环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第44卷 第4期
2023年4月15日

目 次

气候变化对中国夏季臭氧影响 …… 胡安琪, 谢晓栋, 龚康佳, 侯宇晖, 胡建林 (1801)
基于EOF分解和KZ滤波的2019~2021年中国臭氧时空变化及驱动因素分析 …… 王浩琪, 张裕芬, 罗忠伟, 王艳阳, 戴启立, 毕晓辉, 吴建会, 冯银厂 (1811)
华北工业城市夏季大气臭氧生成机制及减排策略 …… 郑镇森, 窦建平, 张国涛, 李丽明, 徐勃, 杨文, 白志鹏 (1821)
2015~2020年中国城市$PM_{2.5}$-O_3复合污染时空演变特征 …… 牛笑笑, 钟艳梅, 杨璐, 易嘉慧, 慕航, 吴倩, 洪松, 何超 (1830)
2015~2021年京津冀及周边地区$PM_{2.5}$和臭氧复合污染时空特征分析 …… 宋小涵, 燕丽, 刘伟, 贺晋瑜, 王亚晨, 黄同林, 李园园, 陈敏, 孟静静, 侯战方 (1841)
2000~2020年中国典型经济区$PM_{2.5}$时空变化及其与植被景观格局的关系 …… 徐勇, 李欣怡, 黄雯婷, 郭振东, 盘钰春, 郑志威, 戴强玉 (1852)
北京市核心区冬春季大气离子沉降量特征及来源解析 …… 赵宇, 李贝贝, 黄玉虎, 梁静, 杨洪玲, 秦建平, 朱玲 (1865)
南京近郊农田大气颗粒物及金属干沉降输入特征 …… 刘翠英, 靳浩, 樊建凌 (1873)
西安冬季$PM_{2.5}$中不同极性水溶性有机物的污染特征及氧化潜势 …… 罗玉, 黄沙沙, 张甜, 孙健, 沈振兴 (1882)
机动车源和民用燃料源颗粒物中有机碳和元素碳的排放特征 …… 王红磊, 刘思晗, 孙杰娟, 刘焕武, 赵天良, 裴宇儇, 可玥, 武自豪, 刘诗云 (1890)
伊犁河谷核心区春季$PM_{2.5}$组分特征及来源解析 …… 谷超, 徐涛, 马超, 伊布提哈尔·加帕尔, 郭丽瑶, 李新琪, 杨文 (1899)
基于高空间分辨网格的郑州市城镇居民$PM_{2.5}$暴露浓度与健康风险变化评估 …… 李媛, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 王申博, 王克, 张瑞芹 (1911)
基于多源数据融合的河南省建材行业排放清单 …… 刘晓, 胡京南, 王红梅, 杨丽, 张皓 (1924)
开封市城区冬季大气挥发性有机物污染特征及来源解析 …… 施雨其, 郑凯允, 丁玮婷, 刘金平, 陈洪光, 高光, 王玲玲, 王楠, 马双良, 郑瑶, 谢绍东 (1933)
2020年和2021年南京城区臭氧生成敏感性和VOCs来源变化分析 …… 陆晓波, 王鸣, 丁峰, 喻义勇, 张哲海, 胡崑 (1943)
北京市城区夏季大气VOCs变化特征及臭氧生成潜势 …… 张蕊, 孙雪松, 王裕, 王飞, 罗志云 (1954)
青岛市臭氧污染与非污染期间VOCs化学特征及来源解析 …… 贾智海, 顾瑶, 孔翠丽, 宋江邦, 孟赫, 石来元, 吴建会, 刘保双 (1962)
基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季O_3生成特征 …… 俞辉, 韦娜娜, 徐学哲, 刘芊芊, 姚易辰, 赵卫雄, 张为俊 (1974)
“大气十条”政策的节能降碳效果评估与创新中介效应 …… 李少林, 王齐齐 (1985)
北京市减污降碳协同控制情景模拟和效应评估 …… 俞珊, 张双, 张增杰, 瞿艳芝, 刘桐珅 (1998)
基于不同排放清单的长三角人为CO_2排放模拟 …… 马心怡, 黄文晶, 胡凝, 肖薇, 胡诚, 张弥, 曹畅, 赵佳玉 (2009)
武汉汉江水源地水质变化趋势及风险分析 …… 卓海华, 娄保锋, 徐杰, 陈洁, 陈杰, 兰秀薇, 范文重, 欧阳雪姣, 兰静 (2022)
长江武汉段水源地典型抗生素及抗性基因污染特征与生态风险评价 …… 李柏林, 张贺, 王俊, 沙雪妮, 陈晓飞, 卓海华 (2032)
陕北矿区典型河流多环芳烃的赋存特征、来源及毒性风险分析 …… 吴喜军, 董颖, 赵健, 刘静, 张亚宁 (2040)
典型湖泊有机聚集体时空特征及驱动因子 …… 谢贵娟, 龚伊, 朱富成, 刘昌利, 卢宝伟, 邓辉, 汤祥明 (2052)
桂林市不同功能型公园水体微塑料的分布特征及风险评估 …… 李沛钊, 吴莉, 黄菲菲, 林才霞, 舒小华, 张倩 (2062)
长江流域浮游植物群落的环境驱动及生态评价 …… 张静, 胡愈炘, 胡圣, 黄杰 (2072)
环境异质性对三峡库区支流香溪河附石硅藻群落的影响及驱动作用 …… 纪璐璐, 赵璐, 欧阳添, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李玉鑫, 李佳欣, 施军琼, 吴忠兴 (2083)
武汉市3种类型湖泊浮游植物群落特点及关键影响因子 …… 张浩坤, 闵奋力, 崔慧荣, 彭雪, 张心怡, 张淑娴, 李竹栖, 葛芳杰, 张璐, 吴振斌, 刘碧云 (2093)
重金属污染对不同生境中微生物群落结构的影响 …… 何一凡, 肖新宗, 王佳文 (2103)
亳清河水体细菌群落的结构和分布特征 …… 王森, 陈建文, 张红, 李君剑 (2113)
微塑料暴露对小棒短指软珊瑚(*Sinularia microclavata*)共附生细菌群落结构和功能的影响 …… 刘敏, 车文学, 曾映旭, 边伟杰, 吕淑果, 穆军 (2122)
上海市从源头到龙头的饮用水新型污染物分布特征及健康风险评价 …… 严棋 (2136)
铝锆改性生物炭对水体低浓度氟的吸附特性 …… 刘艳芳, 高玮, 刘蕊, 尹思婕, 张妙雨, 刘晓帅, 李再兴 (2147)
典型雌激素在微塑料上的吸附特征及位点能量分布 …… 刘姜艳, 郑密密, 胡嘉梧, 柳王荣, 贺德春, 潘杰 (2158)
面向工业园区废水臭氧氧化深度处理性能评价的模型污染物选择与评估 …… 辛勃, 单超, 吕路 (2168)
基于地理探测器和多源数据的耕地土壤重金属来源驱动因子及其交互作用识别 …… 张宏泽, 崔文刚, 刘绥华, 崔瀚文, 黄月美 (2177)
基于APCS-MLR和PMF模型的煤矸山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析 …… 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵 (2192)
基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估 …… 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳 (2204)
基于BP神经网络预测北京市加油站周边土壤多环芳烃含量 … 马赛炎, 魏海英, 马瑾, 刘奇缘, 吴颐杭, 屈雅静, 田雨欣, 赵文浩 (2215)
石家庄市土壤中喹诺酮类抗生素时空分布及其风险评估 …… 赵鑫宇, 陈慧, 赵波, 宋圆梦, 卢梦淇, 崔建升, 张璐璐, 李双江 (2223)
典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险 …… 邓帅, 段佳辉, 宁墨奂, 谭林, 蒲刚, 陈际行, 齐小兵, 蒋尚智, 谢桃园, 刘意章 (2234)
岩溶区不同母质土壤Cd地球化学特征及玉米籽实Cd含量预测 …… 戴亮亮, 徐宏根, 巩浩, 彭志刚, 肖凯琦, 吴欢欢, 许青阳, 郭军, 汤媛媛, 张俊 (2243)
龙岩市不同利用类型土壤及农作物Pb、Cd和As污染风险与贡献分析 …… 王蕊, 陈楠, 张二喜 (2252)
小麦籽粒镉含量影响因素Meta分析和决策树分析 …… 刘娜, 张少斌, 郭欣宇, 宁瑞艳 (2265)
黄土高原次生林演替过程土壤有机碳库及其化学组成响应特征 …… 刘涵宇, 刘颖异, 张琦, 封伦, 高起乾, 任成杰, 韩新辉 (2275)
短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响 …… 江原, 甘小玲, 曹丰丰, 赵传燕, 李伟斌 (2283)
黄河源区斑块化退化高寒草甸土壤微生物多样性对长期封育的响应 …… 杨鹏年, 李希来, 李成一, 段成伟 (2293)
不同海拔鬼箭锦鸡儿根际和非根际土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测 …… 李媛媛, 徐婷婷, 艾喆, 魏庐潞, 马飞 (2304)
模拟酸雨及氮沉降对马尾松林土壤细菌群落结构及其多样性的影响 …… 王楠, 钱少郁, 潘小承, 陈一磊, 白尚斌, 徐飞 (2315)
磷石膏和碱蓬对盐渍化土壤水盐及细菌群落结构的影响 …… 刘月, 杨树青, 张万锋, 娄帅 (2325)
菌渣与化肥配施对稻田土壤微生物群落组成及多样性的影响 …… 耿和田, 王旭东, 石思博, 叶正钱, 周文晶 (2338)
增氧对不同秸秆还田稻田田面水养分动态及温室气体排放的影响 …… 胡锦辉, 薛利红, 钱聪, 薛利祥, 曹帅 (2348)
外源褪黑素对锑胁迫下水稻幼苗生长和抗氧化系统的影响 …… 储玉檀, 李颜, 黄益宗, 保琼莉, 孙红羽, 黄永春 (2356)
面向2035的节能与新能源汽车全生命周期碳排放预测评价 …… 付佩, 兰利波, 陈颖, 郝卓, 邢云翔, 蔡旭, 张春梅, 陈轶嵩 (2365)
农田土壤微塑料分布、来源和行为特征 …… 薄录吉, 李冰, 张凯, 马荣辉, 李彦, 王艳芹, 孙斌, 刘月岩 (2375)
农田土壤除草剂污染的修复技术研究进展 …… 胡芳雨, 安婧, 王宝玉, 徐明恺, 张惠文, 魏树和 (2384)
我国黑土地农田土壤除草剂残留特征研究及展望 … 李睿, 吴秋梅, 赵归梅, 胡文友, 田康, 黄标, 吴祥为, 刘峰, 赵玉国, 赵永存 (2395)
《环境科学》征订启事(1910) 《环境科学》征稿简则(1984) 信息(2167, 2191, 2324)

Eco-Environmental Knowledge Web
环 境 科 学
Environmental Science
第44卷第4期 2023年4月
Vol.44,No.4 Apr.,2023

基于总过氧自由基观测研究合肥市西郊夏季 O_3 生成特征

俞辉[1,2]，韦娜娜[1]，徐学哲[1]，刘芊芊[2,3]，姚易辰[1,2]，赵卫雄[1*]，张为俊[1,3]
(1. 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所，合肥 230031；2. 中国科学技术大学研究生院科学岛分院，合肥 230026；3. 中国科学技术大学环境科学与光电技术学院，合肥 230026)

摘要：2020 年 8 月利用化学放大法对合肥市西郊大气总过氧自由基RO_2^*·（RO_2· + HO_2·）体积分数进行监测，并结合 O_3 和其前体物，分析了过氧自由基体积分数、O_3 生成速率和 O_3 生成对前体物的敏感性. 结果表明，观测期间总过氧自由基体积分数的日均值呈典型的单峰型变化，12:00 左右出现最高值，日间峰值体积分数为 43.8×10^{-12}，日间 RO_2^*· 与太阳辐射强度、温度和 O_3 呈明显的相关性. 利用实测 RO_2^*· 和 NO，获得合肥市西郊夏季 O_3 生成速率，日间峰值为 $10.6\times10^{-9}\,h^{-1}$，$O_3$ 生成速率对 NO 变化更为敏感. 基于大气自由基和 NO_x（NO + NO_2）反应去除速率占比（Ln/Q），对合肥市西郊夏季 O_3 生成敏感进行了分析，结果显示 O_3 生成敏感具有明显日变化. 早晨 O_3 生成为 VOCs 控制区，上午 O_3 生成为 VOCs-NO_x 协同控制区，下午转变为 NO_x 控制区.

关键词：臭氧（O_3）；总过氧自由基（RO_2^*·）；臭氧生成速率；臭氧生成敏感性；合肥市西郊夏季
中图分类号：X515 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2023)04-1974-11 **DOI**：10.13227/j.hjkx.202206116

Characteristics of O_3 Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical

YU Hui[1,2], WEI Na-na[1], XU Xue-zhe[1], LIU Qian-qian[2,3], YAO Yi-chen[1,2], ZHAO Wei-xiong[1*], ZHANG Wei-jun[1,3]
(1. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Heifei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China; 2. Science Island Branch, Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3. School of Environmental Science and Optoelectronics Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In August 2020, the observations of total peroxy radical concentrations were carried out in the western suburb site of Hefei using a peroxy radical chemical amplifier (PERCA) instrument. The ozone production and its sensitivity were characterized with the measured O_3 and its precursors. The results showed that the daily variation in total peroxy radical concentrations exhibited an obvious convex tend, with the highest value at approximately 12:00; the average peak peroxy radical concentration was 43.8×10^{-12}; and the concentrations of the peroxy radical and ozone were driven by strong solar radiation and high temperature. The photochemical ozone production rate could be determined with peroxy radical and NO concentration. The average ozone peak production rate in summer was $10.6\times10^{-9}\ h^{-1}$, which was more sensitive to NO concentration. Based on the ratio of the radical loss rate due to reactions with NO_x to the radical loss rate (Ln/Q), the characteristics of O_3 production in the western suburb of Hefei in summer were analyzed. The results showed that O_3 production sensitivity varied greatly during the day. The summer O_3 production regime shifted from the VOC-sensitive chemistry in the early morning to NO_x-sensitive chemistry in the afternoon, and this regime transition typically occurred in the morning.

Key words: ozone(O_3); total peroxy radical(RO_2^*·); ozone production rate; sensitivity of ozone generation; summer in the western suburb of Hefei

臭氧（O_3）是由挥发性有机物（volatile organic compounds，VOCs）和氮氧化物（nitrogen oxides，NO_x）在太阳光照射下发生光化学反应的产物，是典型的二次污染物. 当对流层 O_3 特别是近地面 O_3 超过自然水平时，会对人体健康[1]、生态系统[2]和气候变化[3]等方面产生显著影响. 近年来，中国近地面 O_3 污染问题日益凸显[4,5]，尤其是京津冀[6]、长三角[7]、珠三角[8]和成渝地区[9]. 近地层的 O_3 积累形成主要受其前体物排放、化学转化和气象驱动的共同作用. 而造成 O_3 积累的主要化学机制是过氧自由基（RO_2· 和HO_2·）和 NO 反应生成的 NO_2 光解，产生 O_3，打破大气中的 O_3 和 NO_x 光化学平衡，造成 O_3 的净生成[10].

RO_x·（RO_2· + HO_2· + ·OH + RO·）主导的氧化过程导致了一次污染物的去除和二次污染物生成[11]，根据大气自由基与 NO_x 反应去除速率占比，可将 O_3 生成分为 NO_x控制区、VOCs 控制区和过渡区[12,13]. 在 NO_x 控制区，相对较低的 NO_x 下，过氧自由基主要通过自由基之间的反应去除，NO_x 的减少会导致 O_3 的减少；而在 VOCs 控制区，过氧自由基主要通过与 NO_x 的反应去除，NO_x 的减少实际上会增加 O_3 的产生. 目前，京津冀、长三角和珠三角等

收稿日期：2022-06-10；**修订日期**：2022-07-16
基金项目：国家自然科学基金项目（U21A2028，42022051，41905118，21876177）；中国科学院青年创新促进会项目（Y202089）；合肥研究院院长基金项目（YZJJ202101，BJPY2019B02）；大气重污染成因与治理攻关项目（DQGG202117）
作者简介：俞辉（1993～），男，博士研究生，主要研究方向为大气过氧自由基测量，E-mail:1755614257@qq.com
* 通信作者，E-mail:wxzhao@aiofm.ac.cn

地区已经开展的外场研究表明，我国大部分城市都属于 VOCs 控制区；在乡村和郊区等地区，O_3 生成多属于 NO_x 控制区或过渡区[14~16]. O_3 生成敏感性存在明显的时空分布规律和地区差异[17]. 文献[18, 19]研究发现 O_3 生成敏感性存在明显日变化特征，早晨，光化学反应较弱，自由基含量较低，O_3 生成主要由 VOCs 控制；而下午光化学反应较为强烈，NO_x 被快速消耗，逐渐转变为由 NO_x-VOCs 共同控制或者由 NO_x 控制. 因此自由基是大气 O_3 污染的驱动力，厘清大气自由基化学是理解区域 O_3 污染成因的关键.

合肥位于安徽中部、江淮分水岭南侧，属于长三角城市群. 目前，针对合肥市 O_3 污染成因开展的研究较少. 本文主要基于化学放大法，在线测量合肥市城郊区域夏季大气总过氧自由基，分析了大气 RO_2^*· 水平和影响因素，并结合大气 O_3 及其前体物对 O_3 生成速率进行了研究，分析了大气 O_3 及其前体物污染特征，以及 O_3 生成速率和 O_3 生成对其前体物的敏感性.

1　材料与方法

1.1　观测地点与观测时间

观测地点位于安徽省合肥市西郊董铺水库科学岛（北纬 31°54′19″N，东经 117°09′43″E）距合肥市中心约 10 km，站点周围以科研办公区为主，属于典型的城郊站点，图 1 所示为观测站点位置. 观测时间为 2020 年 8 月 20 ~ 30 日，属于夏季气象特征.

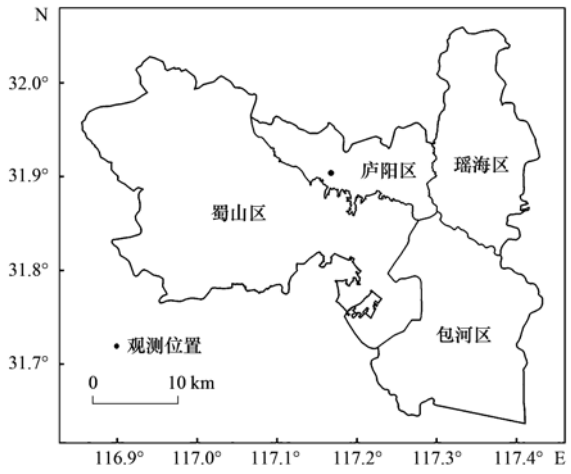


图 1　观测站点位置示意

Fig. 1　Location of the measurement site

1.2　观测方法

1.2.1　过氧自由基测量

过氧自由基测量是基于化学放大法（peroxy radical chemical amplifier，PERCA）和宽带腔增强吸收光谱技术（broadband cavity-enhanced absorption spectroscopy，BBCEAS）相结合，实现对过氧自由基实时和在线测量，测量装置见文献[20 ~ 22]，在时间分辨率 21 s 下，$\varphi(RO_2^*\cdot)$ 探测限可达 0.4×10^{-12}，测量不确定度为 20%. 该测量装置主要由两部分组成，第一部分是化学反应腔用来将过氧自由基通过化学放大反应转化为 NO_2. 它是利用过氧自由基与过量的 CO 和 NO 发生化学循环放大反应，将 $HO_2\cdot$ 和 $RO_2\cdot$ 转化为高 NO_2 的信号. 化学反应腔包括两个通道，一个为反应通道，用来发生化学放大转化反应；另一个是参考通道，用来测量 NO_2 背景信号. 第二部分是两台宽带腔增强二氧化氮监测仪（BBCEAS-NO_2），分别用来测量反应通道和参考通道中 NO_2，因此总的过氧自由基的 $RO_2^*\cdot$ 可由以下公式(1)获得：

$$[RO_2^*\cdot] = [HO_2\cdot] + \sum[RO_2\cdot] = \Delta[NO_2]/CL \tag{1}$$

式中，$\Delta[NO_2]$ 为反应通道与参考通道 NO_2 之差即化学放大反应生成的 NO_2，CL 为化学放大链长（chain length），即循环反应的次数.

NO_2 测量和 CL 是过氧自由基测量的关键参数. 为确保 $RO_2^*\cdot$ 准确测量，监测过程中严格执行质量保证和质量控制，每周对 BBCEAS-NO_2 监测仪和 CL 进行标校，标校方法见文献[20]. 观测期间标校 CL 平均值为 70 ± 10.

1.2.2　VOCs 采样与分析

VOCs 采样于安徽光学精密机械研究所 1 号楼 7 楼楼顶. 采用内表面硅烷化处理的苏玛罐（3.2 L，Entech，美国）采集环境空气样品. 苏玛罐配套使用限流阀（CS1200E 系列，Entech，美国）和罐采样计时器（TM1200，Entech，美国）均速采样，采样流速为 46.4 mL·min^{-1}. 具体采样频率为日间（07:00 ~ 19:00）采样间隔 1 h；夜间（19:00 ~ 07:00）采样间隔 3 h；每天共计 16 个样品.

苏玛罐采集的 VOCs 样品分析按照《环境空气挥发性有机物的测定罐采样/气相色谱-质谱法》（HJ 759-2015）执行[23]，采用预浓缩（Entech 7200，美国）和气相色谱质谱联用仪（Thermo TSQ 9000，美国）系统对样品中的 VOCs 进行定量分析，样品首先经预浓缩系统处理后进入分析系统，通过中心切割技术（dean-switch），使得不同的物种通过不同的检测器检测，其中乙烷、乙烯和乙炔在火焰离子化检测器（flame ionization detector，FID）上检测，其余目标化合物在质谱（mass spectrometry，MS）检测器上检测. FID 色谱柱的型号为 TG BOND Q +（30 m × 0.32 mm × 10 μm），MS 色谱柱的型号为 TG-

624SilM(30 m×0.53 mm×3.0 μm). MS 用全扫描模式分析,目标化合物由色谱保留时间和 MS 图进行定性,通过内标法定量. 分析了 116 种 VOCs,其中包括烷烃 29 种、烯烃 11 种、炔烃 1 种、芳香烃 18 种、含氧挥发性有机物(oxygenated volatile organic compounds,OVOCs)19 种、卤代烃 35 种、二硫化碳、四氢呋喃和 1,4-二噁烷.

1.2.3 气象参数和大气常规污染物测量

采样位置的环境温度、相对湿度、风向风速、太阳总辐射(total solar irradiance,TSI)、O_3、NO_2、SO_2 和 CO 的数据来自合肥董铺水库国控环境空气质量自动监测站(位于安光所主楼,距观测地面约 18 m),O_3、NO_2、SO_2 和 CO 分别利用美国热电公司 49i、42i、43i 和 43C 型号分析仪测量得到;数据时间分辨率均为 1 h.

1.3 数据处理方法

1.3.1 O_3 生成速率测量

O_3 光化学产生的主要来源是 NO_2 的光解[10]. 在清洁的大气环境下,O_3、NO_2 和 NO 存在稳定的动态平衡关系,光化学反应过程为:

$$NO_2 + h\nu\ (\lambda < 420\ nm) \longrightarrow NO + O(^3P) \quad (2)$$

$$O(^3P) + O_2 + M \longrightarrow O_3 + M \quad (3)$$

$$NO + O_3 \longrightarrow NO_2 + O_2 \quad (4)$$

而在实际大气 O_3 的积累主要由过氧自由基和 NO 反应引起的,其反应过程为:

$$HO_2\cdot + NO \longrightarrow NO_2 + \cdot OH \quad (5)$$

$$RO_2\cdot + NO \longrightarrow NO_2 + RO\cdot \quad (6)$$

整个过程中过氧自由基不断氧化 NO 产生 NO_2,NO_2 随后光解产生 O_3. 因此,O_3 总的光化学生成速率[$P(O_3)$]可以近似用过氧自由基和 NO 反应速率代替[24]:

$$P(O_3) = k_{NO+HO_2\cdot}[NO][HO_2\cdot] + [NO]\sum\nolimits_i k_i[RO_2\cdot]_i \quad (7)$$

$$P(O_3) = k[NO][RO_2^*\cdot] \quad (8)$$

式中,$k_{NO+HO_2\cdot}$ 为 NO 和 $HO_2\cdot$ 的反应速率常数,[NO]和[$HO_2\cdot$]分别为 NO 和 $HO_2\cdot$ 的体积分数,k_i 为 NO 和不同 $RO_2\cdot$ 的反应速率常数. 由于 $k_{NO+HO_2\cdot}$ 和 k_i 相当,在没有 $HO_2\cdot$ 和不同细分 $RO_2\cdot$ 体积分数的情况下,可以利用公式(8)来近似计算 $P(O_3)$,其中 k 是 NO 和 $RO_2^*\cdot$ 的有效反应速率常数,一般用 $k_{NO+HO_2\cdot}$ 近似代替[25].

O_3 的光化学去除反应主要包括 O_3 的光解反应、O_3 与烯烃(OLE)的反应、O_3 与自由基的反应和 NO_2 与·OH的终止反应,O_3 的光化学去除速率可以表示为:

$$D(O_3) = k_{O(^1D)+H_2O}[O(^1D)][H_2O] + k_{O_3+OLE}[O_3][OLE] + k_{O_3+OH}[O_3][\cdot OH] + k_{O_3+HO_2\cdot}[O_3][HO_2\cdot] + k_{NO_2+\cdot OH}[NO_2][\cdot OH] \quad (9)$$

O_3 的净光化学生成速率[$P(O_3)_{net}$]即为光化学总额生成速率 $P(O_3)$ 和光化学去除速率 $D(O_3)$ 之差.

1.3.2 $RO_x\cdot$ 生成速率

总的自由生成速率 $P(RO_x\cdot)$ 主要包括 O_3 的光解反应、HONO 的光解反应、H_2O_2 的光解反应、OVOCs 的光解反应和 O_3 与烯烃的反应,一般 H_2O_2 的光解反应相比总自由基生成速率贡献率小于 1%[26,27],本研究工作可忽略. 因此,自由基总的光化学生成速率可表示为:

$$P(RO_x\cdot) = 2J_{O^1D}[O_3]\times k_{O^1D+H_2O}[H_2O]\times (k_{O^1D+H_2O}[H_2O] + k_{O^1D+N_2}[N_2] + k_{O^1D+O_2}[O_2])^{-1} + 2J_{HONO}[HONO] + 2J_{HCHO}[HCHO] + 2J_{CH_3CHO}[CH_3CHO] + 2J_{CH_3CHOCH_3}[CH_3CHOCH_3] \quad (10)$$

式中,k 为反应速率常数,J 为光解速率. 计算涉及到的反应速率常数均参照 NIST 化学反应动力学数据库(IUPAC)[28],光解速率使用美国国家大气研究中心(NCAR)开发的光辐射传输模型[29]来计算,并使用太阳总辐照度进行光解速率修正[30]. HONO 通过 NO_x 估算,以[HONO]/[NO_x]为 0.02 计算光解产生的自由基[31]. 甲醛(HCHO)通过乙醛(CH_3CHO)体积分数来估算,一般[HCHO]/[CH_3CHO]为 1~2[32],本文乙醛体积分数近似代替 HCHO 来估算其光解产生的自由基.

1.3.3 Ln/Q 判断 O_3 生成敏感性

目前 O_3 污染主控区的识别方法主要包括集合指示剂法[33]、观测模型法[16]和空气质量模型法[34]等. 而基于 Ln/Q 判断 O_3 生成敏感性最早由 Kleinman 等[12,13]提出,Ln 表示自由基和 NO_x 反应的去除速率,Q 表示总自由基的产生速率. 当 Ln/Q 大于 0.5 时,表示自由基的去除主要和 NO_x 反应,O_3 生成处于 VOCs 控制区;当 Ln/Q 小于 0.5 时,表示自由基的去除主要通过自由基之间的自反应,O_3 生处于 NO_x 控制区;当 Ln/Q 等于 0.5 时,O_3 生成处于过渡区. Ln/Q 可通过下式计算[35]:

$$Ln/Q = -\alpha/2 + (\alpha^2 + 4\alpha)^{1/2}/2 \quad (11)$$

$$\alpha = \left(\frac{k_{\cdot OH+NO_2}[NO_2]k_{HO_2\cdot+NO}[NO]\gamma}{k_{\cdot OH+VOC}[VOC]}\right)^2\left(\frac{1}{2Qk_{eff}}\right) \quad (12)$$

$$\gamma = [HO_2\cdot]/([HO_2\cdot + RO_2\cdot]) \quad (13)$$

$$k_{eff} = k_{HO_2\cdot+HO_2\cdot}(\gamma^2) + k_{RO_2\cdot+HO_2\cdot}(\gamma - \gamma^2) \quad (14)$$

式中，k 为反应速率常数，计算均参照 NIST 化学反应动力学数据库(IUPAC)；γ 为HO_2· 与总过氧自由基体积分数之比，本文计算取值为 0.5[26]；$k_{\cdot OH+VOC}$ [VOC]为 VOCs 与·OH的反应活性，计算包括 CO 和 CH_4，利用式(11)～(14)可以计算出 Ln/Q.

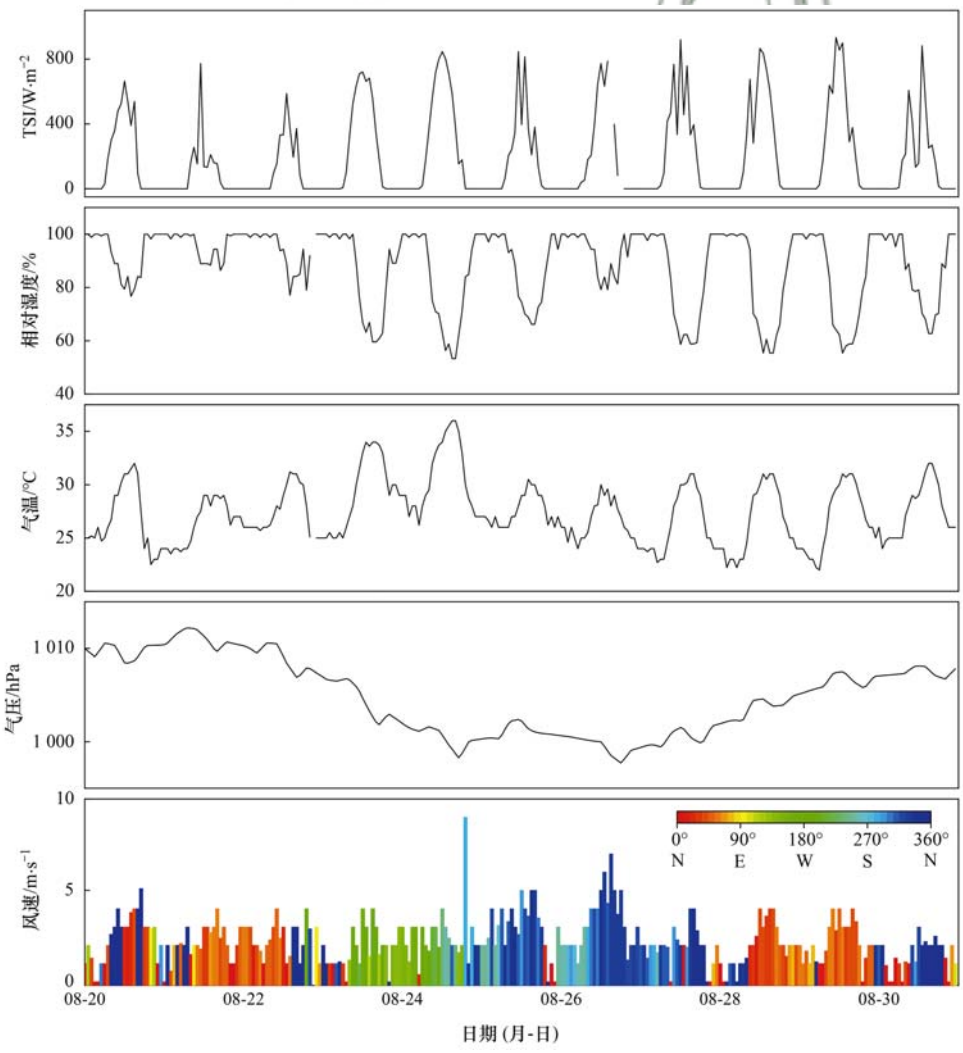
2　结果与讨论

2.1　O_3 和前体物污染特征

图 2 是观测期间 8 月 20～30 日的气象参数时间序列. 观测期间呈现高温和强太阳辐射的夏季气象特征，太阳总辐射日平均值为 348.2 W·m^{-2}，温度平均值为 27.4℃，相对湿度平均值为 88%. 观测期间平均风速为 2.3 m·s^{-1}，风向主要为偏北风. 观测期间大气压强变化不大，平均值为1 004.8 hPa.

图 3 是观测期间 8 月 20～30 日的 O_3、RO_2^*· 和前体物污染时间序列. 观测期间 CO 体积分数整体呈上升的趋势，φ(CO)变化在(0.24～0.8)×10^{-6}之间，大气中的 φ(SO_2)保持较低，平均值为 2×10^{-9}. NO_2 日间(06:00～18:00)体积分数较低，平均值数为 5.18×10^{-9}. NO 日间(06:00～18:00)体积分数较低，其平均值为 0.35×10^{-9}. 观测期间 O_3 变化较大，其体积分数变化在(7.5～110)×10^{-9}之间，根据《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中规定的日最大 8 h 平均 O_3 浓度(MDA8-O_3)二级标准限值为 160 μg·m^{-3}，在温度 25℃、气压为 101.3 kPa 的夏季平均条件下相当于 75×10^{-9}的体积分数. 观测期间，O_3 污染出现在 8 月 23 日和 8 月 29 日，最大 8 h φ(O_3)平均值分别为 97×10^{-9}和 82×10^{-9}.

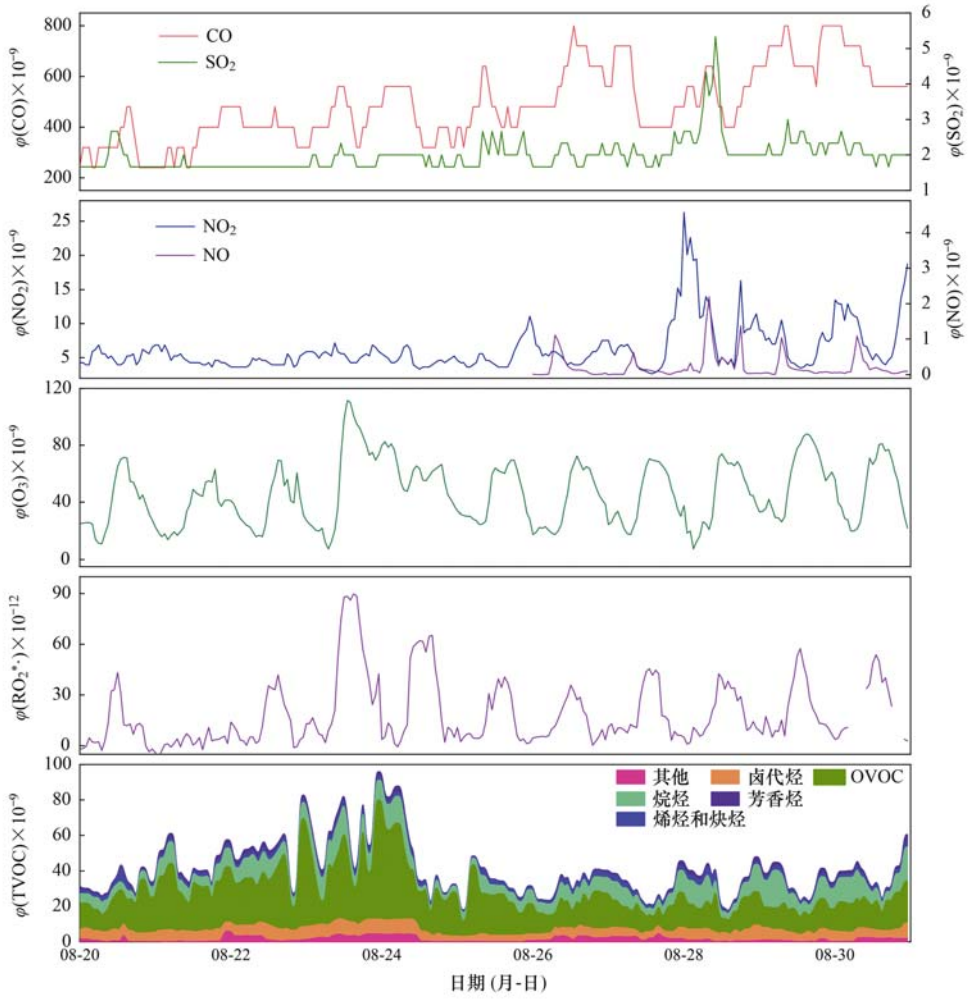
观测期间 φ(VOCs)平均值为 40.6×10^{-9}，其中，φ(烷烃)平均值为 8.6×10^{-9}，占比为 21%；φ(芳香烃)平均值为 1.5×10^{-9}，占比为 4%；φ(烯烃)和 φ(炔烃)平均值为 2.3×10^{-9}，占比为 5%；φ(卤代烃)平均值为 5.6×10^{-9}，占比为 14%；



图中缺失数据为仪器维护时段

图 2　观测期间的气象参数时间序列

Fig. 2　Meteorological parameters timeseries for the whole observation



图中缺失数据为仪器维护时段

图 3 观测期间 CO、SO_2、NO、NO_2、O_3、RO_2^*· 和 VOCs 体积分数时间序列

Fig. 3 Concentration of CO, SO_2, NO, NO_2, O_3, RO_2^*·, and VOCs timeseries for the whole observation

φ(OVOCs)平均值为 20.1×10^{-9},占比为 52%. 总体上,观测期间合肥市西郊夏季大气中的总 VOCs(TVOCs)体积分数在国内城市中处于中等水平,低于廊坊[36](69.56×10^{-9})和鹤山[37](54.6×10^{-9})等城区,高于郑州[38](29.11×10^{-9})、成都[39](31.85×10^{-9})、济南[40](29.39×10^{-9})和桂林[41](23.67×10^{-9}),与重庆市[42]相当(45.08×10^{-9});其中烷烃和芳香相对其他城市体积分数较低,而 OVOCs 体积分数远高于其他城市,与 Wang 等[43]观测的 2019 年合肥市西郊夏季 VOCs 各组分体积分数相近. 异戊二烯(isoprene)是天然的 VOCs 排放的示踪物. 观测期间异戊二烯体积分数呈现白天高,夜间低的特征,13:00 出现最高值. 芳香烃主要来自人为源排放,通常甲苯/苯(T/B)反映不同排放源对 VOCs 贡献,当 T/B <2 时,表示交通排放是 VOCs 的主要来源[44]. 观测期间甲苯/苯的日平均值均低于 2,表明观测期间 VOCs 的主要污染源为交通排放(图 4).

2.2 大气中总过氧自由基体积分数水平分析

合肥市西郊夏季过氧自由基体积分数的时间序列如图 3 所示. 夏季太阳辐射强,温度高,大气化学反应强烈,过氧自由基变化显著,体积分数日最高值在$(35.8\sim89.8)\times10^{-12}$之间波动,峰值体积分数为 43.8×10^{-12}. 如表 1 所示,从观测期间的 NO 水平来看,观测期间 NO 体积分数较低,φ(NO)日平均值小于 1×10^{-9},相比同样低 φ(NO)地区的中国望都[45](43.34×10^{-9}),美国圣安东尼奥市[24](37×10^{-9}),合肥市西郊夏季过氧自由基体积分数水平偏低,和在美国洛杉矶市[46](22.35×10^{-9})过氧自由基体积分数水平相当.

图 4 为观测期间的RO_2^*·、O_3、NO、NO_2、总辐射度、温度和湿度日平均变化曲线. 过氧自由基和 O_3 是光化学反应的产物,太阳辐射强度会直接影响大气自由基体积分数水平. 太阳辐射强度、温度和 RO_2^*· 日变化基本一致,清晨随着光照的开始,过氧自由基的体积分数呈现出升高的趋势; 12:00,当光

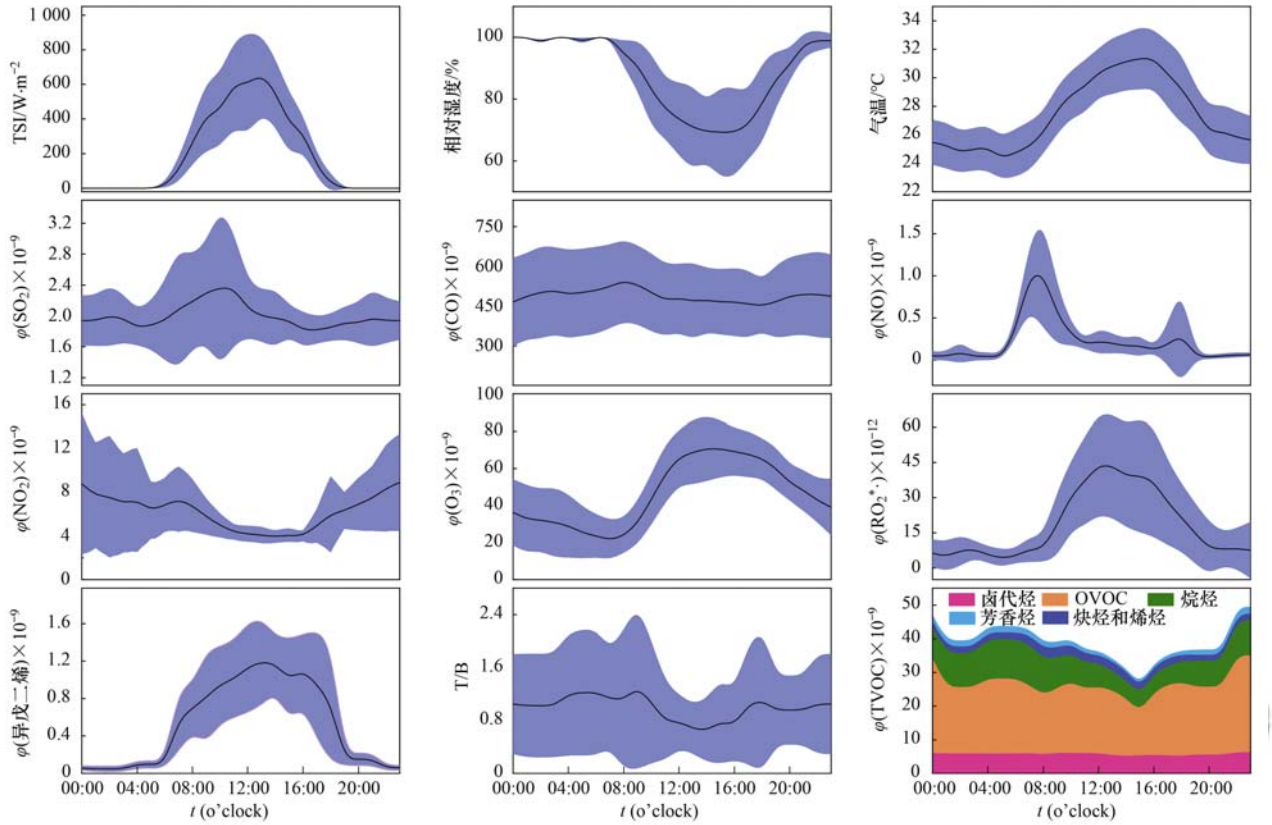


图 4　2020 年 8 月合肥市西郊 O_3 及其主要前体物体积分数和气象参数日变化情况

Fig. 4　Averaged diurnal variations in O_3 and its precursors and meteorological parameters during August 2020 in the western suburbs of Hefei

表 1　不同地区夏季大气过氧自由基体积分数、O_3 生成速率、自由基产生速率和相关参数[1)]

Table 1　Summary of peroxy radicalconcentrations, ozone production rate, RO_x· primary production and related parameters for field campaigns insummer

观测名称	观测时间	观测地点	环境类型	$\varphi(NO)$ $\times10^{-9}$	$\varphi(HO_2)$ $\times10^{-12}$	$\varphi(RO_2^*\cdot)$ $\times10^{-12}$	$\varphi(O_3)$ $\times10^{-9}$	$P(O_3)$ $\times10^{-9}/h^{-1}$	$P(RO_x\cdot)$ $\times10^{-9}/h^{-1}$	文献
CalNex-LA	2010 年 5 ~ 6 月	洛杉矶	城郊	1.92	/	22.35	65.25	18.58	4.93	[46]
SAFS-2017	2017 年 5 月	圣安东尼奥	城市	0.23	/	37	40	3.41	0.64	[24]
Wangdu-2014	2014 年 6 ~ 7 月	望都	农村	0.72	19.52	43.34	72.37	10.44	3.02	[44]
CHOOSE-2019	2019 年 9 月	成都	城郊	4.12	21.99	/	57.55	/	3.76	[27]
Hefei-2020	2020 年 8 月	合肥	城郊	0.37	/	27.62	55.19	5.91	1.95	本研究

1)所有数据均为日间平均值(06:00 ~ 18:00),其中"SAFS-2017"使用日间中位值(07:00 ~ 20:00),"/"表示无测量数据

照达到最强时,过氧自由基的体积分数达到最大;午后,随着光照的减弱,过氧自由基也随之开始降低. 图 5(a)为日间$RO_2^*\cdot$、太阳总辐射强度和温度散点图,$RO_2^*\cdot$ 与太阳总辐射强度呈正相关(R = 0.62),合肥市西郊夏季高温,强太阳辐射导致高$RO_2^*\cdot$ 的生成.

图 5(c)为日间$RO_2^*\cdot$ 和 O_3 散点图,呈现明显的相关性(R = 0.75). 日变化趋势$RO_2^*\cdot$ 和太阳辐射强度相近,但 O_3 峰值滞后,出现在 14:00 (图 4). O_3 在对流层的主要来源是 NO_2 的光解,日间$RO_2^*\cdot$ 与 NO 的反应是 NO_2 的重要来源. 当 O_3 生成速率大于去除速率时,O_3 才会累积,在上午随着光照增强,过氧自由基和 O_3 体积分数都随之上升,正午过后光照变弱,过氧自由基体积分数开始下降,直到 O_3 生成速率小于去除速率时,O_3 开始下降. 因此,O_3 的日变化规律不同于过氧自由基.

NO_x 是过氧自由基化学的重要参数,它的体积分数和变化直接影响过氧自由基的化学过程[47]. 图 5(b)为日间$RO_2^*\cdot$ 和 NO_x 散点图,整体呈现负相关趋势(R = −0.36). 对比 NO_x 和$RO_2^*\cdot$ 日变化趋势(图 4),NO 在早晚出现两个小峰,主要由上下班高峰期机动车排放引起的,在 08:00,NO 随着$RO_2^*\cdot$ 的上升而快速下降,同时下午保持较低体积分数. NO_2 和$RO_2^*\cdot$ 呈现相反的日变化特征,夜间 NO_2 较高而白天较低. 一方面,白天 NO_2 的光解反应会随光辐射而加强;另一方面,高$RO_2^*\cdot$ 会和 NO_2 反应生成过

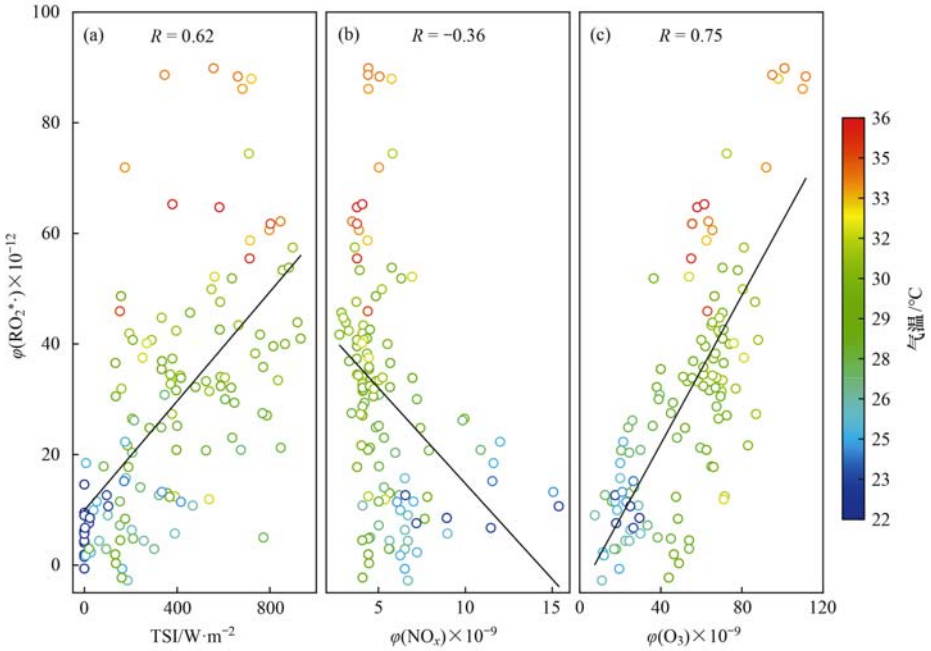


图 5 日间(06:00 ~ 18:00) RO_2^{*}· 与太阳总辐照度、NO_x、O_3 和气温相关性

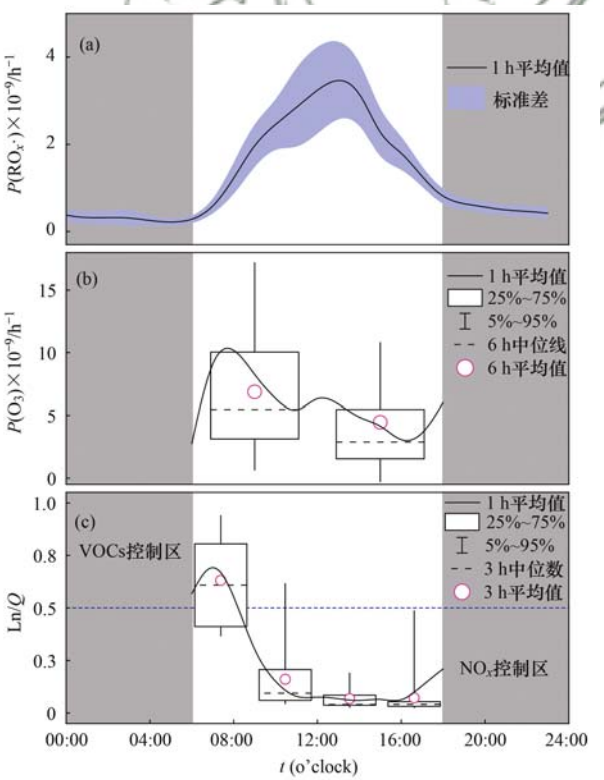
Fig. 5 Correlations ofbetweenconcentration of RO_2^{*}· with total solar irradiance, NO_x, O_3, and temperature during the daytime (06:00-18:00)

氧硝酸酯等物质,加速 NO_2 的去除. 总的来说,合肥市西郊夏季RO_2^{*}· 与 NO_x 呈明显的负相关.

2.3 O_3 生成速率及生成敏感性

利用观测的过氧自由基和 NO 数据计算出合肥西郊夏季的 O_3 产生速率[公式(8)],此外结合观测数据计算出本地RO_x· 生成速率和 Ln/Q. 图 6(a)为观测期间RO_x· 产生速率日变化情况,日间RO_x· 产生速率在(0.1 ~ 8) $\times 10^{-9}$ h^{-1}之间波动,最大值在13:00,峰值为3.8 $\times 10^{-9}$ h^{-1}. RO_x· 产生速率日平均值为1.95 $\times 10^{-9}$ h^{-1},较中国望都和成都地区,合肥西郊夏季RO_x· 产生速率偏低(表 1). 图 6(b)为观测期间 O_3 产生速率日变化情况. 日间 $P(O_3)$ 峰值出现在8:00,峰值为10.6 $\times 10^{-9}$ h^{-1},日间平均值为5.91 $\times 10^{-9}$ h^{-1},低于北京、上海、成都和深圳等高 NO 地区[48~50]. 如图 7 所示,美国圣安东尼奥及中国望都和合肥的 φ(NO)都低于 1 $\times 10^{-9}$,合肥西郊夏季的 O_3 产生速率和 O_3 水平高出圣安东尼奥 1.5 倍左右,但望都高出合肥 1.5 倍.

图 8(b)为日间 NO 对RO_2^{*}· 和 O_3 生成速率的影响,当 φ(NO)为 0.5 $\times 10^{-9}$时,O_3 生成速率出现最高值,峰值为 11.1 $\times 10^{-9}$$h^{-1}$; 当 φ(NO)小于 0.5 $\times 10^{-9}$时,RO_2^{*}· 快速下降,O_3 生成速率随着 NO 的增加快速上升,当 φ(NO)大于 0.5 $\times 10^{-9}$时,如图 8(a)所示,RO_2^{*}· 快速下降,O_3 生成速率开始下降. 从观测期 NO 水平分布来看, φ(NO)小于 0.5 $\times 10^{-9}$(占比 80%),合肥市西郊夏季 O_3 生成速率对 NO 的变化更为敏感.

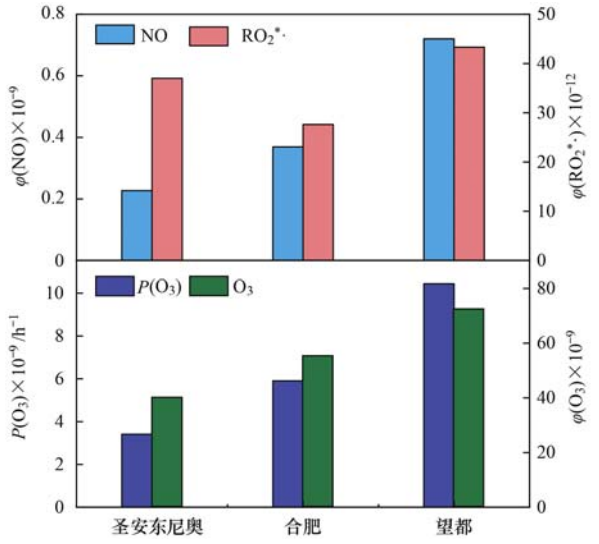


图中阴影部分表示夜间(18:00 ~ 06:00)

图 6 2020 年 8 月合肥市西郊 $P(RO_x\cdot)$、$P(O_3)$和 Ln/Q 日变化情况

Fig. 6 Averaged diurnal variations in $P(RO_x\cdot)$, $P(O_3)$, and Ln/Q in August 2020 in the western suburbs of Hefei

图 6(c)为合肥市西郊夏季 Ln/Q 日变化情况. O_3 生成敏感性存在明显的时间分布特征,早晨(06:00 ~ 8:00),Ln/Q 平均值为 0.63,NO_x 较高,自由基体积分数较低,O_3 生成主要由 VOCs 0 控制;



所有数据均为日间平均值

图 7　对比不同低 NO 地区的 NO、RO_2^{*}·、$P(O_3)$和 O_3

Fig. 7　Comparison of diurnal NO concentration, RO_2^{*}· concentration, ozone production rate, and O_3 concentration with those of previous summer experiments under low-NO_x conditions

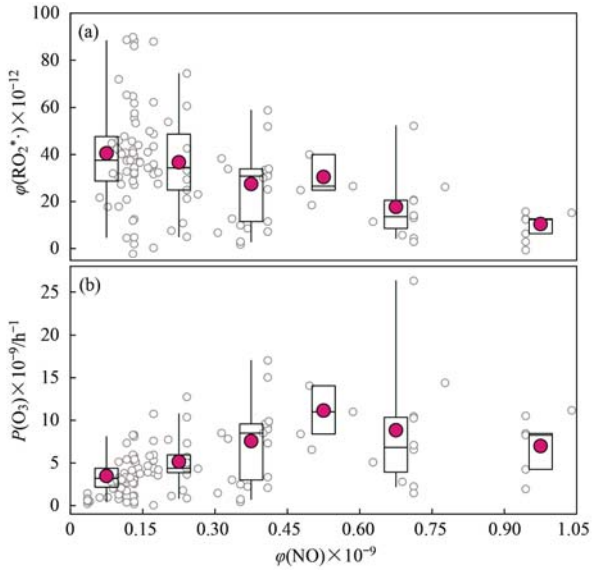


图 8　日间 NO 对和RO_2^{*}· 和 $P(O_3)$ 的影响(06:00～18:00)

Fig. 8　Relationship between NO concentration with RO_2^{*}· concentration and ozone production rate during the daytime (06:00-18:00)

08:00，Ln/Q 为 0.5，O_3 生成由 VOCs 控制转变为 NO_x 控制. 随着太阳辐射的增强，自由基体积分数快速上升，NO_x 被快速消耗，O_3 生成转变为由 NO_x 控制，Ln/Q 快速下降；下午 Ln/Q 接近为 0.1，NO_x 较低，自由基含量较高，O_3 生成为 NO_x 控制区. 此外，16:00，Ln/Q 开始上升，主要由于机动车排放导致 NO_x 增加. 观测期间的 O_3 生成的时间分布特征与北京[18]和圣安东尼奥[24]相一致.

根据 VOCs/NO_x 特征比值法可粗略判断区域 O_3 生成的敏感性. 一般，当 VOCs/NO_x <4 时，O_3 生成为 VOCs 控制；当 VOCs/NO_x >8 时，为 NO_x控制；当 VOCs/NO_x 为 4～8 之间为过渡区[51,52]. 图 9(a)为观测期间日间 VOCs/NO_x 频率分布统计分布和 O_3 生成的敏感性扇形统计，VOCs/NO_x 大于 8 的占比为 30%；VOCs/NO_x 在 4～8 之间的占比为 52%；VOCs/NO_x 小于的 4 占比 18%. VOCs/NO_x 特征比值法推断出观测期间主要为 O_3 生成为 NO_x控制区和过渡区. 与 Ln/Q 分析 O_3 生成敏感性结果相差较大，如图 9(b)中的扇形统计所示，观测期间 Ln/Q 小于 0.5 的占比为 82%；Ln/Q 大于 0.5 的占比为 10%；Ln/Q 等于 0.5 的占比为 8%. 对于 VOCs/NO_x 特征比值，将 4 和 8 作为临界值判断区域 O_3 生成的敏感性，该临界值会受到 VOCs 化学组成的影响，在不同地区存在差异，VOCs/NO_x 特征比值法不能准确判断区域 O_3 生成的敏感性. Ln/Q 基于自由

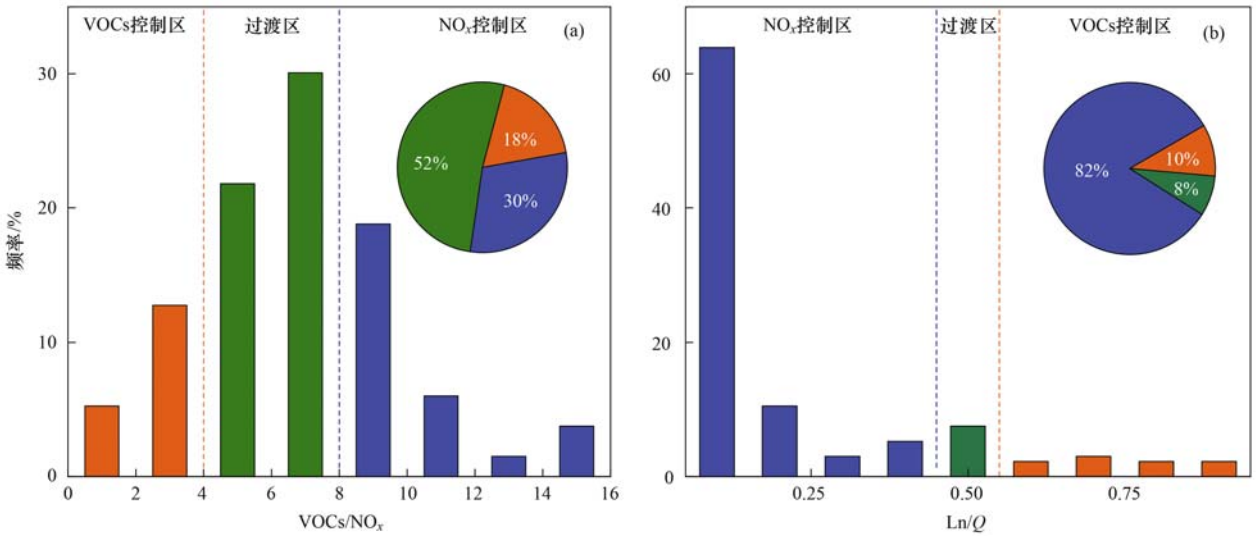


图 9　合肥市西郊夏季 VOCs/NO_x 和 Ln/Q 频率统计分布

Fig. 9　Distribution of the frequency of VOCs/NO_x ratios and Ln/Q ratios in the western suburbs of Hefei in summer

基和 NO_x 反应速率去分析 O_3 生成敏感性,从 O_3 生成的化学反应机制上去分析区域 O_3 生成的敏感性. 因此,Ln/Q 更能准确反映本地 O_3 生成敏感性. 图 9(b)所示,O_3 生成处于 NO_x 敏感区占总比的 82%. 由此,观测期间合肥市西郊夏季 O_3 生成主要处于 NO_x 控制区.

3 结论

(1)观测期间呈现高温和强太阳辐射的夏季气象特征. $\varphi(O_3)$变化较大,其范围在(7.5 ~ 110) × 10^{-9}之间. 此外, φ(VOCs)平均值为 40.6 × 10^{-9},其中 OVOCs 占比最高,烷烃占比次之,占比分别为 52% 和 21%.

(2)利用化学放大法对合肥市西郊夏季大气中总过氧自由基进行测量. 结果显示,过氧自由基呈典型的单峰日变化趋势,日间高值在(35.8 ~ 89.8) × 10^{-12}之间波动,其峰值体积分数平均值为 43.8 × 10^{-12}; 夏季高温和强太阳辐射会导致高RO_2^*·生成,同时,伴随高 O_3 生成.

(3)合肥市西郊夏季日间 O_3 产生速率日变化显著,日间最大 O_3 产生速率在 08:00,峰值为 10.6 × 10^{-9} h^{-1}. 观测结果显示合肥市西郊夏季处于低 NO 地区,O_3 产生速率对 NO 变化更为敏感.

(4)合肥市西郊夏季 O_3 生成主要处于 NO_x 敏感区,O_3 生成敏感性存在明显日变化特征. 早晨 O_3 生成为 VOCs 控制区,上午 O_3 生成为 VOCs-NO_x 协同控制区,下午转变为 NO_x 控制区.

参考文献:

[1] Rider C F, Carlsten C. Air pollution and DNA methylation: effects of exposure in humans[J]. Clinical Epigenetics, 2019, **11**(1), doi: 10.1186/s13148-019-0713-2.

[2] Worden H M, Bowman K W, Worden J R, *et al*. Satellite measurements of the clear-sky greenhouse effect from tropospheric ozone[J]. Nature Geoscience, 2008, **1**(5): 305-308.

[3] Feng Z Z, Hu E Z, Wang X K, *et al*. Ground-level O_3 pollution and its impacts on food crops in China: a review [J]. Environmental Pollution, 2015, **199**: 42-48.

[4] 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.

[5] Lu X, Zhang L, Wang X L, *et al*. Rapid increases in warm-season surface ozone and resulting health impact in China since 2013[J]. Environmental Science & Technology Letters, 2020, **7**(4): 240-247.

[6] 王耀庭, 殷振平, 郑祚芳, 等. 基于长时序"地-星"数据的京津冀大气污染时空分布及演变特征[J]. 环境科学, 2022, **43**(7): 3508-3522.
Wang Y T, Yin Z P, Zheng Z F, *et al*. Spatial-temporal distribution and evolution characteristics of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region based on long-term "ground-satellite" data [J]. Environmental Science, 2022, **43**(7): 3508-3522.

[7] Li Z, Yu S C, Li M Y, *et al*. The modeling study about impacts of emission control policies for Chinese 14th Five-Year plan on $PM_{2.5}$ and O_3 in Yangtze River Delta, China[J]. Atmosphere, 2022, **13**(1), doi: 10.3390/atmos13010026.

[8] 洪莹莹, 翁佳烽, 谭浩波, 等. 珠江三角洲秋季典型 O_3 污染的气象条件及贡献量化[J]. 中国环境科学, 2021, **41**(1): 1-10.
Hong Y Y, Weng J F, Tan H B, *et al*. Meteorological conditions and contribution quantification of typical ozone pollution during autumn in Pearl River Delta[J]. China Environmental Science, 2021, **41**(1): 1-10.

[9] 曹云擎, 李振亮, 蒲茜, 等. 成渝地区典型城市 O_3 污染对人为源前体物排放敏感性模拟研究[J]. 环境科学学报, 2021, **41**(8): 3001-3011.
Cao Y Q, Li Z L, Pu X, *et al*. Sensitivity of O_3 formation from anthropogenic precursor emissions in typical cities in the Chengdu-Chongqing region: a simulation study [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, **41**(8): 3001-3011.

[10] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 1992.

[11] Lu K D, Guo S, Tan Z F, *et al*. Exploring atmospheric free-radical chemistry in China: the self-cleansing capacity and the formation of secondary air pollution [J]. National Science Review, 2019, **6**(3): 579-594.

[12] Kleinman L I. The dependence of tropospheric ozone production rate on ozone precursors[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(3): 575-586.

[13] Kleinman L, Lee Y N, Springston S R, *et al*. Ozone formation at a rural site in the southeastern United States[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, **99**(D2): 3469-3482.

[14] Shao M, Zhang Y H, Zeng LM, *et al*. Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. Journal of Environmental Management, 2009, **90**(1): 512-518.

[15] Tan Z F, Lu K D, Dong H B, *et al*. Explicit diagnosis of the local ozone production rate and the ozone-NO_x-VOC sensitivities [J]. Science Bulletin, 2018, **63**(16): 1067-1076.

[16] 张英南, 薛丽坤, 陈天舒, 等. 基于观测的模型(OBM)的发展历程及其在我国大气化学研究中的应用与展望[J]. 环境科学研究, 2022, **35**(3): 621-632.
Zhang Y N, Xue L K, Chen T S, *et al*. Development history of observation-based model (OBM) and its application and prospect in atmospheric chemistry studies in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, **35**(3): 621-632.

[17] Wang T, Xue L K, Brimblecombe P, *et al*. Ozone pollution in China: a review of concentrations, meteorological influences, chemical precursors, and effects [J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 1582-1596.

[18] Lu K D, Zhang Y H, Su H, *et al*. Oxidant (O_3 + NO_2) production processes and formation regimes in Beijing [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2010, **115**(D7), doi: 10.1029/2009JD012714.

[19] Pan X, Kanaya Y, Tanimoto H, *et al*. Examining the major contributors of ozone pollution in a rural area of the Yangtze River Delta region during harvest season[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(11): 6101-6111.

[20] Chen Y, Yang C Q, Zhao W X, *et al*. Ultra-sensitive measurement of peroxy radicalsby chemical amplification broadbandcavity-enhanced spectroscopy[J]. Analyst, 2016, **141**

(20)：5870-5878.

[21] Yang C Q, Zhao W X, Fang B, *et al*. Removing water vapor interference in peroxy radical chemical amplification with a large diameter Nafion dryer[J]. Analytical Chemistry, 2018, **90**(5): 3307-3312.

[22] Yang C Q, Zhao W X, Fang B, *et al*. Improved chemical amplification instrument by using a Nafion dryer as an amplification reactor for quantifying atmospheric peroxy radicals under ambient conditions[J]. Analytical Chemistry, 2019, **91**(1): 776-779.

[23] HJ 759-2015, 环境空气挥发性有机物的测定罐采样/气相色谱-质谱法[S].

[24] Anderson D C, Pavelec J, Daube C, *et al*. Characterization of ozone production in San Antonio, Texas, using measurements of total peroxy radicals[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(5):2845-2860.

[25] Orlando J J, Tyndall G S. Laboratory studies of organic peroxy radical chemistry: an overview with emphasis on recent issues of atmospheric significance[J]. Chemical Society Reviews, 2012, **41**(19): 6294-6317.

[26] Tan Z F, Ma X F, Lu K D, *et al*. Direct evidence of local photochemical production driven ozone episodein Beijing: a case study[J]. Science of the Total Environment, 2021, **800**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148868.

[27] Yang X P, Lu K D, Ma X F, *et al*. Observations and modeling of OH and HO_2 radicals in Chengdu, China in summer 2019[J]. Science of the Total Environment, 2021, **772**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.144829.

[28] Atkinson R, Baulch D L, Cox R A, *et al*. Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: Volume Ⅰ-gas phase reactions of O_x, HO_x, NO_x and SO_x species[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2004, **4**(6):1461-1738.

[29] Madronich S. Instructions for using the web-based TUV quick calculator[EB/OL]. https://www.acom.ucar.edu/Models/TUV/Interactive_TUV/InstructionsWebTUV.pdf, 2016-08-09.

[30] Trebs I, Bohn B, Ammann C, *et al*. Relationship between the NO_2 photolysis frequency and the solar global irradiance[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2009, **2**(2): 725-739.

[31] Lee B H, Wood E C, Herndon S C, *et al*. Urban measurements of atmospheric nitrous acid: a caveat on the interpretation of the HONO photostationary state[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013, **118**(21): 12274-12281.

[32] Villanueva-Fierro I, Popp C J, Martin R S. Biogenic emissions and ambient concentrations of hydrocarbons, carbonyl compounds and organic acids from ponderosa pine and cottonwood trees at rural and forested sites in central New Mexico[J]. Atmospheric Environment, 2004, **38**(2): 249-260.

[33] Sillman S. The use of NO_y, H_2O_2, and HNO_3 as indicators for ozone-NO_x-hydrocarbon sensitivity in urban locations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, **100**(D7): 14175-14188.

[34] Chen X Y, Liu Y M, Lai A Q, *et al*. Factors dominating 3-dimensional ozone distribution during high tropospheric ozone period[J]. Environmental Pollution, 2018, **232**: 55-64.

[35] Kleinman L I, Daum P H, Lee Y N, *et al*. Sensitivity of ozoneproduction rate to ozone precursors[J]. Geophysical Research Letters, 2001, **28**(15): 2903-2906.

[36] 张敬巧, 吴亚君, 李慧, 等. 廊坊开发区秋季 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 中国环境科学, 2019, **39**(8): 3186-3192.
Zhang J Q, Wu Y J, Li H, *et al*. Characteristics and source apportionment of ambient volatile organic compounds in autumn in Langfang development zones[J]. China Environmental Science, 2019, **39**(8): 3186-3192.

[37] Song M D, Liu X G, Zhang Y H, *et al*. Sources and abatement mechanisms of VOCs in southern China[J]. Atmospheric Environment, 2019, **201**: 28-40.

[38] Li Y D, Yin S S, Yu S J, *et al*. Characteristics, source apportionment and health risks of ambient VOCs during high ozone period at an urban site in central plain, China[J]. Chemosphere, 2020, **250**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126283.

[39] 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市 2017 年夏季大气 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析[J]. 环境科学研究, 2019, **32**(4): 619-626.
Xu C X, Chen J H, Han L, *et al*. Analyses of pollution characteristics, ozone formation potential and sources of VOCs atmosphere in Chengdu city in Summer 2017[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32**(4): 619-626.

[40] 高素莲, 闫学军, 刘光辉, 等. 济南市夏季臭氧重污染时段 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 生态环境学报, 2020, **29**(9): 1839-1846.
Gao S L, Yan X J, Liu G H, *et al*. Characteristics and source apportionment of ambient VOCs in serious ozone pollution period of summer in Ji'nan[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, **29**(9): 1839-1846.

[41] Zhang X F, Yin Y Y, Wen J H, *et al*. Characteristics, reactivity and source apportionment of ambient volatile organic compounds (VOCs) in a typical tourist city[J]. Atmospheric Environment, 2019, **215**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116898.

[42] 李陵, 李振亮, 张丹, 等. 重庆市主城区 O_3 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2021, **42**(8): 3595-3603.
LiL, Li Z L, Zhang D, *et al*. Pollution characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs during ozone pollution period in the main urban area of Chongqing[J]. Environmental Science, 2021, **42**(8): 3595-3603.

[43] Wang S B, Liu G J, Zhang H, *et al*. Insight into the environmental monitoring and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in various functional areas[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2022, **15**(7): 1121-1131.

[44] Brocco D, Fratarcangeli R, Lepore L, *et al*. Determination of aromatic hydrocarbons in urban air of Rome[J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(4): 557-566.

[45] Tan Z F, Fuchs H, Lu K D, *et al*. Radical chemistry at a rural site (Wangdu) in the North China Plain: observation and model calculations of OH, HO_2 and RO_2 radicals[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2017, **17**(1): 663-690.

[46] Griffith S M, Hansen R F, Dusanter S, *et al*. Measurements of hydroxyl and hydroperoxy radicals during CalNex-LA: model comparisons and radical budgets[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, **121**(8): 4211-4232.

[47] Tan Z F, Lu K D, Hofzumahaus A, *et al*. Experimental budgets of OH, HO_2, and RO_2 radicals and implications for ozone formation in the Pearl River Delta in China 2014[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(10): 7129-7150.

[48] Tan Z F, Lu K D, Jiang M Q, *et al*. Daytime atmospheric oxidation capacity in four Chinese megacities during the photochemically polluted season: a case study based on box model simulation[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2019, **19**(6): 3493-3513.

[49] Liu X F, Guo H, Zeng L W, *et al*. Photochemical ozone

pollution in five Chinese megacities in summer 2018[J]. Science of the Total Environment, 2021, **801**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.149603.

[50] 张明棣, 云龙, 李成柳, 等. 基于观测模型量化 VOCs 对深圳市城区臭氧生成的影响[J]. 环境科学研究, 2021, **34**(11): 2599-2608.
Zhang M D, Yun L, Li C L, *et al*. Quantifying impacts of VOCs on ozone formation in urban area of Shenzhen based on observation-based model [J]. Research of Environmental Sciences, 2021, **34**(11): 2599-2608.

[51] Seinfeld J H. Urban air pollution: state of the science[J]. Science, 1989, **243**(4892): 745-752.

[52] Yang Y C, Liu X G, Zheng J, *et al*. Characteristics of one-year observation of VOCs, NO_x, and O_3 at an urban site in Wuhan, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, **79**: 297-310.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjkx.ac.cn)进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目. 图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1,1.1,1.1.1 的形式,左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1),(2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊:作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名,年,卷(期):起页-止页.

图书:作者. 书名[M]. 出版地:出版社,年. 起页-止页.

会议文集:作者. 论文名[A]. 见(In):编者. 文集名[C]. 出版地:出版社(单位),年. 起页-止页.

学位论文:作者. 论文名[D]. 保存地:保存单位,年份.

报告:作者. 论文名[R]. 出版地:出版单位,出版年.

专利:专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等. 编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102;E-mail:hjkx@rcees.ac.cn;网址:www.hjkx.ac.cn

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 44 No. 4

Apr. 15, 2023

CONTENTS

Impact of Climate Change on Summer Ozone in China ····· HU An-qi, XIE Xiao-dong, GONG Kang-jia, *et al.* (1801)

Spatial-temporal Variation and Driving Factors of Ozone in China from 2019 to 2021 Based on EOF Technique and KZ Filter ····· WANG Hao-qi, ZHANG Yu-fen, LUO Zhong-wei, *et al.* (1811)

Photochemical Mechanism and Control Strategy Optimization for Summertime Ozone Pollution in an Industrial City in the North China Plain ····· ZHENG Zhen-sen, DOU Jian-ping, ZHANG Guo-tao, *et al.* (1821)

Spatiotemporal Evolution Characteristics of $PM_{2.5}$-O_3 Compound Pollution in Chinese Cities from 2015 to 2020 ····· NIU Xiao-xiao, ZHONG Yan-mei, YANG Lu, *et al.* (1830)

Spatiotemporal Distribution Characteristics of Co-pollution of $PM_{2.5}$ and Ozone over BTH with Surrounding Area from 2015 to 2021 ····· SONG Xiao-han, YAN Li, LIU Wei, *et al.* (1841)

Spatio-temporal Variation in $PM_{2.5}$ Concentration and Its Relationship with Vegetation Landscape Patterns in Typical Economic Zones in China from 2000 to 2020 ····· XU Yong, LI Xin-yi, HUANG Wen-ting, *et al.* (1852)

Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Ion Deposition During Winter and Spring in the Core Area of Beijing ····· ZHAO Yu, LI Bei-bei, HUANG Yu-hu, *et al.* (1865)

Input Characteristics of Dry Deposition of Atmospheric Particulates and Metals in Farmland in the Suburb of Nanjing ····· LIU Cui-ying, JIN Hao, FAN Jian-ling (1873)

Pollution Characterizations and Oxidative Potentials of Water-Soluble Organic Matters at Different Polarity Levels in Winter $PM_{2.5}$ Over Xi'an ····· LUO Yu, HUANG Sha-sha, ZHANG Tian, *et al.* (1882)

Emission Characteristics of Organic Carbon and Elemental Carbon in PM_{10} and $PM_{2.5}$ from Vehicle Exhaust and Civil Combustion Fuels ····· WANG Hong-lei, LIU Si-han, SUN Jie-juan, *et al.* (1890)

Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ in the Core Area of Ili River Valley in Spring ····· GU Chao, XU Tao, MA Chao, *et al.* (1899)

Evaluation of Changes in $PM_{2.5}$ Exposure Concentration and Health Risk for Urban Resident in Zhengzhou Based on High Spatial Resolution Grids ····· LI Yuan, XU Yi-fei, YUAN Ming-hao, *et al.* (1911)

Emission Inventory of Building Material Industry in Henan Province Based on Multi-source Data Integration ····· LIU Xiao, HU Jing-nan, WANG Hong-mei, *et al.* (1924)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Winter in Kaifeng City ····· SHI Yu-qi, ZHENG Kai-yun, DING Wei-ting, *et al.* (1933)

Changes in O_3-VOCs-NO_x Sensitivity and VOCs Sources at an Urban Site of Nanjing Between 2020 and 2021 ····· LU Xiao-bo, WANG Ming, DING Feng, *et al.* (1943)

Variation Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Urban Beijing in Summer ····· ZHANG Rui, SUN Xue-song, WANG Yu, *et al.* (1954)

Chemical Characteristics and Source Apportionment for VOCs During the Ozone Pollution Episodes and Non-ozone Pollution Periods in Qingdao ····· JIA Zhi-hai, GU Yao, KONG Cui-li, *et al.* (1962)

Characteristics of O_3 Production in the Western Suburb of Hefei in Summer Based on the Observation of Total Peroxy Radical ····· YU Hui, WEI Na-na, XU Xue-zhe, *et al.* (1974)

Evaluation of Energy Saving and Carbon Reduction Effect of Air Pollution Prevention and Control Action Plan and Innovation Intermediary Effect ····· LI Shao-lin, WANG Qi-qi (1985)

Scenario Simulation and Effects Assessment of Co-control on Pollution and Carbon Emission Reduction in Beijing ····· YU Shan, ZHANG Shuang, ZHANG Zeng-jie, *et al.* (1998)

Simulation of Anthropogenic CO_2 Emissions in the Yangtze River Delta Based on Different Emission Inventories ····· MA Xin-yi, HUANG Wen-jing, HU Ning, *et al.* (2009)

Water Quality Change Trend and Risk Analysis of Wuhan Hanjiang River Water Source ····· ZHUO Hai-hua, LOU Bao-feng, XU Jie, *et al.* (2022)

Pollution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Resistance Genes in Different Water Sources in the Wuhan Section of the Yangtze River ····· LI Bo-lin, ZHANG He, WANG Jun, *et al.* (2032)

Occurrence Characteristics, Sources, and Toxicity Risk Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Typical Rivers of Northern Shaanxi Mining Area, China ····· WU Xi-jun, DONG Ying, ZHAO Jian, *et al.* (2040)

Spatio-temporal Characteristics of Organic Aggregates and the Driving Factors in Typical Lakes ····· XIE Gui-juan, GONG Yi, ZHU Fu-cheng, *et al.* (2052)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Microplastics in Water of Different Functional Parks in Guilin ····· LI Pei-zhao, WU Li, HUANG Fei-fei, *et al.* (2062)

Environmental Driving Factors and Assessment on the Aquatic Ecosystem of Periphytic Algae of Six Inflow Rivers in Yangtze River Basin ····· ZHANG Jing, HU Yu-xin, HU Sheng, *et al.* (2072)

Influence and Driving of Environmental Heterogeneity on the Epilithic Diatom Community in Xiangxi River, a Tributary of the Three Gorges Reservoir Area ····· JI Lu-lu, ZHAO Lu, OUYANG Tian, *et al.* (2083)

Characteristics of Phytoplankton Communities and Key Impact Factors in Three Types of Lakes in Wuhan ····· ZHANG Hao-kun, MIN Fen-li, CUI Hui-rong, *et al.* (2093)

Effects of Heavy Metal Pollution on the Structure of Microbial Communities in Different Habitats ····· HE Yi-fan, XIAO Xin-zong, WANG Jia-wen (2103)

Structure and Distribution Characteristics of Bacterial Community in Boqing River Water ····· WANG Sen, CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, *et al.* (2113)

Effects of Microplastic Exposure on the Community Structure and Function of Symbiotic Bacteria in *Sinularia microclavata* ····· LIU Min, CHE Wen-xue, ZENG Ying-xu, *et al.* (2122)

Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Emerging Contaminants from Raw Water to Drinking Water in Shanghai ····· YAN Qi (2136)

Adsorption Characteristics of Fluoride in Low-Concentration Water by Aluminum and Zirconium-Modified Biochar ····· LIU Yan-fang, GAO Wei, LIU Rui, *et al.* (2147)

Sorption Characteristics and Site Energy Distribution Theory of Typical Estrogens on Microplastics ····· LIU Jiang-yan, ZHENG Mi-mi, HU Jia-wu, *et al.* (2158)

Selection and Evaluation of Model Pollutants for Performance Assessment of Advanced Treatment of Industrial Park Wastewater by Ozonation ····· XIN Bo, SHAN Chao, LÜ Lu (2168)

Identifying Driving Factors and Their Interacting Effects on Sources of Heavy Metal in Farmland Soils with Geodetector and Multi-source Data ····· ZHANG Hong-ze, CUI Wen-gang, LIU Sui-hua, *et al.* (2177)

Pollution Characteristics and Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of Coal Mine Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model ····· MA Jie, SHEN Zhi-jie, ZHANG Ping-ping, *et al.* (2192)

Contamination and Probabilistic Health Risk Assessment of Heavy Metals in Agricultural Soils Around a Lead-Zinc Smelter ····· HUANG Jian-bo, JIANG Deng-deng, WEN Bing, *et al.* (2204)

Prediction of PAHs Content in Soil Around Gas Stations in Beijing Based on BP Neural Network ····· MA Sai-yan, WEI Hai-ying, MA Jin, *et al.* (2215)

Spatial-temporal Distribution and Risk Assessment of Quinolones Antibiotics in Soil of Shijiazhuang City ····· ZHAO Xin-yu, CHEN Hui, ZHAO Bo, *et al.* (2223)

Accumulation and Pollution Risks of Heavy Metals in Soils and Agricultural Products from a Typical Black Shale Region with High Geological Background ····· DENG Shuai, DUAN Jia-hui, NING Mo-huan, *et al.* (2234)

Geochemical Characteristics of Cd in Different Parent Soils in Karst Area and Prediction of Cd Content in Maize ····· DAI Liang-liang, XU Hong-gen, GONG Hao, *et al.* (2243)

Pollution Risk and Contribution Analysis of Pb, Cd, and As in Soils and Crops Under Different Land Use Types in Longyan City ····· WANG Rui, CHEN Nan, ZHANG Er-xi (2252)

Influencing Factors of Cadmium Content in Wheat Grain: A Meta-analysis and Decision Tree Analysis ····· LIU Na, ZHANG Shao-bin, GUO Xin-yu, *et al.* (2265)

Response Characteristics of Soil Organic Carbon Pool and Its Chemical Composition During Secondary Forest Succession in the Loess Plateau ····· LIU Han-yu, LIU Ying-yi, ZHANG Qi, *et al.* (2275)

Effects of Short-Term Nitrogen and Phosphorus Addition on Soil Respiration Components in a Subalpine Grassland of Qilian Mountains ····· JIANG Yuan, GAN Xiao-ling, CAO Feng-feng, *et al.* (2283)

Response of Soil Microbial Diversity to Long-term Enclosure in Degraded Patches of Alpine Meadow in the Source Zone of the Yellow River ····· YANG Peng-nian, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, *et al.* (2293)

Diversity and Predictive Functional of *Caragana jubata* Bacterial Community in Rhizosphere and Non-rhizosphere Soil at Different Altitudes ····· LI Yuan-yuan, XU Ting-ting, AI Zhe, *et al.* (2304)

Effects of Simulated Acid Rain and Nitrogen Deposition on Soil Bacterial Community Structure and Diversity in the Masson Pine Forest ····· WANG Nan, QIAN Shao-yu, PAN Xiao-cheng, *et al.* (2315)

Effects of Phosphogypsum and *Suaeda salsa* on the Soil Moisture, Salt, and Bacterial Community Structure of Salinized Soil ····· LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, *et al.* (2325)

Effects of Combined Application of Fungal Residue and Chemical Fertilizer on Soil Microbial Community Composition and Diversity in Paddy Soil ····· GENG He-tian, WANG Xu-dong, SHI Si-bo, *et al.* (2338)

Effects of Aeration on Surface Water Nutrient Dynamics and Greenhouse Gas Emission in Different Straw Returning Paddy Fields ····· HU Jin-hui, XUE Li-hong, QIAN Cong, *et al.* (2348)

Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Growth and Antioxidant System of Rice Seedlings Under Antimony Stress ····· CHU Yu-tan, LI Yan, HUANG Yi-zong, *et al.* (2356)

Life Cycle Prediction Assessment of Energy Saving and New Energy Vehicles for 2035 ····· FU Pei, LAN Li-bo, CHEN Ying, *et al.* (2365)

Distribution, Sources, and Behavioral Characteristics of Microplastics in Farmland Soil ····· BO Lu-ji, LI Bing, ZHANG Kai, *et al.* (2375)

Research Progress on the Remediation Technology of Herbicide Contamination in Agricultural Soils ····· HU Fang-yu, AN Jing, WANG Bao-yu, *et al.* (2384)

Research Progress and Prospect of Herbicide Residue Characteristics in Black Soil Region of China ····· LI Rui, WU Qiu-mei, ZHAO Gui-mei, *et al.* (2395)