

目次

|                                                                   |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 加速能源转型与产业结构调整的环境健康协同效益评估:以京津冀鲁地区为例                                | 杨玺, 孙奕生, 常世彦, 李胜悦, 郑昊天, 王书肖, 张希良 (3627)                            |
| 基于不同电力需求的中国减排降碳协同增效路径                                             | 向梦宇, 王深, 吕连宏, 张楠, 白梓函 (3637)                                       |
| 城市碳达峰碳中和行动评估方法与应用                                                 | 张保留, 白梓函, 张楠, 吕连宏, 阳平坚 (3649)                                      |
| 基于可解释性机器学习的城市 O <sub>3</sub> 驱动因素挖掘                               | 董佳奇, 胡冬梅, 闫雨龙, 彭林, 张辉辉, 牛月圆, 段小琳 (3660)                            |
| 基于响应曲面法的臭氧生成敏感性分析                                                 | 朱禹寰, 陈冰, 张雅茹, 刘晓, 李光耀, 舍静, 陈强 (3669)                               |
| 基于 WRF-CMAQ/ISAM 模型的榆林市夏季 O <sub>3</sub> 来源解析                     | 王伊凡, 仝纪龙, 陈羽翔, 林鑫, 刘永乐, 敖丛杰, 刘浩天 (3676)                            |
| 基于轻量级梯度提升机的南京大气臭氧浓度预测                                             | 朱珈莹, 安俊琳, 冯悦政, 贺婕, 张玉欣, 王俊秀 (3685)                                 |
| 2022 年广东省冬季一次臭氧污染过程的气象成因及潜在源区分析                                   | 李婷苑, 陈靖扬, 龚宇, 沈劲 (3695)                                            |
| 夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响                                        | 杜楠, 陈磊, 廖宏, 朱佳, 李柯 (3705)                                          |
| 气象、本地光化学生成和外围传输对长沙市 2018~2020 年臭氧污染趋势变化影响的识别                      | 杨俊, 杨雷峰, 丁华, 谢丹平, 刘妍妍, 余涛, 吕明, 袁自冰 (3715)                          |
| 2000~2021 年成渝城市群 PM <sub>2.5</sub> 时空变化及驱动机制多维探测                  | 徐勇, 郭振东, 郑志威, 戴强玉, 赵纯, 黄雯婷 (3724)                                  |
| 基于 GTWR-XGBoost 模型的四川省 PM <sub>2.5</sub> 小时浓度估算                   | 吴迪, 杜宁, 王莉, 吴宇宏, 张少磊, 周彬, 张显云 (3738)                               |
| 2013~2021 年邢台 PM <sub>2.5</sub> 重污染过程输送和增长特性                      | 江琪, 盛黎, 靳雨晨, 王继康, 尤媛, 王飞 (3749)                                    |
| 基于高分辨率在线观测数据分析上海市城区秋冬季大气有机气溶胶化学特征及污染来源                            | 朱书慧 (3760)                                                         |
| 机动车尾气碳质气溶胶排放因子及其稳定碳同位素特征                                          | 于鸣媛, 王谦, 付明亮, 戈畅, 谢峰, 曹芳, 章炎麟 (3771)                               |
| 沈阳工业区夏季 VOCs 组成特征及其对二次污染形成的贡献                                     | 关璐, 苏枫枫, 库盈盈, 胡建林, 于兴娜 (3779)                                      |
| 疫情管控期间深圳市城区 VOCs 的变化特征及减排效果评估                                     | 云龙, 林楚雄, 李成柳, 邱志诚, 古添发, 李光程, 张明棣, 郭健锋 (3788)                       |
| 西安市冬季道路扬尘中有机质组成特征及其氧化潜势                                           | 王擎雯, 陈庆彩, 王超, 王瑞鹤, 刘国瑞, 李豪, 李艳广 (3797)                             |
| 淮北孙疃矿区地表尘中多环芳烃类化合物的污染特征及致癌风险评价                                    | 徐振鹏, 钱雅慧, 洪秀萍, 罗钟庚, 高秀龙, 梁汉东 (3809)                                |
| 雄安建设初期白洋淀水质时空差异及其对降雨和土地利用的响应                                      | 王子铭, 杨丽虎, 宋献方 (3820)                                               |
| 流域尺度污染溯源模拟-优化防控方法:以铜陵市顺安河流域为例                                     | 刘国王辰, 陈磊, 李佳奇, 张钰晨, 赵奕欣, 刘妍琪, 沈珍瑶 (3835)                           |
| 南昌市浅层地下水水质评价及监测指标优化                                               | 郑紫吟, 储小东, 徐金英, 马志飞 (3846)                                          |
| 闪电河流域“三水”氢氧同位素特征及水体转换分析                                           | 杨丽娜, 贾德彬, 高瑞忠, 苏文旭, 卢方园, 郝玉胜 (3855)                                |
| 金沙江丰富类和稀有类浮游真核微生物的分布特征与影响因素                                       | 燕炳成, 崔戈, 孙胜浩, 王沛芳, 王超, 吴程, 陈娟 (3864)                               |
| 嘉陵江不同干扰断面河道沉积物细菌群落多样性                                             | 竹兰萍, 张拓, 李佳宁, 王佳颖, 郭伟亮, 徐飞, 张富斌 (3872)                             |
| 水库水深变化对不同浮游微生物群落及网络互作关键种的影响                                       | 王洵, 廖琴, 王沛芳, 袁秋生, 胡斌, 邢小蕾, 徐浩森 (3881)                              |
| 典型工业区地下水细菌群落多样性特征与环境因子响应初探                                        | 吴建强, 张书源, 王敏, 陈敏, 叶文娟, 熊丽君, 黄沈发 (3892)                             |
| 太湖流域肥料施用策略调整对典型作物系统氮磷流失的影响                                        | 俞映倬, 王逸之, 杨根, 杨林章, 段婧婧, 韩雪梅, 薛利红 (3902)                            |
| 基于机器学习的长江流域农田氮径流流失负荷估算                                            | 张有福, 潘哲祺, 陈丁江 (3913)                                               |
| 千岛湖地区上梧溪流域地表径流非点源氮污染分类识别                                          | 俞珂, 严璇, 唐张轩, 张方方, 何圣嘉, 姜培坤 (3923)                                  |
| 沱江和涪江水系干支流氮磷营养盐的空间分布特征                                            | 李子阳, 周明华, 徐鹏, 陈露, 刘祥龙, 林洪羽, 江南, 任兵, 张博文 (3933)                     |
| 外秦淮河底泥污染及疏浚效果                                                     | 张沐, 任增谊, 张曼, 赵琼, 尹洪斌 (3945)                                        |
| 新污染物多环芳烃衍生物的来源、分布与光化学行为                                           | 葛林科, 王子宇, 曹胜凯, 车晓佳, 朱超, 张蓬, 马宏瑞 (3957)                             |
| 镉砷在针铁矿界面共吸附的相互作用机制                                                | 苏子贤, 刘赛红, 管玉峰, 陶亮 (3970)                                           |
| 环糊精键合 Fe-TAML 催化剂的制备及其活化 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 氧化水中有机微污染物 | 刘清泉, 蔡本哲, 蔡喜运 (3978)                                               |
| Co(II) 活化过一硫酸盐降解氨基三甲膦酸的性能及反应机制                                    | 朱敬林, 汪舒 (3990)                                                     |
| 微塑料诱导下污泥造粒潜能变化及微生物富集特征                                            | 谢晴帆, 俞楠, 张妮, 谢周云, 单珂欣, 吴亦馨, 唐力, 夏静芬, 杨国靖 (3997)                    |
| 中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价                                           | 王静, 魏恒, 潘波 (4006)                                                  |
| 渝东南典型地质高背景区土壤重金属来源解析及污染评价                                         | 蒋玉莲, 余京, 王锐, 王佳彬, 李瑜, 余飞, 张云逸 (4017)                               |
| 基于 PMF 模型的农田土壤重金属源暴露风险综合评价:以浙江省某电子垃圾拆解区为例                         | 方嘉, 何影, 黄乃涛, 支裕优, 傅伟军 (4027)                                       |
| 乌鲁木齐市郊农田土壤及农作物中多环芳烃的污染特征及风险评价                                     | 范悦, 曹双瑜, 艾力江·努尔拉, 于芸云江·吗米提敏, 阿不都艾尼·阿不里, 谢宣宣, 古丽斯坦·阿不都拉, 刘河疆 (4039) |
| 荒漠绿洲土壤抗生素抗性基因分布特征及驱动机制                                            | 黄福义, 周曙仡, 苏建强, 朱永官 (4052)                                          |
| 近 15 年我国土壤抗生素污染特征与生物修复研究进展                                        | 赵晓东, 乔青青, 秦宵睿, 李晓晶, 李永涛 (4059)                                     |
| 改性生物炭修复砷镉复合污染土壤研究进展                                               | 吕鹏, 李莲芳, 黄晓雅 (4077)                                                |
| 沼液还田对土壤-作物系统重金属累积的影响:Meta 分析                                      | 赵奇志, 杨志敏, 孔凡靖, 熊海灵, 朱康文, 陈玉成 (4091)                                |
| 两种铁改性生物炭对微碱性砷镉污染土壤的修复效果                                           | 梁欣冉, 何丹, 郑墨华, 付庆灵, 胡红青, 朱俊 (4100)                                  |
| 秸秆离田对土壤 Cd 生物有效性及水稻 Cd 积累的影响                                      | 王子钰, 周航, 周坤华, 谭文韬, 蒋毅, 唐棋, 伍港繁, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (4109)                |
| 秸秆与脱硫石膏配施改良黄河三角洲盐碱地的理化性质                                          | 赵惠丽, 于金艺, 刘涛, 王丽, 赵英 (4119)                                        |
| 基于环境 DNA 的复合污染土壤生物评价和胁迫诊断                                         | 黄湘云, 钟文军, 刘训杰, 毕婉娟, 钱林皓, 张效伟 (4130)                                |
| 地质高背景区土壤-玉米重金属综合质量评价                                              | 张传华, 王钟书, 刘力, 刘燕 (4142)                                            |
| 浙江省蔬菜生产系统重金属污染生态健康风险                                              | 张述敏, 刘翠玲, 杨桂玲, 邓美华 (4151)                                          |
| 生物炭配施磷肥对土壤养分、酶活性及紫花苜蓿养分吸收的影响                                      | 刘鑫裕, 王冬梅, 张泽洲, 张鹏, 樊桐桐 (4162)                                      |
| 低密度聚乙烯微塑料对空心菜生长和生理特征的影响                                           | 周颖, 蒋文婷, 刘训悦, 朱高荻, 唐荣贵, 章海波, 蔡延江 (4170)                            |
| 沼液施用对麦茬口期土壤微生物群落结构特征及功能的影响                                        | 乔宇颖, 奚辉, 李娜, 陈喜靖, 沈阿林, 喻曼 (4179)                                   |
| 大同铅锌尾矿不同污染程度土壤细菌群落分析及生态功能特征                                       | 刘泽勋, 庄家尧, 刘超, 郑康, 陈玲 (4191)                                        |
| 马尾松采伐迹地火烧黑炭对土壤有机碳组分和碳转化酶活性的影响                                     | 姚智, 焦鹏宇, 吴晓生, 严强, 刘先, 胡亚林, 王玉哲 (4201)                              |
| 《环境科学》征订启事(3648)                                                  |                                                                    |
| 《环境科学》征稿简则(3659)                                                  |                                                                    |
| 信息(3714, 4150, 4178)                                              |                                                                    |

# 夏季对流层臭氧辐射强迫对华北地区天气和空气质量的影响

杜楠<sup>1</sup>, 陈磊<sup>1,2\*</sup>, 廖宏<sup>1\*</sup>, 朱佳<sup>1</sup>, 李柯<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 南京 210044; 2. 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 自2013年我国实施《大气污染防治行动计划》以来, 大气颗粒物浓度显著降低, 但臭氧( $O_3$ )污染日益严峻, 同时对对流层 $O_3$ 作为一种重要的温室气体, 其辐射强迫能够影响天气和空气质量. 利用双向耦合的区域空气质量模型 WRF-Chem, 再现2017年6月发生在华北地区的一次 $O_3$ 污染事件, 通过敏感性试验分析对流层臭氧辐射强迫(TORF)对当地气象场的影响, 以及改变的气象变量对 $O_3$ 空气质量的反馈作用. 结果表明, WRF-Chem模式在气象要素的模拟上表现出较好的性能, 并且能够很好地捕捉到 $O_3$ 浓度的时空演变特征. TORF使北京-天津-河北-山东地区的近地面气温平均升高0.23 K(最大增温可达0.8 K)、近地面相对湿度降低1.84%、边界层高度增加27.73 m. TORF对风速的影响较弱( $-0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 但产生的西南风异常容易将上游污染地区的 $O_3$ 和其前体物输送至华北地区. 在臭氧辐射反馈的影响下, 研究区域内 $\varphi(O_3)$ 平均增加1.7% ( $1.23 \times 10^{-9}$ ), 而在污染严重的北京和天津地区,  $\varphi(O_3)$ 增加量最高可达 $5 \times 10^{-9}$ . 进一步利用过程诊断分析法可以发现, 增强的气相化学反应是TORF恶化近地面 $O_3$ 污染的主导原因.

**关键词:** 对流层臭氧( $O_3$ ); 辐射反馈; 空气质量; 数值模拟; 过程诊断分析法

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)07-3705-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208098

## Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China

DU Nan<sup>1</sup>, CHEN Lei<sup>1,2\*</sup>, LIAO Hong<sup>1\*</sup>, ZHU Jia<sup>1</sup>, LI Ke<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, School of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the vigorous implementation of the Clean Air Action since 2013, the atmospheric particle pollution in China has been substantially reduced, but ozone concentrations have been increasing. Moreover, tropospheric ozone can make a difference in meteorology and air quality through its radiative forcing as an important greenhouse gas. A coupled regional meteorology-chemistry model (WRF-Chem) was used to reproduce an ozone pollution event that occurred in North China in June 2017. The impact of tropospheric ozone radiative forcing on local meteorological fields and its feedback effect on ozone air quality were analyzed through sensitivity experiments. The results revealed the excellent performance of the WRF-Chem model for meteorological parameters and ozone pollutant concentrations. Tropospheric ozone radiative forcing (TORF) increased the average near-surface temperature by 0.23 K in the Beijing-Tianjin-Hebei-Shandong Region (the maximum temperature increase could reach 0.8 K), reduced the relative humidity by 1.84%, and elevated the height of the boundary layer by 27.73 m. TORF had a weaker effect on wind speed ( $-0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), but the generated anomalous southwestern wind was more liable to transport ozone and its precursors from upstream polluted areas to North China. Under the impacts of ozone radiation feedback, the ozone volume fraction in the study area increased by an average of 1.7% ( $1.23 \times 10^{-9}$ ), whereas in the heavily polluted Beijing and Tianjin areas, the increase reached up to  $5 \times 10^{-9}$ . Furthermore, the enhanced gas phase chemical reactions were identified as the dominant cause worsening near-surface ozone pollution by progress diagnostic analysis.

**Key words:** tropospheric ozone ( $O_3$ ); radiation feedback; air quality; numerical simulation; progress diagnostic analysis

对流层臭氧( $O_3$ )是由氮氧化物( $NO_x$ )和挥发性有机物(VOCs)通过光化学反应生成的一种二次气体污染物<sup>[1,2]</sup>.  $O_3$ 污染作为全球性的公共卫生问题已引起广泛的社会关注<sup>[3]</sup>. 据估计, 全球每年因 $O_3$ 污染导致的过早死亡人数平均超过70万人(其中38%发生在中国), 造成农作物减产14~60亿美元, 森林生物量减少7%<sup>[4~8]</sup>.

对流层 $O_3$ 也是一种重要的温室气体, 可以吸收太阳短波辐射和地球长波辐射, 影响地气系统的辐射收支平衡<sup>[9]</sup>. IPCC第五次评估报告指出, 自前工业化时代以来, 全球平均的对流层臭氧辐射强迫

(tropospheric ozone radiative forcing, TORF)估计值为 $0.40 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , 是导致全球变暖的重要因素之一<sup>[10]</sup>. Dentener等<sup>[11]</sup>通过TM3和STOCHEM模型开展臭氧辐射强迫的长期模拟, 指出随着人为排放和气候的变化, 北半球2020~2030年 $O_3$ 体积分数

收稿日期: 2022-08-11; 修订日期: 2022-09-21

基金项目: 国家重点研发计划全球变化及应对重点专项(2019YFA0606800); 国家自然科学基金项目(42007195); 江苏省高等学校自然科学基金项目(21KJB170004); 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室开放基金项目(SCAPC202114)

作者简介: 杜楠(1997~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境数值模拟, E-mail: nandu@nuist.edu.cn

\* 通信作者, E-mail: chenlei@nuist.edu.cn; hongliao@nuist.edu.cn

要比 1990 ~ 2000 年增加  $5.0 \times 10^{-9}$ , 进而会使对流层臭氧辐射强迫增加  $0.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Pozzoli 等<sup>[12]</sup>利用气溶胶-化学-气候模式 ECHAM5-HAMMOZ 通过敏感性试验探究人为活动对臭氧辐射强迫影响, 模拟结果表明, 1981 ~ 2005 年, 增强的人为活动使对流层  $\text{O}_3$  的辐射强迫增加, 全球平均值为  $0.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 东亚地区为  $0.12 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . Dang 等<sup>[13]</sup>运用 GEOS-Chem 模式分析我国 2012 ~ 2017 年清洁空气行动计划下对流层臭氧辐射强迫的变化情况, 模拟结果表明, 2012 年我国东部对流层臭氧辐射强迫为  $0.72 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 2017 年臭氧辐射强迫进一步增强  $0.10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

对流层  $\text{O}_3$  浓度的变化在扰动地气辐射收支的同时也会影响气象条件<sup>[14~16]</sup>. Xie 等<sup>[17]</sup>通过气溶胶-气候模式 BCC\_AGCM2.0.1\_CUACE/Aero 模拟 1850 ~ 2013 年对流层  $\text{O}_3$  的有效辐射强迫 (effective radiative forcing, ERF) 及其对全球气候的影响, 结果表明, 由于 1850 ~ 2013 年间的对流层  $\text{O}_3$  柱浓度变化 18.08 DU, 导致 ERF 平均增加  $0.46 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 全球年平均地表温度增加  $0.36^\circ\text{C}$ , 降水增加  $0.02 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ . Roy 等<sup>[18]</sup>利用气溶胶-化学-气候模式 ECHAM5-HAMMOZ, 通过理想试验, 探究印度地区人为  $\text{NO}_x$  排放变化对  $\text{O}_3$  浓度及其辐射效应的影响, 模拟结果表明, 增加 38% 的  $\text{NO}_x$  排放会使对流层中低层的  $\text{O}_3$  浓度升高, 进而使臭氧辐射强迫增强  $16.3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ , 促进青藏高原的升温和印度降水的增加 ( $0.3 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ). 但当人为  $\text{NO}_x$  的排放量进一步增加时 (增加 78%), 更高的  $\text{O}_3$  浓度会转变 Hadley 环流而减弱印度地区的降水 ( $-0.3 \sim -0.6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ). Li 等<sup>[19]</sup>利用区域气候模式 RegCM4 调研中国地区夏季对流层  $\text{O}_3$  的空间分布、辐射强迫和气候影响, 并指出, 自工业革命以来, 对流层  $\text{O}_3$  浓度的增加使晴天净辐射通量增加  $0.89 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 进而增强海陆热力差异, 使东亚夏季风环流在中国南部增强, 带来更多的水汽.

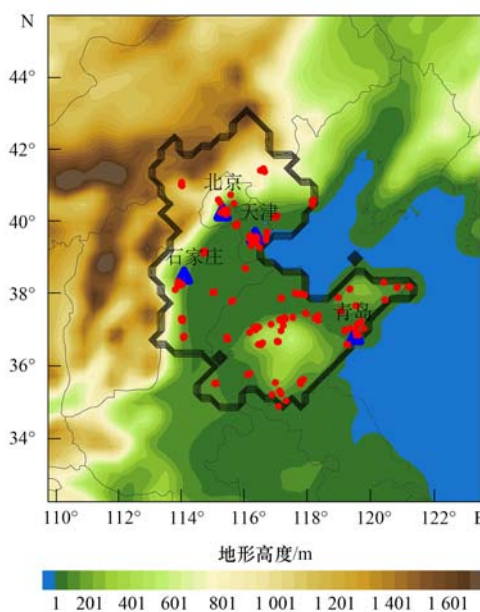
对流层  $\text{O}_3$  在大气热平衡中扮演非常重要的角色, 可以通过其与辐射和气象的相互作用而影响污染治理的成效. 然而, 目前国内外有关对流层  $\text{O}_3$  与辐射的相互作用, 更多的只是涉及对气象场的影响, 如对温度<sup>[20,21]</sup>、风速<sup>[19]</sup>和降水<sup>[22,23]</sup>等气象因子的影响, 而改变的气象变量进一步对空气质量的反馈影响的研究几乎没有. 探究  $\text{O}_3$  的辐射强迫, 尤其是量化对流层  $\text{O}_3$  与辐射的相互作用对空气质量的反馈影响, 有利于更好地理解大气污染事件的形成和演变机制, 对未来制定更好的大气污染防控政策具有重要的指导意义.

2020 年我国人口加权平均的  $\text{O}_3$  日最大 8 h 浓度的第 90 百分位数为  $139.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 相比 2015 年上涨 13.8%<sup>[24]</sup>. 中国  $\text{O}_3$  污染问题日益凸显, 已成为“十四五”期间的攻坚重点. 考虑到华北平原 ( $36^\circ \sim 40.5^\circ\text{N}$ ,  $114.5^\circ \sim 119.5^\circ\text{E}$ ) 是我国  $\text{O}_3$  污染最严重的地区之一, 也是  $\text{O}_3$  浓度逐年增长最快速的地区之一<sup>[25~27]</sup>, 本文以 2017 年 6 月发生在华北地区的一次  $\text{O}_3$  污染事件为研究对象, 采用双向耦合的区域空气质量模型 WRF-Chem 来再现此次污染事件, 并通过敏感性试验分析对流层臭氧辐射强迫对地气系统的辐射收支扰动及其引起的气象场变化的基础上, 进一步定量探究对流层  $\text{O}_3$  的辐射反馈对空气质量的影响及其在污染物浓度演变中的作用.

## 1 材料与方法

### 1.1 模式设置

为探究对流层臭氧辐射强迫对气象变量的影响, 以及改变的气象变量对  $\text{O}_3$  浓度的反馈影响, 本研究使用由 NCAR 和 NOAA 等联合开发的在线 (online) 三维区域空气质量模式 WRF-Chem<sup>[28,29]</sup> (weather research and forecasting model coupled to chemistry). 模式版本为 v3.7.1, 采用 Lambert 地图投影方式, 网格分辨率设为 27 km, 模拟区域着眼于我国华北平原地区 (图 1), 垂直方向上有 29 层. 模拟时段为 2017 年 5 月 27 ~ 30 日, 其中前 5 d 为 spin-up 时间.



蓝色三角表示气象观测站点, 红色圆点表示  $\text{O}_3$  浓度监测站点, 黑色加粗边界是本研究重点关注地区 (北京、天津、河北和山东)

图 1 WRF-Chem 模式的模拟区域和观测站点的空间分布

Fig. 1 WRF-Chem simulation domain and the spatial distribution of observation sites

驱动 WRF-Chem 模式的气象初边界数据来自欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 提供的第 5 代全球再分析气象资料 ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>). 该再分析数据具有高空间分辨率( $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ )和高时间分辨率(1 h),能很好地提高空气质量模式对大气污染物浓度及其时空演变特征的模拟能力. 化学物种的初边界条件来自全球化学模式 CAM-Chem 的模拟结果 (<https://www.acom.ucar.edu/cam-chem/camchem.shtml>), 其水平分辨率为  $1^{\circ} \times 1.25^{\circ}$ , 时间分辨率为 6 h.

人为排放数据来自清华大学研发的 MEIC 排放清单<sup>[30]</sup> (<http://meicmodel.org/>), 包括污染物二氧化硫( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、一氧化碳( $\text{CO}$ )、非甲烷挥发性有机物(NMVOC)、氨气( $\text{NH}_3$ )、黑碳(BC)、有机碳(OC)、一次排放的细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )和粗颗粒物( $\text{PM}_{10}$ ). 模式所使用的生物源排放来自 MEGANv2.04 的模型结果<sup>[31]</sup>. 生物质燃烧排放源来自 FINNV2.0<sup>[32]</sup>. 沙尘和海盐排放分别使用 Shao 等<sup>[33]</sup>和 Gong 等<sup>[34]</sup>提出的算法在线计算.

气相化学方案为 CBM-Z (carbon bond mechanism, version Z) 机制<sup>[35]</sup>, 该方案在 CBM-IV 的基础上更新了无机化学和异戊二烯化学等反应参数, 共包含 67 个物种和 164 个反应. 光解反应速率来自 Fast-J 方案<sup>[36]</sup>, 并进一步考虑了气溶胶对光解速率的影响. 气溶胶模块选用的是 8 个粒径段的 MOSAIC(model for simulating aerosol interactions and chemistry) 机制<sup>[37]</sup>, 该机制包含硫酸盐、硝酸盐、铵盐、黑碳、有机质、液态水和其他无机物质等, 涉及的主要气溶胶过程包括热力学平衡、二元成核、凝聚和凝结等, 同时本研究还添加了气溶胶表面的非均相化学反应过程. 气溶胶光学属性(包括消光系数、单次散射反照率和不对称因子)可以通过波长与粒子的三维位置的函数计算得到. 在 WRF-Chem 模式中, 每一个气溶胶化学成分在各个粒径段内都被赋予一个体积平均的复折射指数, 进而可以通过 Mie 理论来计算气溶胶粒子的消光效率和散射效率<sup>[38]</sup>. 长短波辐射方案均选用 RRTMG (rapid radiative transfer model for GCMs) 方案<sup>[39]</sup>, 该方案引入实时计算的气溶胶光学属性, 用来表征气溶胶直接辐射强迫的影响. 与此同时, 本研究还将模式实时计算的  $\text{O}_3$  浓度替换辐射方案中的气候态平均值, 以期探究对流层  $\text{O}_3$  的直接辐射强迫影响. 此外, RRTMG 模型中默认设定的其他温室气体浓度, 如  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等, 也根据全球化学模式 CAM-Chem 模拟结果进行更新. 详细的物理和化学参数化

方案可见表 1.

表 1 模式模拟所用主要参数化方案

| Table 1 Parameterization schemes used in the model simulation |                                  |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| 选项                                                            | 参数化方案                            |
| 微物理方案                                                         | Purdue Lin scheme                |
| 长波辐射方案                                                        | RRTMG scheme                     |
| 短波辐射方案                                                        | RRTMG scheme                     |
| 陆面过程方案                                                        | Revised MM5 Monin-Obukhov scheme |
| 城市冠层模型                                                        | Unified Noah land-surface model  |
| 边界层方案                                                         | YSU scheme                       |
| 积云对流方案                                                        | Grell 3-D ensemble scheme        |
| 光解方案                                                          | Fast-J                           |
| 沙尘方案                                                          | Shao_2004                        |
| 气相化学方案                                                        | CBMZ                             |
| 气溶胶方案                                                         | MOSAIC                           |

1.2 过程诊断分析法

参照 Chen 等<sup>[40]</sup>的做法, 本研究将气体和气溶胶的过程诊断模块耦合到 WRF-Chem 模式中. 该方法能直接量化各物理和化学过程在污染物浓度演变过程中的贡献. 在本文中, 考虑了 8 个主要的物理化学过程, 包括区域输送、排放、垂直混合、次网格对流、气相化学、云化学、湿沉降和气溶胶化学.

1.3 敏感性试验设置

本研究着眼于对流层  $\text{O}_3$  的辐射效应, 即对流层  $\text{O}_3$  的辐射强迫对气象场的扰动, 以及改变的气象要素对近地面  $\text{O}_3$  浓度的反馈影响. 基于此, 本文开展了两个试验(表 2), 分别是控制试验(CTL)和不考虑对流层臭氧辐射强迫影响的敏感性试验(NoTORF). 其中 CTL 试验表示真实情景, 其模拟结果是用来验证 WRF-Chem 模式的模拟能力. NoTORF 试验是在 CTL 试验的基础上不考虑对流层臭氧辐射强迫的影响, 即在 RRTMG 长短波辐射方案中将对流层  $\text{O}_3$  的混合比设为 0, 也就是不考虑对流层内  $\text{O}_3$  气体光学属性对辐射通量的影响. 因此, 比较 CTL 控制试验和 NoTORF 试验, 可量化对流层臭氧辐射强迫所产生的影响.

表 2 敏感性试验设置<sup>1)</sup>

| Table 2 Sensitivity experiments |                           |                           |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| 试验名称                            | 对流层 $\text{O}_3$ 对长波辐射的影响 | 对流层 $\text{O}_3$ 对短波辐射的影响 |
| CTL                             | 开启                        | 开启                        |
| NoTORF                          | 关闭                        | 关闭                        |

1) 开启表示将实时计算的  $\text{O}_3$  浓度(体积混合比)替换辐射方案中预设的气候态平均浓度, 关闭表示将对流层内  $\text{O}_3$  的浓度(体积混合比)设为 0

1.4 观测数据

为验证 WRF-Chem 模式对 2017 年 6 月华北地区气象场和污染物浓度的模拟能力, 本研究分别从怀俄明大学 (<http://weather.uwyo.edu/surface/>

meteorogram/seasia.shtml) 下载北京(ZBAA, 39.93°N, 116.28°E)、天津(ZBTJ, 39.18°N, 117.35°E)、石家庄(ZBSJ, 38.28°N, 114.70°E)和青岛(ZSQD, 36.07°N, 120.33°E)的小时近地面 2 m 气温( $T_2$ )、2 m 相对湿度( $RH_2$ )和 10 m 风速( $WS_{10}$ )数据,以及从中国环境监测总站(<https://air.cnemc.cn:18007>)获取北京、天津、河北和山东这 4 个省市共 197 个站点的逐小时  $O_3$  浓度观测数据. 气象观测站点和  $O_3$  浓度观测站点的空间分布详见图 1.

2 模式评估

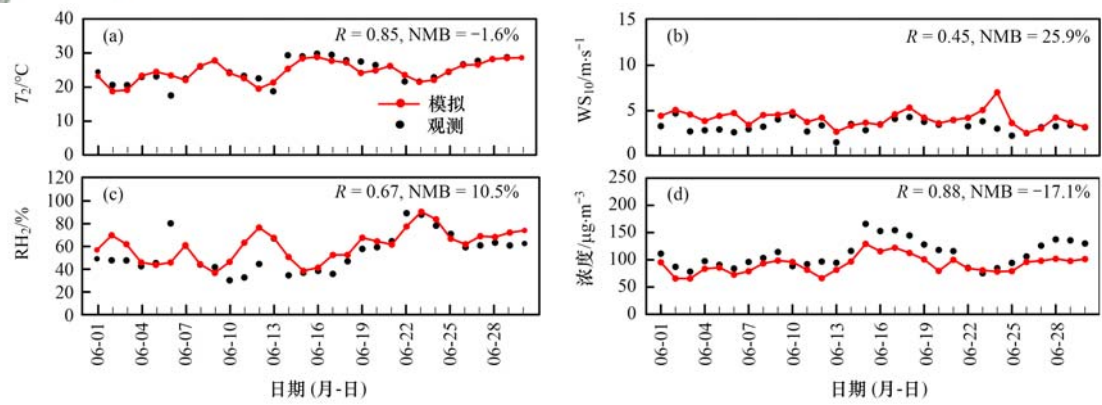
模式对气象要素和大气污染物浓度的可靠模拟是进一步开展研究工作的基础. 为评估 WRF-Chem 模式的模拟性能,本研究将 2017 年 6 月研究区域内(北京、天津、河北和山东)的 CTL 试验模拟数据与观测数据均进行 24 h 平均,选用日均值进行详细对比. 分别计算气象因子( $T_2$ 、 $RH_2$  和  $WS_{10}$ )和  $O_3$  浓度模拟值与观测值之间的标准平均偏差(NMB)和相关系数( $R$ ),它们的定义为:

$$NMB = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{SIM_i - OBS_i}{OBS_i} \times 100\%$$
$$R = \frac{\sum_{i=1}^n |(OBS_i - \overline{OBS}) \times (SIM_i - \overline{SIM})|}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (OBS_i - \overline{OBS})^2 + \sum_{i=1}^n (SIM_i - \overline{SIM})^2}}$$

$\overline{SIM} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n SIM_i$ ,  $\overline{OBS} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n OBS_i$   
式中,  $n$  为样本总数;  $SIM_i$  为观测值;  $OBS_i$  为模拟值;  $\overline{OBS}$ 和 $\overline{SIM}$ 分别为平均观测值和模拟.

图 2 给出的是 2017 年 6 月华北地区模式模拟与站点观测的气象要素和  $O_3$  浓度的时间变化曲线. 如图 2(a) 和 2(c) 显示, WRF-Chem 模式模拟的大气温度和相对湿度与观测数据吻合良好,  $R$  分别为 0.85 和 0.67, NMB 分别为 -1.6% 和 10.5%. 不同的地表层和边界层参数化方案可能会影响模拟的近地表水分通量,这些方案的设置可以部分解释观测和模拟之间的  $RH_2$  偏差<sup>[41]</sup>. 但模式对近地面风场的模拟能力较差[图 2(b)],主要表现为高估的风速(NMB = 25.9%),可能原因是较粗的网格分辨率(27 km)无法真实地刻画地形和下垫面数据的影响<sup>[42,43]</sup>. 风速的高估也同样出现在其他的 WRF-Chem 模式研究工作中<sup>[44~48]</sup>. 模式模拟的  $O_3$  浓度与观测值具有很好的一致性,  $R$  可达到 0.88 [图 2(d)],但模式对于观测值大于 120  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  的  $O_3$  浓度存在持续的低估现象,可能原因与 WRF-Chem 模式模拟气象条件的偏差有关,如对温度的低估和对风速的高估<sup>[49,50]</sup>. 不完整的 VOCs 排放清单很大程度上也会导致模型对  $O_3$  浓度的低估<sup>[51]</sup>.

表 3 详细验证了 WRF-Chem 模式对 4 个省市(北京、天津、河北和山东)气象场和  $O_3$  浓度的模拟能力. 模式模拟的  $T_2$ 、 $RH_2$ 、 $WS_{10}$  和  $O_3$  浓度的  $R$



$R$  为相关系数; NMB 为标准平均偏差

图 2 分析区域内 2017 年 6 月观测和模拟的结果的时间序列

Fig. 2 Time series of observed and simulated results over the study area in June 2017

表 3 分析区域内各省市 2017 年 6 月气象要素和  $O_3$  浓度的模拟效果评估

Table 3 Statistical metrics between observations and simulations for meteorological elements and ozone concentrations over cities of the study area in June 2017

| 变量        | 北京   |       | 天津   |       | 河北   |       | 山东   |       |
|-----------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
|           | $R$  | NMB/% | $R$  | NMB/% | $R$  | NMB/% | $R$  | NMB/% |
| $T_2$     | 0.79 | 0.2   | 0.88 | 1.7   | 0.75 | 2.2   | 0.66 | -11.2 |
| $RH_2$    | 0.58 | -1.2  | 0.69 | 10.6  | 0.57 | -6.2  | 0.63 | 35.9  |
| $WS_{10}$ | 0.16 | 19.5  | 0.49 | 6.5   | 0.21 | 68.8  | 0.30 | 21.7  |
| $O_3$ 浓度  | 0.76 | -5.5  | 0.82 | -9.6  | 0.83 | -19.1 | 0.81 | -19.0 |

分别为 0.66 ~ 0.88、0.57 ~ 0.69、0.16 ~ 0.49 和 0.76 ~ 0.83, NMB 分别为 -11.2% ~ 2.2%、-6.2% ~ 35.9%、6.5% ~ 68.8% 和 -19.1% ~ -5.5%。总之, WRF-Chem 能够较好地再现华北地区 2017 年 6 月气象要素和  $O_3$  浓度的逐日变化特征。

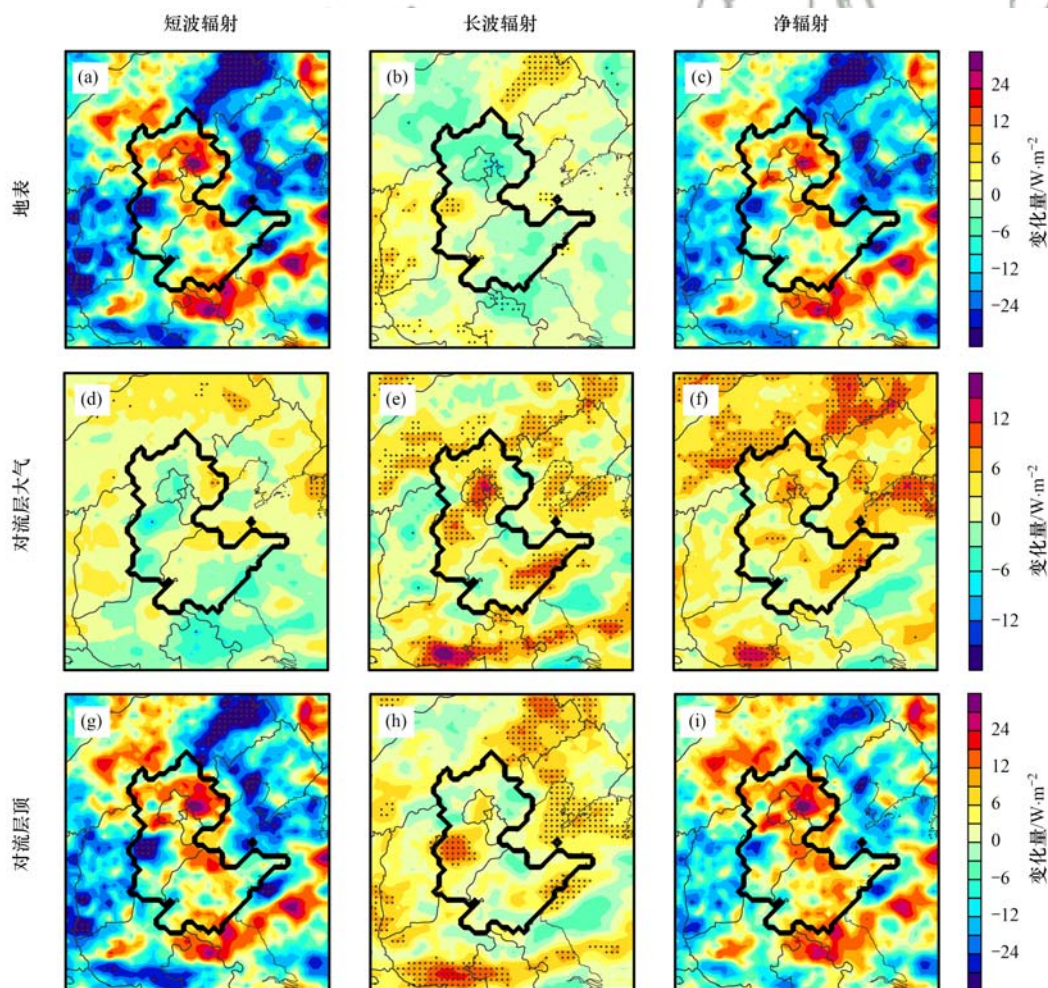
本研究主要探讨对流层  $O_3$  的辐射效应, 尤其是针对于白天高  $O_3$  浓度和强太阳辐射情况下的对流层  $O_3$  的辐射强迫影响。因此, 进一步验证了 WRF-Chem 模式对白天 (10:00 ~ 18:00) 气象条件和  $O_3$  浓度的模拟能力, 以及对比量化了考虑 TORF 后模式模拟性能的改善情况。表 4 详细总结了 CTL 试验和 NoTORF 试验对全天和白天观测结果的验证情况。可以发现, 相较于全天的模拟结果, 模式略微低估 (高估) 了白天的气温 (相对湿度), 但显著提高了对  $O_3$  的模拟能力 (全天的 NMB 为 -17.1%, 白天的 NMB 为 1.1%)。与此同时, 对比于 NoTORF 试验的模拟结果, 考虑 TORF 后, 无论是气象要素还是  $O_3$  浓度的模拟偏差都有较好改善。

综上所述, WRF-Chem 模式能较好再现 2017 年 6 月华北地区气象要素和  $O_3$  浓度的时空演变特征, 尤其是当考虑 TORF 的影响后, 模式的模拟性能进一步得到提升。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 对流层臭氧辐射强迫对辐射通量的影响

$O_3$  作为辐射活性气体, 既可以吸收太阳短波辐射, 也可以吸收地面长波辐射, 从而改变地气的辐射通量平衡。图 3 为 2017 年 6 月白天时段 (10:00 ~ 18:00) 对流层臭氧辐射强迫对地表、对流层大气和对流层顶短波辐射、长波辐射和净辐射影响的空间分布。可以发现, TORF 能够使研究区域内的地表短波辐射通量和地表净辐射通量平均增加 2.05  $W \cdot m^{-2}$  和 1.25  $W \cdot m^{-2}$ , 但减少地表长波辐射 0.80  $W \cdot m^{-2}$ 。地表短波辐射通量的增加主要是因为降水量的减少。TORF 能够显著增加对流层大气的净辐射通量 (3.99  $W \cdot m^{-2}$ ), 其中变化的长波辐射贡献



黑色点阵表示超过 90% 显著性区域; 目标分析区域 (北京、天津、河北和山东) 的辐射通量变化量平均值 ( $W \cdot m^{-2}$ ) 分别为 2.05 (a)、-0.80 (b)、1.25 (c)、0.26 (d)、3.73 (e)、3.99 (f)、2.31 (g)、2.93 (h) 和 5.24 (i)

图 3 2017 年 6 月白天时段 (10:00 ~ 18:00) 对流层臭氧辐射强迫对辐射通量的影响

Fig. 3 Impacts of tropospheric ozone radiative forcing on radiative flux during daytime (10:00-18:00) in June 2017

93.5%. 对流层  $O_3$  作为温室气体,吸收热量后能够释放长波辐射. 因此,当考虑 TORF 后,对流层大气的长波辐射明显增加[图 3(e)]. 对流层顶辐射通量的变化情况和地表层一致,其中短波辐射的增加主要出现在华北平原的北部,长波辐射的增加主要集中在河北的南部. 对流层顶平均净辐射通量增加

表 4 考虑 TORF 和不考虑 TORF 对气象要素和  $O_3$  浓度模拟效果的评估<sup>1)</sup>/%

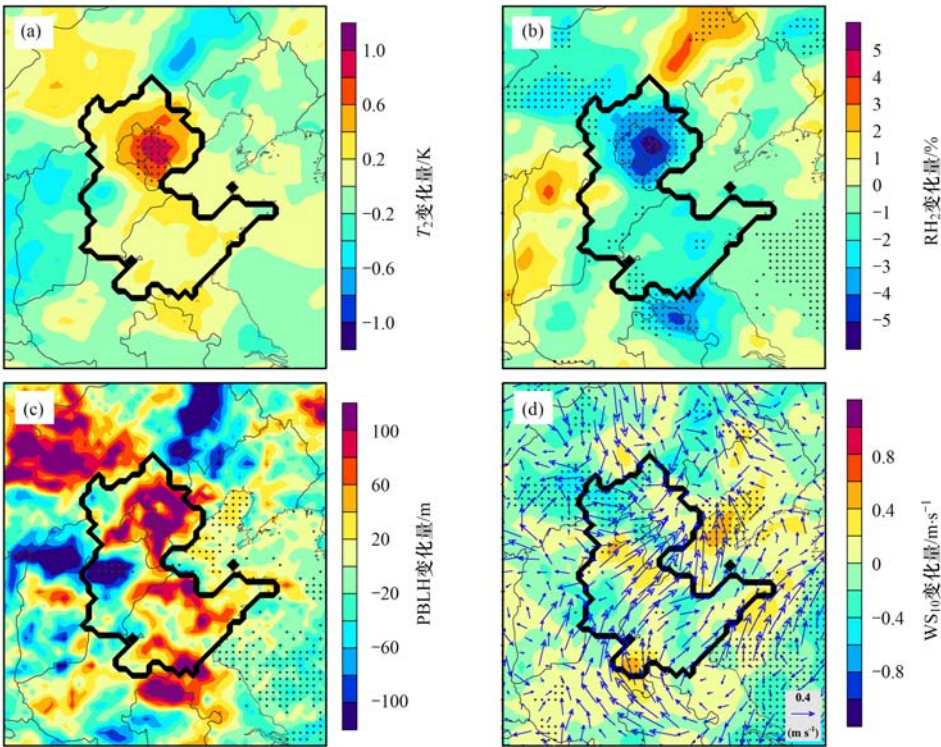
| 项目        | Table 4 Evaluation of simulation effects on meteorological elements and ozone concentrations between considering TORF and not considering TORF/% |                 |      |        |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|--------|
|           | and not considering TORF/%                                                                                                                       |                 |      |        |
|           | 全天(00:00~23:00)                                                                                                                                  | 白天(10:00~18:00) | CTL  | NoTORF |
| $T_2$     | -1.6                                                                                                                                             | -2.4            | -7.3 | -8.2   |
| $RH_2$    | 10.5                                                                                                                                             | 13.5            | 26.2 | 31.2   |
| $WS_{10}$ | 25.9                                                                                                                                             | 27.8            | 15.3 | 15.9   |
| $O_3$ 浓度  | -17.1                                                                                                                                            | -18.8           | 1.1  | -1.5   |

1) 数值为 NMB

为  $5.24\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ .

**3.2 对流层臭氧辐射强迫对气象场的影响**

对流层臭氧辐射强迫改变地气辐射通量平衡后会进一步影响近地面气象场. 图 4 为 TORF 对  $T_2$ 、 $RH_2$ 、边界层高度(PBLH)和  $WS_{10}$ 影响的空间分布. 观察图 4(a)可以发现,近地面气温升高的区域与地表净辐射通量增加的地区基本吻合,高值主要出现在北京和天津,最大增温达  $0.8\text{ K}$ ,研究区域内的平均增温  $0.23\text{ K}$ . TORF 增加近地面气温的同时,使近地面相对湿度降低,区域平均变化值为  $-1.84\%$  [图 4(b)]. 温度增加促进垂直方向的湍流运动,因此边界层高度升高[图 4(c)],平均增加  $2\%$  左右 ( $27.73\text{ m}$ ). TORF 对风速的影响不明显,区域平均的变化值为  $-0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但在温度显著升高的地区存在气流的辐合[图 4(d)],有利于将周边的大气污染物传输至北京和天津等地区.



黑色点阵表示超过 90% 显著性区域; 目标分析区域(北京、天津、河北和山东)的对应指标变化量平均值分别为:  $0.23\text{ K}$  (a)、 $-1.84\%$  (b)、 $27.73\text{ m}$  (c) 和  $-0.02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (d)

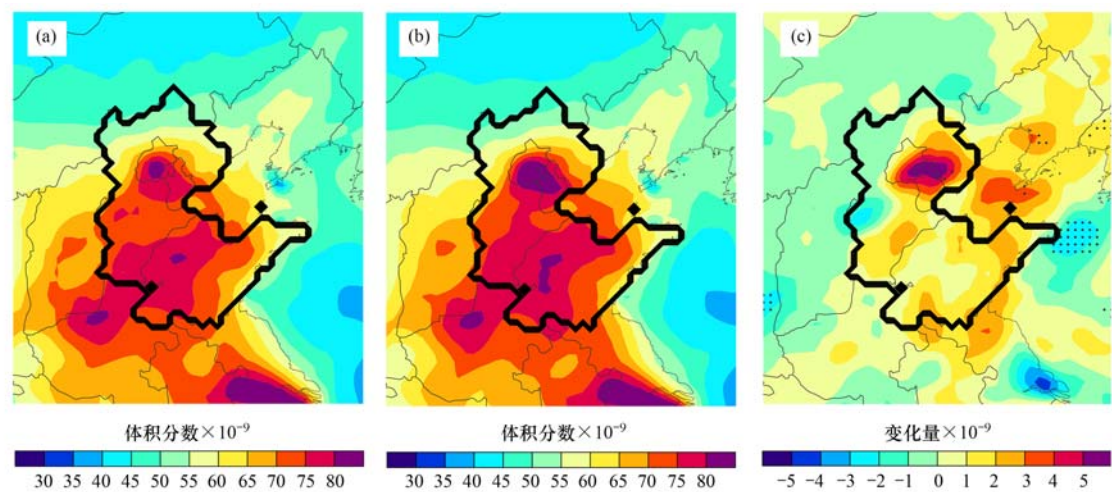
图 4 2017 年 6 月白天时段(10:00~18:00)对流层臭氧辐射强迫对气象场的影响

Fig. 4 Impacts of tropospheric ozone radiative forcing on meteorological fields during the daytime (10:00-18:00) in June 2017

**3.3 对流层臭氧辐射强迫对近地面  $O_3$  浓度的反馈影响**

WRF-Chem 模式是双向耦合的大气化学模式,当模式考虑对流层臭氧辐射强迫对近地面气象场的影响后,改变的气象变量也会对  $O_3$  浓度产生反馈影响. 图 5 展示了华北地区 2017 年 6 月白天时

段近地面  $O_3$  的空间分布情况,并量化了 TORF 对  $O_3$  浓度的反馈影响. 分析 NoTORF 试验的模拟结果可知[图 5(a)],华北地区的  $O_3$  污染较为严重,区域平均  $\varphi(O_3)$  为  $69.21 \times 10^{-9}$ ,污染最高的北京地区可超过  $80 \times 10^{-9}$ . 当进一步考虑 TORF 影响后,分析区域内的  $\varphi(O_3)$  进一步升高[图 5(b)],



(a) NoTORF 试验, (b) CTL 试验, (c) CTL 试验减去 NoTORF 试验; 黑色点阵表示超过 90% 显著性区域; 目标分析区域 (北京、天津、河北和山东) 的体积分数平均值分别为:  $69.21 \times 10^{-9}$  (a)、 $70.44 \times 10^{-9}$  (b) 和  $1.23 \times 10^{-9}$  (c)

图 5 2017 年 6 月白天时段 (10:00 ~ 18:00) 近地面  $O_3$  体积分数的空间分布

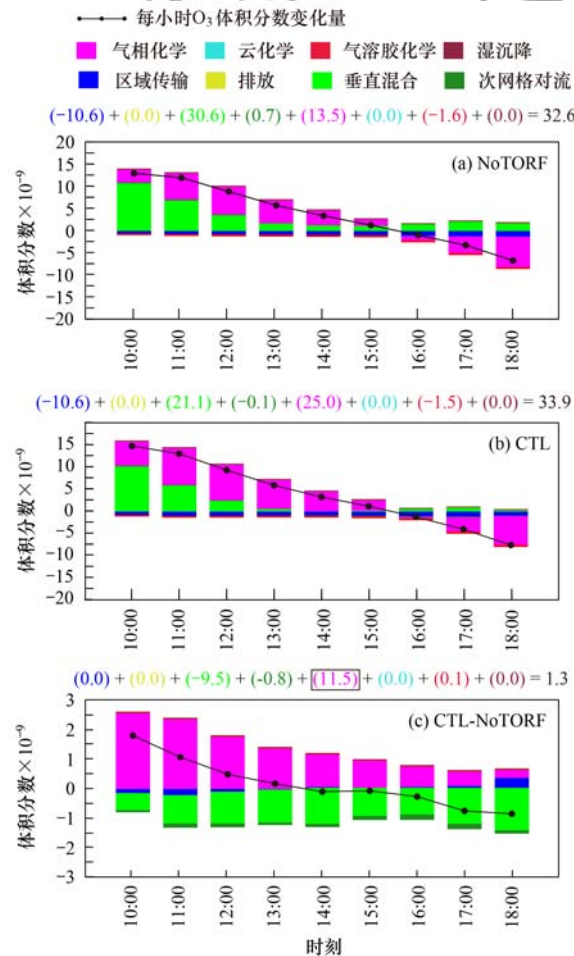
Fig. 5 Spatial distributions of near-ground ozone volume fraction during daytime (10:00-18:00) in June 2017

平均增加  $1.7\%$  ( $1.23 \times 10^{-9}$ ), 尤其是在污染严重的北京和天津地区,  $\varphi(O_3)$  的增加量最高可达  $5 \times 10^{-9}$  [图 5(c)], 可能原因是 TORF 增加大气温度进而促进了  $O_3$  的化学生成, 以及 TORF 引起的西南风异常将华北平原南部的  $O_3$  污染输送至北京和天津地区 [图 4(d)], 最终进一步加剧此处  $O_3$  污染.

3.4 过程诊断分析对流层臭氧辐射强迫的影响机制

对流层臭氧辐射强迫对近地面  $O_3$  浓度存在正的反馈影响, 尤其体现在  $O_3$  浓度升高的 6 月 25 ~ 30 日. 故此, 本文以 2017 年 6 月 25 ~ 30 日的白天作为研究时段, 通过 WRF-Chem 模式耦合的过程诊断分析方法, 定量诊断 NoTORF 试验和 CTL 试验模拟的华北地区 10:00 ~ 18:00 的小时  $O_3$  浓度演变过程中各个物理化学过程的贡献, 并进一步确定考虑 TORF 后, 主导近地面  $O_3$  浓度升高的主要物理化学过程.

从图 6(a) 可以发现, NoTORF 试验下白天  $\varphi(O_3)$  变化量为  $32.6 \times 10^{-9}$  [即  $\varphi(O_3)$  从 10:00 ~ 18:00 增加了  $32.6 \times 10^{-9}$ ], 主要贡献来自于垂直混合 ( $30.6 \times 10^{-9}$ ) 和气相化学反应 ( $13.5 \times 10^{-9}$ ) 使  $O_3$  体积分数增加. 当考虑对流层  $O_3$  的辐射反馈影响后, 白天  $\varphi(O_3)$  的变化量升高至  $33.9 \times 10^{-9}$  [图 6(b)], 相较于 NoTORF 试验, 进一步增加了  $1.3 \times 10^{-9}$  [图 6(c)]. 从过程分析的角度来讲, 更多的气相化学反应生成 (NoTORF 试验下为  $13.5 \times 10^{-9}$ , CTL 试验下为  $25.0 \times 10^{-9}$ ), 是 TORF 对近地面  $O_3$  体积分数存在正反馈影响的主导过程 [图 6(c)].



彩色数字表示对应颜色的物理/化学过程所引起的白天时段  $O_3$  体积分数总变化量  $\times 10^{-9}$ ; 黑色方框表示最主要正贡献

图 6 2017 年 6 月白天时段 (10:00 ~ 18:00) 过程诊断分析法所得各物理/化学过程对每小时  $O_3$  体积分数变化量的贡献

Fig. 6 Contribution of each physical/chemical process to the hourly variation in ozone volume fraction obtained using process diagnostic analysis during daytime (10:00-18:00) in June 2017

### 3.5 讨论

Li 等<sup>[19]</sup>利用区域气候模型 RegCM4 发现夏季中国对流层 O<sub>3</sub> 浓度增加会导致夏季风增强和降水增加. 而在未来气候变暖的情景下, 我国东部对流层 O<sub>3</sub> 浓度将进一步升高<sup>[52]</sup>. 定量预估气候变化下, 增加的对流层 O<sub>3</sub> 浓度所改变的辐射强迫对降水和环流场的影响, 有助于进一步探究在未来情景下对流层臭氧辐射强迫对气候的反馈影响, 这也是笔者在本文基础之上开展的下一步研究.

### 4 结论

(1) 对流层臭氧辐射强迫 (TORF) 使北京、天津、河北和山东区域内地表的短波辐射通量和净辐射通量平均增加  $2.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  和  $1.25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 地表长波辐射减少  $0.80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . TORF 显著增加对流层大气的净辐射通量 ( $3.99 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), 其中短波辐射通量增加  $0.26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 长波辐射通量增加  $3.73 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . 对流层顶的辐射通量变化情况和地表层一致, 对流层顶平均净辐射通量增加为  $5.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

(2) 考虑 TORF 影响后, 近地面气温在研究区域内平均增温  $0.23 \text{ K}$ , 最大增温达  $0.8 \text{ K}$ , 主要出现在北京和天津地区. TORF 使近地面相对湿度平均降低  $1.84\%$ 、边界层高度平均增加  $27.73 \text{ m}$ . TORF 对风速影响不明显 ( $-0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 但使风向改变. 异常的西南风可能会将华北平原南部的 O<sub>3</sub> 及其前体物输送至北京和天津地区, 加剧华北地区的 O<sub>3</sub> 污染.

(3) 考虑 TORF 影响后, 研究区域内的  $\varphi(\text{O}_3)$  进一步升高, 平均增加约  $1.7\%$  ( $1.23 \times 10^{-9}$ ), 尤其是在污染严重的北京和天津地区,  $\varphi(\text{O}_3)$  的增加量最高可达  $5 \times 10^{-9}$ .

(4) 进一步利用过程诊断分析方法探究 TORF 恶化近地面 O<sub>3</sub> 污染的主要物理化学过程, 并发现在 O<sub>3</sub> 浓度升高的 6 月 25 ~ 30 日期间, 更强的气相化学反应是引入对流层臭氧辐射强迫后研究区域内近地面 O<sub>3</sub> 浓度升高的主导原因.

#### 参考文献:

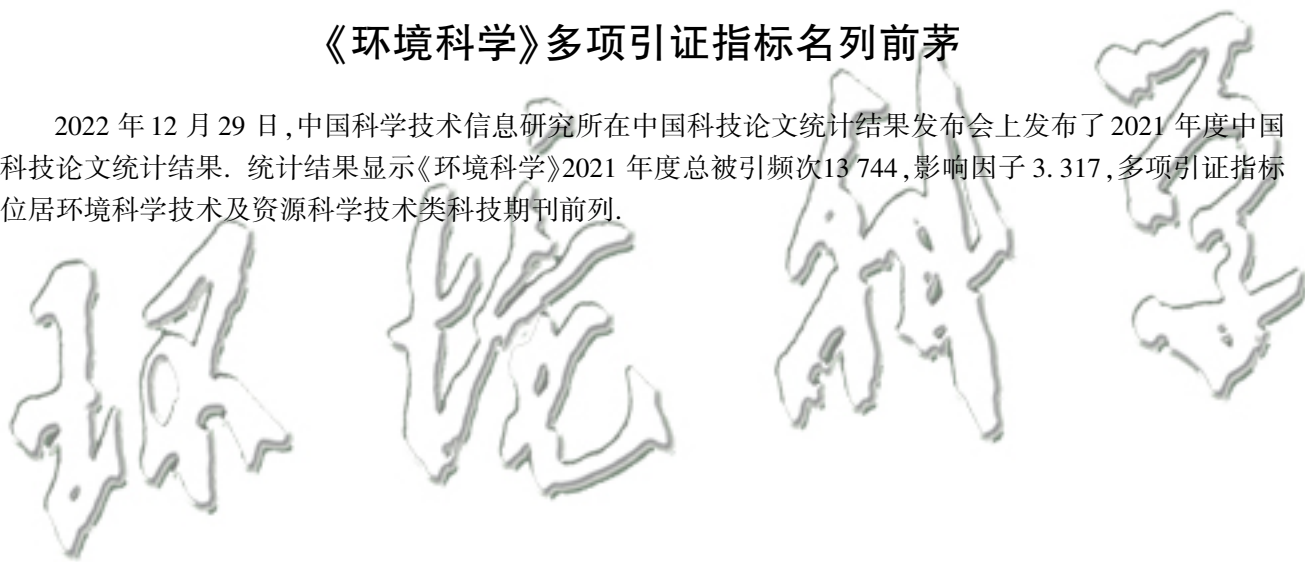
- [1] Sillman S. The relation between ozone, NO<sub>x</sub> and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(12): 1821-1845.
- [2] Kleinman L I, Daum P H, Lee Y N, *et al.* Ozone production efficiency in an urban area [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107** ( D23 ), doi: 10.1029/2002JD002529.
- [3] Feng Z Z, De Marco A, Anav A, *et al.* Economic losses due to ozone impacts on human health, forest productivity and crop yield across China [J]. *Environment International*, 2019, **131**, doi: 10.1016/j.envint.2019.104966.
- [4] Anenberg S C, Horowitz L W, Tong D Q, *et al.* An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, **118**(9): 1189-1195.
- [5] Van Dingenen R, Dentener F J, Raes F, *et al.* The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(3): 604-618.
- [6] Wittig V E, Ainsworth E A, Naidu S L, *et al.* Quantifying the impact of current and future tropospheric ozone on tree biomass, growth, physiology and biochemistry: a quantitative meta-analysis [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(2): 396-424.
- [7] Li P, Feng Z Z, Catalayud V, *et al.* A meta-analysis on growth, physiological, and biochemical responses of woody species to ground-level ozone highlights the role of plant functional types [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2017, **40**(10): 2369-2380.
- [8] Tai A P K, Martin M V, Heald C L. Threat to future global food security from climate change and ozone air pollution [J]. *Nature Climate Change*, 2014, **4**(9): 817-821.
- [9] 张华, 王菲, 赵树云, 等. IPCC AR6 报告解读, 地球能量收支、气候反馈和气候敏感度 [J]. *气候变化研究进展*, 2021, **17**(6): 691-698.  
Zhang H, Wang F, Zhao S Y, *et al.* Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity [J]. *Climate Change Research*, 2021, **17**(6): 691-698.
- [10] Myhre G, Shindell D, Bréon F M, *et al.* Anthropogenic and natural radiative forcing [A]. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* (Eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [11] Dentener F, Stevenson D, Ellingsen K, *et al.* The global atmospheric environment for the next generation [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (11): 3586-3594.
- [12] Pozzoli L, Janssens-Maenhout G, Diehl T, *et al.* Re-analysis of tropospheric sulfate aerosol and ozone for the period 1980-2005 using the aerosol-chemistry-climate model ECHAM5-HAMMOZ [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11** (18): 9563-9594.
- [13] Dang R J, Liao H. Radiative forcing and health impact of aerosols and ozone in China as the consequence of Clean Air Actions over 2012-2017 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(21): 12511-12519.
- [14] 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 等. 我国对流层臭氧增加对气温的影响 [J]. *高原气象*, 2003, **22**(2): 132-142.  
Wu J, Jiang W M, Liu H N, *et al.* The effect of increased tropospheric ozone on temperature in China [J]. *Plateau Meteorology*, 2003, **22**(2): 132-142.
- [15] 王卫国, 吴润, 刘红年, 等. 中国及邻近地区污染排放对对流层臭氧变化与辐射影响的研究 [J]. *大气科学*, 2005, **29** (5): 734-746.  
Wang W G, Wu J, Liu H N, *et al.* Researches on the influence of pollution emission on tropospheric ozone variation and radiation over China and its adjacent area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2005, **29**(5): 734-746.
- [16] Fu Y, Liao H, Yang Y. Interannual and decadal changes in tropospheric ozone in China and the associated chemistry-climate interactions: a review [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, **36**(9): 975-993.
- [17] Xie B, Zhang H, Wang Z L, *et al.* A modeling study of effective

- radiative forcing and climate response due to tropospheric ozone [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, **33**(7): 819-828.
- [18] Roy C, Fadnavis S, Müller R, *et al.* Influence of enhanced Asian  $\text{NO}_x$  emissions on ozone in the upper troposphere and lower stratosphere in chemistry-climate model simulations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 1297-1311.
- [19] Li S, Wang T J, Zanits P, *et al.* Impact of tropospheric ozone on summer climate in China [J]. *Journal of Meteorological Research*, 2018, **32**(2): 279-287.
- [20] 蒲茜. 长三角高温热浪期间臭氧的形成机理及辐射效应研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- Pu X. Analysis of elevated ozone formation mechanism and radiative effect during heat waves in Yangtze River Delta [D]. Nanjing: Nanjing University, 2017.
- [21] 周彦丽. 东亚对流层  $\text{O}_3$  对夏季气温影响的数值模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2010.
- [22] Chang W Y, Liao H, Wang H J. Climate responses to direct radiative forcing of anthropogenic aerosols, tropospheric ozone, and long-lived greenhouse gases in Eastern China over 1951-2000 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, **26**(4): 748-762.
- [23] 石广玉. 大气微量气体的辐射强迫与温室气候效应[J]. *中国科学 B 辑*, 1991, **21**(7): 776-784.
- [24] 中国清洁空气政策伙伴. 中国碳中和与清洁空气协同路径[R]. 北京: 能源基金会, 2021.
- [25] Ma X D, Huang J P, Zhao T L, *et al.* Rapid increase in summer surface ozone over the North China Plain during 2013-2019: a side effect of particulate matter reduction control? [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(1): 1-16.
- [26] Li K, Jacob D J, Shen L, *et al.* Increases in surface ozone pollution in China from 2013 to 2019: anthropogenic and meteorological influences [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, **20**(19): 11423-11433.
- [27] Gong C, Liao H, Yue X, *et al.* Impacts of ozone-vegetation interactions on ozone pollution episodes in North China and the Yangtze River Delta [J]. *Geophysical Research Letters*, 2021, **48**(12), doi: 10.1029/2021GL093814.
- [28] 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.
- [29] Chapman E G, Gustafson W I J, Easter R C, *et al.* Coupling aerosol-cloud-radiative processes in the WRF-Chem model: investigating the radiative impact of elevated point sources [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(3): 945-964.
- [30] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, *et al.* MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory under the international collaboration framework of the MICS-Asia and HTAP [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(2): 935-963.
- [31] 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.
- [32] Wiedinmyer C, Akagi S K, Yokelson R J, *et al.* The Fire INventory from NCAR (FINN): a high resolution global model to estimate the emissions from open burning [J]. *Geoscientific Model Development*, 2011, **4**(3): 625-641.
- [33] Shao Y P. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109** (D10), doi: 10.1029/2003JD004372.
- [34] Gong S L, Barrie L A, Blanchet J P. Modeling sea-salt aerosols in the atmosphere: 1. Model development [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102** (D3): 3805-3818.
- [35] Zaveri R A, Peters L K. A new lumped structure photochemical mechanism for large-scale applications [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104** (D23): 30387-30415.
- [36] Wild O, Zhu X, Prather M J. Fast-J: accurate simulation of in- and below-cloud photolysis in tropospheric chemical models [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2000, **37**(3): 245-282.
- [37] Zaveri R A, Easter R C, Fast J D, *et al.* Model for simulating aerosol interactions and chemistry (MOSAIC) [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113** (D13), doi: 10.1029/2007JD008782.
- [38] Barnard J C, Fast J D, Paredes-Miranda G, *et al.* Technical note: evaluation of the WRF-Chem "aerosol chemical to aerosol optical properties" module using data from the MILAGRO campaign [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10** (15): 7325-7340.
- [39] Zhao C, Liu X, Leung L R, *et al.* Radiative impact of mineral dust on monsoon precipitation variability over West Africa [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(5): 1879-1893.
- [40] Chen L, Zhu J, Liao H, *et al.* Assessing the formation and evolution mechanisms of severe haze pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region using process analysis [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(16): 10845-10864.
- [41] Qian Y, Yan H P, Berg L K, *et al.* Assessing impacts of PBL and surface layer schemes in simulating the surface-atmosphere interactions and precipitation over the tropical ocean using observations from AMIE/DYNAMO [J]. *Journal of Climate*, 2016, **29**(22): 8191-8210.
- [42] Zheng G J, Duan F K, Su H, *et al.* Exploring the severe winter haze in Beijing: the impact of synoptic weather, regional transport and heterogeneous reactions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(6): 2969-2983.
- [43] Yahya K, Wang K, Gudoshava M, *et al.* Application of WRF/Chem over North America under the AQMEII phase 2: part I. Comprehensive evaluation of 2006 simulation [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **115**(40): 733-755.
- [44] Zhang Y, Wen X Y, Jang C J. Simulating chemistry-aerosol-cloud-radiation-climate feedbacks over the continental U. S. using the online-coupled Weather Research Forecasting Model with Chemistry (WRF/Chem) [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(29): 3568-3582.
- [45] Gao Y, Zhang M, Liu Z, *et al.* Modeling the feedback between aerosol and meteorological variables in the atmospheric boundary layer during a severe fog-haze event over the North China Plain [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(8): 4279-4295.
- [46] 廖礼, 漏嗣佳, 符瑜, 等. 中国东部气溶胶在天气尺度上的辐射强迫和对地面气温的影响 [J]. *大气科学*, 2015, **39** (1): 68-82.
- Liao L, Lou S J, Fu Y, *et al.* Radiative forcing of aerosols and its impact on surface air temperature on synoptic scale in Eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2015, **39** (1): 68-82.
- [47] Qiu Y L, Liao H, Zhang R J, *et al.* Simulated impacts of direct radiative effects of scattering and absorbing aerosols on surface layer aerosol concentrations in China during a heavily polluted event in February 2014 [J]. *Journal of Geophysical Research:*

- Atmospheres, 2017, **122**(11): 5955-5975.
- [48] Yang H, Chen L, Liao H, *et al.* Impacts of aerosol-photolysis interaction and aerosol-radiation feedback on surface-layer ozone in North China during multi-pollutant air pollution episodes[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2022, **22**(6): 4101-4116.
- [49] Hu J L, Chen J J, Ying Q, *et al.* One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2016, **16**(16): 10333-10350.
- [50] Wang P F, Qiao X, Zhang H L. Modeling PM<sub>2.5</sub> and O<sub>3</sub> with aerosol feedbacks using WRF/Chem over the Sichuan Basin, southwestern China[J]. Chemosphere, 2020, **254**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126735.
- [51] Zhang Y X, Dubey M K. Comparisons of WRF/Chem simulated O<sub>3</sub> concentrations in Mexico City with ground-based RAMA measurements during the MILAGRO period[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(30): 4622-4631.
- [52] 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.

## 《环境科学》多项引证指标名列前茅

2022年12月29日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上发布了2021年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2021年度总被引频次13 744,影响因子3.317,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                 |                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Assessing the Environmental and Health Co-benefits of Accelerated Energy Transition and Industrial Restructuring: A Case Study of the BTHS Region .....                                         | YANG Xi, SUN Yi-sheng, CHANG Shi-yan, <i>et al.</i> (3627)         |
| Synergistic Paths of Reduced Pollution and Carbon Emissions Based on Different Power Demands in China .....                                                                                     | XIANG Meng-yu, WANG Shen, LÜ Lian-hong, <i>et al.</i> (3637)       |
| Evaluation Method and Application for Urban Carbon Peaking & Neutrality Performance .....                                                                                                       | ZHANG Bao-liu, BAI Zi-han, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (3649)         |
| Revealing Driving Factors of Urban O <sub>3</sub> Based on Explainable Machine Learning .....                                                                                                   | DONG Jia-qi, HU Dong-mei, YAN Yu-long, <i>et al.</i> (3660)        |
| Sensitivity Analysis of Ozone Formation Using Response Surface Methodology .....                                                                                                                | ZHU Yu-huan, CHEN Bing, ZHANG Ya-ru, <i>et al.</i> (3669)          |
| Analysis of O <sub>3</sub> Sources in Yulin City in Summer Based on WRF-CMAQ/ISAM Model .....                                                                                                   | WANG Yi-fan, TONG Ji-long, CHEN Yu-xiang, <i>et al.</i> (3676)     |
| Atmospheric Ozone Concentration Prediction in Nanjing Based on LightGBM .....                                                                                                                   | ZHU Jia-ying, AN Jun-lin, FENG Yue-zheng, <i>et al.</i> (3685)     |
| Meteorological Formation Mechanisms and Potential Sources of an Ozone Pollution Process in Winter of 2022 in Guangdong Province .....                                                           | LI Ting-yuan, CHEN Jing-yang, GONG Yu, <i>et al.</i> (3695)        |
| Impact of Summer Tropospheric Ozone Radiative Forcing on Meteorology and Air Quality in North China .....                                                                                       | DU Nan, CHEN Lei, LIAO Hong, <i>et al.</i> (3705)                  |
| Identification of Impacts from Meteorology and Local and Transported Photochemical Generation on Ozone Trends in Changsha from 2018 to 2020 .....                                               | YANG Jun, YANG Lei-feng, DING Hua, <i>et al.</i> (3715)            |
| Spatio-temporal Variation and Multi-dimensional Detection of Driving Mechanism of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration from 2000 to 2021 .....          | XU Yong, GUO Zhen-dong, ZHENG Zhi-wei, <i>et al.</i> (3724)        |
| Estimation of PM <sub>2.5</sub> Hourly Concentration in Sichuan Province Based on GTWR-XGBoost Model .....                                                                                      | WU Di, DU Ning, WANG Li, <i>et al.</i> (3738)                      |
| Transmission and Growth Characteristics of Severe PM <sub>2.5</sub> Pollution Events from 2013 to 2021 in Xingtai, Hebei .....                                                                  | JIANG Qi, SHENG Li, JIN Yu-chen, <i>et al.</i> (3749)              |
| Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Urban Shanghai During Cold Season Based on High Time-resolution Measurements of Organic Molecular Markers .....        | ZHU Shu-hui (3760)                                                 |
| Emission Factors of Carbonaceous Aerosol and Stable Carbon Isotope for In-use Vehicles .....                                                                                                    | YU Ming-yuan, WANG Qian, FU Ming-liang, <i>et al.</i> (3771)       |
| Composition Characteristics of Volatile Organic Compounds and Associated Contributions to Secondary Pollution in Shenyang Industrial Area in Summer .....                                       | GUAN Lu, SU Cong-cong, KU Ying-ying, <i>et al.</i> (3779)          |
| Characteristics of VOCs and Assessment of Emission Reduction Effect During the Epidemic Lockdown Period in Shenzhen Urban Area .....                                                            | YUN Long, LIN Chu-xiong, LI Cheng-liu, <i>et al.</i> (3788)        |
| Characteristics of Organic Matter Composition and Oxidation Potential in Road Dust in Winter in Xi'an .....                                                                                     | WANG Qing-wen, CHEN Qing-cai, WANG Chao, <i>et al.</i> (3797)      |
| Contamination Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Compounds in Surface Dust of Suntuan Mining Area in Huaibei .....                                                      | XU Zhen-peng, QIAN Ya-hui, HONG Xiu-ping, <i>et al.</i> (3809)     |
| Spatial-temporal Variation in Water Quality and Its Response to Precipitation and Land Use in Baiyangdian Lake in the Early Stage of the Construction of Xiong'an New Area .....                | WANG Zi-ming, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (3820)                    |
| Simulation of Pollution Apportionment and Optimization of Control Methods in Watershed Scale: A Case Study of the Shun'an Watershed in Tongling City .....                                      | LIU Guo-wangchen, CHEN Lei, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (3835)        |
| Evaluation of Shallow Groundwater Quality and Optimization of Monitoring Indicators in Nanchang .....                                                                                           | ZHENG Zi-yin, CHU Xiao-dong, XU Jin-ying, <i>et al.</i> (3846)     |
| Hydrogen and Oxygen Isotopic Characteristics and Influencing Factors of "Three Waters" in Shandian River Basin .....                                                                            | YANG Li-na, JIA De-bin, GAO Rui-zhong, <i>et al.</i> (3855)        |
| Distribution Characteristics and Influencing Factors of Abundant and Rare Planktonic Microeukaryotes in Jinsha River .....                                                                      | YAN Bing-cheng, CUI Ge, SUN Sheng-hao, <i>et al.</i> (3864)        |
| Bacterial Community Diversity in Channel Sediments of Different Disturbance Sections of the Jialing River .....                                                                                 | ZHU Lan-ping, ZHANG Tuo, LI Jia-ning, <i>et al.</i> (3872)         |
| Effects of Reservoir Water Depth on Different Plankton Communities and Keystone Species of Network Interaction .....                                                                            | WANG Xun, LIAO Qin, WANG Pei-fang, <i>et al.</i> (3881)            |
| Correlation Between the Diversity Characteristics of Groundwater Bacterial Community and Environmental Factors in Typical Industrial Areas .....                                                | WU Jian-qiang, ZHANG Shu-yuan, WANG Min, <i>et al.</i> (3892)      |
| Effects of Fertilizer Application Strategy Adjustments on Nitrogen and Phosphorus Loss from Typical Crop Systems in Taihu Lake Region .....                                                     | YU Ying-liang, WANG Yi-zhi, YANG Bei, <i>et al.</i> (3902)         |
| Estimation of Cropland Nitrogen Runoff Loss Loads in the Yangtze River Basin Based on the Machine Learning Approaches .....                                                                     | ZHANG Yu-fu, PAN Zhe-qi, CHEN Ding-jiang (3913)                    |
| Classification and Identification of Non-point Source Nitrogen Pollution in Surface Flow of the Shangwu River Watershed in the Qiandao Lake Region .....                                        | YU Ke, YAN Yan, TANG Zhang-xuan, <i>et al.</i> (3923)              |
| Spatial Distribution of Nitrogen and Phosphorus Nutrients in the Main Stream and Typical Tributaries of Tuojiang River and Fujiang River .....                                                  | LI Zi-yang, ZHOU Ming-hua, XU Peng, <i>et al.</i> (3933)           |
| Sediment Pollution and Dredging Effect of Waqinhuai River .....                                                                                                                                 | ZHANG Mu, REN Zeng-yi, ZHANG Man, <i>et al.</i> (3945)             |
| Critical Review on Environmental Occurrence and Photochemical Behavior of Substituted Polycyclic Aromatic Hydrocarbons .....                                                                    | GE Lin-ke, WANG Zi-yu, CAO Sheng-kai, <i>et al.</i> (3957)         |
| Cadmium and Arsenic Interactions During Co-adsorption onto Goethite .....                                                                                                                       | SU Zi-xian, LIU Sai-hong, GUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (3970)       |
| Preparation of Catalyst Cyclodextrin-Fe-TAML to Activate H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> and Oxidize Organic Micropollutants in Water .....                                                       | LIU Qing-quan, CAI Ben-zhe, CAI Xi-yun (3978)                      |
| Performance and Reaction Mechanism of Co(II) Mediated Activation of Peroxymonosulfate for Degrading Nitrilotris (Methylene Phosphonic Acid) .....                                               | ZHU Jing-lin, WANG Shu (3990)                                      |
| Change in Granulation Potential and Microbial Enrichment Characteristics of Sludge Induced by Microplastics .....                                                                               | XIE Qing-fan, YU Nan, ZHANG Ni, <i>et al.</i> (3997)               |
| Accumulation Characteristics and Probabilistic Risk Assessment of Cd in Agricultural Soils Across China .....                                                                                   | WANG Jing, WEI Heng, PAN Bo (4006)                                 |
| Source Analysis and Pollution Assessment of Soil Heavy Metals in Typical Geological High Background Area in Southeastern Chongqing .....                                                        | JIANG Yu-lian, YU Jing, WANG Rui, <i>et al.</i> (4017)             |
| Integrated Analysis on Source-exposure Risk of Heavy Metals in Farmland Soil Based on PMF Model: A Case Study in the E-waste Dismantling Area in Zhejiang Province .....                        | FANG Jia, HE Ying, HUANG Nai-tao, <i>et al.</i> (4027)             |
| Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Farmland Soil and Crops in the Suburbs of Urumqi .....                                                     | FAN Yue, CAO Shuang-yu, Nuerla Ailijiang, <i>et al.</i> (4039)     |
| Distribution and Driving Mechanisms of Antibiotic Resistance Genes in Desert-Oasis Continuum .....                                                                                              | HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yidan, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4052)   |
| Characteristics of Antibiotic Contamination of Soil in China in Past Fifteen Years and the Bioremediation Technology: A Review .....                                                            | ZHAO Xiao-dong, QIAO Qing-qing, QIN Xiao-rui, <i>et al.</i> (4059) |
| Modified Biochar for Remediation of Soil Contaminated with Arsenic and Cadmium: A Review .....                                                                                                  | LÜ Peng, LI Lian-fang, HUANG Xiao-ya (4077)                        |
| Effect of Biogas Slurry Return to Field on Heavy Metal Accumulation in Soil-crop System: A Meta-analysis .....                                                                                  | ZHAO Qi-zhi, YANG Zhi-min, KONG Fan-jing, <i>et al.</i> (4091)     |
| Remediation Effect of Two Iron-modified Biochars on Slightly Alkaline Arsenic and Cadmium Contaminated Soil .....                                                                               | LIANG Xin-ran, HE Dan, ZHENG Zhao-hua, <i>et al.</i> (4100)        |
| Effects of Straw Removal Measure on Soil Cd Bioavailability and Rice Cd Accumulation .....                                                                                                      | WANG Zi-yu, ZHOU Hang, ZHOU Kun-hua, <i>et al.</i> (4109)          |
| Application of Desulphurized Gypsum with Straw to Improve Physicochemical Properties of Saline-alkali Land in Yellow River Delta .....                                                          | ZHAO Hui-li, YU Jin-yi, LIU Tao, <i>et al.</i> (4119)              |
| Biological Evaluation and Key Stress Factor Diagnosis of Compound Contaminated Soil Based on Environmental DNA .....                                                                            | HUANG Xiang-yun, ZHONG Wen-jun, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4130)  |
| Comprehensive Quality Assessment of Soil-Maize Heavy Metals in High Geological Background Area .....                                                                                            | ZHANG Chuan-hua, WANG Zhong-shu, LIU Li, <i>et al.</i> (4142)      |
| Ecological Risk and Health Risk of Heavy Metal Pollution in Vegetable Production System of Zhejiang Province .....                                                                              | ZHANG Shu-min, LIU Cui-ling, YANG Gui-ling, <i>et al.</i> (4151)   |
| Effect of Biochar with Phosphorus Fertilizer on Soil Nutrients, Enzyme Activity, and Nutrient Uptake of <i>Alfalfa</i> .....                                                                    | LIU Xin-yu, WANG Dong-mei, ZHANG Ze-zhou, <i>et al.</i> (4162)     |
| Effects of Low-density Polyethylene Microplastics on the Growth and Physiology Characteristics of <i>Ipomoea aquatica</i> Forsk .....                                                           | ZHOU Ying, JIANG Wen-ting, LIU Xun-jie, <i>et al.</i> (4170)       |
| Effects of Biogas Slurry Application on Soil Microbial Communities Structure and Function During Wheat-rice Stubble Period .....                                                                | QIAO Yu-ying, XI Hui, LI Na, <i>et al.</i> (4179)                  |
| Analysis of Soil Bacterial Community Structure and Ecological Function Characteristics in Different Pollution Levels of Lead-zinc Tailings in Datong .....                                      | LIU Ze-xun, ZHUANG Jia-yao, LIU Chao, <i>et al.</i> (4191)         |
| Effect of Fire-deposited Charcoal on Soil Organic Carbon Pools and Associated Enzyme Activities in a Recently Harvested <i>Pinus massoniana</i> Plantation Subjected to Broadcast Burning ..... | YAO Zhi, JIAO Peng-yu, WU Xiao-sheng, <i>et al.</i> (4201)         |