

### 北京城区PM<sub>2.5</sub>各组分污染特征及来源分析

安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年5月

第43卷 第5期  
Vol.43 No.5



目次

|                                                                                                                          |                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| 北京城区 PM <sub>2.5</sub> 各组分污染特征及来源分析 .....                                                                                | 安欣欣, 曹阳, 王琴, 富佳明, 王陈婧, 景宽, 刘保献 (2251)                        |
| 基于时空混合效应模型的京津冀 PM <sub>2.5</sub> 浓度变化模拟 .....                                                                            | 范丽行, 杨晓辉, 宋春杰, 李梦诗, 段继福, 王卫, 李夫星, 李伟妙 (2262)                 |
| 2000~2018 年京津冀城市群 PM <sub>2.5</sub> 时空演变及其与城市扩张的关联 .....                                                                 | 赵安周, 相恺政, 刘宪锋, 张向蕊 (2274)                                    |
| 海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM <sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析 .....                                                                       | 虞雄, 杨凌霄, 张婉, 齐安安, 王滢铭, 王鹏程, 黄琦, 赵彤, 张雄飞, 徐鹏, 张天琪, 王文兴 (2284) |
| 硫酸盐非均相机制对颗粒物污染的影响: 上海典型污染事件的 WRF-Chem 模拟 .....                                                                           | 张茹涵, 张皓然, 冯伟航, 汤克勤, 马亚平, 王红丽, 黄成, 胡建林, 张宏亮, 李楠 (2294)        |
| 省会城市不同功能区大气 PM <sub>2.5</sub> 化学组分季节变化及来源分析 .....                                                                        | 孙友敏, 范晶, 徐标, 李彦, 韩红, 张桂芹 (2304)                              |
| 太原市冬季不同污染程度下 PM <sub>2.5</sub> 的化学组成、消光特征及氧化潜势 .....                                                                     | 任娇, 赵荣荣, 王铭, 张欢欢, 尹诗杰, 薛永刚 (2317)                            |
| 郑州市冬季大气 PM <sub>2.5</sub> 金属元素来源及健康风险评价 .....                                                                            | 姚森, 王乾恒, 薛妍, 史来文, 张俊美, 杨书申 (2329)                            |
| 淄博市冬季 PM <sub>2.5</sub> 载体金属元素污染特征、生态风险评价及来源分析 .....                                                                     | 白雯宇, 徐勃, 郭丽瑶, 殷宝辉, 马银红, 李丽明, 杨文, 赵雪艳 (2336)                  |
| 承德市 PM <sub>2.5</sub> 中多环芳烃的季节分布特征、来源解析及健康风险评价 .....                                                                     | 贺博文, 聂赛赛, 李仪琳, 郭睿瑶, 姚波, 崔建升, 冯亚平, 王帅, 侯晓松 (2343)             |
| 珠三角大气中二噁英污染水平与区域迁移 .....                                                                                                 | 付建平, 谢丹平, 黄锦琼, 杨艳艳, 冯桂贤, 周长风, 廖海婷, 青亮, 张漫雯, 吴明亮, 张素坤 (2355)  |
| 华北平原南部农村地区黑碳气溶胶浓度及来源 .....                                                                                               | 张玲, 孔少飞, 郑煌, 胡尧, 曾昕, 程溢, 祁士华 (2363)                          |
| 基于模式过程分析技术天津地区 PM <sub>2.5</sub> 污染气象成因分析 .....                                                                          | 郝团, 蔡子颖, 韩素芹, 杨旭, 樊文雁, 姚青, 邱晓滨 (2373)                        |
| 基于排放量和大气反应活性的 VOCs 污染源分级控制 .....                                                                                         | 陈鹏, 张月, 邢敏, 李珊珊 (2383)                                       |
| 基于复杂网络的中国臭氧拓扑特征 .....                                                                                                    | 菅娜, 陈建华, 李冬, 王迪, 薛志钢 (2395)                                  |
| 基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测 .....                                                                                        | 陈天雷, 吴敏, 潘成珂, 常莉敏, 李洪, 刘鹏, 高宏, 黄韬, 马建民 (2403)                |
| 基于源反演和气溶胶同化方法天津空气质量模式预报能力改进 .....                                                                                        | 蔡子颖, 唐邈, 肖致美, 杨旭, 朱玉强, 韩素芹, 徐虹, 邱晓滨 (2415)                   |
| 基于空气质量监测数据的钢铁行业污染源识别方法 .....                                                                                             | 石耀耀, 胡京南, 褚咏昕, 段青春, 胡丙鑫, 殷丽娜, 吕玲玲 (2427)                     |
| 重污染天气应对“绩效分级、差异化管控”措施首次实践效果后评估 .....                                                                                     | 曾景海, 王灿 (2436)                                               |
| 黄河流域水污染风险分区 .....                                                                                                        | 周夏飞, 曹国志, 於方, 杨威杉, 徐泽升 (2448)                                |
| 黄河流域甘肃段工业行业水污染物空间排放特征 .....                                                                                              | 李雪迎, 杨曦, 乔琦, 刘丹丹, 张玥, 赵若楠, 白璐 (2459)                         |
| 黄河沉积物重金属时空分布与污染评价 .....                                                                                                  | 王韬轶, 潘保柱, 韩语, 王雨竹, 李晨辉, 杜蕾 (2467)                            |
| APCS-MLR 结合 PMF 模型解析厦门杏林湾近郊流域沉积物金属来源 .....                                                                               | 沈宸宇, 闫钰, 于瑞莲, 胡恭任, 崔建勇, 颜妍, 黄华斌 (2476)                       |
| 河流底泥 DOM、营养盐与重金属空间分异特征及响应关系 .....                                                                                        | 肖艳春, 于会彬, 宋永会 (2489)                                         |
| 太原市汾河河岸带土壤重金属分布特征、评价与来源解析 .....                                                                                          | 胡杰, 赵心语, 王婷婷, 苟奎贤, 王春玲 (2500)                                |
| 洪泽湖溶解态有机质与重金属汞的结合特性 .....                                                                                                | 胡斌, 王沛芳, 张楠楠, 包天力, 金秋彤 (2510)                                |
| 富营养化驱动下西凉湖百年生态演化轨迹 .....                                                                                                 | 郑佳楠, 徐敏, 郑文秀, 朱可欣, 王荣, 张恩楼 (2518)                            |
| 基于 DGT 技术的黄河上游典型水库沉积物氮磷释放与污染源解析 .....                                                                                    | 马玉坤, 朱翔, 庞晴晴, 孔明, 韩天伦, 彭福全, 谢磊, 汪龙眠, 徐斌, 何斐 (2527)           |
| 暴雨前后河南北部河流水质分异特征及其污染源解析 .....                                                                                            | 张彦, 邹磊, 梁志杰, 姜明, 李平, 黄仲冬, 齐学斌 (2537)                         |
| 鄱阳湖流域水葫芦 ( <i>Eichhornia crassipes</i> ) 对水体微塑料的吸附截留效应 .....                                                             | 李文刚, 吴希恩, 简敏菲, 刘淑丽, 刘海球, 丁惠君 (2548)                          |
| 太湖塑料添加剂时空分布和生态风险评价 .....                                                                                                 | 刘舒娇, 丁剑楠, 石波哲, 张军毅, 庄严, 邹华 (2557)                            |
| 骆马湖表层沉积物微塑料的分布、来源及储量 .....                                                                                               | 姚明轩, 白雪, 徐振佳, 李凤杰, 陆滢, 李畅, 华祖林 (2566)                        |
| 太湖不同介质中磷的污染特征及其治理启示 .....                                                                                                | 蔡梅, 陆志华, 王元元, 钱旭 (2575)                                      |
| 辽河四平段流域河流沉积物微生物群落多样性和结构分析 .....                                                                                          | 李鹏洋, 安启睿, 王新皓, 孙思宇, 李青乾, 郑娜 (2586)                           |
| 面源污染诱导嘉陵江沉积物中细菌群落结构与功能异变 .....                                                                                           | 薛玉琴, 徐飞, 刘坤和, 王佳颖, 竹兰萍, 朱志豪, 张拓 (2595)                       |
| 微塑料对沉积物细菌群落组成和多样性的影响 .....                                                                                               | 李汶璐, 王志超, 杨文煊, 张博文, 李卫平 (2606)                               |
| 白洋淀冬季沉积物好氧反硝化菌垂直分布特征及群落构建 .....                                                                                          | 张甜娜, 陈召莹, 张紫薇, 周石磊, 孟佳靖, 陈哲, 张一凡, 董宛佳, 崔建升 (2614)            |
| 人工诱导水库分层水体提前混合对细菌群落结构和代谢活性的影响 .....                                                                                      | 高悦, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 司凡, 杨斌 (2624)                              |
| 鄱阳湖典型区铜锈环螺体内微塑料分布特征 .....                                                                                                | 江为群, 胡启武, 简敏菲, 邹龙, 刘淑丽 (2633)                                |
| 负载多壁碳纳米管的多孔 Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb-Ni 电极电催化氧化双酚 A .....                                                                 | 符远航, 刘安迪, 黄伟斌, 唐彬彬, 张进忠 (2640)                               |
| 磁性 Mn <sub>0.6</sub> Zn <sub>0.4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> 催化 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 降解亚甲基蓝效能及机制 ..... | 徐冬莹, 余静, 郝旗, 杨迎春, 方淑红 (2650)                                 |
| 两种纳米颗粒对沸石吸附环丙沙星的影响 .....                                                                                                 | 蒋兰翠, 孟昭福, 刘贤, 刘欣, 王新欣, 曹雪雯 (2662)                            |
| AMD 污泥复合材料吸附 As(V) 的机制及其影响因素 .....                                                                                       | 张亚辉, 张瑞雪, 吴攀, 陈世万, 杨艳, 安丽, 傅渝然, 张子豪 (2673)                   |
| 三氯生及其降解中间产物对活性污泥中微生物群落变化和硝化反硝化功能基因的影响 .....                                                                              | 卢英源, 董小琦, 彭星星, 贾晓珊 (2685)                                    |
| 污染场地风险管控可持续评价指标体系构建及关键影响因素分析 .....                                                                                       | 李笑诺, 易诗懿, 陈卫平 (2699)                                         |
| 基于生态功能的滨海湿地土壤质量综合评价方法构建及实证分析 .....                                                                                       | 张雪, 孔范龙, 姜志翔 (2709)                                          |
| 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价 .....                                                                                             | 陈航, 王颖, 王澍 (2719)                                            |
| 典型铁、锰矿物对稻田土壤砷形态与酶活性的影响 .....                                                                                             | 周一敏, 黄雅媛, 刘凯, 赵儒乐, 李冰玉, 雷鸣 (2732)                            |
| 两种油菜施肥水溶性壳聚糖修复典型铅污染农田土壤 .....                                                                                            | 孟晓飞, 郑国砥, 陈同斌, 杨俊兴, 郭俊梅, 刘杰 (2741)                           |
| 基于贝叶斯理论的小麦籽粒镉铅超标风险预测 .....                                                                                               | 王天齐, 李艳玲, 杨阳, 牛硕, 王美娥, 陈卫平 (2751)                            |
| 紫色土旱坡地油菜/玉米轮作下氮流失的年度变化特征 .....                                                                                           | 徐曼, 高明, 余添, 朱浩宇, 邓华, 王子芳 (2758)                              |
| 不同原料生物炭的理化特性及其作炭基肥缓释载体的潜力评价 .....                                                                                        | 邢莉彬, 成洁, 耿增超, 张宏伟, 梁宏旭, 王强, 孙倩倩, 李艳 (2770)                   |
| 木醋液酸化生物炭与氮素配施对盐渍土壤活性氮及氨挥发的影响 .....                                                                                       | 申书伟, 张丹丹, 王敏鸽, 王旭东 (2779)                                    |
| 生物可降解地膜覆盖对关中地区小麦-玉米农田温室气体排放的影响 .....                                                                                     | 郭怡婷, 罗晓琦, 王锐, 陈海心, 冯浩 (2788)                                 |
| 戴云山南坡不同海拔森林土壤微生物群落结构特征和影响因素 .....                                                                                        | 何中声, 王紫薇, 朱静, 陈佳嘉, 谷新光, 江蓝, 陈博, 吴则焰, 刘金福, 陈文伟 (2802)         |
| 模拟增温和降雨增加对撂荒草地土壤胞外酶活性及计量特征的影响 .....                                                                                      | 王兴, 钟泽坤, 简俊楠, 张硕宏, 杨改河, 任成杰, 冯永忠, 任广鑫, 王晓娇, 韩新辉 (2812)       |
| 中国主要城市的城市化对局地增温的贡献 .....                                                                                                 | 李宇, 周德成, 闫章美, 张良侠 (2822)                                     |
| 《环境科学》征订启事 (2293)                                                                                                        |                                                              |
| 《环境科学》征稿简则 (2426)                                                                                                        |                                                              |
| 信息 (2585, 2672, 2708)                                                                                                    |                                                              |

# 基于前体物多情景排放的兰州市 2030 年夏季臭氧预测

陈天雷<sup>1</sup>, 吴敏<sup>1</sup>, 潘成珂<sup>1</sup>, 常莉敏<sup>1</sup>, 李洪<sup>1</sup>, 刘鹏<sup>1</sup>, 高宏<sup>1\*</sup>, 黄韬<sup>1</sup>, 马建民<sup>2</sup>

(1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃省环境污染预警与控制重点实验室, 兰州 730000; 2. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

**摘要:** 近年来, 兰州市夏季臭氧污染问题日渐凸显, 已成为影响当地环境空气质量达标的首要污染因子和制约环境空气质量持续改善的突出短板。解决臭氧污染问题需结合城市经济发展的实际情况定量评估前体物减排量并提出切实可行的减排对策, 为环境管理的中长期规划提供科学依据。在 2015 年本地排放清单的基础上, 通过情景分析法预测了兰州市 2030 年 3 种梯度城市发展与污染控制情景下臭氧的两类主要前体物氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ ) 和挥发性有机物 (VOCs) 的排放量, 利用 WRF-Chem 模型对不同情景下的 2030 年夏季臭氧污染程度进行了数值模拟, 分析了臭氧浓度与生成敏感性的时空变化情况, 并提出了兰州市臭氧前体物的总量控制参考和针对不同行政区的减排对策建议。结果表明, 3 种不同的城市发展与污染控制情景下兰州市 2030 年  $\text{NO}_x$  排放量为  $4.57 \times 10^4 \sim 12.14 \times 10^4 \text{ t}$ , VOCs 排放量为  $5.30 \times 10^4 \sim 7.69 \times 10^4 \text{ t}$ ,  $\text{NO}_x$  排放可通过调整能源结构, 加强末端治理和限制机动车排放等措施有效减少; 减排 VOCs 则需从工业源、生活源和移动源多方面同时入手, 做好长期治理攻坚的准备。模拟结果显示, 兰州市夏季中心城区臭氧浓度高, 臭氧生成主要受 VOCs 控制, 郊区浓度略低, 受  $\text{NO}_x$  控制。2030 年若将兰州市  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放量限制在  $6.25 \times 10^4 \text{ t}$  和  $5.81 \times 10^4 \text{ t}$ , 夏季臭氧 1 h 平均浓度将全部低于国家二级标准, 若限制在  $4.57 \times 10^4 \text{ t}$  和  $5.30 \times 10^4 \text{ t}$ , 可进一步削减夏季日间臭氧浓度的 9.1%, 更利于中心城区的臭氧浓度削峰。兰州市目前阶段应着重减排中心城区的 VOCs 和郊区的  $\text{NO}_x$ , 同时关注臭氧生成敏感性变化, 加强各行政区间的联防联控。

**关键词:** 兰州市; 大气臭氧; 臭氧前体物排放; WRF-Chem; 情景模拟; 减排对策建议

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)05-2403-12 DOI: 10.13227/j.hjxx.202108116

## Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030

CHEN Tian-lei<sup>1</sup>, WU Min<sup>1</sup>, PAN Cheng-ke<sup>1</sup>, CHANG Li-min<sup>1</sup>, LI Yang<sup>1</sup>, LIU Peng<sup>1</sup>, GAO Hong<sup>1\*</sup>, HUANG Tao<sup>1</sup>, MA Jian-min<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Environmental Pollution Prediction and Control, Gansu Province, College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** In recent years, summer ozone pollution in Lanzhou has become an increasingly prominent concern and a primary factor causing the air quality of the city to exceed the ambient air quality standard of China. To achieve the city's goal for improving the air quality in Lanzhou, well below the national standard, effective air quality mitigation measures for the next decade must be taken to quantify the reduction in ozone precursor emissions, which would provide scientific support for the long-term outline of local environmental management. Based on the 2015 emission levels issued by the local government, the emission amounts of major ozone precursors ( $\text{NO}_x$  and VOCs) were predicted, and ozone concentration levels subject to three urban development and pollution control scenarios in Lanzhou in 2030 were simulated using a coupled WRF-Chem weather and air quality model. The response and sensitivity of predicted ozone concentration to the changes in precursor emissions was quantified. The results were used to determine the levels and magnitudes of precursor emission reductions in Lanzhou in the next decade and provide guidance for emission mitigation policy. Based on the economic development and pollution control plan in Lanzhou, the emission range of  $\text{NO}_x$  was  $4.57 \times 10^4 \sim 12.14 \times 10^4 \text{ t}$ , and the emission range of VOCs was  $5.30 \times 10^4 \sim 7.69 \times 10^4 \text{ t}$ , under three modeling scenarios. Adjusting the energy structure, tightening up end-treatment, and restricting the vehicle emissions could more effectively reduce  $\text{NO}_x$  emissions, whereas the reduction in VOCs emissions would depend on synergistic emission reduction from industry, residential, and transportation sources, which requires a long-term campaign. The modeling results showed that the ozone concentration in the urban area was higher than that in the suburbs. The urban ozone was formed mainly in a VOCs-limited regime, and the suburban ozone was formed in an  $\text{NO}_x$ -limited regime. If the emissions of  $\text{NO}_x$  and VOCs in Lanzhou were restricted below  $6.25 \times 10^4 \text{ t}$  and  $5.81 \times 10^4 \text{ t}$  in 2030, respectively, the 1 h average ozone concentration could be well below the secondary level of the national ambient air quality standard in summer. If emissions of these two precursors were further reduced to  $4.57 \times 10^4 \text{ t}$  and  $5.30 \times 10^4 \text{ t}$ , the summer daytime-ozone concentration could be further reduced by 9.1%, which would be conducive to ozone control in the urban area. By comparing the ozone pollution in different scenarios, the focus to reduce the air quality of the city below the national standard should be on reducing VOCs in urban Lanzhou and  $\text{NO}_x$  in the suburbs of the city. Additional attention should be paid to the sensitivity of ozone formation to the changes in ozone precursor emissions so as to help strengthen regional joint prevention and control for ozone pollution in Lanzhou.

**Key words:** Lanzhou; atmospheric ozone; ozone precursor emissions; WRF-Chem; scenario simulation; emission reduction countermeasures

作为中国最早发现光化学烟雾的城市, 自 2013 年以来, 兰州市夏季臭氧浓度呈明显上升态势并持续处于较高水平<sup>[1]</sup>, 2016 ~ 2020 年, 仅西固工业区夏季臭氧超标天数就分别达到 16.7%、44.6%、50.5%、63.2% 和 33.7%<sup>[2]</sup>, 在 2016 ~ 2019 年超标天数快速飙升后, 2020 年开始趋于下降, 夏季臭氧

1 h 平均浓度于 2017 年最高达到  $481 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 对拉

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2021-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977357); 兰州大学中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2021-kb23)

作者简介: 陈天雷(1995 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为城市大气污染防治, E-mail: chentl19@lzu.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: honggaol@lzu.edu.cn

升兰州市平均臭氧浓度水平有很大的贡献. 当前兰州市臭氧已成为影响夏季空气质量的首要污染物. 高浓度的臭氧污染不仅持续恶化生态环境, 造成建筑老化, 引起气候变化, 还对人体健康有严重的损害<sup>[3-5]</sup>. 有研究发现, 兰州市区近地面臭氧高浓度污染主要集中在 4~8 月<sup>[6]</sup>, 臭氧的形成对其前体物  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的敏感性不断发生变化<sup>[2, 7-9]</sup>. 由于近地面臭氧主要来自于化学转化造成的二次污染, 与其前体物呈非线性关系<sup>[10]</sup>, 治理难度不亚于  $\text{PM}_{2.5}$ . 在“十四五”规划中, 国家已经把臭氧及其前体物列为改善空气质量的重点关注污染物<sup>[11]</sup>, 如何在保证城市高质量发展的基础上, 有效评估当前大气污染防治措施, 制定科学和长期的臭氧前体物减排方案, 是城市大气环境管理者亟待解决的问题.

基于空气质量模型的情景设置是开展区域臭氧浓度空间分布模拟, 进行前体物减排效果评估的有效手段和方法. Kim 等<sup>[12]</sup>的研究利用 GEOS-Chem 模型模拟了 2050 年 RCP 情景下全球近地面臭氧的浓度分布, 量化了气候和排放变化对未来臭氧空气质量的影响. Zhu 等<sup>[13]</sup>的研究同样利用 GEOS-Chem 模型模拟了 2000~2050 年 RCP 情景下中国区域近地面臭氧的浓度变化, 得出应同时降低  $\text{NO}_x$ 、CO 和 NMVOCs 的人为排放与全球  $\text{CH}_4$  的浓度, 以减轻未来中国区域臭氧污染的结论; Zhang 等<sup>[14]</sup>的研究利用 CMAQ 模型模拟了 2015~2020 年中国区域 5 种减排控制政策情景下  $\text{O}_3$  和  $\text{NO}_2$  的浓度分布, 研究了二者的协同健康效应, 并探讨了目前已在各部门实施的减排控制政策的有效性; Li 等<sup>[15]</sup>的研究基于 WRF-Chem 模型模拟了 2016 年兰州市 11 种前体物排放控制情景下的臭氧浓度, 分析了主城区和石化工业区的臭氧敏感性特征; Zhang 等<sup>[16]</sup>的研究利用 MCM 模型与后向轨迹法, 确定了 2018 年华北平原区域臭氧的主要来源, 得出了减少交通和工业部门的前体物排放, 可有效降低此区域臭氧浓度的结论; 谢放尖等<sup>[17]</sup>的研究通过设置梯度发展情景调整排放清单, 利用 CMAQ 模型模拟了 2030 年南京市包括臭氧在内的 6 项污染物浓度, 给出了达标约束下各项污染物的总量控制指标. 兰州市大气臭氧前体物减排对策的科学制定和严格实施是防控臭氧污染、改善环境空气质量的关键, 探讨各项减排措施的综合控制效果, 进行科学地环境管理中长期规划对于研判兰州市臭氧污染趋势、推进臭氧污染防治工作具有十分重要的意义.

本研究采用情景分析法, 在 2015 年(基准年)本地排放清单的基础上, 设置了 3 种梯度的城市发展与污染控制情景, 预测了兰州市 2030 年(目标

年)臭氧主要前体物  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放量, 并于基准年和目标年选取夏季臭氧污染较为严重的一个月时间(7 月 24 日~8 月 24 日), 利用 WRF-Chem 模型评估 2030 年不同前体物排放情景下夏季臭氧浓度相比于 2015 年的变化情况及其生成敏感性, 提出适用于兰州市不同行政区臭氧防控的前体物减排对策建议, 以期为兰州市“十四五”环境规划和大气污染物总量控制政策的制定提供参考.

## 1 材料与方法

### 1.1 目标年排放清单的预测

#### 1.1.1 排放总量预测方法

区域大气污染物排放量与城市经济发展情况、能源消费量、重点行业活动水平、末端治理效率和污染管控政策强度等因素密切相关<sup>[18-21]</sup>. 以 2015 年本地  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放清单为基础, 筛选重点排放源和排放行业, 根据兰州市当前城市发展态势, 结合已出台的污染物管控政策和规划力度合理推测, 构建兰州市 2030 年不同  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放情景, 情景名称与内容见表 1, 主要活动水平预测及依据见表 2. 采用排放系数法<sup>[22]</sup>对重点排放源和排放行业进行分行业预测<sup>[23]</sup>, 对其他排放源和排放行业进行宏观预测, 估算兰州市 2030 年  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放量, 具体公式如下:

$$E = \sum_{i=1}^n A_i \times \text{EF}_i \times (1 - \eta) \quad (1)$$

式中,  $E$  为污染物排放量,  $i$  代表不同的源类别;  $A$  为活动水平, 其定义为影响污染物排放的各种经济活动的产出量, 如能源消耗量和产品产量等;  $\text{EF}$  为排放因子, 即单位活动水平的污染物产生量;  $\eta$  为治理技术对污染物的去除效率. 模拟 2030 年空气质量时, 兰州市发展情景下二氧化硫和颗粒物排放主要参考兰州市生态环境局空气质量达标规划指标所设置的减排比例, 在 2015 年总量排放的基础上做削减, 基础情景和战略情景在此基础上再分别增加和减少 10% 的排放, 其余污染物保持与  $\text{PM}_{2.5}$  下降比例相同.

#### 1.1.2 清单网格化方法

参考以往研究对于清单网格化的分配方法<sup>[24-30]</sup>, 假定目标年污染源的分布特征不发生变化, 把预测的兰州市 2030 年  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放量进行时间、空间和化学物种分配, 使其满足空气质量模型的输入数据要求. 空间分配上, 将经纬度明确的点源和道路移动源分别根据 2015 年兰州市工业企业布局和路网进行分配, 其余生活源, 工业源和农业源排放量分别根据人口密度, 第二产业 GDP 和土



表 1 不同的城市发展与污染防治政策干预下的情景设置

| Table 1 Scenario settings under different urban development and pollution control interference |                                                                                                                                           |                                                                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 情景名称                                                                                           | 情景内容                                                                                                                                      | 重要影响因子的控制                                                           |
| 基础情景                                                                                           | 延续兰州市经济和各行业的现状发展速度,保持 2015 年能源结构不变,不考虑 2015 年后新政策的出台对污染物排放的限制,预测在城市中速发展且没有新污染防治政策干预的情景下,2030 年 NO <sub>x</sub> 和 VOCs 的排放量                | GDP 保持平稳增长;延续 2015 年产业结构和布局;兰州市能源结构、排放因子、末端治理效率和减排控制措施均保持在 2015 年水平 |
| 发展情景                                                                                           | 延续兰州市当前城市发展态势,结合已出台的规划力度合理推测,发展环境政策,优化兰州市能源结构和产业结构.考虑未来部分重点行业治污技术的进步对污染物减排的效果,预测在城市中低速发展且进行适当污染防治政策干预下 2030 年 NO <sub>x</sub> 和 VOCs 的排放量 | GDP 保持中低速增长;调整能源结构并指导行业发展;根据污染防治政策的发展趋势设置合理的末端治理效率和减排控制比例           |
| 战略情景                                                                                           | 采取可持续发展战略,加大力度调整兰州市能源结构和产业结构,严格执行各项环保政策,不断提升治理技术,在发展情景的基础上进一步减排,预测在城市中低速发展且强化污染防治政策干预下,2030 年 NO <sub>x</sub> 和 VOCs 的排放量                 | GDP 保持中低速增长;优化能源结构,限制高耗能高污染行业产品产量;提高末端治理效率,加大污染物减排控制比例              |

表 2 主要活动水平预测

| Table 2 Forecast of major activity levels |            |                                                           |                                                                           |                               |
|-------------------------------------------|------------|-----------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 项目                                        | 情景预测及依据    |                                                           |                                                                           |                               |
|                                           | 基础情景       | 发展情景                                                      | 战略情景                                                                      |                               |
| 经济社会发展主要参数                                | GDP        | 根据 2001 ~ 2020 年兰州市年均 GDP 增速预测                            | 根据兰州市“十四五”经济社会发展目标和“十三五”期间年均 GDP 增速预测                                     | 保持发展情景 GDP 增速水平               |
|                                           | 城镇人口       | 根据兰州市 2013 ~ 2020 年城镇常住人口年均增长率预测                          | 保持基础情景人口增长率                                                               | 保持基础情景人口增长率                   |
|                                           | 能源消费总量     | 根据目标年 GDP 和单位生产总值能耗估算,单位生产总值能耗保持 2015 年不变                 | 参考《甘肃省“十三五”节能减排综合工作方案》和国家“十四五”单位 GDP 能耗减排比例,预测兰州市 2030 年单位生产总值能耗降幅比例为 30% | 预测兰州市 2030 年单位生产总值能耗降幅比例为 40% |
|                                           | 煤炭消费总量     | 根据目标年煤炭消费总量占能源消费总量的比例计算,保持与兰州市 2015 年能源结构相同               | 参考《甘肃省“十三五”能源发展规划》和《中国未来能源发展战略探析》,预测兰州市 2030 年煤炭消费比重为 50%                 | 预测兰州市 2030 年煤炭消费比重为 40%       |
| NO <sub>x</sub> 重点排放源和排放行业                | 电力、热力生产和供应 | 采用单位燃煤量的排污系数法进行测算                                         | 设置目标年各项措施对 NO <sub>x</sub> 削减比例比基础情景提升 25%                                | 在发展情景的基础上再减排 10%              |
|                                           | 非金属矿物制品业   | 兰州市水泥与平板玻璃产量按照 2011 ~ 2019 年变化趋势推算                        | 设置目标年水泥行业综合脱销效率为 85%,平板玻璃行业各项措施对于 NO <sub>x</sub> 削减比例提升 20%              | 在发展情景基础上各压减 10% 产能            |
|                                           | 其他工业       | 采用单位煤炭消费量的排放强度法预测                                         | 按照兰州市生态环境局所设置的目标年减排比例估算                                                   | 保持发展情景水平                      |
|                                           | 移动源        | 根据近十年机动车增长趋势,分车型测算机动车 NO <sub>x</sub> 排放量,新增机动车按照国Ⅳ排放标准执行 | 2020 年后新增机动车按照国Ⅵ排放标准执行,并设置 2030 年各项减排措施对于移动源 NO <sub>x</sub> 削减比例提升 20%   | 在发展情景的基础上再减排 10%              |
| VOCs 重点排放源和排放行业                           | 石化行业       | 原油加工量按照近 5 年趋势预测                                          | 设置石化行业 VOCs 目标年减排比例提升 25%                                                 | 在发展情景的基础上再减排 15%              |
|                                           | 化工、印刷及其他行业 | 细分为 12 个行业并根据近 6 年各行业发展趋势预测                               | 设置目标年各项措施对于 12 个行业 VOCs 的综合削减比例提升 25%                                     | 在发展情景的基础上再减排 10%              |
|                                           | 生活源        | 根据目标年城镇人口数与单位人口排放 VOCs 系数进行测算                             | 设置目标年各项措施对于生活源 VOCs 的削减比例提升 30%                                           | 保持发展情景水平                      |
|                                           | 移动源        | 根据近十年机动车增长趋势,分车型测算机动车 VOCs 排放量,新增机动车按照国Ⅳ排放标准执行            | 2020 年后新增机动车按照国Ⅵ排放标准执行,并设置 2030 年各项减排措施对于移动源 VOCs 削减比例提升 20%              | 在发展情景的基础上再减排 10%              |

地利用类型数据进行分配. 基于韩向娣等<sup>[31]</sup>的研究,第二产业 GDP 数据由网格化的夜间灯光数据计算得出,具体公式如下:

$$\ln \text{GDP}_2 = 0.733 \ln I + 14.424 \quad (2)$$

式中,GDP<sub>2</sub> 为第二产业 GDP 数据; I 为夜间灯光指数. 人口密度数据来源于 CIESIN (Center for International Earth Science Information Network), 夜间灯光数据来源于 NOAA (National Oceanic and

Atmospheric Administration), 土地利用类型数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心; 参考 2015 年本地排放清单中基于部门调研获得的逐月和逐时分配系数进行时间分配; 参考国内外相关研究和 SPECIATE v4.2 数据库<sup>[32]</sup>进行 VOCs 物种分配, 并映射到 MOZART<sup>[33]</sup> 化学机制, 以便对接 WRF-Chem 模型. 2030 年兰州市其余污染物排放清单根据目标年情景削减比例在 2015 年清华 MEIC 清单<sup>[34]</sup>的基础上削减获取.

## 1.2 模型设置

近地面臭氧的生成机制较为复杂, 受到温度, 光照, 气压, 相对湿度和前体物排放量与排放比例等多种因素的影响<sup>[6,35,36]</sup>, 故使用内嵌化学机制的空气质量模型模拟臭氧浓度的方法得到了广泛的应用. 本研究采用空气质量模型 WRF-Chem v3.8.1<sup>[37]</sup>, 对兰州市进行两层区域嵌套模拟. 图 1 为模拟域和海拔高度, 考虑到兰州市的复杂地形和小尺度气象活

动, 设置模型内域覆盖兰州市及周边地区, 空间分辨率为 2 km, 网格数 140 × 135; 外域覆盖甘肃省及部分邻近省份, 空间分辨率为 10 km, 网格数 104 × 110. 垂直方向包括 27 层, 最顶层气压值为 50 hPa. 气象场由 NCEP (1° × 1°) FNL 资料经气象模式 WPS v3.8.1 模拟得到. 天然源排放的 VOCs 采用美国国家大气研究中心研发的 MEGAN 模型计算得到<sup>[38]</sup>. 模型采用适于光化学二次污染物模拟的 MOZART 化学机制, 气溶胶化学过程采用 MOSAIC 模块, 使用 KPP 库, 开启气象和化学双反馈选项. 模型验证以 2015 年模拟时间段 (7 月 24 日 ~ 8 月 24 日) 为基准, 目标年气象数据以 2015 年相同时间段作为替代.

## 2 结果与讨论

### 2.1 清单结果分析

图 2 给出了兰州市 2030 年不同城市发展与污染控制情景下 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 的主要源排放量的差异及相对 2015 年的变化率. 从中可见, NO<sub>x</sub> 排放的主要贡献源为电力热力生产和供应源、移动源与工业源, VOCs 排放的主要贡献源为工业源、生活源和移动源. 在基础情景下, 若无新污染防控政策干预, 兰州市 2030 年 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 的排放量将分别达到  $12.14 \times 10^4$  t 和  $7.69 \times 10^4$  t, 相比 2015 年增幅为 81% 和 25%; 发展情景下, 适当的污染防控政策干预可以将兰州市 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 的排放量限制在  $6.25 \times 10^4$  t 和  $5.81 \times 10^4$  t, 相比 2015 年的降幅为 7% 和 6%; 战略情景下, 强化污染防控政策干预可将兰州市 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 的排放总量限制在  $4.57 \times 10^4$  t 和  $5.30 \times 10^4$  t, 相比 2015 年的降幅达 32% 和 14%; 此外, 在进行情景计算时发现, 对于兰州市 NO<sub>x</sub> 减排, 除了应合理调整能源结构和提高重点行业的脱硝效率外, 各项限制机动车排放的措施也可获得较好的效果, 而对于 VOCs 减排则需从工业源、生活源和移动源多方面同时入手, 合理规划, 突出重点, 做好长期治理攻坚的准备.

### 2.2 模型验证

用于模型验证的兰州市臭氧浓度观测数据来自于兰州市 5 个国控监测站小时分辨率的臭氧自动监测数据. 图 3 给出了 2015 年 7 月 24 日 ~ 8 月 24 日期间, 兰州市 5 个国控监测站臭氧小时浓度模拟值与观测值在时间序列上的对比情况, 可以看出, 模拟值能够较好的与臭氧自动监测浓度的变化趋势相吻合, 除了对榆中农村地区模拟的相关性稍差外, 4 个城区点位的相关性均在 0.66 ~ 0.74 之间, 总体上, 模型对于臭氧的浓度略有低估, 对于日间 (08:00 ~ 19:00) 的模拟效果优于夜间 (20:00 ~ 次日 07:00). 由于近地面臭

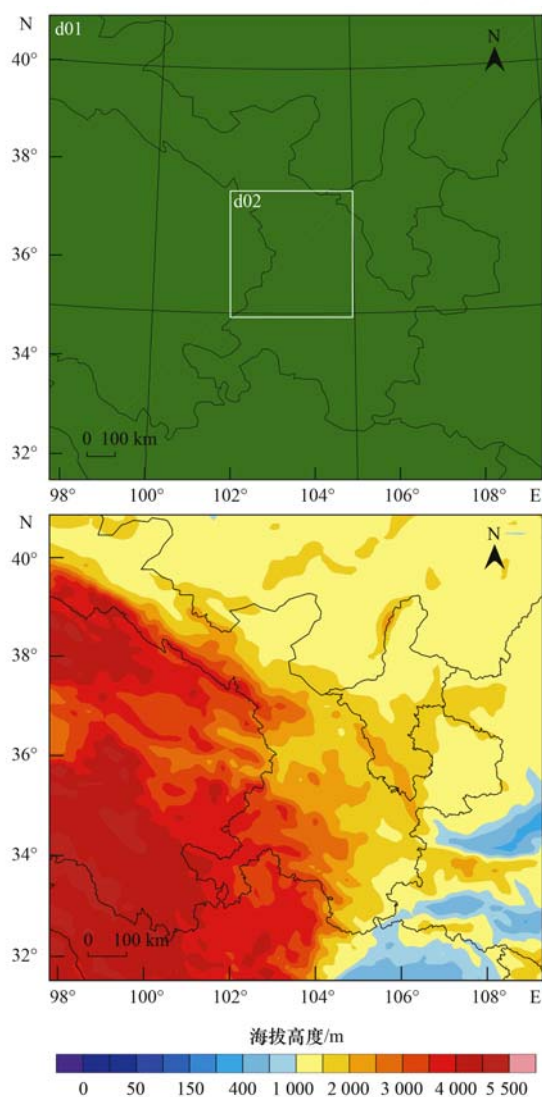
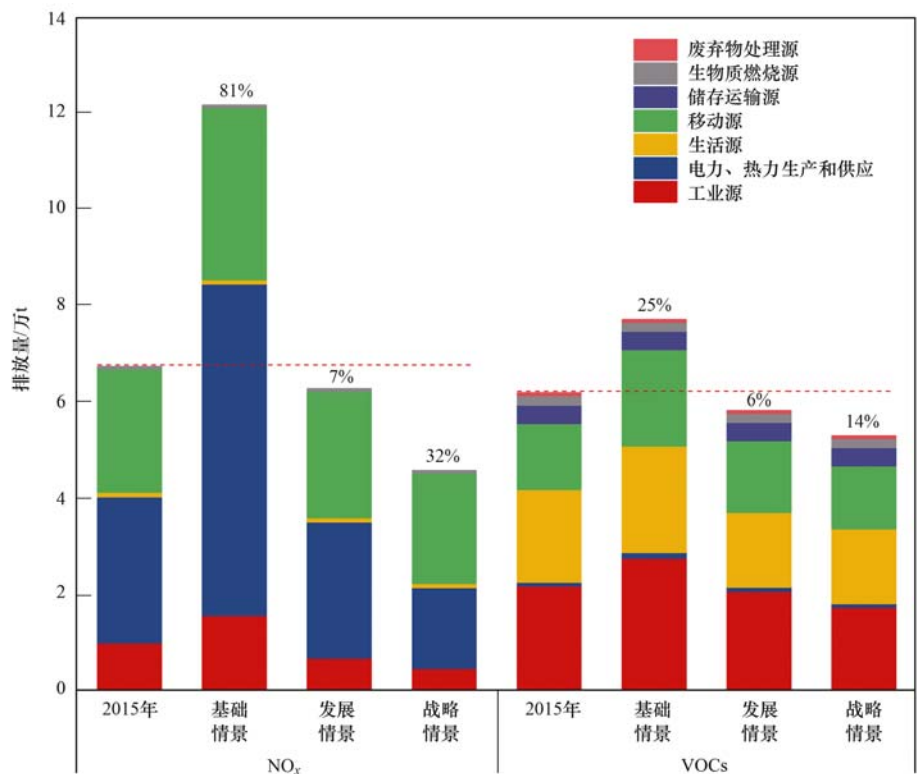


图 1 WRF-Chem 模型模拟区域和海拔高度

Fig. 1 WRF-Chem model domain and terrain height



红色虚线为 2015 年的排放量,虚线以上数值为相比 2015 年的排放增幅,虚线以下数值为相比 2015 年的排放降幅

图 2 兰州市不同情景下 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 的主要源排放总量及其变化

Fig. 2 Emissions and variations of NO<sub>x</sub> and VOCs under different scenarios in Lanzhou

氧的形成与污染主要发生在有光照的日间<sup>[39~41]</sup>,夜间臭氧浓度较低且以消耗作用为主,故提取日间臭氧浓度模拟值做进一步分析。

为更好地验证模型模拟的精度,引入平均相对偏差(MFB)和平均相对误差(MFE)对模拟结果进行评估,定义如下:

MFB = \frac{2}{N} \sum\_{i=1}^N \left( \frac{P\_i - O\_i}{P\_i + O\_i} \right) \tag{3}

MFE = \frac{2}{N} \sum\_{i=1}^N \left( \frac{|P\_i - O\_i|}{P\_i + O\_i} \right) \tag{4}

式中,  $P_i$  和  $O_i$  为模拟和观测变量,  $N$  为参与比对的有效样本数。

表 3 给出了日间臭氧浓度模拟值的统计分析结果,根据 Boylan 等<sup>[42]</sup> 建议的评估模型预报合理性指标范围对模拟结果的精确度进行评价,兰州市各国控点的 MFB 均在 -60%~60% 之间,且 MFE 小于 75%,表明模拟结果在合理可接受范围内,能够反映实际观测情况。

2.3 模拟结果分析

2.3.1 基准年臭氧污染特征

图 4 为 2015 年 7 月 24 日~8 月 24 日的模拟时间段兰州市日间(08:00~19:00)平均温度和风速,从中可见,兰州市夏季的风向属于偏东风,平均风速小于 3 m·s<sup>-1</sup>,并且相比于远郊三县,中心城区的温

度更高,部分地区白天平均温度可达 25℃ 以上。根据马秉吉等<sup>[4]</sup> 和陈培章等<sup>[6]</sup> 的研究,由于地形的影响,兰州市微弱的东风不但对臭氧的清除作用不明显,反而利于其前体物的积累,同时,较高的温度也有助于臭氧的生成。

表 3 兰州市日间臭氧模拟结果精度评估

Table 3 Assessment of daytime ozone simulation performance in Lanzhou

| 国控监测站点 | 样本数/个 | MFB/% | MFE/% |
|--------|-------|-------|-------|
| 职工医院   | 380   | -55   | 67    |
| 兰炼宾馆   | 381   | -50   | 64    |
| 榆中兰大校区 | 363   | -2    | 68    |
| 铁路设计院  | 382   | -50   | 64    |
| 生物制品所  | 383   | -57   | 70    |

图 5 给出了 2015 年夏季模拟时间段兰州市不同时刻(08:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00)臭氧浓度的空间分布情况。从中可知,由于夜间臭氧的消耗,在 08:00 左右,兰州市近地面臭氧浓度处于较低水平。随着白天光照强度的增加和前体物的大量排放,臭氧不断生成与积累,并在 13:00 左右浓度达到最高(安宁区最高约 117 μg·m<sup>-3</sup>),呈现出中心城区高,郊区低的空间分布状态,这是因为城关区的较多机动车和西固区的大型石化与重工业排放了大量的臭氧前体物,有利于臭氧的生成,且较



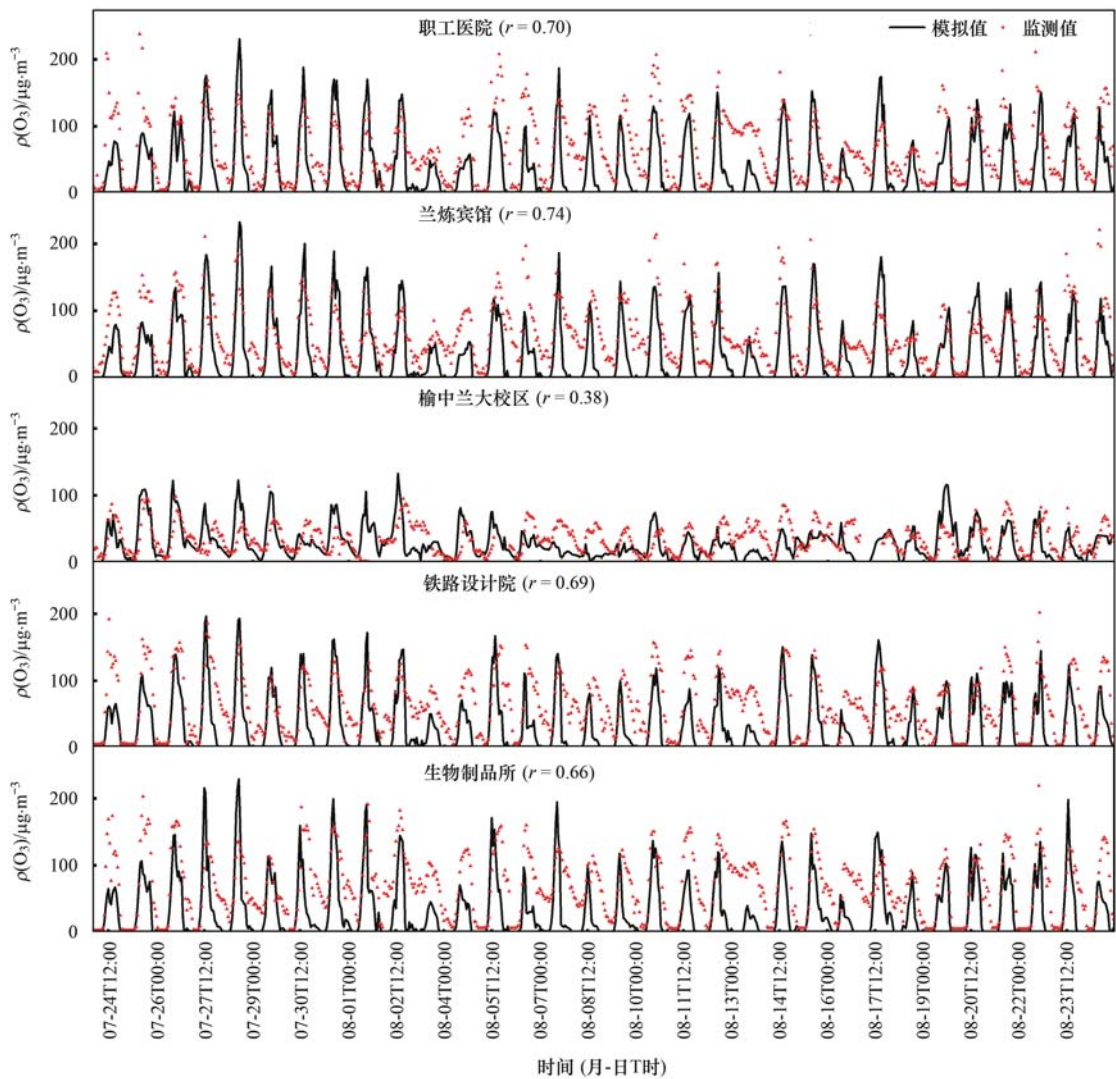


图3 兰州市5个国控站点臭氧小时模拟值与观测值对比

Fig. 3 Comparison between simulated and observed hourly ozone concentrations at five national controlling sites in Lanzhou

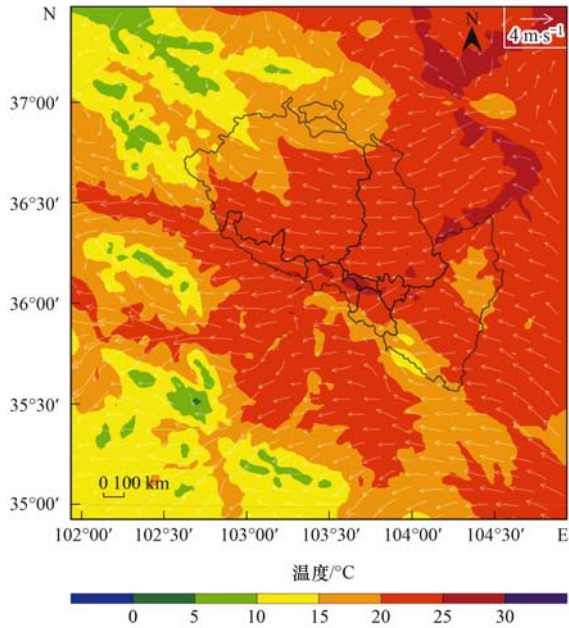


图4 2015年夏季模拟时间段日间平均温度和风速

Fig. 4 Daytime average of temperature and wind speed during the simulation period of summer in 2015

低的风速不利于其扩散,造成了较高的局地污染. 临近傍晚,由于光照强度的下降和前体物的消耗,兰州市臭氧浓度逐渐降低.

本研究基于 Sillman<sup>[43]</sup>所提出的  $H_2O_2/HNO_3$  比值法判定臭氧生成的敏感性,若比值小于 0.3,则该地区处于 VOCs 控制区,若大于 0.5 则属于  $NO_x$  控制区,比值在 0.3~0.5 之间,则属于过渡区. 该方法经学者应用证实其在中国区域具有较好的适用性<sup>[44~46]</sup>. 图 6 给出了兰州市及周边区域  $H_2O_2/HNO_3$  的平均变化情况,总体而言,在 2015 年夏季光化学反应较为显著的时间段,兰州市中心城区平均处于 VOCs 控制区,郊区处于  $NO_x$  控制区,且控制臭氧生成的前体物敏感性在一天的不同时间会发生转换,这与以往对于兰州市 2013~2019 年期间臭氧敏感性研究的结论基本一致<sup>[7~9,47]</sup>. 对比近年来兰州市臭氧敏感性控制区范围的变化情况表明:兰州市夏季臭氧敏感性正呈现出中心城区  $NO_x$  控制区不断减小,VOCs 控制区不断增加的态势,分析与兰



州市石化和重工业 VOCs 治理工作的持续推进以及各项前体物减排措施的不断实施有关,其改变了污染源前体物排放量,导致前体物间的比例发生改变,造成臭氧生成的敏感性特征发生了变化。

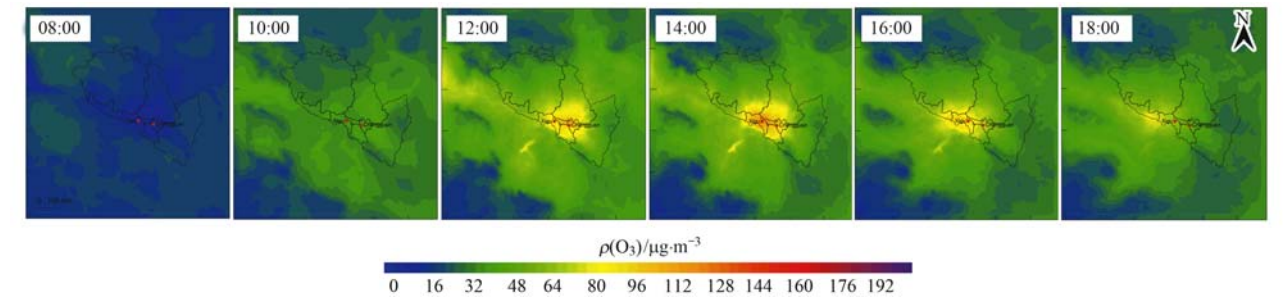


图 5 2015 年夏季模拟时间段不同时刻臭氧浓度分布

Fig. 5 Modeling the distribution of daytime ozone concentration at different times during the simulation period in summer of 2015

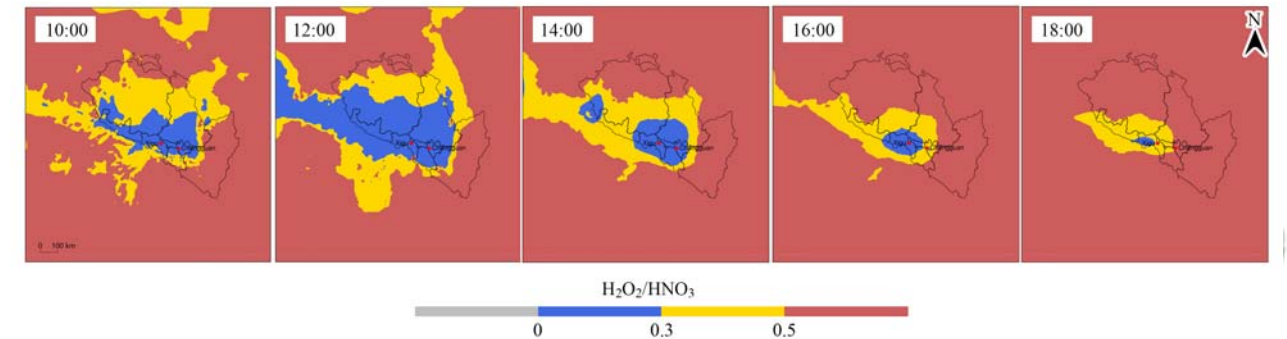


图 6 2015 年夏季模拟时间段  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HNO}_3$  的空间变化

Fig. 6 Spatial variations in  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HNO}_3$  during the simulation period of summer in 2015

2.3.2 目标年情景模拟对比

2.3.2.1 夏季臭氧浓度日变化情况

图 7 给出了 2030 年夏季兰州市及周边地区 3

个情景下不同时刻(08:00、10:00、12:00、14:00、16:00 和 18:00)的臭氧浓度与 2015 年夏季之差的

空间分布情况,图 8 为对应的臭氧生成敏感性控制

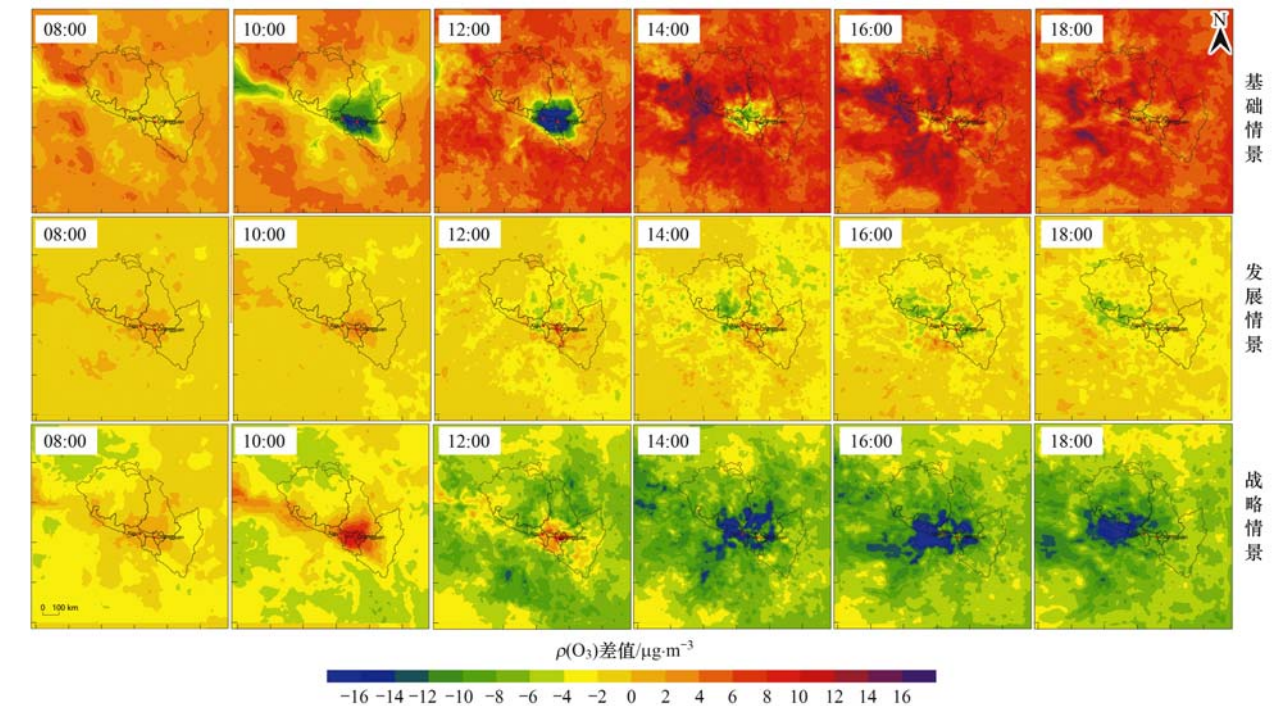


图 7 2030 年夏季基础情景、发展情景和战略情景下不同时刻的臭氧浓度与 2015 年之差的空間分布

Fig. 7 Differences for spatial distribution of modeling summer ozone concentration at different times between 2015 and 2030 based on the basic scenario, development scenario, and strategic scenario

区. 从中可见, 在基础情景的模拟中, 兰州市目标年夏季臭氧浓度总体上高于 2015 年, 尤其是在下午, 本市红古区、永登县部分地区, 临夏回族自治州和青海省东部的臭氧浓度有了明显提高 (差值最高为  $18.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ). 然而在上午, 兰州市中心城区附近出现了臭氧浓度偏低的现象 (差值最低为  $-38.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 这是由于在此情景下, 兰州市夏季臭氧生成主要受 VOCs 控制, 且与 2015 年相比控制范围增加, 中心城区排放的大量  $\text{NO}$  还原臭氧, 高浓度的  $\text{NO}_2$  又终止了  $\cdot\text{OH}$  在大气中的氧化循环, 导致臭氧浓度的降低, 这也符合 VOCs 控制区的特征, 与  $\text{NO}$  的“滴定”效应有关<sup>[48]</sup>, 并且根据计算, 在此情景下兰州市中心城区臭氧的 1 h 平均浓度存在超标现象

(西固区与城关区超标天数均为 6.4%), 前体物的大量排放也增加了局地臭氧污染超标的风险; 在发展情景的模拟中, 兰州市目标年夏季臭氧浓度的时空分布和生成敏感性与 2015 年情况类似, 仅在下午部分时段, 西固区和城关区等少数地区的臭氧浓度有所降低 (差值最低为  $-11.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 在此情景下兰州市臭氧的 1 h 平均浓度已全部低于国家二级标准, 臭氧污染得到了有效控制; 在战略情景的模拟中, 兰州市目标年夏季臭氧浓度显著降低, 以下午时段中心城区的下降最为明显 (差值最低为  $-27.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 有利于臭氧削峰, 同时由于  $\text{NO}_x$  的大量减排, 兰州市臭氧生成敏感性控制区已整体转化为  $\text{NO}_x$  控制区和过渡区.

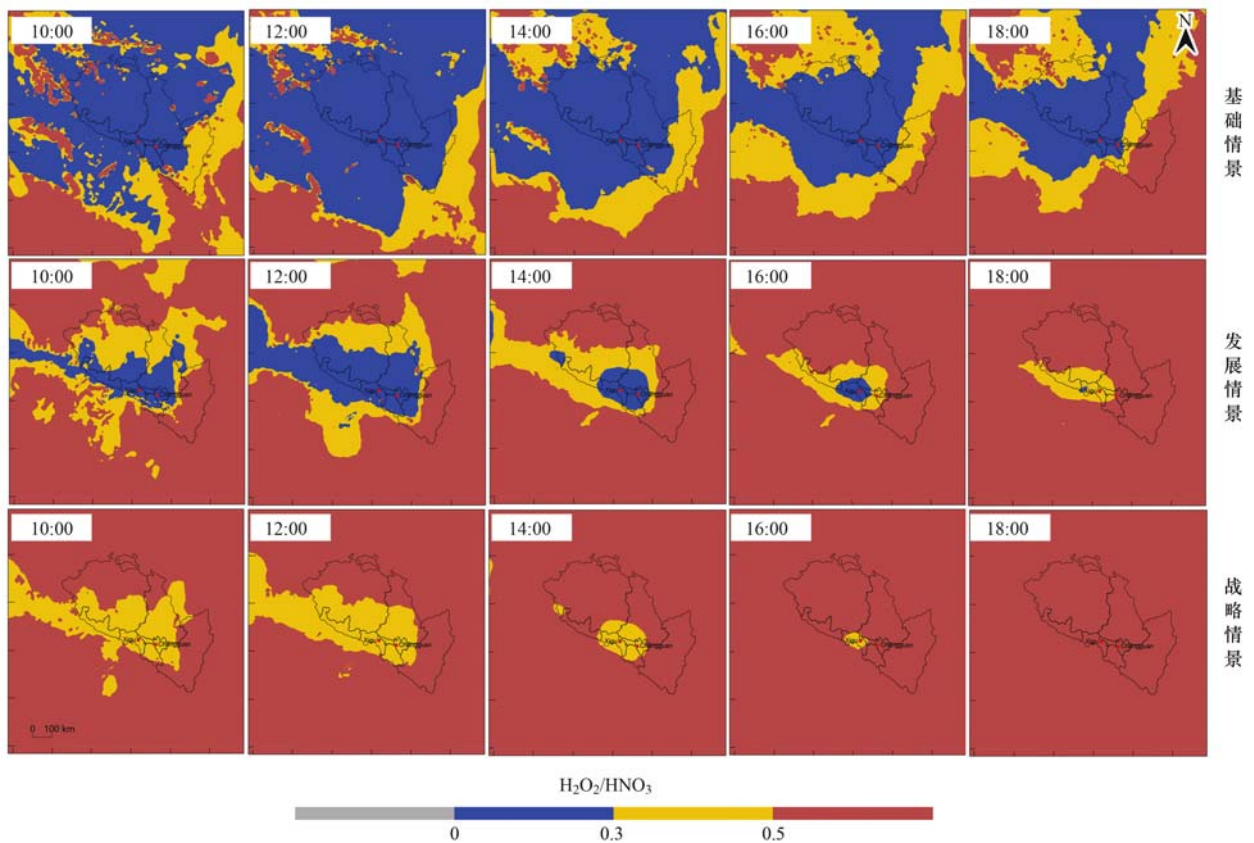


图 8 2030 年夏季基础情景、发展情景和战略情景下  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HNO}_3$  的空间变化

Fig. 8 Spatial variations in  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{HNO}_3$  in summer of 2030 based on the basic scenario, development scenario, and strategic scenario

### 2.3.2.2 兰州市及各行政区夏季臭氧浓度对比

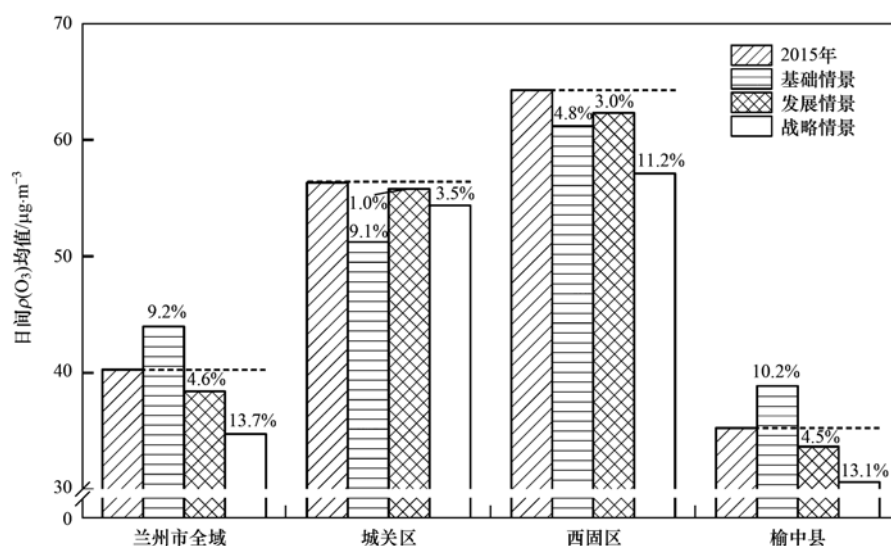
图 9 给出了 2030 年夏季 3 个情景下兰州市不同行政区日间 (08:00 ~ 19:00) 臭氧浓度均值以及 与 2015 相比较的变化情况. 其中, 城关区为居民商业混合区, 西固区为典型工业区, 榆中县为远郊农业区. 总体来看, 兰州市及其各行政区臭氧浓度对比情况: 西固区 > 城关区 > 兰州市全域 (包括兰州市五区三县在内的全部地区的均值) > 榆中县, 不同污染控制情景对兰州市各行政区的臭氧浓度影响不尽相同. 按基础情景城市发展态势, 若无新污染防控政

策干预, 兰州市全域日间臭氧浓度相比 2015 年的增幅将达到 9.2%, 但中心城区包括西固区和城关区的臭氧浓度却分别下降了 9.1% 和 4.8%, 这是由于中心城区的化石燃料燃烧和移动源排放的  $\text{NO}_x$  显著高于 VOCs 的排放量, 增强了  $\text{NO}$  的“滴定”效应, 导致臭氧大量消耗, 造成浓度降低. 此时若加强兰州市 VOCs 的减排, 对臭氧的控制较为有利, 然而大量的前体物排放和积累仍然可以随时造成局地高浓度的臭氧污染; 在发展情景下, 适当的污染防控政策干预可降低兰州市全域日间臭氧浓度的



4.6%,对3个行政区的臭氧浓度也有微弱的削减作用,此时应当注意在中午时段加强城关区和西固区 VOCs 的减排管控,以降低中心城区臭氧的峰值浓度;在战略情景下,强化污染防控政策干预可降低兰州市日间臭氧浓度的 13.7%,对西固区和榆中县的臭氧削减也达到了 11.2% 和 13.1%,但

城关区臭氧浓度降幅仅为 3.5%,这可能是由于兰州市工业企业的空间分布较为集中,城关区人口密度与汽车保有量大和 VOCs 的削减力度不足所导致的,此时应在中心城区协同削减  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放量,在周边地区削减  $\text{NO}_x$  排放,以稳固并加强兰州市臭氧污染的控制效果。



虚线为 2015 年的浓度,虚线以上数值为相比 2015 年的浓度增幅,虚线以下数值为相比 2015 年的浓度降幅

图 9 3 个情景下兰州市不同行政区日间臭氧浓度均值及变化

Fig. 9 Mean and variations of daytime ozone concentration under three scenarios in different districts of Lanzhou

## 2.4 兰州市 $\text{NO}_x$ 和 VOCs 的总量控制与减排对策建议

兰州市的臭氧浓度与城市经济发展特征和污染治理水平密切相关,作为我国工业较发达的城市,其特殊的盆地地形和大量的前体物排放增加了臭氧污染治理的难度,而强有力的环境管理和科学的中长期规划是兰州市臭氧污染防控的关键.从前体物控制上来说, $\text{NO}_x$  和 VOCs 的总量控制是“十四五”期间大气污染治理工作的主攻方向,尤其是生态环境部于 2019 年提出的推行 VOCs 精细化管控“一厂一策”制度,于 2021 年开展的细颗粒物和臭氧污染协同防控“一市一策”驻点跟踪研究以及“十三五”规划中提出并在部分重点区域开展的 VOCs 排放总量控制工作,不仅对当前城市的臭氧防控具有重要意义,也是未来  $\text{PM}_{2.5}$  和臭氧协同治理的关键.由本研究可知,若在 2030 年将兰州市  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放总量限制在  $6.25 \times 10^4 \text{ t}$  和  $5.81 \times 10^4 \text{ t}$ ,预计目标年兰州市夏季臭氧 1 h 平均浓度将全部低于国家二级标准,臭氧污染可以得到有效控制,若将排放量限制在  $4.57 \times 10^4 \text{ t}$  和  $5.30 \times 10^4 \text{ t}$ ,可进一步削减兰州市夏季日间臭氧浓度的 9.1%,此结果也可为兰州市环境规划的提出和污染物总量控制政策的制定提供定量的参考.值得说明的是,可使兰州市 2030 年臭氧

达标的前体物排放情景在理论上有较多种,探寻最佳方案还应综合考虑经济和技术等因素的影响,有待进一步论证.

通过对比兰州市目标年的不同污染控制情景和臭氧污染状况,筛选夏季臭氧污染的主要影响因素,进而针对不同行政区给出的  $\text{NO}_x$  和 VOCs 减排对策建议:在城关区(居民商业混合区)应着重加强对道路移动源  $\text{NO}_x$  和 VOCs 排放的管控,严格执行最新的机动车排放标准,加快淘汰和更新高排放的老旧机动车,大力支持新能源和清洁能源车辆的推广应用,强化各项机动车管控和监督政策,尤其注意减少午间时段的前体物排放,以达到臭氧日间高浓度削峰的目的.同时加大对城关区溶剂使用源 VOCs 排放的限制,主要针对贡献较大的建筑涂料排放和生活源溶剂使用排放,建议推广使用环保型涂料和去污产品,推进喷涂设备的工艺升级,在餐饮服务业加装油雾回收装置等,并减少城关区加油站的 VOCs 排放;在西固区(典型工业区)应重点削减石油化工业的 VOCs 排放量,实行总量控制管理,加大监管力度,建议完善企业 LDAR 工作,强化企业生产环节的源头削减和过程控制,减少 VOCs 的无组织排放.同时,通过优化能源结构,整合优质高效电力供应,加强末端治理,淘汰落后产能等方式减少热电行业和

工业锅炉化石燃料燃烧排放的前体物,加强对机动车尾气排放的控制;在榆中县(远郊农业区)应加强农村地区生物质燃烧的管控工作,开展专项整治活动,全面禁止秸秆焚烧,因地制宜的规划和构建农村地区清洁能源体系,开发生物质能源,减少燃煤锅炉的散煤燃烧量。同时,汽油车的公路排放对该区域臭氧前体物贡献占比也比较大,建议采取优化公路交通限速,取消高速公路人工收费站和强制上路车辆加装尾气净化装置等措施减少尾气排放。根据李洪等<sup>[2]</sup>的研究,近几年榆中县的臭氧浓度升高明显,除了受此区域  $\text{NO}_x$  和 VOCs 排放的影响,还与气象因素导致的中心城区排放的前体物向东输送有关。因此,加强兰州市各行政区之间的臭氧污染联防联控是必要且急迫的手段;总之,目前阶段应在兰州市中心城区着重于减排 VOCs,在郊区着重于减排  $\text{NO}_x$ ,并时刻关注不同行政区臭氧前体物的排放特征,根据臭氧生成敏感性的动态变化,科学、合理地制定前体物减排方案。

### 3 结论

(1) 基于 3 个不同情景预测的兰州市 2030 年臭氧主要前体物排放量和夏季臭氧达标情况:基础情景兰州市  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放量分别为  $12.14 \times 10^4 \text{ t}$  和  $7.69 \times 10^4 \text{ t}$ ,中心城区夏季臭氧 1 h 平均浓度存在超标现象(西固区、城关区超标天数均为 6.4%),兰州市全域日间臭氧浓度较 2015 年提升 9.2%;发展情景兰州市  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放量分别为  $6.25 \times 10^4 \text{ t}$  和  $5.81 \times 10^4 \text{ t}$ ,夏季臭氧 1 h 平均浓度全面达标,日间臭氧浓度较 2015 年下降 4.6%,臭氧污染能够得到有效控制;战略情景兰州市  $\text{NO}_x$  和 VOCs 的排放量分别为  $4.57 \times 10^4 \text{ t}$  和  $5.30 \times 10^4 \text{ t}$ ,夏季日间臭氧浓度在发展情景的基础上进一步削减了 9.1%,更有利于中心城区的臭氧浓度削峰。

(2) 兰州市夏季臭氧污染机制和前体物控制策略:兰州市夏季中心城区臭氧浓度较高,臭氧生成主要受 VOCs 控制,郊区浓度略低,主要受  $\text{NO}_x$  控制,臭氧敏感性在近些年呈现出中心城区  $\text{NO}_x$  控制区不断减小,VOCs 控制区不断增加的趋势。未来进一步减排兰州市  $\text{NO}_x$ ,可通过调整能源结构,加强末端治理和限制机动车排放等措施有效减少,减排 VOCs 则需从工业源、生活源和移动源多方面同时入手,做好长期治理攻坚的准备。

(3) 针对兰州市不同行政区臭氧前体物的减排对策建议:在城关区应加强对机动车尾气排放的管控,减少溶剂使用源和加油站的 VOCs 排放,同时加大对午间时段前体物排放的限制,使臭氧日间高浓

度削峰;在西固区应重点削减石化行业的 VOCs 排放量,并减少电厂和工业锅炉化石燃料燃烧的前体物排放,加强对机动车尾气排放的管控;在榆中县,应强化农村地区生物质燃烧的管控工作,减少散煤燃烧,降低汽油车的公路排放。在兰州市各行政区应加强臭氧污染的联防联控,目前阶段需着重减排中心城区的 VOCs 和郊区的  $\text{NO}_x$ ,并时刻关注臭氧生成敏感性变化,据此调整前体物减排方案。

致谢:感谢兰州大学超算中心对本研究的支持。

### 参考文献:

- [1] 马秉吉, 马玉霞, 虞志昂, 等. 兰州市近地面臭氧污染分布特征[J]. 环境保护科学, 2019, 45(3): 60-65.  
Ma B J, Ma Y X, Yu Z A, et al. Characteristics of near-surface ozone pollution in Lanzhou [J]. Environmental Protection Science, 2019, 45(3): 60-65.
- [2] 李洪, 常莉敏, 吕沛诚, 等. 兰州市大气臭氧生成的敏感性分析及其前体物减排对策建议[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 1628-1639.  
Li Y, Chang L M, Lü P C, et al. Sensitivity analysis of atmospheric ozone formation and its precursors emission reduction countermeasures in Lanzhou city [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(5): 1628-1639.
- [3] Grulke N, Hrath R L. Ozone effects on plants in natural ecosystems[J]. Plant Biology, 2019, 22, doi:10.1111/plb.12971.
- [4] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. IPCC, 2013: climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [5] Miao W J, Huang X, Song Y, et al. An economic assessment of the health effects and crop yield losses caused by air pollution in mainland China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 56: 102-113.
- [6] 陈培章, 陈道劲. 兰州主城臭氧污染特征及气象因子分析[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(2): 46-54.  
Chen P Z, Chen D J. Analysis of ozone pollution characteristics and meteorological factors over Lanzhou city [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(2): 46-54.
- [7] 贾晨辉. 中国西部兰州盆地非甲烷烃大气污染特征及其化学行为[D]. 兰州: 兰州大学, 2018.  
Jia C H. Characteristics and chemical behaviors of atmospheric non-methane hydrocarbons in Lanzhou Valley, Western China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2018.
- [8] 尹伊. 基于 CMAQ 模式、MEIC 清单对兰州市主城区臭氧污染特征的初步研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.  
Yin Y. Ozone pollution characteristics in the main urban area of Lanzhou city based on CMAQ model and MEIC [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [9] 马丹阳. 兰州市石化生产行业对主城区近地面臭氧污染的数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.  
Ma D Y. The simulation of petrochemical industry in Lanzhou city on the ozone pollution near the ground in the main urban area [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [10] Chameides W L, Demerjian K, Albritton D, et al. An assessment of tropospheric ozone pollution: a North American perspective[R]. Washington: NARSTO, 2000.
- [11] 新华网. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年



- 规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. [http://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c\\_1127205564.htm](http://www.xinhuanet.com/2021-03/13/c_1127205564.htm), 2021-03-13.
- [12] Kim M J, Park R J, Ho C H, *et al.* Future ozone and oxidants change under the RCP scenarios[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **101**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.11.016.
- [13] Zhu J, Liao H. Future ozone air quality and radiative forcing over China owing to future changes in emissions under the Representative Concentration Pathways (RCPs) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121** (4): 1978-2001.
- [14] Zhang X G, Fung J C H, Lau A K H, *et al.* Air quality and synergistic health effects of ozone and nitrogen oxides in response to China's integrated air quality control policies during 2015-2019 [J]. *Chemosphere*, 2021, **268**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.129385.
- [15] Li J X, Wang Z X, Chen L L, *et al.* WRF-Chem simulations of ozone pollution and control strategy in petrochemical industrialized and heavily polluted Lanzhou city, Northwestern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **737**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.139835.
- [16] Zhang Y N, Xue L K, Li H Y, *et al.* Source apportionment of regional ozone pollution observed at Mount Tai, North China: application of lagrangian photochemical trajectory model and implications for control policy [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126** (6), doi: 10.1029/2020JD033519.
- [17] 谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 等. 基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟[J]. *环境科学*, 2019, **40** (7): 2967-2976.
- Xie F J, Shi Z H, Li J Y, *et al.* Scenario simulation study constrained by the ambient air quality standards in Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2019, **40** (7): 2967-2976.
- [18] 安文辉, 曹国良, 蒙小波, 等. 情景分析法预测西安市大气污染物排放总量[J]. *环境工程*, 2016, **34** (8): 99-103.
- An W H, Cao G L, Meng X B, *et al.* Scenario analysis to predict the total emissions of air pollutants in Xi'an [J]. *Environmental Engineering*, 2016, **34** (8): 99-103.
- [19] Grossman G M, Krueger A B. Economic growth and the environment[J]. *The Quarterly Journal of Economics*, 1995, **110** (2): 353-377.
- [20] Panayotou T. Empirical tests and policy analysis of environmental degradation at different stages of economic development [R]. Geneva: International Labour Organization, 1993.
- [21] 刘俏. 情景分析法在城市规划区域污染物排放总量中的预测研究——以安庆市为例[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- Liu Q. Research on the prediction of the total discharge of pollutants of urban planning based on scenario analysis—the case study of Anqing city[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.
- [22] 生态环境部. 关于发布计算污染物排放量的排污系数和物料衡算方法的公告[EB/OL]. [http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171229\\_428887.htm](http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201712/t20171229_428887.htm), 2017-12-28.
- [23] 翁建宇. 安徽省“十三五”大气主要污染物排放总量预测及减排潜力分析研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- Weng J Y. The thirteenth five years plan of main air pollutants total amount prediction of Anhui province and analysis of emission reduction potential[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017.
- [24] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review[J]. *National Science Review*, 2017, **4** (6): 834-866.
- [25] Li M, Zhang Q, Streets D G, *et al.* Mapping Asian anthropogenic emissions of non-methane volatile organic compounds to multiple chemical mechanisms [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14** (11): 5617-5638.
- [26] Huang T, Tian C G, Zhang K, *et al.* Gridded atmospheric emission inventory of 2,3,7,8-TCDD in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **108**: 41-48.
- [27] 张凯, 于周锁, 高宏, 等. 兰州盆地人为源大气污染物网格化排放清单及其空间分布特征[J]. *环境科学学报*, 2017, **37** (4): 1227-1242.
- Zhang K, Yu Z S, Gao H, *et al.* Gridded emission inventories and spatial distribution characteristics of anthropogenic atmospheric pollutants in Lanzhou valley [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37** (4): 1227-1242.
- [28] 王文鹏, 王占祥, 李继祥, 等. 兰-白城市群主要大气污染物网格化排放清单及来源贡献[J]. *环境科学*, 2021, **42** (3): 1315-1327.
- Wang W P, Wang Z X, Li J X, *et al.* Gridded emission inventories of major criteria air pollutants and source contributions in Lan-Bai metropolitan area, Northwest China [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (3): 1315-1327.
- [29] 郭文凯, 李光耀, 陈冰, 等. 兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在 WRF-Chem 中应用评估[J]. *环境科学*, 2021, **42** (2): 634-642.
- Guo W K, Li G Y, Chen B, *et al.* Establishment of a high-resolution anthropogenic emission inventory and its evaluation using the WRF-Chem model for Lanzhou [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (2): 634-642.
- [30] 马明月, 杨宏, 潘峰, 等. MEIC 清单对兰州市西固区臭氧污染预测的适用性研究[J]. *环境保护科学*, 2021, **47** (2): 136-144.
- Ma M Y, Yang H, Pan F, *et al.* Applicability of MEIC to predict ozone pollution in Xigu district of Lanzhou [J]. *Environmental Protection Science*, 2021, **47** (2): 136-144.
- [31] 韩向娣, 周艺, 王世新, 等. 夜间灯光遥感数据的 GDP 空间化处理方法[J]. *地球信息科学学报*, 2012, **14** (1): 128-136.
- Han X D, Zhou Y, Wang S X, *et al.* GDP spatialization in China based on nighttime imagery[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2012, **14** (1): 128-136.
- [32] Simon H, Beck L, Bhavsar P V, *et al.* The development and uses of EPA's SPECIATE database [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2010, **1** (4): 196-206.
- [33] Emmons L K, Walters S, Hess P G, *et al.* Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4) [J]. *Geoscientific Model Development*, 2010, **3** (1): 43-67.
- [34] Zhang Q, Streets D G, Carmichael G R, *et al.* Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9** (14): 5131-5153.
- [35] Porter W C, Heald C L. The mechanisms and meteorological drivers of the summertime ozone-temperature relationship [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19** (21): 13367-13381.
- [36] Sillman S. The relation between ozone, NO<sub>x</sub> and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33** (12): 1821-1845.
- [37] Grell G A, Peckham S E, Schmitz R, *et al.* Fully coupled “online” chemistry within the WRF model [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39** (37): 6957-6975.
- [38] 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)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3181-3210.
- [39] García M A, Sánchez M L, Pérez I A, *et al.* Ground level ozone concentrations at a rural location in Northern Spain[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **348**(1-3): 135-150.
- [40] Dueñas C, Fernández M C, Cañete S, *et al.* Assessment of ozone variations and meteorological effects in an urban area in the Mediterranean Coast [J]. *Science of the Total Environment*, 2002, **299**(1-3): 97-113.
- [41] EPA/600/AP-93/004aF, Air quality criteria for ozone and related photochemical oxidants volume I of III (Final Report, 1996)[S].
- [42] Boylan J W, Russell A G. PM and light extinction model performance metrics, goals, and criteria for three-dimensional air quality models[J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(26): 4946-4959.
- [43] Sillman S. The use of  $\text{NO}_y$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$ , and  $\text{HNO}_3$  as indicators for ozone- $\text{NO}_x$ -hydrocarbon sensitivity in urban locations [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1995, **100**(D7): 14175-14188.
- [44] Liu X H, Zhang Y, Xing J, *et al.* Understanding of regional air pollution over China using CMAQ, part II. Process analysis and sensitivity of ozone and particulate matter to precursor emissions [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(30): 3719-3727.
- [45] 贝耐芳, 冯添, 吴佳睿, 等. 西安地区夏季臭氧的模拟研究[J]. *地球环境学报*, 2017, **8**(6): 552-567.
- Bei N F, Feng T, Wu J R, *et al.* Simulations of summertime ozone in Xi'an and surrounding areas [J]. *Journal of Earth Environment*, 2017, **8**(6): 552-567.
- [46] 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.
- [47] 王文鹏. 兰州市近地面臭氧成因及源汇关系模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- Wang W P. Modeling formation mechanism and source-sink relationship of ground-level ozone in Lanzhou, China [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [48] Xue L K, Wang T, Louie P K K, *et al.* Increasing external effects negate local efforts to control ozone air pollution: a case study of Hong Kong and implications for other Chinese cities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(18): 10769-10775.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                               |                                                                    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Chemical Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> in Urban Area of Beijing .....                                                                                                         | AN Xin-xin, CAO Yang, WANG Qin, <i>et al.</i> (2251)               |
| Modeling of PM <sub>2.5</sub> Concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Region Using a Space-time Linear Mixed Effects Model .....                                                                          | FAN Li-hang, YANG Xiao-hui, SONG Chun-jie, <i>et al.</i> (2262)    |
| Spatio-temporal Evolution Patterns of PM <sub>2.5</sub> and Relationship with Urban Expansion in Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration from 2000 to 2018 .....                                            | ZHAO An-zhou, XIANG Kai-zheng, LIU Xian-feng, <i>et al.</i> (2274) |
| Characteristics and Source Analysis of PM <sub>2.5</sub> in Qingdao in Winter Under the Action of Sea-Land-Atmosphere Convergence .....                                                                       | TUO Xiong, YANG Ling-xiao, ZHANG Wan, <i>et al.</i> (2284)         |
| Impacts of Heterogeneous Uptake Pathway on Sulfate Formation: A Case Study in Shanghai Based on WRF-Chem .....                                                                                                | ZHANG Ru-han, ZHANG Hao-ran, FENG Wei-hang, <i>et al.</i> (2294)   |
| Source Apportionment and Seasonal Changes in PM <sub>2.5</sub> Chemical Components from Different Functional Areas of a Provincial Capital City .....                                                         | SUN You-min, FAN Jing, XU Biao, <i>et al.</i> (2304)               |
| Chemical Compositions, Light Extinction Effect, and Oxidative Potential of PM <sub>2.5</sub> Under Different Pollution Levels During Winter in Taiyuan .....                                                  | REN Jiao, ZHAO Rong-rong, WANG Ming, <i>et al.</i> (2317)          |
| Source Apportionment and Health Risk Assessment of Metal Elements in Ambient PM <sub>2.5</sub> in the Winter of Zhengzhou .....                                                                               | YAO Sen, WANG Qian-heng, XUE Yan, <i>et al.</i> (2329)             |
| Characteristics, Ecological Risk Assessment, and Sources of the Polluted Metallic Elements in PM <sub>2.5</sub> During Winter in Zibo City .....                                                              | BAI Wen-yu, XU Bo, GUO Li-yao, <i>et al.</i> (2336)                |
| Seasonal Distribution Characteristics, Source Analysis, and Health Risk Evaluation of PAHs in PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....                                                                              | HE Bo-wen, NIE Sai-sai, LI Yi-lin, <i>et al.</i> (2343)            |
| Pollution Level and Regional Migration of PCDD/Fs in Ambient Air from Pearl River Delta, China .....                                                                                                          | FU Jian-ping, XIE Dan-ping, HUANG Jin-qiong, <i>et al.</i> (2355)  |
| Concentrations and Sources of Black Carbon Aerosols in Rural Areas of Southern North China Plain .....                                                                                                        | ZHANG Ling, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (2363)       |
| Research on Causes of Severely Polluted Weather in Tianjin Based on Process Analytical Technology .....                                                                                                       | HAO Jian, CAI Zi-ying, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (2373)            |
| Classification Control of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Pollution Sources Based on Emission Amounts and Atmospheric Reactivity .....                                                             | CHEN Peng, ZHANG Yue, XING Min, <i>et al.</i> (2383)               |
| Complex Networks Reveal the Characteristics of Ozone in China .....                                                                                                                                           | YING Na, CHEN Jian-hua, LI Dong, <i>et al.</i> (2395)              |
| Ozone Simulation of Lanzhou City Based on Multi-scenario Emission Forecast of Ozone Precursors in the Summer of 2030 .....                                                                                    | CHEN Tian-lei, WU Min, PAN Cheng-ke, <i>et al.</i> (2403)          |
| Improvement of Environmental Model Prediction Based on Inversion and Aerosol Assimilation .....                                                                                                               | CAI Zi-ying, TANG Miao, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (2415)         |
| Method of Identifying Air Pollution from Iron and Steel Industry Based on Ambient Air Quality Monitoring Data Analysis .....                                                                                  | SHI Yao-peng, HU Jing-nan, CHU Yang-xi, <i>et al.</i> (2427)       |
| Assessment of "Differentiated Response Requirement Based on Performance Grading" Policy During Heavy Air Pollution Alert .....                                                                                | ZENG Jing-hai, WANG Can (2436)                                     |
| Risk Zoning of Water Pollution in the Yellow River Basin .....                                                                                                                                                | ZHOU Xia-fei, CAO Guo-zhi, YU Fang, <i>et al.</i> (2448)           |
| Emission Characteristics of Industrial Water Pollutants in Gansu Section of the Yellow River Basin .....                                                                                                      | LI Xue-ying, YANG Xi, QIAO Qi, <i>et al.</i> (2459)                |
| Spatial-temporal Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Yellow River .....                                                                                                 | WANG Tao-yi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (2467)             |
| APCS-MLR Combined with PMF Model to Analyze the Source of Metals in Sediment of Xinglin Bay Suburban Watershed, Xiamen .....                                                                                  | SHEN Chen-yu, YAN Yu, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2476)            |
| Spatial Differentiation Characteristics and Response Relationship of DOM, Nutrients, and Heavy Metals in River Sediments .....                                                                                | XIAO Yan-chun, YU Hui-bin, SONG Yong-hui (2489)                    |
| Distribution Characteristics, Evaluation, and Source Analysis of Heavy Metals in Soils of Fenhe Riparian Zone in Taiyuan City .....                                                                           | HU Jie, ZHAO Xin-yu, WANG Ting-ting, <i>et al.</i> (2500)          |
| Binding Affinity Between Heavy Metal Hg and Dissolved Organic Matter in Hongze Lake .....                                                                                                                     | HU Bin, WANG Pei-fang, ZHANG Nan-nan, <i>et al.</i> (2510)         |
| Ecosystem Evolutionary Trajectory of Lake Xiliang over the Past Century Driven by Eutrophication .....                                                                                                        | ZHENG Jia-nan, XU Min, ZHENG Wen-xiu, <i>et al.</i> (2518)         |
| Sediment Release and Pollution Source Analysis of Typical Reservoirs in the Upper Reaches of the Yellow River Based on DGT Technology .....                                                                   | MA Yu-shen, ZHU Xiang, PANG Qing-qing, <i>et al.</i> (2527)        |
| Differential Characteristics and Source Identification of Water Quality of the Rivers in Northern Henan Before and After Rainstorm .....                                                                      | ZHANG Yan, ZOU Lei, LIANG Zhi-jie, <i>et al.</i> (2537)            |
| Adsorption and Interception Effects of <i>Eichhornia crassipes</i> on Microplastics in Water of the Poyang Lake Basin .....                                                                                   | LI Wen-gang, WU Xi-en, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2548)          |
| Spatiotemporal Distribution and Ecological Risk Assessment of Plastic Additives in Taihu Lake .....                                                                                                           | LIU Shu-jiao, DING Jian-nan, SHI Jun-zhe, <i>et al.</i> (2557)     |
| Distribution Characteristics, Sources, and Storage of Microplastics in Surface Sediments of Luoma Lake .....                                                                                                  | YAO Ming-xuan, BAI Xue, XU Zhen-jia, <i>et al.</i> (2566)          |
| Pollution Characteristics of Phosphorus in Different Media in Taihu Lake and Its Treatment Enlightenment .....                                                                                                | CAI Mei, LU Zhi-hua, WANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (2575)          |
| Analysis on Diversity and Structure of Microbial Community in River Sediment of Siping Section of Liaohe River .....                                                                                          | LI Peng-yang, AN Qi-rui, WANG Xin-hao, <i>et al.</i> (2586)        |
| Non-point Source Pollution (NPS) Induces Structural and Functional Variation in Bacterial Communities in Sediments of Jialing River .....                                                                     | XUE Yu-qin, XU Fei, LIU Kun-he, <i>et al.</i> (2595)               |
| Effects of Microplastics on Bacterial Community Composition and Diversity in Sediments .....                                                                                                                  | LI Wen-lu, WANG Zhi-chao, YANG Wen-huan, <i>et al.</i> (2606)      |
| Vertical Distribution Characteristics and Community Construction of Aerobic Denitrification Bacteria from the Sediments of Baiyangdian Lake During the Winter Freezing Period .....                           | ZHANG Tian-na, CHEN Zhao-ying, ZHANG Zi-wei, <i>et al.</i> (2614)  |
| Effect of Induced Mixing on Bacterial Community Structure and Metabolic Activity in Reservoir .....                                                                                                           | GAO Yue, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2624)              |
| Distribution Characteristics of Microplastics in <i>Bellamyia aeruginosa</i> in Typical Area of Poyang Lake .....                                                                                             | JIANG Wei-qun, HU Qi-wu, JIAN Min-fei, <i>et al.</i> (2633)        |
| Electrocatalytic Oxidation of Bisphenol A by Porous Ti/SnO <sub>2</sub> -Sb-Ni Electrode Loaded with Multi-wall Carbon Nanotubes .....                                                                        | FU Yuan-hang, LIU An-di, HUANG Wei-bin, <i>et al.</i> (2640)       |
| Efficiency and Mechanism of Degradation of Methylene Blue with H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Catalyzed by Magnetic Mn <sub>0.4</sub> Zn <sub>0.4</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> @SiO <sub>2</sub> ..... | XU Dong-ying, YU Jing, HAO Qi, <i>et al.</i> (2650)                |
| Effect of Two Types of Nanoparticles on the Adsorption of Ciprofloxacin on Zeolite .....                                                                                                                      | JIANG Lan-cui, MENG Zhao-fu, LIU Xian, <i>et al.</i> (2662)        |
| Adsorption Mechanisms and Effect Factors of As(V) by AMD Sludge Composite Material .....                                                                                                                      | ZHANG Ya-hui, ZHANG Rui-xue, WU Pan, <i>et al.</i> (2673)          |
| Shifts in Microbial Community and Variation in Functional Genes for Nitrification and Denitrification in Activated Sludge Affected by Triclosan and Its Transformed Intermediates .....                       | LU Ying-yuan, DONG Xiao-qi, PENG Xing-xing, <i>et al.</i> (2685)   |
| Construction of Sustainability Evaluation Index System for Contaminated Site Risk Management and Analysis on Key Influential Factors .....                                                                    | LI Xiao-nuo, YI Shi-yi, CHEN Wei-ping (2699)                       |
| Construction and Empirical Analysis of a Comprehensive Evaluation Method of Coastal Wetland Soil Quality Based on Ecological Functions .....                                                                  | ZHANG Xue, KONG Fan-long, JIANG Zhi-xiang (2709)                   |
| Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area .....                                                                                                   | CHEN Hang, WANG Ying, WANG Shu (2719)                              |
| Effects of Typical Iron and Manganese Minerals on Arsenic Speciation and Enzyme Activities in Paddy Soil .....                                                                                                | ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Kai, <i>et al.</i> (2732)          |
| Phytoremediation Efficiency of Two Cultivars of <i>Brassica napus</i> L. Under Water-soluble Chitosan Treatment in Typical Pb-contaminated Farmland Soils .....                                               | MENG Xiao-fei, ZHENG Guo-di, CHEN Tong-bin, <i>et al.</i> (2741)   |
| Risk Prediction of Cadmium and Lead in Wheat Grains Based on Bayes Theorem .....                                                                                                                              | WANG Tian-qi, LI Yan-ling, YANG Yang, <i>et al.</i> (2751)         |
| Interannual Variation Characteristics of Nitrogen Loss Under Rapeseed/Maize Rotation in Purple Soil Sloping Field .....                                                                                       | XU Man, GAO Ming, YU Luo, <i>et al.</i> (2758)                     |
| Physicochemical Properties of Biochars Prepared from Different Feedstocks and Evaluation of Its Potential as A Slow-release Carriers for Biochar-based Fertilizers .....                                      | XING Li-bin, CHENG Jie, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (2770)       |
| Effects of Combined Application of Wood Vinegar-Acidified Biochar and Nitrogen on Active Nitrogen and Ammonia Volatilization in Saline Soil .....                                                             | SHEN Shu-wei, ZHANG Dan-dan, WANG Min-ge, <i>et al.</i> (2779)     |
| Effects of Biodegradable Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions Under Wheat-Maize Rotation System in the Guanzhong Plain .....                                                                     | GUO Yi-ting, LUO Xiao-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (2788)           |
| Forest Soil Microbial Community Structure Characteristics and Its Influencing Factors at Different Elevations on the Southern Slope of Daiyun Mountain .....                                                  | HE Zhong-sheng, WANG Zi-wei, ZHU Jing, <i>et al.</i> (2802)        |
| Effects of Simulated Warming and Increased Precipitation on Soil Extracellular Enzyme Activity and Enzymatic Stoichiometry of Abandoned Grassland .....                                                       | WANG Xing, ZHONG Ze-kun, JIAN Jun-nan, <i>et al.</i> (2812)        |
| Contribution of Urbanization to Local Warming in Major Cities of China .....                                                                                                                                  | LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei, <i>et al.</i> (2822)          |