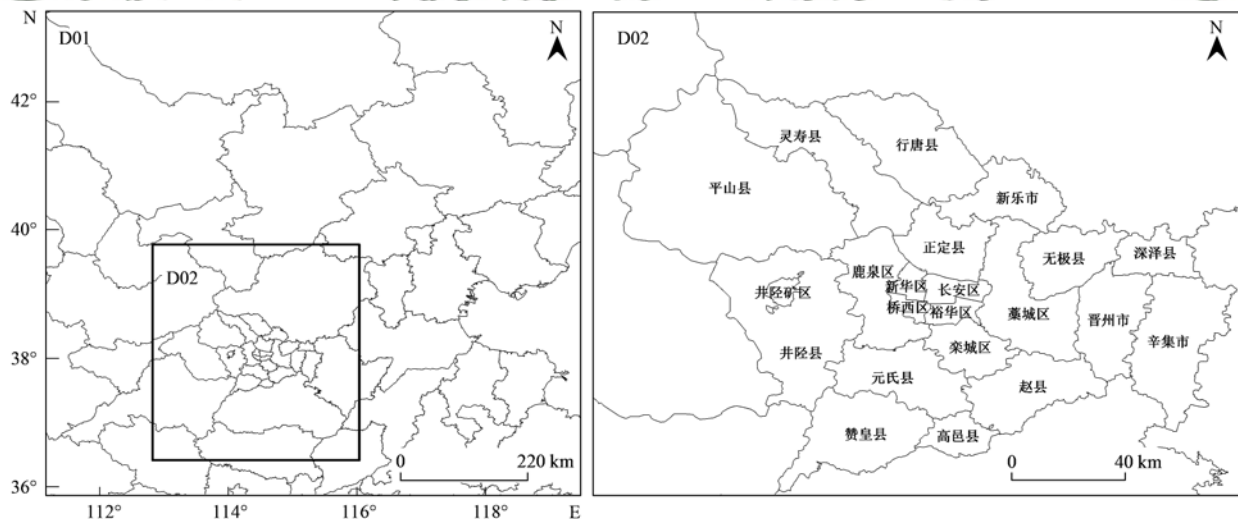


图1 双层嵌套区域示意

Fig. 1 Schematic diagram of the two-level nested-grid modeling domain

2 结果与讨论

2.1 O_3 污染特征分析

2.1.1 O_3 污染水平

图2为观测期间石家庄市 O_3 、 NO_2 与气象要素的时间序列.观测期间,石家庄市市区 O_3 日最大8 h 浓度平均值 $[\rho(\text{MDA8 } \text{O}_3)]$ 最高为 $299 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,超过国家二级标准 $[\rho(\text{MDA8 } \text{O}_3) = 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 的

86.8%;日均 $\rho(\text{MDA8 } \text{O}_3)$ 为 $188 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,MDA8 O_3 超标天数为22 d,超标率为70.9%.综合来看,观测期间污染过程主要发生7月的1~5、11~15、17~19和23~28日,分别将这4个过程命名为EP1、EP2、EP3和EP4.其中EP1和EP2期间,主要受南风影响,而EP3期间,主要受东南风的影响,EP4期间,前期风向为南风,后转为东南风,与非臭氧日期间相比,温度显著偏高,相对湿度较

低, NO_2 的浓度处于较高水平, 浓度平均值 [$\rho(NO_2)$] 为 $28.7 \mu g \cdot m^{-3}$. 郊县的日均 $\rho(MDA8 O_3)$ 为 $184 \mu g \cdot m^{-3}$, NO_2 的浓度平均值 [$\rho(NO_2)$] 为 $26.7 \mu g \cdot m^{-3}$, 处在边界的郊县区域容易受到市域内外气象传输的影响^[35~37], O_3 污染较重; 从图 3(a) 可见, 石家庄市市区 O_3 日变化呈明显的“单

峰型”分布, 夜间明显低于白天; 统计发现, 1 d 中 O_3 在早间 06:00 ~ 07:00 时浓度最低, 在 08:00 ~ 13:00 阶段 O_3 浓度快速升高, 并在 15:00 ~ 16:00 达到峰值. 7 月, 超标日 O_3 小时浓度在 09:00 ~ 23:00 明显高于非臭氧日的同时段, O_3 浓度在夜间依然处于较高水平.

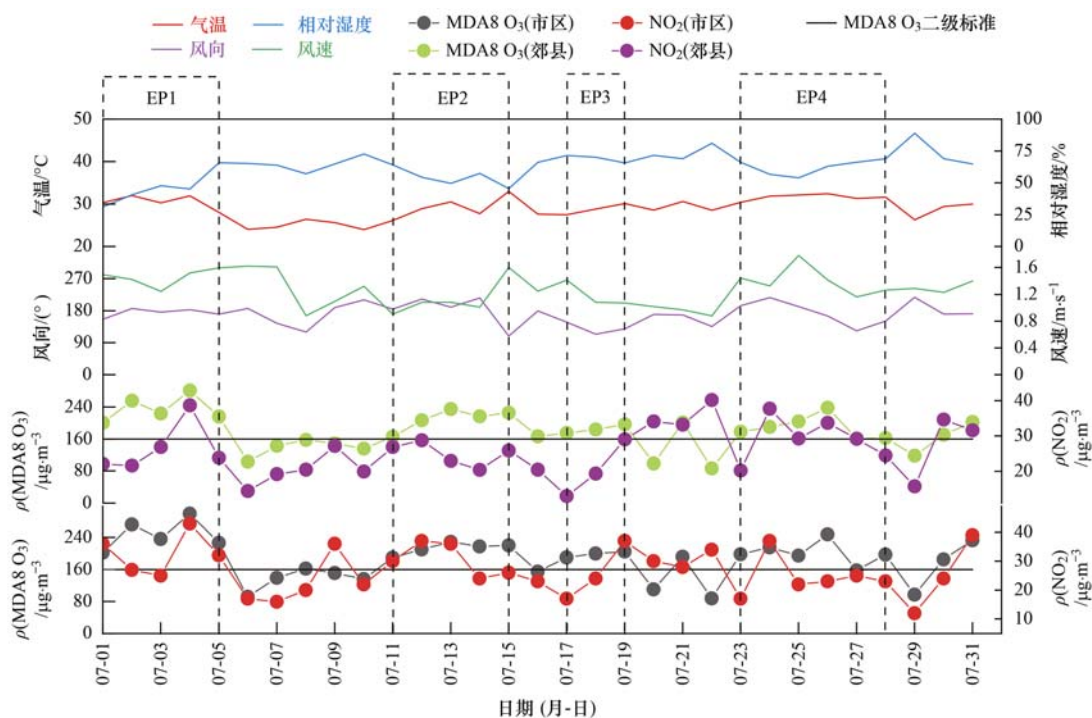


图2 气象因子、 O_3 和 NO_2 浓度时间序列

Fig. 2 Time series of meteorological factors, O_3 and NO_2

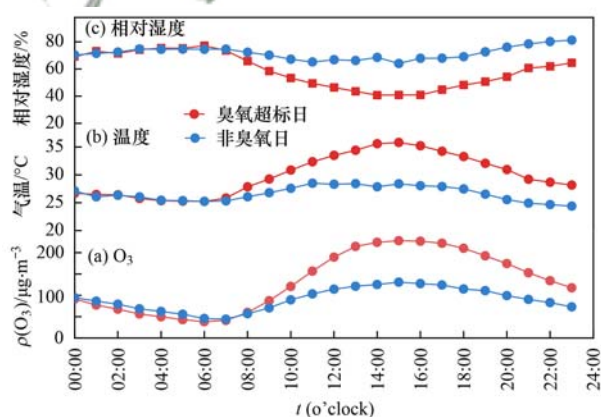


图3 石家庄市 O_3 小时浓度、温度和相对湿度的日变化

Fig. 3 Diurnal variation in the ozone hourly concentration, temperature, and relative humidity in Shijiazhuang City

2.1.2 气象因素的影响

气温是影响 O_3 浓度最主要的一个气象要素之一, 气温升高通常伴随着水汽的减少和辐射的增强^[38,39], 一般气温越高, O_3 浓度也会增加. 根据图 3(b) 结果所示, 1 d 中温度的谷值出现在 06:00 左右, 峰值出现在 15:00 左右, 曲线呈“单峰型”变化. 臭氧超标日下气温显著偏高, 日最高气温达 $35^\circ C$,

而非臭氧日的日最高气温为 $28^\circ C$.

由图 3(c) 可见, 相对湿度在 07:00 左右开始下降, 在 15:00 左右出现最低值, 随后开始回升, 曲线呈“单谷型”变化. 臭氧超标日的日均湿度为 58.9%, 而非臭氧日的日均相对湿度可达 71.1%, 表明较高的相对湿度, 不利于 O_3 的生成. 相对湿度增大时, 往往伴随着不利于 O_3 生成和累积的气象条件, 包括风速增大和云量增多等, 从而导致 O_3 浓度下降^[40].

风影响大气污染物的扩散和输送^[41,42]. 本文选取光照较强且平均温度较高的 O_3 小时浓度高值时段(12:00 ~ 18:00), 分析 O_3 与风的关系. 如图 4(a) 所示, 臭氧超标日下, 盛行东南风, 且该风向下出现 $\rho(O_3)$ 值大于 $200 \mu g \cdot m^{-3}$ 的频率较高; 在风速小于 $1 m \cdot s^{-1}$ 的区间, 各个方向的 O_3 小时浓度值较高, 随着风速的增加, O_3 小时浓度开始降低, 说明较低的风速有利于 O_3 生成, 而在东南方向风速约为 $3 m \cdot s^{-1}$ 时, 出现 $\rho(O_3)$ 高值区(大于 $300 \mu g \cdot m^{-3}$), 这可能是由于 O_3 及其前体物经远距离输送到下风向汇聚, 导致 O_3 浓度升高. 图 4(b) 非臭氧日下, O_3 高

浓度 $[\rho(\text{O}_3) > 160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}]$ 多出现在东和西北方向,且风速大于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

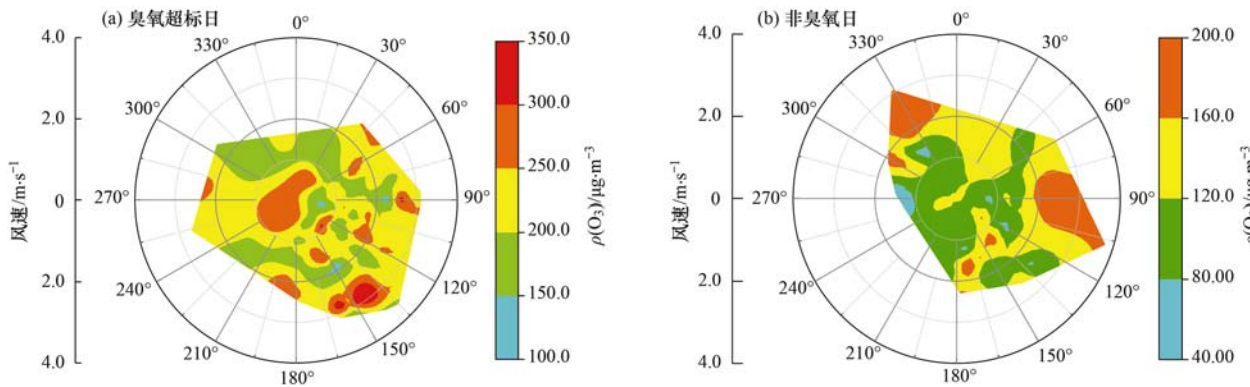


图4 石家庄市不同时段午后 O_3 小时浓度风玫瑰图

Fig. 4 Wind rose chart of the ozone hourly concentration in the afternoon of different periods in Shijiazhuang City

2.2 模拟效果评估

为评估模式的模拟效果,本研究采用标准化平均偏差(NMB)和相关系数(R)对研究时段内石家庄的气象场和化学场模拟效果进行评估,结果见图5.其中气象场提取了石家庄气象站点2 m 温度(T_2)、2 m 相对湿度(RH_2)和10 m 风速(WS_{10})与观测数据进行比较,其中,温度的模拟效果最好, R 和NMB分别为0.87和0.04;相对湿度模拟效果次之, R 和NMB分别为0.75和-0.27;风速的吻合度最小,模拟值和观测值的变化趋势基本一致, R 和NMB分别为0.46和0.44.有研究表明,风速的

模拟结果与观测结果的偏差较大可能与WRF模式中使用的土地利用类型数据有关^[43].整体而言,本研究气象场的模拟效果在可接受范围内,并且与黄蕊珠等^[44]的研究结果相近.

本研究以石家庄市市区6个环境监测站点平均值进行模型准确性检验.结果表明,模式可以较好地再现研究时段内石家庄市 O_3 浓度变化趋势,模拟值与观测值相关性较高,相关系数 R 为0.74,模式对 O_3 略有低估,NMB为-0.25,整体WRF-CMAQ模式模拟效果较好,符合美国EPA的相关标准^[45],可用于后续的分析.

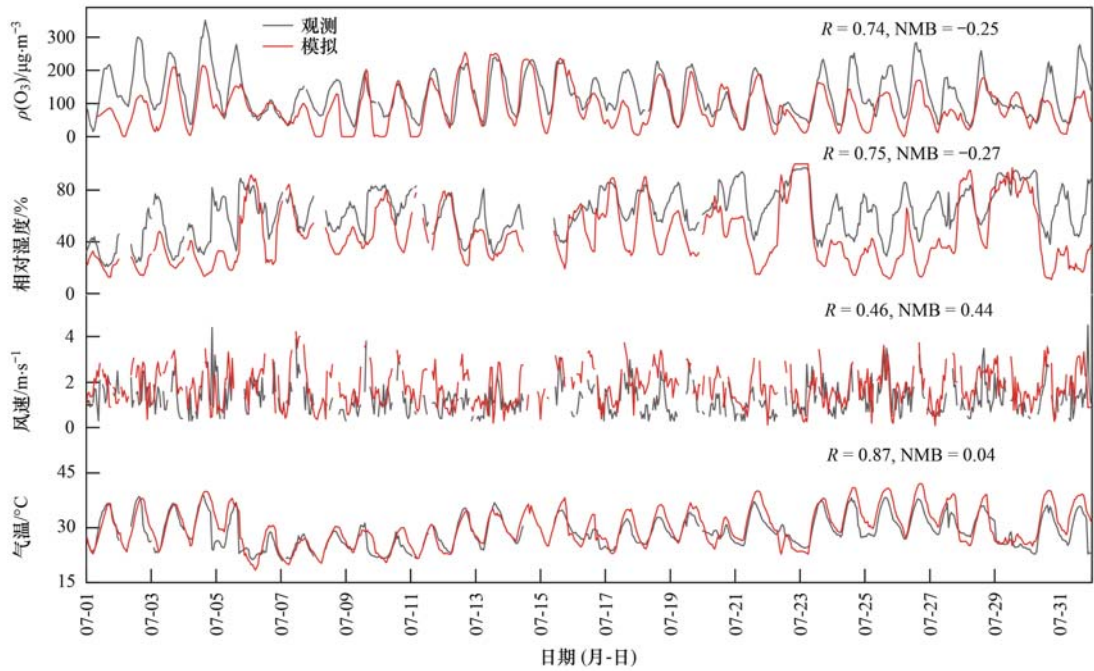


图5 O_3 小时浓度、温度、相对湿度和风速的模拟值与观测值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and measured ozone hourly concentration, temperature, and relative humidity

2.3 敏感性分析

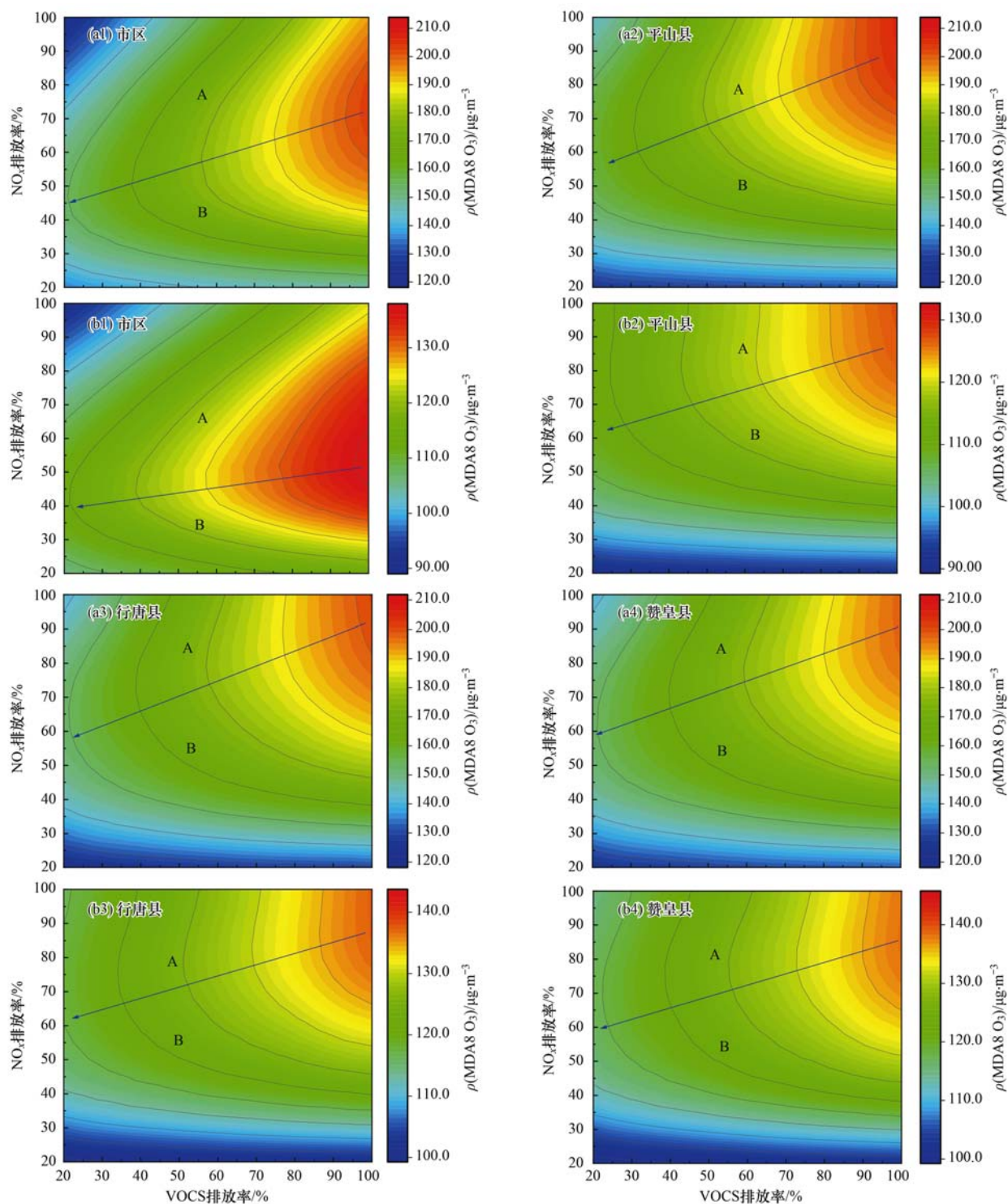
O_3 的前体物 NO_x 和VOCs经过一系列复杂的光化学反应影响 O_3 的生消,且对 O_3 的影响是高度

非线性的^[46].本文通过情景分析法,对 NO_x 和VOCs不同排放组合绘制 O_3 生成浓度等值线,从而识别 O_3 的敏感性.选取石家庄市 O_3 污染较严重的平山

县、行唐县和赞皇县^[47],探究市区和郊县在臭氧超标日和臭氧非超标日情况下的 O_3 敏感性. 图 6 给出了相应的 O_3 等浓度曲线,从中可以看出 O_3 浓度与前体物 VOCs 和 NO_x 排放呈典型的非线性关系. 其中 VOCs 和 NO_x 排放量均为 100% 时,表示研究期间前体物排放的实际情况(即基准排放对应的环境浓度),等浓度曲线的脊线将曲线分为两个部分. 理论情况下,在脊线上半部分(A 区), O_3 生成主要受

VOCs 控制,即与降低 NO_x 的排放量相比,降低 VOCs 的排放量可以更有效地降低 O_3 浓度;在脊线的下半部分(B 区), O_3 浓度主要受 NO_x 控制,即与降低 VOCs 的排放量相比,降低 NO_x 的排放量可以更有效地降低 O_3 浓度.

以 NO_x 和 VOCs 各削减 50% 所对应的 O_3 浓度变化作为 O_3 控制区类型的判断依据,分别记为 ΔO_{3N} 和 ΔO_{3V} (若差值为负,说明前体物削减导致 O_3



(a) 臭氧超标日; (b) 非臭氧日

图 6 石家庄市不同区域 MDA8 O_3 EKMA 曲线图

Fig. 6 EKMA curves of MDA8 O_3 in different regions of Shijiazhuang City

浓度上升), NO_x 控制区为 $\Delta\text{O}_{3\text{N}} \geq 5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 且 $\Delta\text{O}_{3\text{N}} > 2 \times \Delta\text{O}_{3\text{V}}$; VOCs 控制区为 $\Delta\text{O}_{3\text{V}} \geq 5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 且 $\Delta\text{O}_{3\text{V}} > 2 \times \Delta\text{O}_{3\text{N}}$; NO_x 和 VOCs 协同控制区为 $\Delta\text{O}_{3\text{N}} \geq 5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 或 $\Delta\text{O}_{3\text{V}} \geq 5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 且二者差距在两倍以内; NO_x 滴定区为 $\Delta\text{O}_{3\text{N}} \leq -5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 且 $\Delta\text{O}_{3\text{V}} < 5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 非控制区为 $\Delta\text{O}_{3\text{N}}$ 和 $\Delta\text{O}_{3\text{V}}$ 值的变化均在 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以内^[24,48].

图 6 分别为石家庄市不同区域臭氧超标日和非臭氧日下的 MDA8 O_3 EKMA 曲线图,从图 6(a1) 可以看出,石家庄市在基准排放下,MDA8 O_3 浓度平均值位于等浓度曲线转折点脊线左侧,表明在环境浓度下, O_3 处于 VOCs 控制敏感区,在此范围内,降低 NO_x 排放, O_3 浓度会出现上升现象,直到 NO_x 减排控制在脊线或脊线位置以下时, O_3 浓度才开始降低,从中可以看出当 NO_x 排放量削减至 50% 以上 O_3 浓度才开始下降.

图 6(a2)、图 6(a3) 和图 6(a4) 显示石家庄市郊县在基准排放下,MDA8 O_3 浓度平均值位于等浓度曲线转折点脊线稍偏左侧,表明在环境浓度下, O_3 生成受 VOCs 影响较为明显. 与市区相比, O_3 浓度值处于 NO_x 控制区的范围明显较大. 在该区域内,减少 NO_x 或 VOCs 排放, O_3 浓度均会下降,且当 NO_x 和 VOCs 各单独削减 50% 所对应的 O_3 浓度均下降 $5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,且二者差距在两倍以内,由此

推测郊县区域 O_3 生成处于 NO_x 与 VOCs 协同控制区.

从图 6(b1) 可以看出石家庄市 O_3 生成处于 VOCs 控制区,降低 NO_x 排放会出现 O_3 浓度升高的现象,与臭氧日下相比,虽然 O_3 生成机制相似,但脊线所示比例不同,非臭氧日下石家庄市脊线所在的 VOCs 和 NO_x 的比值约为 8:1,与臭氧日下前体物比值存在差异(市区 3:1),这表明,非臭氧日下前体物 VOCs 的控制对降低石家庄市市区的 O_3 水平作用更为明显. 图 6(b2)、图 6(b3) 和图 6(b4) 显示郊县区域属于 NO_x 与 VOCs 协同控制型.

2.4 前体物最优减排比例探究

EKMA 曲线是研究 O_3 及其前体物非线性关系和 O_3 浓度控制对策的重要手段,利用 EKMA 曲线即可识别 O_3 浓度以及与之对应的前体物 VOCs 和 NO_x 排放量. 从 EKMA 曲线中可以看出,不同前体物削减比例对 O_3 的浓度控制效果不同. 为了量化不同削减比例下 O_3 的浓度变化,本研究以前体物减排比例为横坐标,基于模型和插值得到的各减排方案下 O_3 模拟值,绘制不同减排比例下 O_3 值浓度的变化曲线. 平山县、行唐县和赞皇县区域均为 NO_x 与 VOCs 协同控制区,且差距较小,因此取 3 个区域的平均值作为郊县区域. 基于对现实控制效率的考虑,具体的排放情景见表 1,所有的敏感性试验仅针对人为排放源,生物源排放保持不变.

表 1 敏感性试验方案/%

Table 1 Sensitivity test scheme/%

情景	NO_x 削减比例	VOCs 削减比例	情景	NO_x 削减比例	VOCs 削减比例
S1	0	20	S13	40	60
S2	0	40	S14	40	80
S3	0	60	S15	60	0
S4	0	80	S16	60	20
S5	20	0	S17	60	40
S6	20	20	S18	60	60
S7	20	40	S19	60	80
S8	20	60	S20	80	0
S9	20	80	S21	80	20
S10	40	0	S22	80	40
S11	40	20	S23	80	60
S12	40	40	S24	80	80

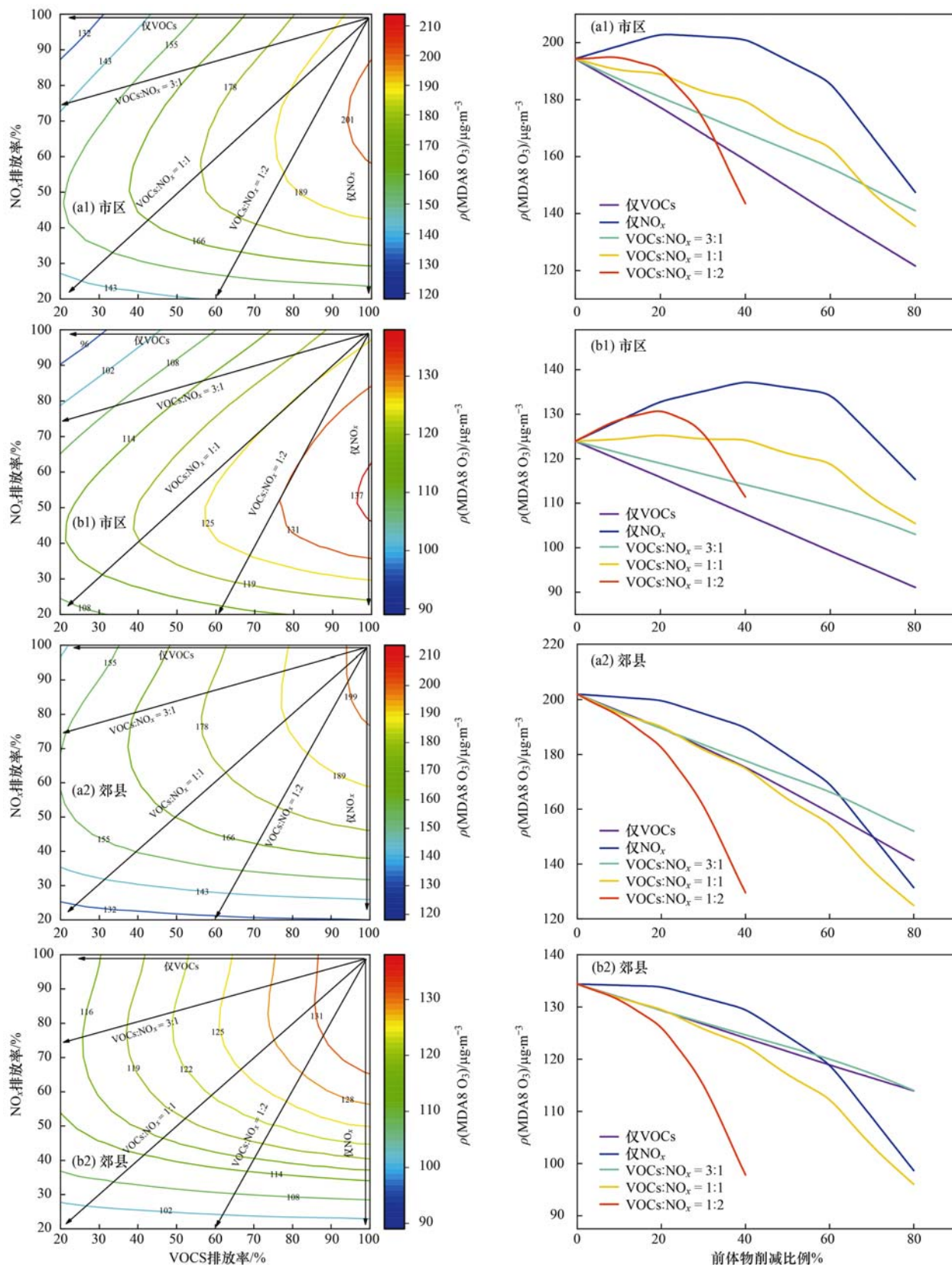
从图 7(a1) 可以看出臭氧超标日下,石家庄市在单独减排 NO_x 时会导致 O_3 浓度上升,直到 NO_x 削减比例达 50% 时,才能与基准情景相持平. 当仅削减 VOCs 时, O_3 下降速率最快,呈线性变化,说明 VOCs 对 O_3 浓度的下降控制至关重要. 当 $\text{VOCs}:\text{NO}_x = 1:2$,且当 NO_x 削减比例小于 40% ~ 50% 时, O_3 浓度变化不明显,下降了 $0 \sim 4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; 仅当 NO_x 削减比例超过 50% 时,持续减排 NO_x 使得

O_3 浓度逐渐呈下降趋势. 因此,建议石家庄市夏季 O_3 控制前期主要以 VOCs 减排为主,当 NO_x 减排超过 50% 时,最佳减排比例为 $\text{VOCs}:\text{NO}_x = 1:2$.

从图 7(a2) 可以看出石家庄市郊县区域,不同的 VOCs 和 NO_x 削减比例下, O_3 浓度均会下降,其中仅削减 NO_x 排放, O_3 下降速率最慢,当 NO_x 减排比例超过 20% 时,前体物减排比例为 $\text{VOCs}:\text{NO}_x = 1:2$ 时, O_3 下降速率最快.

从图 7(b1) 可以看出非臭氧日下, 石家庄市在仅削减 NO_x 排放的情况下, O_3 浓度会上升, 与臭氧超标日下不同的是, NO_x 削减比例达到 70% 左右

时, 才能与基准情景相持平, $VOCs$ 和 NO_x 的削减比例大于 1 倍时, O_3 浓度才不会出现上升情况, 且 O_3 控制效果随着 $VOCs$ 削减比例的增大而变得更好;



(a) 臭氧超标日; (b) 非臭氧日

图 7 石家庄市不同区域前体物不同削减比例下 MDA8 O_3 浓度变化

Fig. 7 Response of MDA8 O_3 to different precursor emission reduction magnitudes in Shijiazhuang City

对于非臭氧日下的石家庄市郊县[图 7(b2)]而言,与臭氧超标日下相差不大,前体物减排比例均为 VOCs: $\text{NO}_x = 1:2$ 时最优。

3 结论

(1) 2019 年 7 月石家庄地区发生了长时间的 O_3 污染现象,市区 MDA8 O_3 超标天数为 22 d,超标率高达 70.9%,臭氧超标日期间,伴随着高温、低湿和小风,同时 NO_2 的浓度也处于较高水平,浓度平均值为 $28.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

(2) 石家庄市 O_3 与温度变化趋势高度一致,温度呈“单峰型”变化,臭氧超标日下的气温显著偏高,日最高气温达 35°C ,远高于非臭氧日的 28°C ; O_3 与相对湿度呈负相关,臭氧超标日的日均湿度为 58.9%,远低于非臭氧日的 71.1%,说明高湿不利于 O_3 的生成;臭氧超标日下,风向主要为东南风,且风速大于 $2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,石家庄市更容易出现高浓度 O_3 现象,而非臭氧日下, O_3 高浓度多伴随 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上偏西北风和东风。

(3) 本研究期间,石家庄市市区在臭氧污染时段属于 VOCs 控制型,在此期间,降低 NO_x 排放, O_3 浓度会出现上升现象;与市区相比,郊县区域在减少 NO_x 或 VOCs 排放时, O_3 浓度均会下降,属于 NO_x 与 VOCs 协同控制型;非臭氧日时段石家庄市也属于 VOCs 控制区,且相比臭氧污染时段前体物 VOCs 的控制对降低市区的 O_3 水平作用更为明显,郊县区域属于 NO_x 与 VOCs 协同控制型。

(4) 前体物减排方案的探究结果表明,臭氧污染时段市区在仅削减 NO_x 排放的情况下, O_3 浓度会上升,但在 NO_x 削减比例超过 50% 时,持续减排 NO_x 使得 O_3 浓度逐渐呈下降趋势,而在仅削减 VOCs 时, O_3 下降速率最快;而在非臭氧日时段,市区在 VOCs 和 NO_x 的削减比例大于 1 倍时, O_3 浓度才不会出现反弹,且 O_3 控制效果随着 VOCs 削减比例的增大而变得更好。因此,建议市区前期应优先考虑仅削减 VOCs;而对于郊县区域,在臭氧污染时段和非臭氧时段,不同的 NO_x 与 VOCs 削减比例下, O_3 浓度均会下降,建议减排比例(VOCs: NO_x) 为 1:2。

参考文献:

- [1] 孟晓艳, 宫正宇, 张霞, 等. 全国及重点区域臭氧污染现状[J]. 中国环境监测, 2017, **33**(4): 17-25.
Meng X Y, Gong Z Y, Zhang X, et al. Pollution characteristics of ozone in China and key regions[J]. Environmental Monitoring in China, 2017, **33**(4): 17-25.
- [2] 张倩倩, 张兴赢. 基于卫星和地面观测的 2013 年以来我国臭氧时空分布及变化特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(3): 1132-1142.
Zhang Q Q, Zhang X Y. Ozone spatial-temporal distribution and trend over China since 2013: insight from satellite and surface observation[J]. Environmental Science, 2019, **40**(3): 1132-1142.
- [3] Cheng N L, Chen Z Y, Sun F, et al. Ground ozone concentrations over Beijing from 2004 to 2015: variation patterns, indicative precursors and effects of emission-reduction[J]. Environmental Pollution, 2018, **237**: 262-274.
- [4] 漏嗣佳, 朱彬, 廖宏. 中国地区臭氧前体物对地面臭氧的影响[J]. 大气科学学报, 2010, **33**(4): 451-459.
Lou S J, Zhu B, Liao H. Impacts of O_3 precursor on surface O_3 concentration over China[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2010, **33**(4): 451-459.
- [5] 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 等. 京津冀地区典型月 O_3 污染输送特征[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(10): 3684-3691.
Wang Y L, Xue W B, Lei Y, et al. Model-derived source apportionment and regional transport matrix study of ozone in Jingjinji[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(10): 3684-3691.
- [6] 牛元, 程水源, 欧盛菊, 等. 基于光化学指标法的邯郸市臭氧生成敏感性[J]. 环境科学, 2021, **42**(6): 2691-2698.
Niu Y, Cheng S Y, Ou S J, et al. Applying photochemical indicators to analyze ozone sensitivity in Handan[J]. Environmental Science, 2021, **42**(6): 2691-2698.
- [7] 蒋美青, 陆克定, 苏榕, 等. 我国典型城市群 O_3 污染成因和关键 VOCs 活性解析[J]. 科学通报, 2018, **63**(12): 1130-1141.
Jiang M Q, Lu K D, Su R, et al. Ozone formation and key VOCs in typical Chinese city clusters[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, **63**(12): 1130-1141.
- [8] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, et al. Ozone pollution in China: A review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects[J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 1582-1596.
- [9] Hu J L, Wang Y G, Ying Q, et al. Spatial and temporal variability of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} over the North China Plain and the Yangtze River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2014, **95**: 598-609.
- [10] Monks P S, Archibald A T, Colette A, et al. Tropospheric ozone and its precursors from the urban to the global scale from air quality to short-lived climate forcer[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(15): 8889-8973.
- [11] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3001-3008.
Wang Z S, Li Y T, Chen T, et al. Analysis on diurnal variation characteristics of ozone and correlations with its precursors in urban atmosphere of Beijing[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(12): 3001-3008.
- [12] 武卫玲, 薛文博, 雷宇, 等. 基于 OMI 数据的京津冀及周边地区 O_3 生成敏感性[J]. 中国环境科学, 2018, **38**(4): 1201-1208.
Wu W L, Xue W B, Lei Y, et al. Sensitivity analysis of ozone in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area using OMI satellite remote sensing data[J]. China Environmental Science, 2018, **38**(4): 1201-1208.
- [13] Ahamad F, Latif M T, Tang R, et al. Variation of surface ozone exceedance around Klang Valley, Malaysia[J]. Atmospheric Research, 2014, **139**: 116-127.
- [14] Assareh N, Prabamroong T, Manomaiphiboon K, et al. Analysis of observed surface ozone in the dry season over Eastern Thailand during 1997-2012[J]. Atmospheric Research, 2016, **178**: 179-

- 17-30.
- [15] Fu J S, Dong X Y, Gao Y, *et al.* Sensitivity and linearity analysis of ozone in East Asia: the effects of domestic emission and intercontinental transport[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, **62**(9): 1102-1114.
- [16] Lin W L, Xu X B, Zheng X D, *et al.* Two-year measurements of surface ozone at Dangxiong, a remote highland site in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, **31**: 133-145.
- [17] Xing J, Wang S X, Zhao B, *et al.* Quantifying nonlinear multiregional contributions to ozone and fine particles using an updated response Surface modeling technique[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **51**(20): 11788-11798.
- [18] Wang P, Chen Y, Hu J L, *et al.* Attribution of tropospheric ozone to NO_x and VOC emissions: Considering ozone formation in the transition regime[J]. Environmental Science & Technology, 2019, **53**(3): 1404-1412.
- [19] 梁永贤, 尹魁浩, 胡泳涛, 等. 深圳地区臭氧污染来源的敏感性分析[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(6): 1390-1396.
- Ling Y X, Yin K H, Hu Y T, *et al.* Sensitivity analysis of ozone precursor emission in Shenzhen, China[J]. China Environmental Science, 2014, **34**(6): 1390-1396.
- [20] 罗恢泓, 袁自冰, 郑君瑜, 等. 上海夏季臭氧生成机制时空变化特征及其影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(1): 154-168.
- Luo H H, Yuan Z B, Zheng J Y, *et al.* Spatio-temporal variation of summertime ozone formation mechanism in Shanghai and its impact factors[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(1): 154-168.
- [21] Wang X S, Zhang Y H, Hu Y T, *et al.* Decoupled direct sensitivity analysis of regional ozone pollution over the Pearl River Delta during the PRIDE-PRD2004 campaign[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(28): 4941-4949.
- [22] 郝伟华, 王文勇, 张迎春, 等. 成都市臭氧生成敏感性分析及控制策略的制定[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(10): 3894-3899.
- Hao W H, Wang W Y, Zhang Y C, *et al.* Analysis of ozone generation sensitivity in Chengdu and establishment of control strategy[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(10): 3894-3899.
- [23] Guo H, Chen K Y, Wang P F, *et al.* Simulation of summer ozone and its sensitivity to emission changes in China[J]. Atmospheric Pollution Research, 2019, **10**(5): 1543-1552.
- [24] 严茹莎. 德州市夏季臭氧敏感性特征及减排方案[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3961-3968.
- Yan R S. Ozone sensitivity analysis and emission controls in Dezhou in summer[J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3961-3968.
- [25] 张晓, 张艳品, 钊伟妙. 石家庄市主城区臭氧污染特征及气象成因分析[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(2): 245-253.
- Zhang X, Zhang Y P, Qian W M. Characteristics of ozone pollution and its meteorological factors in Shijiazhuang urban area[J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(2): 245-253.
- [26] 陈静, 钊伟妙, 韩军彩, 等. 石家庄市秋季典型天气背景下重污染特征分析[J]. 气象与环境学报, 2015, **31**(4): 42-50.
- Chen J, Qian W M, Han J C, *et al.* Pollution characteristic under typical weather background in autumn over Shijiazhuang[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2015, **31**(4): 42-50.
- [27] 王晓琦, 郎建垒, 程水源, 等. 京津冀及周边地区 PM_{2.5} 传输规律研究[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- Wang X Q, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Study on transportation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and its surrounding area[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(11): 3211-3217.
- [28] 吴莹, 吉东生, 宋涛, 等. 夏秋季北京及河北三城市的大气污染联合观测研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(9): 2741-2749.
- Wu Y, Ji D S, Song T, *et al.* Characteristics of atmospheric pollutants in Beijing, Zhuozhou, Baoding and Shijiazhuang during the period of summer and autumn[J]. Environmental Science, 2011, **32**(9): 2741-2749.
- [29] 张良, 王晓利, 王占山, 等. 2014 年石家庄市 O₃ 污染特征[J]. 环境科学与技术, 2017, **40**(7): 1-8.
- Zhang L, Wang X L, Wang Z S, *et al.* Ozone pollution characteristics of Shijiazhuang in 2014[J]. Environmental Science & Technology, 2017, **40**(7): 1-8.
- [30] 赵乐, 刘新军, 范莉茹, 等. 石家庄夏季典型时段臭氧污染特征及来源解析[J]. 中国环境监测, 2019, **35**(4): 78-84.
- Zhao L, Liu X J, Fan L R, *et al.* Pollution characteristic and source apportionment of VOCs during summer typical periods in Shijiazhuang[J]. Environmental Monitoring in China, 2019, **35**(4): 78-84.
- [31] Kang M J, Zhang J, Zhang H L, *et al.* On the relevancy of observed ozone increase during COVID-19 lockdown to summertime ozone and PM_{2.5} control policies in China[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2021, **8**(4): 289-294.
- [32] Lueken D J, Yarwood G, Hutzell W T. Multipollutant modeling of ozone, reactive nitrogen and HAPs across the continental US with CMAQ-CB6[J]. Atmospheric Environment, 2019, **201**: 62-72.
- [33] Zhou Y, Cheng S Y, Lang J L, *et al.* A comprehensive ammonia emission inventory with high-resolution and its evaluation in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **106**: 305-317.
- [34] Multi-resolution emission inventory for China[EB/OL]. <http://www.meicmodel.org/>, 2021-06-30.
- [35] Guan Y N, Wang L, Wang S J, *et al.* Temporal variations and source apportionment of volatile organic compounds at an urban site in Shijiazhuang, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2020, **97**: 25-34.
- [36] 王帅, 崔建升, 冯亚平, 等. 石家庄市挥发性有机物和臭氧的污染特征及源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- Wang S, Cui J S, Feng Y P, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs and O₃ in Shijiazhuang[J]. Environmental Science, 2020, **41**(12): 5325-5335.
- [37] 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 等. 石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5131-5142.
- Nie S S, Wang S, Cui J S, *et al.* Spatio-Temporal characteristics and potential source areas of seasonal atmospheric pollution in Shijiazhuang[J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5131-5142.
- [38] 赵伟, 高博, 刘明, 等. 气象因素对香港地区臭氧污染的影响[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 55-66.
- Zhao W, Gao B, Liu M, *et al.* Impact of meteorological factors on the ozone pollution in Hong Kong[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 55-66.

- [39] Jacob D J, Winner D A. Effect of climate change on air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 51-63.
- [40] Camalier L, Cox W, Dolwick P. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(33): 7127-7137.
- [41] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2041-2051.
Cheng N L, Li Y T, Zhang D W, *et al.* Characteristics of ozone over standard and its relationships with meteorological conditions in Beijing City in 2014[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2041-2051.
- [42] 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 等. 华北地区典型重工业城市夏季近地面 O₃ 污染特征及敏感性[J]. *环境科学*, 2020, **41**(7): 3085-3094.
Ou S J, Wei W, Wang X Q, *et al.* Pollution characteristics and sensitivity of surface ozone in a typical heavy-industry city of the north china plain in summer[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(7): 3085-3094.
- [43] 陈欣昊, 王咏薇, 任侠, 等. 基于 WRF-CMAQ 对江苏省 2014 年冬半年霾日的模拟与评估[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2016, **52**(6): 961-976.
Chen X H, Wang Y W, Ren X, *et al.* Simulation and evaluation of haze day in Jiangsu Province based on WRF/CMAQ model in winter, 2014 [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2016, **52**(6): 961-976.
- [44] 黄蕊珠, 陈焕盛, 葛宝珠, 等. 京津冀重霾期间 PM_{2.5} 来源数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(9): 2670-2680.
Huang R Z, Chen H S, Ge B Z, *et al.* Numerical study on source contributions to PM_{2.5} over Beijing-Tianjin-Hebei area during a severe haze event[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(9): 2670-2680.
- [45] US EPA. Guidance on the use of models and other analyses for demonstrating attainment of air quality goals for ozone, PM_{2.5}, and regional haze[M]. North Carolina: Research Triangle Park, 2013.
- [46] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 106-114.
Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, during 2013-2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 106-114.
- [47] 王帅, 聂赛赛, 冯亚平, 等. 石家庄市臭氧和二氧化氮的时空演替特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2021, **42**(6): 2679-2690.
Wang S, Nie S S, Feng Y P, *et al.* Spatio-temporal evolution characteristics and source apportionment of O₃ and NO₂ in Shijiazhuang[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(6): 2679-2690.
- [48] 洪礼楠, 黄争超, 秦墨梅, 等. 天津市夏季臭氧污染特征及来源的模拟分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, **53**(5): 929-938.
Hong L N, Huang Z C, Qin M M, *et al.* Simulation of pollution characteristics and source apportionment of ozone in Tianjin during summer time [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2017, **53**(5): 929-938.

CONTENTS

Development Scenarios and Environmental Benefits Analysis of Future Power Generation Industry Under Two Modes in China	LIU Chun-jing, LÜ Jian-yi, ZHAO Wen-chang, <i>et al.</i>	(3375)
Forecasting of Emission Co-reduction of Greenhouse Gases and Pollutants for the Road Transport Sector in Lanzhou Based on the LEAP Model	PANG Ke, ZHANG Qian, MA Cai-yun, <i>et al.</i>	(3386)
Discussion of Air Quality Forecasting Evaluation for Cities Based on Half-level Method	WANG Xiao-yan, ZHU Li-li, XU Rong, <i>et al.</i>	(3396)
Characterization and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} in Xiamen Port	XIAO Si-han, CAI Mei-jun, LI Xiang, <i>et al.</i>	(3404)
Deposition Characteristics of Water-soluble Inorganic Nitrogen and Organic Nitrogen in Atmospheric Precipitation in the Northern Suburbs of Nanjing	ZHANG Jia-ying, YU Xing-na, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i>	(3416)
Analysis of PM _{2.5} Transmission Characteristics in Main Cities of Jinzhong Basin in Winter	WANG Xiao-lan, WANG Yan, YAN Shi-ming, <i>et al.</i>	(3423)
Temporal Evolution and Source Apportionment of Black Carbon Aerosol in Ordos During Summer and Autumn 2019	KONG Xiang-chen, ZHANG Lian-xia, ZHANG Cai-yun, <i>et al.</i>	(3439)
Characteristics, Sources, and SOAP of VOCs During Winter in Jiyuan	WANG Fang, LI Li-xia, WANG Hong-guo, <i>et al.</i>	(3451)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in August in the Chang-Zhu-Tan Urban Area	LUO Da-tong, ZHANG Qing-mei, LIU Zhan, <i>et al.</i>	(3463)
Ozone Sensitivity Analysis and Control Strategy in Shijiazhuang City in July 2019	ZHU Jia-xian, WANG Xiao-qi, OU Sheng-ju, <i>et al.</i>	(3473)
Spatiotemporal Variation and Influencing Factors of AOD in the North China Plain	GUO Lin, MENG Fei, MA Ming-liang	(3483)
Aerosol Optical Characteristics with Ground-based Measurements via Sun Photometer and Its Relationship with PM Particle Concentration in Chang'an	ZHENG Yu-rong, WANG Xu-hong, CUI Si-ying, <i>et al.</i>	(3494)
Spatial-temporal Distribution and Evolution Characteristics of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei Region Based on Long-term "Ground-Satellite" Data	WANG Yao-ting, YIN Zhen-ping, ZHENG Zuo-fang, <i>et al.</i>	(3508)
Ten-year Trend Analysis of Eutrophication Status and the Related Causes in Lake Hongze	CHEN Tian-yu, LIU Chang-qing, SHI Xiao-li, <i>et al.</i>	(3523)
Shallow Groundwater Around Plateau Lakes: Spatiotemporal Distribution of Phosphorus and Its Driving Factors	YANG Heng, LI Gui-fang, YE Yuan-hang, <i>et al.</i>	(3532)
Characteristics and Differences of Dissolved Oxygen Stratification in Different Tributaries of Three Gorges Reservoir During Impoundment Period	Ji Dao-bin, FANG Jiao, LONG Liang-hong, <i>et al.</i>	(3543)
Dissolved Organic Matter Component and Source Characteristics of the Metropolitan Lakes and Reservoirs in a Typical Karst Region	NI Mao-fei, ZHOU Hui, MA Yong-mei, <i>et al.</i>	(3552)
Characteristics, Sources, and Risk Assessment of Perfluoroalkyl Substances in Surface Water and Sediment of Luoma Lake	HUANG Jia-hao, WU Wei, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3562)
Vertical Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phytoplankton Community Structure in Qiandao Lake	WANG Ji-yi, HUO Di, GUO Chao-xuan, <i>et al.</i>	(3575)
Chemical Forms and Spatial Distribution of Phosphorus in the Sediment of Sihe River	ZHANG Zi-han, ZHANG Xin-ru, JIA Chuan-xing, <i>et al.</i>	(3587)
Influence of Optimal Land Use Allocation on Phosphorus Loss in the Process of Rainfall and Runoff	ZHOU Hao, CHEN Fang-xin, LUO Yi-feng, <i>et al.</i>	(3597)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Accumulated Heavy Metals in Bioretention Systems	CHU Yang-yang, YANG Long, ZHOU Yuan, <i>et al.</i>	(3608)
Effects of Damming and Impoundment on Planktonic Microbial Community Structure and Interspecific Interaction Patterns in Different Water Depths	WANG Xun, ZHANG Jia-jia, YUAN Qiu-sheng, <i>et al.</i>	(3623)
Identification of Bacterial Flora and Metabolic Function of Sediments in Different Channels of Duliujian River Basin, Tianjin	LIU Jia-yuan, FENG Yue, YANG Xue-chun, <i>et al.</i>	(3635)
Spatiotemporal Distribution and Source Apportionment of Suspended Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water	PENG Ke-xing, LI Rui-fei, ZHOU Yi-chen, <i>et al.</i>	(3645)
Spatial Variation and Potential Sources of Microplastics in Rivers in Tongzhou District, Beijing	MEN Cong, LI Di, ZUO Jian-e, <i>et al.</i>	(3656)
Effects of Microplastic Exposure on Crucian Growth, Liver Damage, and Gut Microbiome Composition	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Jin-bo, <i>et al.</i>	(3664)
Influence of Different Types of Dewatering Agents on the Solidification Effect and Physical and Chemical Properties of Sediment	REN Jun, YIN Peng, WANG Wei-zhen, <i>et al.</i>	(3672)
Structural Characteristics of Micro-nano Particle Size Biochar and Its Adsorption Mechanism for Cd ²⁺	MA Wen-yan, PEI Peng-gang, GAO Ge, <i>et al.</i>	(3682)
Phosphorus Adsorption Characteristics of Different Biochar Types and Its Influencing Factors	LIAN Shen-hai, ZHANG Shu-nan, LIU Feng, <i>et al.</i>	(3692)
Development of Zeolite Loaded Mg-La-Fe Ternary (hydr)oxides for Treatment of Low Concentration Phosphate Wastewater	YIN Xue-jie, SONG Xiao-bao, DING Chen-man, <i>et al.</i>	(3699)
Succession and PICRUSt2-based Predicted Functional Analysis of Microbial Communities During the Sludge Bulking Occurrence and Restoration in One-stage Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	LI Ya-nan, YAN Bing, ZHENG Rui, <i>et al.</i>	(3708)
Aerobic Granulation Stability and Microbial Diversity of Filamentous Bulking Sludge	GAO Chun-di, YANG Xiao-yang, OU Jia-li, <i>et al.</i>	(3718)
Dynamic Variation in Vegetation Cover and Its Influencing Factor Detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020	XU Yong, ZHENG Zhi-wei, GUO Zhen-dong, <i>et al.</i>	(3730)
Enrichment and Ecological Risk Assessment of Available Phosphorus in Paddy Soil of Fujian Province Over Past 40 years	CHEN Zhong-xing, QIU Long-xia, CHEN Han-yue, <i>et al.</i>	(3741)
Effects of Land Use Change on Constitution, Stability, and C, N, P Stoichiometric Characteristics of Soil Aggregates in Southwest China Karst	HE Yu, SHENG Mao-yin, WANG Ke, <i>et al.</i>	(3752)
Heavy Metal Pollution and Health Risk Assessment of Mine Soil in Yangtze River Economic Belt	ZHANG Zhe, LU Ran, WU Si-yang, <i>et al.</i>	(3763)
Pollution Characteristics and Phytotoxicity of Heavy Metals in the Soil Around Coal Gangue Accumulation Area	SHANG Yu, SANG Nan	(3773)
Evaluation of Mercury Pollution in Soil of Different Land Use Types in Coal-fired Industrial Area	LI Qiang, YAO Wan-cheng, ZHAO Long, <i>et al.</i>	(3781)
Cadmium Enrichment and Bioavailability of Quaternary Profiles in Nansha District, Guangzhou, China	WANG Fang-ting, BAO Ke, HUANG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(3789)
Health Risk Assessment and Environmental Benchmark of Heavy Metals in Cultivated Land in Mountainous Area of Northwest Guizhou Province	XU Meng-qi, YANG Wen-tao, YANG Li-yu, <i>et al.</i>	(3799)
Effect Factors and Model Prediction of Soil Heavy Metal Bioaccessibility	ZHANG Jia-wen, TIAN Biao, LUO Jing-jing, <i>et al.</i>	(3811)
Effect of Organic Material Amendments on Soil Respiration in Tobacco Fields of Central Henan	LU Qi-fei, YE Xie-feng, HAN Jin, <i>et al.</i>	(3825)
Methane Production Potential and Methanogenic Pathways in Paddy Soils Under Different Rice-based Cropping Systems	SHEN Wan-yu, HUANG Qiong, MA Jing, <i>et al.</i>	(3835)
Characteristics and Assembly Process of Reclaimed Soil Microbial Communities in Eastern Plain Mining Areas	MA Jing, DONG Wen-xue, ZHU Yan-feng, <i>et al.</i>	(3844)
Differences in Bacterial Community Structure in Rhizosphere Soil of Three <i>Caragana</i> Species and Its Driving Factors in a Common Garden Experiment	LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, <i>et al.</i>	(3854)
Comparison of Bacterial Community Structure and Functional Groups of Paddy Soil Aggregates Between Karst and Non-karst Areas	XIAO Xiao-yi, JIN Zhen-jiang, LENG Meng, <i>et al.</i>	(3865)
Contrasting Responses of the Microbial Community Structure and Functional Traits to Soil pH in Purple Soils	WANG Zhi-hui, JIANG Xian-jun	(3876)
Effects of Agricultural Organic Waste Incorporation on the Metabolic Capacity of Microbial Carbon Sources of Dissolved Organic Matter in Paddy Soil	XIAO Yi, LI Zheng, HUANG Rong, <i>et al.</i>	(3884)