

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

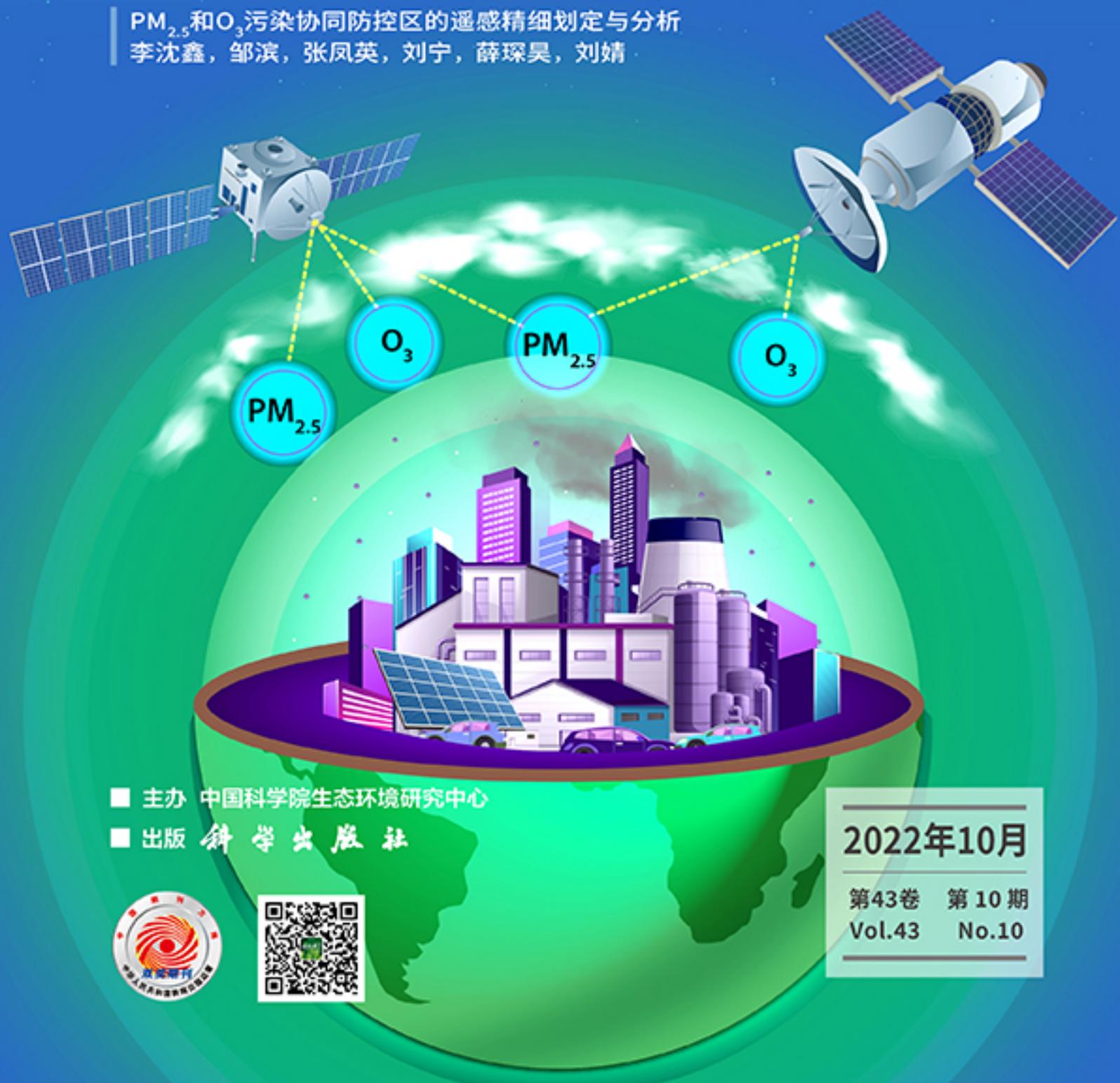
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析
李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年10月

第43卷 第10期
Vol.43 No.10

目次

PM_{2.5}和O₃污染协同防控区的遥感精细划定与分析 李沈鑫, 邹滨, 张凤英, 刘宁, 薛琛昊, 刘婧(4293)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析 裴成磊, 谢雨彤, 陈希, 张涛, 邱晓暖, 王瑜, 王在华, 李梅(4305)

佛山臭氧浓度预报方程的建立与应用 陈辰, 洪莹莹, 谭浩波, 司徒淑婷, 程银琳, 步巧利, 吴蒙, 潘巧英(4316)

乌海市高分辨率大气污染源排放清单构建及其在臭氧污染成因探究中的应用 张瑞欣, 楚波, 尚春林, 曹喜萍, 李光耀, 朱玉凡, 刘晓, 夏佳琦, 陈强(4327)

结合在线监测和自动识别系统分析东海沿岸船舶排放特征 邱浩, 刘丹彤, 吴杨周, 李思远, 丁朔, 胡康, 张家乐, 陈梅汀(4338)

机动车制动磨损颗粒物及挥发性有机物的组分特征 门正宇, 刘笃优, 郭全有, 张静, 彭剑飞, 吴琳, 毛洪钧(4348)

笼养鸡舍冬季挥发性有机物排放特征 曹甜甜, 郑云昊, 张羽, 王悦, 丛群欣, 王源昊, 董红敏(4357)

上海市生活垃圾房气溶胶中可培养细菌污染状况及种群特征 卢冰洁, 张翔, 王川, 邱俊, 李丹(4367)

浙江省2008~2018年人为源氨排放清单及分布特征 方利江, 杨一群, 叶观琼(4380)

“双碳”目标下钢铁行业控煤降碳路线图 薛英岚, 张静, 刘宇, 陈瑜, 孙健, 蒋洪强, 张伟, 曹东(4392)

空间关联网络结构特征的减排效应:基于城市群视角 郑航, 叶阿忠(4401)

中国对外直接投资的减污降碳效应及其实现机制 白梓函, 吕连宏, 赵明轩, 张楠, 罗宏(4408)

近年全国地表水水质变化特征 嵇晓燕, 侯欢欢, 王姗姗, 杨凯(4419)

湟水河流域地表水体微塑料分布、风险及影响因素 范梦苑, 黄懿梅, 张海鑫, 李好好, 黄倩(4430)

汾河流域地表水水化学同位素特征及其影响因素 赵春红, 申豪勇, 王志恒, 梁永平, 赵一, 谢浩, 唐春雷(4440)

城镇化进程中珠江三角洲高锰地下水赋存特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 李海军(4449)

喀什噶尔河下游平原区地下水咸化特征及成因分析 鲁涵, 曾妍妍, 周金龙, 孙英(4459)

重庆市老龙洞地下河流域硝酸盐来源和生物地球化学过程的识别 王雨吻, 杨平恒, 张洁茹(4470)

蓝藻水华过程中优势种群演替模式、效应及驱动因子分析 欧阳添, 赵璐, 纪璐璐, 杨宋琪, 郑保海, 杜雨欣, 李佳欣, 李玉鑫, 施军琼, 吴忠兴(4480)

珠海市磨刀门水道输水水源水库群浮游植物群落特征及其环境驱动因子 张茉莉, 王思瑞, 昌盛, 王山军, 金德才, 樊月婷, 张坤锋, 谢琼, 付青(4489)

营养物质对铜绿微囊藻生长和藻际细菌的影响 吕萍, 李慧莉, 徐勇, 郑效旭, 黄振华, 王聪, 徐圣君, 庄绪亮(4502)

老化作用对微塑料吸附四环素的影响及其机制 王林, 王姝歆, 曾祥英, 何杨, 黄雯, 郑世界, 张建强(4511)

沉积物和土壤中胶体对氯霉素吸附行为的影响 晏彩霞, 罗燕清, 聂明华, 周旋, 丁明军(4522)

历史抗生素胁迫改变磺胺甲噁唑和甲氧苄啶对活性污泥的影响:ARGs及其潜在宿主 张忠兴, 樊晓燕, 李星, 高玉玺, 赵君如(4536)

阳朔典型铅锌矿区流域土壤重金属空间分布特征及来源解析 陈盟, 潘泳兴, 黄奕翔, 王樞檀, 张睿东(4545)

白洋淀及周边土壤重金属的分布特征及生态风险评估 郑飞, 郭欣, 汤名扬, 朱冬, 董四君, 康乐, 陈兵(4556)

基于地理探测器的镇域尺度土壤重金属含量空间分异及其影响因素分析 龚仓, 王亮, 王顺祥, 张志翔, 董航, 刘玖芬, 王德伟, 严步青, 陈映(4566)

燃煤电厂重金属排放与周边土壤中重金属污染特征及健康风险 车凯, 陈崇明, 郑庆宇, 范辉, 魏明磊, 罗蓬, 郁金星(4578)

海南岛半干旱区农用地土壤重金属富集因素、健康风险及来源识别 杨剑洲, 龚晶晶, 王振亮, 高健翁, 杨建坤, 胡树起, 唐世新(4590)

九龙江口红树林表层沉积物重金属赋存形态及污染评价 张华兰, 于瑞莲, 万瑞安, 胡恭任, 黄华斌, 吴雅清(4601)

我国茶叶主产区有机肥重金属含量现状 伊晓云, 方丽, 杨向德, 马立锋, 刘美雅, 张群峰, 倪康, 石元值(4613)

甘肃省农业土壤邻苯二甲酸酯累积特征及来源分析 陈王玉, 张光全, 张杨, 李明凯, 郝佳欣, 熊有才, 李崇霄, 曹靖(4622)

三峡库区澎溪河不同高程消落带土壤磷形态及磷酸酶活性分布特征 高艺伦, 方芳, 唐子超, 张蕊, 蒋艳雪, 郭劲松(4630)

塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性 李昕竹, 贡璐, 唐军虎, 罗艳, 丁肇龙, 朱海强, 张涵, 李蕊希(4639)

黄土丘陵区柠条人工林不同深度土壤呼吸速率对土壤湿度的响应 孙亚荣, 王亚娟, 赵敏, 薛文艳, 梁思琦, 刘乐, 刘超, 陈云明(4648)

基于Meta-analysis的生物炭对土壤硝态氮淋失和磷酸盐固持影响 姜志翔, 崔爽, 张鑫, 郝敏, 孙德茂(4658)

低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制 方治国, 谢俊婷, 杨青, 卢焯桢, 黄海, 朱芸烟, 尹思敏, 吴鑫涛, 都韶婷(4669)

无机钝化剂对镉污染酸性水稻土的修复效果及其机制 张剑, 孔繁艺, 卢升高(4679)

改良铅锌矿渣对栎树幼苗铅锌富集与耐性机制 谢天志, 陈永华, 苏荣葵, 刘慧, 姚海松(4687)

CaO₂/FA复合材料富集磷效能及其回收物对土壤改良作用 岳薇, 李大鹏, 吴玲予, 王璐, 汤尧禹, 朱企, 黄勇(4697)

早稻秸秆还田和减钾对晚稻产量和土壤肥力的影响 黄巧义, 黄建凤, 黄旭, 吴永沛, 李苹, 付弘婷, 唐拴虎, 刘一峰, 徐培智(4706)

秸秆连续还田配施化肥对稻-油轮作土壤碳库及作物产量的影响 蔡影, 付思伟, 张博睿, 胡宏祥, 刘文雯, 俞金涛, 贾临东, 刘运峰(4716)

化肥减量配施秸秆对双季稻田固氮微生物群落的影响 陈凯鹏, 韦菊烟, 陈丹, 王聪, 沈健林, 李勇, 吴金水(4725)

化肥减量与有机物料添加对华北潮土微生物氮循环功能基因丰度和氮转化遗传潜力的影响 李胜君, 胡荷, 李刚, 王蕊, 赵建宁, 张贵龙, 修伟明(4735)

长期覆膜条件下农田土壤微生物群落的响应特征 胡志娥, 肖谋良, 丁济娜, 季剑虹, 陈剑平, 葛体达, 鲁顺保(4745)

长期秸秆还田对潮土真菌群落、酶活性和小麦产量的影响 马垒, 李燕, 魏建林, 李子双, 周晓琳, 郑福丽, 吴小宾, 王利, 刘兆辉, 谭德水(4755)

土壤改良剂对再生水滴灌根际土壤菌群多样性及病原菌和抗生素抗性基因丰度的影响 崔丙健, 崔二革, 刘春成, 胡超, 樊向阳, 李中阳, 高峰(4765)

氮素对苜蓿植物修复垃圾堆场镉-多环芳烃复合污染土壤及土壤细菌群落结构的影响 李怡佳, 马俊伟, 李玉倩, 肖琛, 沈心怡, 牛云, 陈家军(4779)

抗生素降解剂对猪粪堆肥腐熟和细菌群落演替的影响 李玮琳, 张昕, 马军伟, 孙万春, 成琪璐, 林辉(4789)

《环境科学》征订启事(4337) 《环境科学》征稿简则(4407) 信息(4521, 4705, 4800)

广州市冬季一次典型臭氧污染过程分析

裴成磊^{1,2,3,4}, 谢雨彤^{5,6}, 陈希^{5,7}, 张涛^{1,2,3,8}, 邱晓暖⁴, 王瑜⁹, 王在华^{10*}, 李梅^{5,6}

(1. 中国科学院广州地球化学研究所, 有机地球化学国家重点实验室, 广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院深地科学卓越创新中心, 广州 510640; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 广东省广州生态环境监测中心站, 广州 510060; 5. 暨南大学质谱仪器与大气环境研究所, 广东省大气污染在线源解析系统工程技术研究中心, 广州 510632; 6. 粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广州 510632; 7. 广州禾信仪器股份有限公司, 广州 510530; 8. 广东省生态环境监测中心, 广州 510308; 9. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 510632; 10. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 广州 510650)

摘要: 为探究广州市2020年冬季(1月)一次臭氧污染过程,分析了气象条件对臭氧污染产生的影响;运用臭氧生成潜势(OFP)和正交矩阵因子分解法(PMF)分析了影响臭氧的主要挥发性有机物(VOCs)物种和来源;通过经验动力学建模方法(EKMA)识别了臭氧生成控制区,并提出了相应的前体物减排策略。结果表明,本次臭氧污染过程中同时出现了NO₂超标,并且PM₁₀和PM_{2.5}浓度也处于高位,体现出和夏、秋季不同的大气复合污染特征;夜间边界层高度低(<75 m)和大气稳定度高加剧了臭氧前体物和颗粒物的累积,日间温度升高约5℃、太阳辐射增强约10%和水平风速小(<1 m·s⁻¹)等气象条件加剧了光化学反应,促进了臭氧和颗粒物的生成。冬季VOCs组分以烷烃为主(占比为68.2%),且烷烃和炔烃占比较其他季节更高,但芳香烃(二甲苯和甲苯)和丙烯是臭氧生成的关键VOCs物种;源解析结果显示,VOCs的主要来源为汽车尾气(22.4%)、溶剂使用(20.5%)和工业排放(17.9%),其中溶剂使用的OFP最高;臭氧本地生成主要受VOCs控制,前体物VOCs和NO_x按比例3:1进行削减较为合理。研究探索了冬季臭氧污染的成因,为开展重污染季节O₃和PM_{2.5}协同控制提供科学支撑。

关键词: 臭氧(O₃); 挥发性有机物(VOCs); 广州; 污染过程; 正交矩阵因子分解法(PMF)

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)10-4305-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.202110168

Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter

PEI Cheng-lei^{1,2,3,4}, XIE Yu-tong^{5,6}, CHEN Xi^{5,7}, ZHANG Tao^{1,2,3,8}, QIU Xiao-nuan⁴, WANG Yu⁹, WANG Zai-hua^{10*}, LI Mei^{5,6}

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 2. Center for Excellence in Deep Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Guangzhou Sub-branch of Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510060, China; 5. Institute of Mass Spectrometry and Atmospheric Environment, Jinan University, Guangdong Provincial Engineering Research Center for On-line Source Apportionment System of Air Pollution, Guangzhou 510632, China; 6. Guangdong-Hongkong-Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Guangzhou 510632, China; 7. Guangzhou Hexin Instrument Co., Ltd., Guangzhou 510530, China; 8. Guangdong Ecological and Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China; 9. Jinan University Institute for Environmental and Climate Research, Guangzhou 510632, China; 10. Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: This study focused on an ozone pollution event occurring in winter (January) in Guangzhou. Various influencing factors were analyzed, including various atmospheric trace gases, meteorological conditions during the whole pollution process, as well as the characteristics of the main O₃ precursor volatile organic compounds (VOCs). The main sources of VOCs and the O₃ formation regime were analyzed using an array of tools: the ozone potential formation (OFP), positive matrix factorization (PMF) model, and empirical kinetic modeling approach (EKMA) curve. Feasible strategies for O₃ control were suggested. The results showed that O₃ and NO₂ exceeded the corresponding standards in this winter pollution event, when the concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} were also high, differing from the air pollution characteristics in summer and autumn. Low boundary layer height (<75 m) and high atmospheric stability at night exacerbated the accumulation of ozone precursors and fine particles. Meteorological conditions such as the increased daytime temperature (5℃), stronger solar radiation (10%), and low horizontal wind speed (<1 m·s⁻¹) favored photochemical reactions and promoted the formation of ozone and fine particles. VOCs were mainly composed of alkanes, and the proportions of alkanes and alkynes in winter were higher than those in the other seasons. Aromatics (xylenes and toluene) and propylene were the key VOCs species leading to O₃ formation. The main VOCs sources were vehicle exhaust (22.4%), solvent usage (20.5%), and industrial emissions (17.9%); however, the source with highest OFP was identified as solvent usage. O₃ formation in this event was in the VOCs-limited regime, and reducing O₃ precursors in the VOCs/NO_x ratio of 3:1 was effective and feasible for O₃ control. This study explored the causes of an O₃ pollution event in winter, which will serve as reference for the synergistic control of O₃ and PM_{2.5} in heavy pollution seasons.

Key words: ozone (O₃); volatile organic compounds (VOCs); Guangzhou; pollution process; positive matrix factorization (PMF)

收稿日期: 2021-10-22; 修订日期: 2022-02-07

基金项目: 广东省重点领域研发计划项目(2020B1111360001); 广东省自然科学基金重点项目(2016A030311007); 广东省科技计划项目(科技创新平台类)(2019B121201002); 广州市科技计划项目(202002020065); 广东省科学院发展专项(2021GDASYL-20210103058)

作者简介: 裴成磊(1983~),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为大气臭氧污染监测, E-mail: peichenglei@163.com

* 通信作者, E-mail: zaihuawang@163.com

近年来,随着大气污染防治的不断深入,我国大部分地区的 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度逐年下降,然而臭氧(O_3)污染状况却未有明显改善^[1],尤其在城市群区域,比如京津冀^[2~4]、长三角^[5~7]和珠三角^[8]地区,在夏秋季频现 O_3 浓度超标现象, O_3 已成为影响环境空气质量的重要因素^[9,10]. 近地面高浓度的 O_3 不仅造成农作物的减产和橡胶等材料的老化,还会损害人体呼吸道和心肺功能,导致哮喘、咳嗽甚至心血管疾病^[11~13]. 据 2016 年统计,全国有超过 30% 的人口生活在高于我国《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)中 O_3 二级标准($160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的环境中;如果根据世界卫生组织发布的全球空气质量准则(air quality guidelines, AQG 2021)中建议的标准($100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$),这一比例上升至约 67.2%^[14],可见我国 O_3 污染的严重性.

O_3 的生成与其前体物 NO_x 和 VOCs 的光化学反应密切相关,且三者之间存在复杂的非线性关系. 经验动力学建模方法(empirical kinetic modeling approach, EKMA)已被广泛用于研究 O_3 对 NO_x 和 VOCs 排放的非线性响应^[15~21];此外, O_3 的生成也易受到气象条件的影响^[22~25]. 在不利扩散条件下,除已生成 O_3 的传输以外,前体物在区域传输的过程中亦会生成 O_3 ,两者均会导致下风向地区 O_3 浓度上升,从而形成区域 O_3 污染事件^[26].

为针对性地制定减排措施,需明确各排放源对前体物的贡献. 有研究表明,珠三角地区的前体物排放中对 O_3 生成贡献最大的是交通源和溶剂使用源^[27~30],周胜等^[31]通过对珠三角城市群 O_3 和 VOCs 的污染特征分析发现,芳香烃是 VOCs 中对 O_3 生成影响较大的组分,并建议对机动车尾气、溶剂挥发和涂料使用排放的 VOCs 敏感组分进行控制. 协同减排也存在地域差异,Xiang 等^[32]的研究中建议在京津冀地区削减 ~60% 的 VOCs 以及 ~20% 的 NO_x 来达到 O_3 污染的控制. Chen 等^[33]通过对佛山市关键污染源的削减试验发现,同时削减 25% 的港口源与 50% 的有机溶剂源是实现 NO_2 与 O_3 协同控制的有效办法.

广州市处于珠三角地区的中心,虽然 $\text{PM}_{2.5}$ 已经连续 4 a 达标,但是 O_3 污染依然存在,且已经成为影响空气质量达标的的首要因素^[34],环境空气质量形式严峻. 另外,污染的季节性特征明显,冬春季以颗粒物污染为主,夏秋季以 O_3 污染为主^[31,35]. 不仅如此,近年来 O_3 超标出现的时间越发提前,并在冬季也罕见地出现了 O_3 超标,这为广州市大气污染防治

提出了新的挑战. 本文针对广州市 2020 年冬季一次典型的 O_3 污染过程进行了研究,主要包括:污染过程的环境指标污染物及气象变化特征、VOCs 变化特征及来源分布、 O_3 生成对前体物的敏感性分析和冬季 O_3 污染防控建议,以期为我国冬季 O_3 污染研究提供观测实例,并为制定防控对策提供现实参考.

1 材料与方法

1.1 监测站点和采样时间

采样点位于广州市中心城区的超级站(东经 $113^\circ15'35''$,北纬 $23^\circ07'59''$),如图 1 所示. 采样高度 25 m,采样口周围水平面具有 270° 以上的捕集空间的自由空间,采样口周围至少 50 m 范围内无明显固定污染源. 周围人口众多,交通道路较为密集,机动车尾气排放强度较大,餐饮也较为发达,能够代表广州市城市中心区域的环境特点.

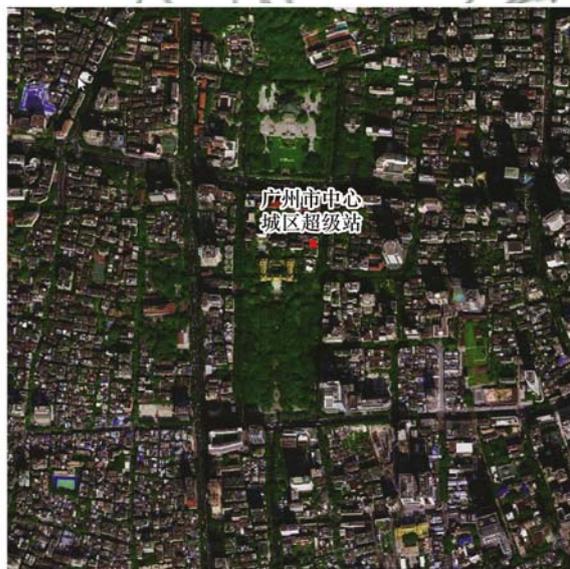


图 1 监测站点广州市中心城区超级站位置示意
Fig. 1 Geographic information for the sampling site of Guangzhou downtown super station

采样时间为 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 1 月 9 日,根据污染过程,将监测时间分为 3 个阶段,分别为污染前(1 月 1~3 日)、污染中(1 月 4 日)和污染后(1 月 5~9 日).

1.2 数据监测和质控

SO_2 、 CO 、 NO_2 、 NO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 O_3 和 VOCs 浓度的监测数据来源于广东省广州生态环境监测中心站,其中 SO_2 、 CO 、 NO_2/NO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 分别使用赛默飞世尔科技 43i(紫外脉冲荧光法)、48i(气体滤波相关红外吸收法)、42i(化学发光法)、5030i(β 射线加动态加热系统联用光散射法)、5014i(β 射线法)和 49i(紫外光度法)型分析仪分

析; VOCs 使用法国 Chromatotec 公司的 GC-866 (Chromatotec Inc., Vilsack, France) 分析系统, 该系统包括两套独立的分析仪和 FID 检测单元, 分别用来分析 $C_2 \sim C_6$ 和 $C_6 \sim C_{12}$ 的 VOCs 物种, 仪器采样流量为 $40 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$, 每个样品采集 10 min, 之后样品经吸附剂低温吸附富集, 再经过 220°C 热解吸后进入双 FID 检测系统, 分别分析低碳和高碳物种。

对于 SO_2 、 CO 、 NO_2 、 NO 、 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 项目的监测按照国家运维和质控规范开展, 每周开展仪器运行状态、零点和跨度的检查, 每月进行气体分析仪流量检查、每季度进行精密密度检查和臭氧量值传递, 每半年进行氮氧化物钨转换炉效率检查; 对于 VOCs 项目, 每月对分析系统进行多点校准, 使用 PAMs 物种混合标准气体 (Spectra Gases Inc., New Jersey, USA) 校准, 标准工作曲线浓度 (体积分数) 梯度 1×10^{-9} 、 2×10^{-9} 、 4×10^{-9} 、 6×10^{-9} 、 8×10^{-9} 和 10×10^{-9} , 对每个化合物建立工作曲线, 线性相关系数 R^2 均大于 0.98。

本文站点气象数据的监测使用维萨拉公司 WXT520, 此外部分气象数据使用了 ERA-5 数据集, 该数据集是基于数据同化系统的全球气象再分析资料, 来自欧洲天气预报中心 (ECMWF), 数据集时间分辨率为 1 h, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 选取了地表温度、地表 U/V、风矢量、地表辐射、边界层高度、垂直温度和垂直风场。

1.3 分析方法

1.3.1 大气稳定度 (理查森数 Ri)

在大气上, 理查森数 (Ri) 表示大气静力稳定度与垂直风切变的比值, 利用模式的结果来计算理查森数, 分析大气的稳定度变化情况, 理查森数的计算方法如下所示^[36]:

$$Ri(Z) = \frac{(g/\theta_{vs})(\theta_{vz} - \theta_{vs})(Z_z - Z_s)}{(u_z - u_s)^2 + (v_z - v_s)^2 + (\text{bu}_*^2)} \quad (1)$$

式中, Z 为距离地表的高度, g 为重力加速度, θ_v 为虚位温, u 和 v 为水平风的两个分量, 下标 z 和 s 分别为指定高度及地表高度。 bu_* 为摩擦速度, 可以忽略。 Ri 值较大时, 大气静力稳定度大或者垂直风切变小, 大气稳定, 有利于污染物的累积; 相反, 当 Ri 较小时, 大气静力稳定度小或者垂直风切变大, 大气不稳定, 有利于污染物的垂直扩散, 以及边界层附近的空气混合。

1.3.2 臭氧生成潜势

臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 为某 VOCs 化合物环境浓度与该 VOCs 的最大反应增量系数 (maximum incremental reactivity, MIR) 的

乘积, 计算公式为:

$$\text{OFP}_i = \text{MIR}_i \times [\text{VOCs}]_i \quad (2)$$

式中, $[\text{VOCs}]_i$ 为观测到的某 VOCs 物种在大气中的质量浓度 ($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$); MIR_i 为该 VOCs 在臭氧最大增量反应中的臭氧生成系数 ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 以 O_3/VOCs 计), 采用 Carter 研究的 MIR 系数^[37]。

1.3.3 经验动力学建模方法 (EKMA)

本研究中采用以光化学烟雾污染为主要研究对象的基于观测的光化学箱模型 (observation-based model, OBM), 其采用 CB05 碳键机制的光化学箱模型绘制 EKMA 曲线, 模拟各种不同 VOCs 和 NO_x 比例的情景, 从而量化 O_3 与前体物之间的非线性关系^[33]。具体操作为, 污染事件日 VOCs 和 NO_x 的平均浓度为模拟的实际情景, NO_x 和 VOCs 以外的参数保持不变, 以平均浓度的 5% 作为步长将 VOCs 和 NO_x 从 100% 削减到 0% 来建立情景矩阵。最后, 用模型输出的臭氧生成速率绘制 EKMA 曲线, 并比较 7 种不同 VOCs 和 NO_x 削减比例下臭氧生成速率的变化。

1.3.4 PMF 受体模型

运用 PMF 5.0 受体模型对大气 VOCs 数据开展来源解析。正交矩阵因子分解法 (positive matrix factorization, PMF) 是基于权重计算各化学组分的误差, 然后根据源的组成或指纹来量化源对样品及其贡献的数学方法^[38]。其分析原理是假设输入浓度为一个 $n \times m$ 的矩阵 X , 其中 n 为样品数, m 为化学组分数。根据最小加权平方的原理, 模型将矩阵 $X = G \times F + E$, 其中 G 为一个 $n \times p$ 的源贡献矩阵, F 为一个 $p \times m$ 的源成分谱矩阵, p 为主要污染源的数目, E 为残差矩阵。PMF 约束每个样品的源贡献为非负值, 然后依据样品的残差 e 和不确定性 u 使目标函数 Q 最小化, 可以同时确定污染源贡献值 G (相对值) 和污染源成分谱 F (化学成分相对浓度)。残差 e 和目标函数 Q 定义为:

$$e_{ij} = x_{ij} - \sum_{k=1}^p g_{ik} f_{kj} \quad (3)$$

$$(i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, p)$$

$$Q(E) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{e_{ij}}{s_{ij}} \right)^2 \quad (4)$$

2 结果与讨论

2.1 广州市冬季一次臭氧污染过程

2020 年 1 月 4 日在广州发生了一次 O_3 污染过程, 污染前、中和后这 3 个阶段的温度、相对湿度、 O_3 、 NO_2 、 NO 、 CO 、 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 随时间的变化序列如图 2 所示。本次 O_3 污染过程除 O_3 -8h

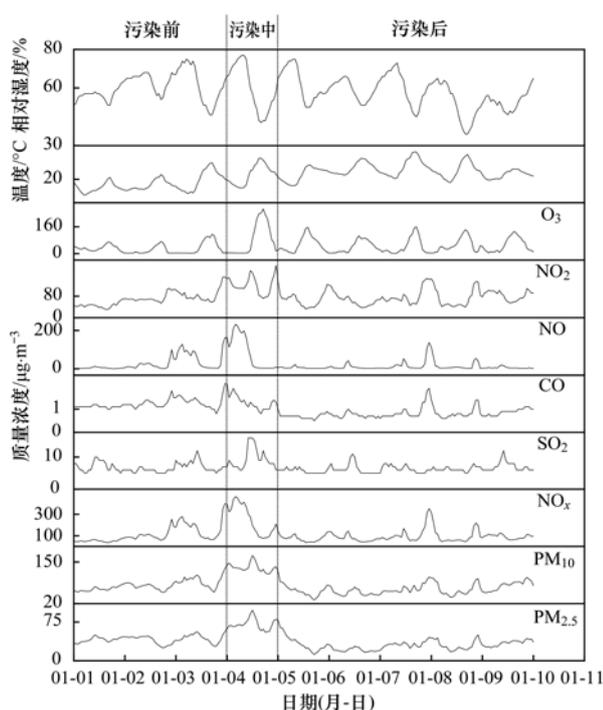


图2 监测期间(2020年1月1~9日)相对湿度、温度、O₃、NO₂、NO、CO、SO₂、NO_x、PM₁₀和PM_{2.5}时间变化

Fig. 2 Relative humidity, temperature, O₃, NO₂, NO, CO, SO₂, NO_x, PM₁₀, and PM_{2.5} time change during the monitoring period (Jan. 1-9, 2020)

(184.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 超标外, NO₂ (104.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 也同时出现了超标, 并且 PM₁₀ (136.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 和 PM_{2.5} (69.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 的质量浓度也显著升高, 处于接近超标的高位, 这与夏秋季常见的 O₃ 单项指标超标, 其他指标均呈现较低浓度的情况不同. 另外, 3 个阶段 15:00 时广东省地表温度、辐射和风速分布如图 3 所示, 大气稳定性和边界层高度如图 4 所示.

由图 4 可以看出, 在污染前(1月1~3日)大气处于较为稳定的状态中, 边界层高度偏低(74.5 m, 1月1~3日夜间边界层平均高度), 1月3日夜间从近地面到高空大气持续静稳, 边界层高度降低至 37.3 m(1月3日 22:00~1月4日 04:00 平均值), 大气容量进一步降低; 此外, 污染前站点周边地表风速偏低[图 3(c)], 1月3日 17:00~1月4日 05:00, 站点测得风速均低于 0.5 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 大气扩散条件差, 因此有利于污染物积累. 另一方面, 1月3日为周五, 周末外出车流与下班车流叠加导致 NO 排放增加, 大货车在 20:00 限行解除后, 进一步增强了 NO 排放. 污染前, 由于太阳辐射的减弱以及 NO 的滴定作用, O₃ 浓度迅速降低, 导致: ① NO₂ 自 1月3日 18:00 开始迅速积累, 并在 1月4日 01:00 达到峰值 152.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 并始终保持 110.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的较高浓度; ② O₃ 不断消耗, 在 1月3日 22:00 降低至个位数, 并在 1月4日 01:00 达到最低值 4.0

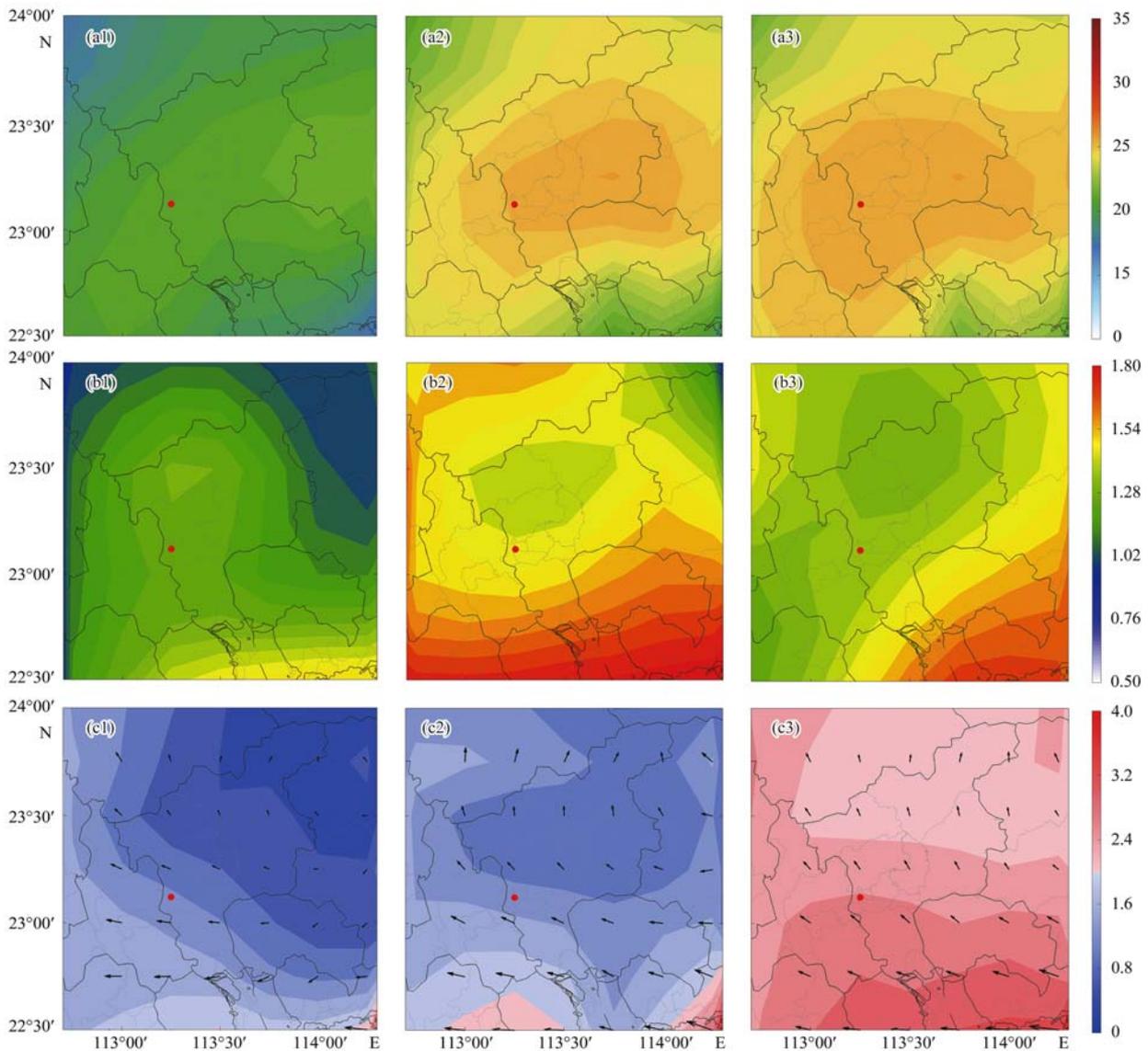
$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; ③ NO 自 1月3日 21:00 开始在短时间内得以快速地积累, 并在 1月4日 04:00 达到峰值 232.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 此时的 NO_x 也达到极大值 466.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 因此, 1月1~4日静稳的气象条件和较差的扩散条件, 加上周末前机动车的集中出行, 导致了 1月4日凌晨积累了大量的 NO_x, NO₂ 也持续维持在较高浓度, 为 1月4日白天的臭氧污染提供了充足的前体物. 污染中期, 广州市中部区域的地表温度要明显高于周边区域[图 3(a)], 并且地表辐射也较强[图 3(b)], 1月4日 10:00 开始, 站点温度保持 20℃ 以上的高温长达 16 h, 并在 15:00 和 16:00 时达到 25.4℃ 的高温, 期间风速也基本保持在 1.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下, 相对湿度在 14:00~20:00 维持在 50% 以下. 因此, 较强的辐射、高温和弱风, 有利于光化学反应, 从而导致 1月4日的臭氧污染事件. 污染后期, 站点风速逐渐增强, 地表辐射也显著降低, 边界层高度也有所增加, 整体大气扩散条件得以改善, 此外, 周末期间, 城市中心区域机动车的总体排放也有所降低, 臭氧污染过程结束.

2.2 VOCs 组分和臭氧生成潜势

污染前、中和后期前体物 VOCs 的质量浓度变化和 OFP 如表 1 所示. 质量浓度变化方面, 监测期间 VOCs 主要由烷烃和芳烃组成. 烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃在污染日的质量浓度均大于污染前和污染后, 污染日的 ρ (总 VOCs) 为 55.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 分别为污染前和后的 2.1 倍和 2.3 倍, 以烷烃质量浓度和芳香烃质量浓度增加尤为明显. OFP 方面, O₃ 污染前、中和后总 OFP 值分别为 168.1、365.2 和 170.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 污染日 OFP 是污染前后的 2.2 倍左右. 监测期间 OFP 贡献率最高的是芳香烃, 说明芳香烃是本次污染过程的主要贡献者, 其次是烷烃和烯烃, 炔烃对 O₃ 生成影响较小.

对比污染前、中和后, VOCs 各组分 OFP 排名前 10 如图 5 所示. 整个监测期间 OFP 排名前 10 组分大部分一致, 前 5 组分始终是间/对-二甲苯、甲苯、邻-二甲苯、丙烯和正丁烷. 其中, 间/对-二甲苯和甲苯在污染日的 OFP 超过 60.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 邻-二甲苯的 OFP 超过 30.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 这 3 个组分的增幅均超过 100%, 其余组分 OFP 介于 10.0~25.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 综合来看, 本次广州市臭氧污染期间, 二甲苯、甲苯和丙烯是臭氧污染形成的主要贡献者.

本研究与广州城区(包括越秀区、海珠区、荔湾区和天河区)其他季节^[39-42]和郊区^[43]夏季监测的大气非甲烷总烃(non-methane hydrocarbon, NMHCs)水平和特征进行对比, 如表 2 所示. 可以看到, 在本次冬季监测时段的 NMHCs 质量浓度为



(a) 地表温度(色柱单位 $^{\circ}\text{C}$), (b) 地表辐射(色柱单位 $10^6\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$), (c) 地表风速(色柱单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$);
1. 污染前, 2. 污染中, 3. 污染后; 红点位置代表超级站点

图3 污染前、中和后期气象参数变化

Fig. 3 Variation in meteorological parameters before, during, and after ozone pollution

表1 污染前、中和后期各类别 VOCs 质量浓度和 OFP 变化/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

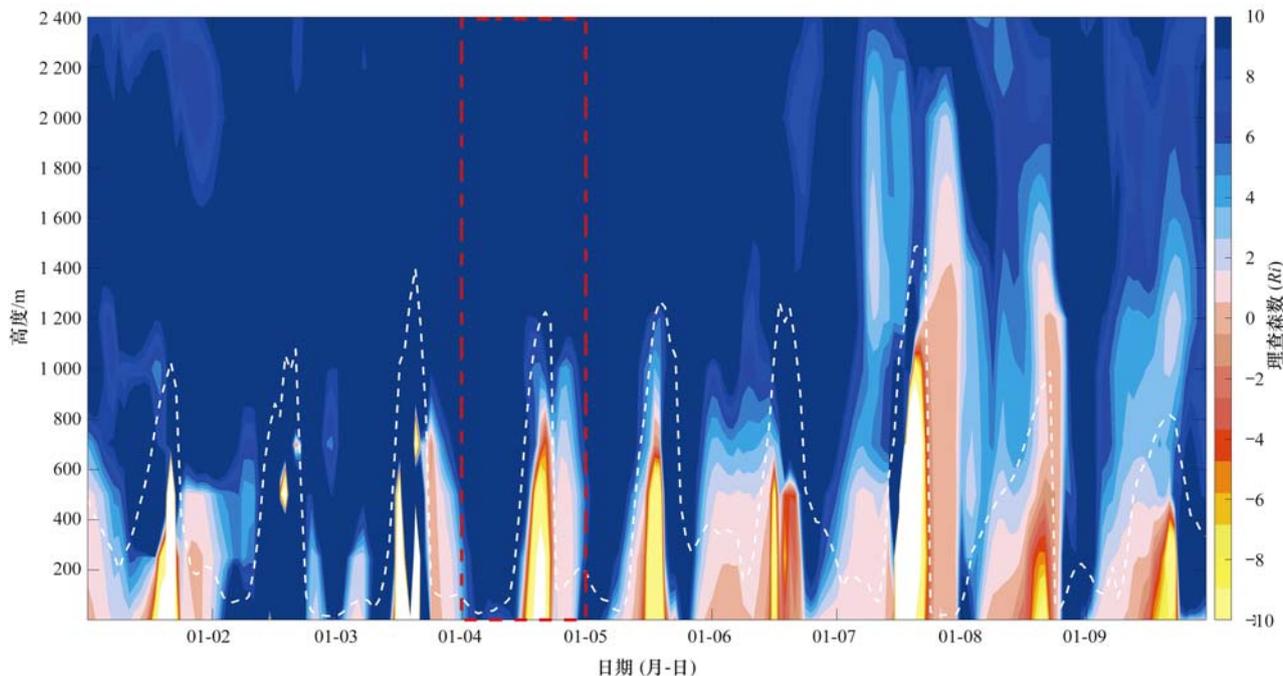
Table 1 Changes in the VOCs mass concentrations and OFP of each category before, during, and after pollution/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

项目	时期	烷烃	烯烃	乙炔	芳香烃	总 VOCs
质量浓度	污染前	19.2	1.1	2.1	4.3	26.7
	污染中	41.9	1.6	2.9	9.4	55.8
	污染后	17.8	0.8	1.6	4.6	24.8
OFP	污染前	43.2	25.9	2.2	96.8	168.1
	污染中	104.1	38.6	3.2	219.3	365.2
	污染后	45.6	18.1	1.7	104.6	170.0

$30.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 低于其他季节 ($34.7 \sim 44.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$). 从 NMHCs 组成分布来看, 广州市 NMHCs 主要以烷烃和芳香烃为主, 监测期间的烷烃 (68.2%) 和炔烃 (6.2%) 占比高于其他季节 (分别为 $58.5\% \sim 63.9\%$, $4.6\% \sim 6.0\%$); 烯烃占比

(3.1%) 明显比其他季节更低 ($8.8\% \sim 26.3\%$); 芳香烃的占比 (22.5%) 高于城区夏秋季 ($15.2\% \sim 21.9\%$), 低于春冬季节 ($24.0\% \sim 24.1\%$). 总的来说, 相比其他季节, 冬季监测期间内烷烃和炔烃贡献更加突出, 从图 6 中烷烃和炔烃主要分布的来源也

可以看出,这些物种主要来自于汽车尾气源和生物质燃烧源,这些来源的占比比其他时期更大.



白色虚线为边界层高度;红色方框为臭氧污染日(1月4日)

图4 监测期间(2020年1月1~9日)大气稳定度的垂直变化

Fig. 4 Atmospheric stability change in Guangzhou during the monitoring period (Jan. 1-9, 2020)

表2 不同监测时间和地区大气NMHCs水平和特征比较

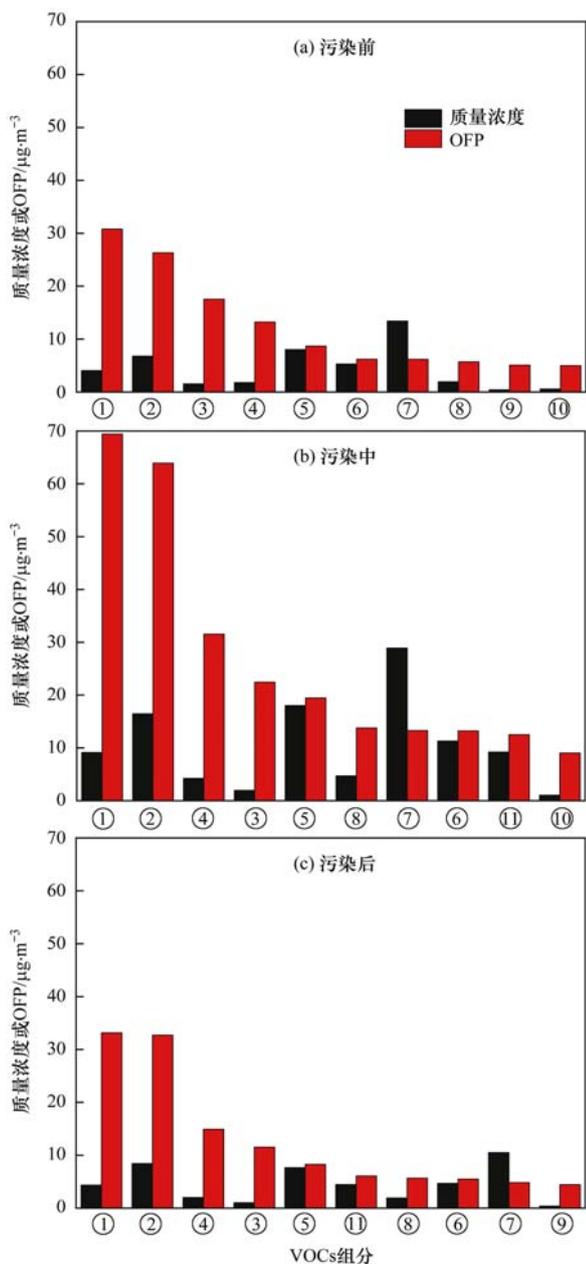
Table 2 Comparison of the NMHCs characteristics in different monitoring periods and regions

地点	日期(年-月-日)	NMHCs/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	NMHCs类别占比/%	OFP贡献率/%	文献
广州城区	2020-01-01~2020-01-09	30.7	烷烃(68.2)、烯烃(3.1)、炔烃(6.2)和芳香烃(22.5)	芳香烃(60.1)、烷烃(26.8)、烯烃(12.0)和炔烃(1.1)	本研究
广州城区	2013-04-01~2013-04-22	41.4	烷烃(60.5)、烯烃(9.5)、炔烃(6.0)和芳香烃(24.0)	—	[39]
广州城区	2016-07-04~2016-07-31	34.7	烷烃(63.8)、芳香烃(17.8)、烯烃(14.0)和乙炔(4.6)	芳香烃(39.4)、烯烃(37.6)、烷烃(22.6)和乙炔(0.4)	[40]
广州城区	2017-09-01~2017-11-30	31.2	烷烃(63.9)、芳香烃(21.9)、烯烃(8.8)和炔烃(5.4)	芳香烃(45.4)、烯烃(32.7)、烷烃(20.8)和炔烃(1.2)	[41]
广州城区	2008-10-19~2008-10-22	44.1	烷烃(58.5)、烯烃(26.3)和芳香烃(15.2)	烯烃(59.3)、烷烃(24.8)和芳香烃(15.8)	[42]
广州番禺	2011-06-01~2012-05-31	42.7	烷烃(59.0)、烯烃(16.9)和芳香烃(24.1)	—	[43]

从 OFP 贡献率来看,冬季广州 OFP 贡献以芳香烃为主,而夏秋季主要以芳香烃和烯烃为主.虞小芳等^[40]的研究中,夏季 OFP 最高的物种包括甲苯、反-2-戊烯、间/对-二甲苯、1,3-丁二烯和邻-二甲苯等,孟瑶^[41]的研究中,秋季 OFP 最高的物种包括间/对-二甲苯、甲苯、乙烯、乙苯和丙烯等,罗炜等^[42]的研究中,秋季 OFP 最高的物种包括顺式-2-丁烯、丁烯、反式-2-丁烯、乙醛和甲苯等.在冬季芳香烃的 OFP 会更突出,可能来自于溶剂使用源排放,说明本次污染过程溶剂使用源对 O₃ 本地生成影响更大.

2.3 VOCs 来源解析

运用 PMF 受体模型对本次 O₃ 污染过程的 VOCs 进行来源解析.通过实际 Q 值与理论 Q 值、模拟值和观测值的对比,数据残差的检验,各个因子的代表性和之间的分离度、各因子的特征物种的确定等,最终确定了6个不同的来源(图6),即工业排放源(17.9%)、油品挥发源(13.0%)、汽车尾气源(22.4%)、植物源(9.7%)、生物质燃烧源(16.5%)和溶剂使用源(20.5%),其中以汽车尾气源和溶剂使用源为主,与天津^[44]、湖州^[45]和上海^[46]情况一致,且与深圳^[47]和淄博^[48]情况也较为



VOCs 组分: ① 间/对-二甲苯, ② 甲苯, ③ 丙烯, ④ 邻-二甲苯, ⑤ 正丁烷, ⑥ 异丁烷, ⑦ 丙烷, ⑧ 乙苯, ⑨ 1,2,3-三甲基苯, ⑩ 1,2,4-三甲基苯, ⑪ 异戊烷

图 5 污染前、中和后的前 10 个高 OFP 组分的质量浓度和 OFP

Fig. 5 Mass concentrations and OFP contributions of the top ten high OFP components before, during and after pollution

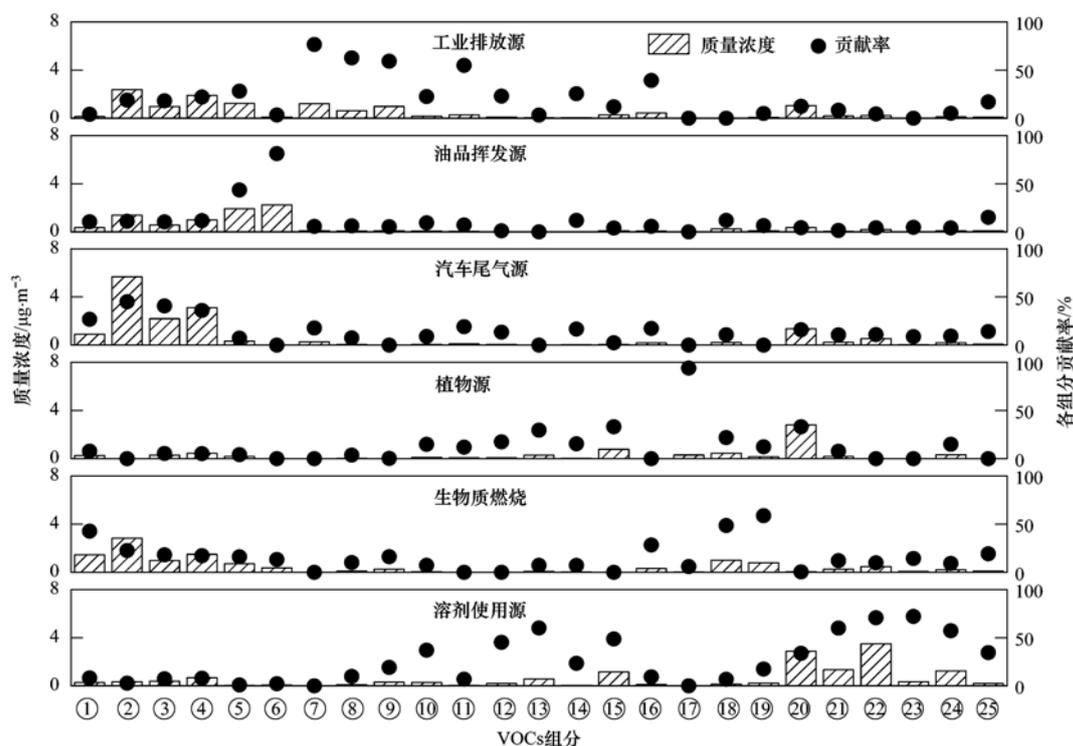
类似. 其中溶剂使用源占比显著小于夏季 (26.6%^[49] 和 28.6%^[41]), 也小于天津、湖州、上海和淄博地区 (表 3), 这可能与季节性有关. 但是显著高于临近的深圳市 (12.7%), 这可能与深圳市对溶剂使用源的管控有关. 从各来源的 OFP 贡献率可以看出 (表 3), 对 O_3 生成影响最大的是溶剂使用源, OFP 贡献率为 36.6%, 其中近 50% 的 OFP 来自间/对-二甲苯, 深圳、天津和湖州也表现出类似的特征. 虽然在冬季溶剂使用源的贡献下降, 但仍然

对广州冬季 O_3 生成起到主导的作用. 其次是机动车尾气源和工业排放源, 其 OFP 贡献率分别为 15.5% 和 15.0%. Ou 等^[50] 通过制定珠三角地区特定 OVOCs 和 VOCs 排放清单, 发现乙烯、间/对-二甲苯、甲苯和 1,2,4-三甲基苯等 24 种高 OFP 物种在当地人为排放中占比 52.0% 且 OFP 贡献高达 80.0%, 而工业溶剂、工业过程、汽油车和摩托车是这些关键反应物种的主要排放源, 这与本研究结果基本相符.

2.4 臭氧敏感性分析

根据污染日 (1 月 4 日) 15:00 时的观测结果绘制了 EKMA 曲线如图 7(a) 所示. 基于实际情况模拟的情景中削减 VOCs 时 O_3 浓度降低, 而削减 NO_x 时 O_3 浓度反而升高, 由此判断当地处于 VOCs 控制区. 图 7(b) 基于 EKMA 曲线结果, 对实际情况前体物的削减共设置了 7 种削减方案, 分别为: VOCs 与 NO_x 按比例 3:1、2:1、1:1、1:2、1:3 削减、仅削减 VOCs 和仅削减 NO_x , 用来反映不同前体物削减方案导致的 O_3 浓度变化百分比. 仅削减 VOCs 时, O_3 随着 VOCs 削减而减少, 削减 VOCs 至 30%, 将使得模拟 O_3 浓度降低到 $200 \mu g \cdot m^{-3}$, 即达到国家规定二级标准. 类似地, 在 VOCs/ NO_x 削减比例为 3:1 的情况下, VOCs 和 NO_x 的总削减百分比达到 50% (VOCs 削减 37.5%, NO_x 削减 12.5%) 即可实现 O_3 达标; 在 VOCs/ NO_x 削减比例为 2:1 的情况下, VOCs 和 NO_x 的总削减百分比达到 60% (VOCs 削减 40%, NO_x 削减 20%) 即可实现 O_3 达标. 其他削减方案 (包括仅削减 NO_x 和 VOCs/ NO_x 削减比例为 1:1、1:2 和 1:3) 即使总削减百分比达到 90% (VOCs 和 NO_x 均削减 45%; VOCs 削减 30%, NO_x 削减 60%; 或 VOCs 削减 22.5%, NO_x 削减 67.5%), 也无法实现 O_3 达标.

考虑到 VOCs 来源广泛且复杂, 在大幅度减排方面存在困难, 因此不推荐 VOCs 和 NO_x 总削减量超过 90% 的方案. 通过上述内容总结了几种可供参考的 O_3 前体物削减方案, 如表 4 所示. 可以看出, 3 种削减方案中仅削减 VOCs 的削减量需求最低, 但是其合理性和可行性都存在一定问题, 一般选择 VOCs 和 NO_x 结合削减治理方案, 且 Wang 等^[51] 的研究指出, 只有当 VOCs/ NO_x 削减比例大于 2:1, 珠三角的 O_3 污染才能得到有效缓解. 对比方案 2 和 3 的 VOCs 与 NO_x 的削减需求, 很明显方案 2, 即 VOCs/ NO_x 削减比例为 3:1 (VOCs 削减 37.5%, NO_x 削减 12.5%) 更适用于实际 O_3 的控制和治理中.



VOCs 组分:①乙烷, ②丙烷, ③异丁烷, ④正丁烷, ⑤异戊烷, ⑥正戊烷, ⑦2-甲基戊烷, ⑧3-甲基戊烷, ⑨正己烷, ⑩环己烷, ⑪2,2,4-三甲基戊烷, ⑫甲基环己烷, ⑬2,3,4-三甲基戊烷, ⑭3-甲基庚烷, ⑮正辛烷, ⑯丙烯, ⑰异戊二烯, ⑱乙炔, ⑲苯, ⑳甲苯, ㉑乙苯, ㉒间/对-二甲苯, ㉓苯乙烯, ㉔邻-二甲苯, ㉕间-乙基甲苯

图 6 不同 VOCs 来源的识别分布

Fig. 6 Identification and apportionment of different VOCs sources

表 3 不同监测时间和地区来源和 OFP 贡献分布对比

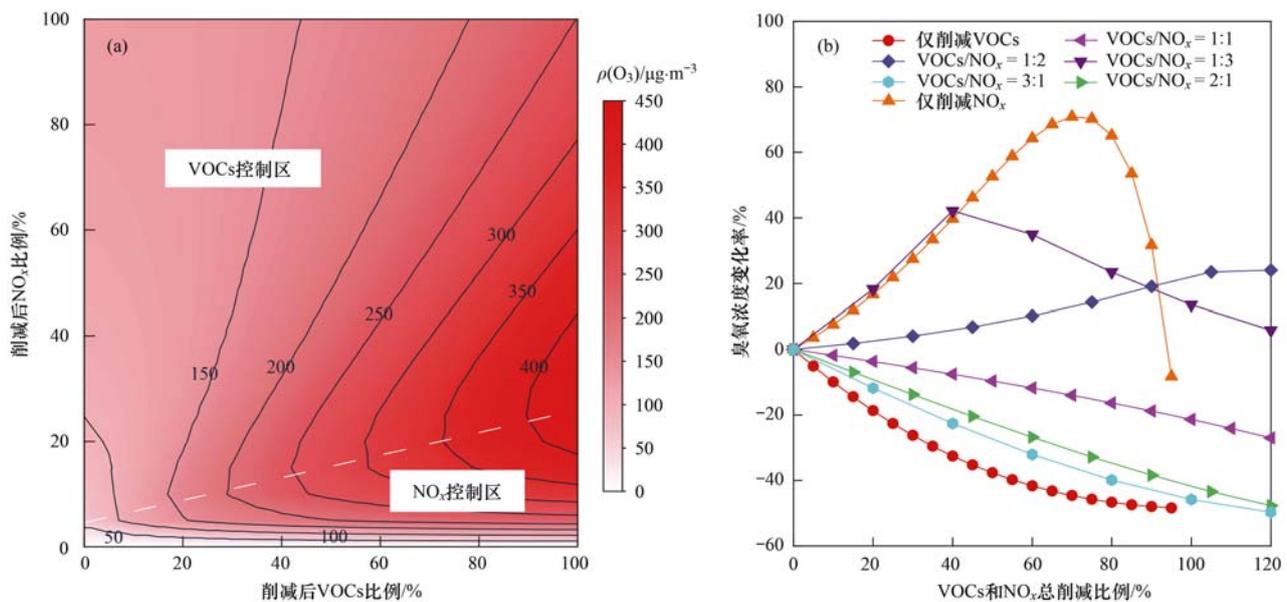
Table 3 Comparison of source apportionments and OFP contributions in different monitoring periods and regions

地点	季节	污染时段	来源占比/%	OFP 贡献率/%	文献
广州城区	冬季	周末	汽车尾气源(22.4)、溶剂使用源(20.5)、工业排放源(17.9)、生物质燃烧源(16.5)、油品挥发源(13.0)和植物源(9.7)	溶剂使用源(36.6)、汽车尾气源(15.5)、工业排放源(15.0)、植物源(12.5)、生物质燃烧源(11.8)和油品挥发源(8.6)	本研究
深圳城区	秋季	周末+工作日	汽油挥发源(26.0)、机动车尾气源(21.2)、溶剂使用源(12.7)、生物质燃烧源(27.3)和工业过程源(12.8)	溶剂使用源(45.8)、机动车尾气源(27.3)、汽油挥发源(15.6)、生物质燃烧源(7.5)和工业过程源(3.8)	[47]
天津城区	夏季	未注明	化工排放和溶剂使用源(29.0)、机动车尾气源(27.0)、天然气和液化石油气源(16.0)、汽油挥发源(15.0)和燃烧源(12.0)	化工排放和溶剂使用源(33.0)、天然气和液化石油气源(33.0)、机动车尾气源(19.0)、汽油挥发源(8.0)和燃烧源(7.0)	[44]
湖州城区	秋季	周末	溶剂使用源(27.0)、交通排放源(22.7)、背景+传输(19.3)、工业排放源(16.9)、汽油挥发(7.7)和植物排放源(6.4)	交通排放源(35.1)、溶剂使用源(30.5)、工业排放源(14.2)、植物排放源(8.9)、背景+传输(7.0)和汽油挥发(4.3)	[45]
上海城区	夏季	周末	机动车源(32.0)、溶剂使用源(29.0)、化工工艺源(16.0)、石化工艺源(15.0)和天然源(8.0)	—	[46]
淄博城区	夏季	未注明	机动车源(32.3)、固定燃烧源(24.2)、溶剂使用源(23.6)、工艺过程源(12.7)和天然植物源(7.2)	—	[48]

表 4 VOCs 和 NO_x 总削减量低于 120% 的臭氧达标方案汇总

Table 4 Summary of O₃ compliance strategies with a total reduction of VOCs and NO_x less than 120%

方案编号	VOCs 削减/%	NO _x 削减/%	总削减/%	备注
1	30	0	30	仅削减 VOCs
2	37.5	12.5	50	VOCs/NO _x 削减比例 3:1
3	40	20	60	VOCs/NO _x 削减比例 2:1



(a) EKMA 曲线; (b) 不同比例的削减方案模拟

图7 EKMA 曲线和不同比例的前体物削减方案模拟

Fig. 7 EKMA curve and simulation of reduction plans

3 结论

(1) 2020年1月上旬广州市冬季一次O₃污染过程,叠加了NO₂超标,并且PM₁₀和PM_{2.5}浓度也处于高位,体现出和夏秋季不同的特征。气象条件是重要的外因,VOCs等前体物快速光化学反应是O₃累积污染的内因。较强太阳辐射和较高气温,促进了前体物快速光化学氧化二次生成O₃,而夜间稳定大气层和不利的水平扩散条件,使得各种污染积累形成污染。

(2) VOCs变化特征方面,冬季监测期间内VOCs以烷烃为主,烷烃和炔烃占比比其他季节更高,芳香烃对O₃生成的贡献最为突出,二甲苯、甲苯和丙烯是本次污染的关键前体物种。VOCs来源分布方面,广州市冬季的VOCs来源主要为汽车尾气、溶剂使用和工业排放源,但是溶剂使用源的OFP贡献最大。

(3) O₃污染过程处于VOCs敏感区,应优先控制VOCs排放,以VOCs与NO_x比例为3:1进行削减时O₃控制效果最佳。

(4) 总而言之,气象条件与前体物快速光化学反应是本次冬季臭氧污染主要原因。建议广州冬季O₃污染控制以VOCs与NO_x为3:1(即VOCs削减37.5%,NO_x削减12.5%)比例进行削减,VOCs来源应主要以控制溶剂使用源的排放为主。

参考文献:

[1] 中华人民共和国生态环境部. 2020 中国生态环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/202105/P020210526572756184785.pdf>, 2021-05-26.

[2] Wang Z B, Li J X, Liang L W. Spatio-temporal evolution of ozone pollution and its influencing factors in the Beijing-Tianjin-Hebei urban Agglomeration [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **256**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113419.

[3] Chen S Y, Wang H C, Lu K D, et al. The trend of surface ozone in Beijing from 2013 to 2019: indications of the persisting strong atmospheric oxidation capacity [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117801.

[4] Chen Z Y, Zhuang Y, Xie X M, et al. Understanding long-term variations of meteorological influences on ground ozone concentrations in Beijing During 2006-2016 [J]. *Environmental Pollution*, 2019, **245**: 29-37.

[5] Shu L, Wang T J, Han H, et al. Summertime ozone pollution in the Yangtze River Delta of eastern China during 2013-2017: synoptic impacts and source apportionment [J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113631.

[6] Qin Y, Li J Y, Gong K J, et al. Double high pollution events in the Yangtze River Delta from 2015 to 2019: characteristics, trends, and meteorological situations [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **792**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.148349.

[7] Gong K J, Li L, Li J Y, et al. Quantifying the impacts of inter-city transport on air quality in the Yangtze River Delta urban agglomeration, China: implications for regional cooperative controls of PM_{2.5} and O₃ [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **779**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146619.

[8] 赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006~2019年珠三角地区臭氧污染趋势 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 97-105.
Zhao W, Gao B, Lu Q, et al. Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006-2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.

[9] Yang L F, Xie D P, Yuan Z B, et al. Quantification of regional ozone pollution characteristics and its temporal evolution: insights from identification of the impacts of meteorological conditions and emissions [J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(2), doi: 10.3390/atmos12020279.

[10] 严刚, 薛文博, 雷宇, 等. 我国臭氧污染形势分析及防控对

- 策建议[J]. 环境保护, 2020, **48**(15): 15-19.
- Yan G, Xue W B, Lei Y, *et al.* Situation and control measures of ozone pollution in China[J]. Environmental Protection, 2020, **48**(15): 15-19.
- [11] 赵楠, 卢毅敏. 中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估[J]. 环境科学, 2022, **43**(3): 1235-1245.
- Zhao N, Lu Y M. Estimation of surface ozone concentration and health impact assessment in China[J]. Environmental Science, 2022, **43**(3): 1235-1245.
- [12] Zhang W W, Feng Z Z, Wang X K, *et al.* Quantification of ozone exposure- and stomatal uptake-yield response relationships for soybean in Northeast China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **599-600**: 710-720.
- [13] Zhang J Y, Chen Q, Wang Q Q, *et al.* The acute health effects of ozone and PM_{2.5} on daily cardiovascular disease mortality: a multi-center time series study in China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, **174**: 218-223.
- [14] Maji K J, Ye W F, Arora M, *et al.* Ozone pollution in Chinese cities: assessment of seasonal variation, health effects and economic burden [J]. Environmental Pollution, 2019, **247**: 792-801.
- [15] Fan M Y, Zhang Y L, Lin Y C, *et al.* Source apportionments of atmospheric volatile organic compounds in Nanjing, China during high ozone pollution season[J]. Chemosphere, 2021, **263**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128025.
- [16] Santos F M, Gómez-Losada Á, Pires J C M. Empirical ozone isopleths at urban and suburban sites through evolutionary procedure-based models [J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, **419**, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126386.
- [17] Su R, Lu K D, Yu J Y, *et al.* Exploration of the formation mechanism and source attribution of ambient ozone in Chongqing with an observation-based model [J]. Science China Earth Sciences, 2018, **61**(1): 23-32.
- [18] Gao Y, Yan F F, Ma M C, *et al.* Unveiling the dipole synergic effect of biogenic and anthropogenic emissions on ozone concentrations[J]. Science of the Total Environment, 2022, **818**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151722.
- [19] Shen H Z, Sun Z, Chen Y L, *et al.* Novel method for ozone isopleth construction and diagnosis for the ozone control strategy of Chinese cities [J]. Environmental Science & Technology, 2021, **55**(23): 15625-15636.
- [20] 崔金梦, 王体健, 李秋潼, 等. 连云港市挥发性有机化合物的组分特征及来源解析[J]. 环境科学, 2020, **41**(9): 3941-3950.
- Cui J M, Wang T J, Li Q T, *et al.* Component characteristics and source appointment of volatile organic compounds in Lianyungang city [J]. Environmental Science, 2020, **41**(9): 3941-3950.
- [21] 李凯, 刘敏, 梅如波. 泰安市大气臭氧污染特征及敏感性分析[J]. 环境科学, 2020, **41**(8): 3539-3546.
- Li K, Liu M, Mei R B. Pollution characteristics and sensitivity analysis of atmospheric ozone in Taian city [J]. Environmental Science, 2020, **41**(8): 3539-3546.
- [22] Yang J B, Liu J L, Han S Q, *et al.* Study of the meteorological influence on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends in all seasons from 2009 to 2015 in Tianjin, China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2019, **131**(6): 1661-1675.
- [23] Ding D, Xing J, Wang S X, *et al.* Impacts of emissions and meteorological changes on China's ozone pollution in the warm seasons of 2013 and 2017 [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2019, **13**(5), doi: 10.1007/s11783-019-1160-1.
- [24] 何超, 慕航, 杨璐, 等. 中国暖季近地面臭氧浓度空间格局演变及主要气象驱动因素[J]. 环境科学, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- He C, Mu H, Yang L, *et al.* Spatial variation of surface ozone concentration during the warm season and its meteorological driving factors in China [J]. Environmental Science, 2021, **42**(9): 4168-4179.
- [25] 赵恺辉, 包云轩, 黄建平, 等. 华南地区春季平流层入侵对对流层低层臭氧影响的模拟研究[J]. 大气科学, 2019, **43**(1): 75-86.
- Zhao K H, Bao Y X, Huang J P, *et al.* A modeling study of the impact of stratospheric intrusion on ozone enhancement in the lower troposphere in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, **43**(1): 75-86.
- [26] Liu Y H, Wang H L, Jing S G, *et al.* Characteristics and sources of volatile organic compounds (VOCs) in Shanghai during summer; implications of regional transport [J]. Atmospheric Environment, 2019, **215**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116902.
- [27] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国人为源 VOC 排放清单不确定性研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 305-312.
- Wei W, Wang S X, Hao J M. Uncertainty analysis of emission inventory for volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 305-312.
- [28] Yang W Y, Chen H S, Wang W D, *et al.* Modeling study of ozone source apportionment over the Pearl River Delta in 2015 [J]. Environmental Pollution, 2019, **253**: 393-402.
- [29] 黄丽滢. 深圳市某区域 PM_{2.5} 与臭氧源解析及协同减排研究 [D]. 深圳: 哈尔滨工业大学, 2019.
- Huang L Y. Study on the source apportionment and synergistic emission reduction of PM_{2.5} and ozone in a certain area of Shenzhen [D]. Shenzhen: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [30] 陈皓, 王雪松, 沈劲, 等. 珠江三角洲秋季典型光化学污染过程中的臭氧来源分析[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2015, **51**(4): 620-630.
- Chen H, Wang X S, Shen J, *et al.* Ozone source apportionment of typical photochemical pollution episodes in the Pearl River Delta in autumn [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2015, **51**(4): 620-630.
- [31] 周胜, 黄报远, 陈慧英, 等. 珠三角城市群 PM_{2.5} 和 O₃ 污染特征及 VOCs 组分敏感性分析[J]. 环境工程, 2020, **38**(1): 42-47, 92.
- Zhou S, Huang B Y, Chen H Y, *et al.* Pollution characteristics of PM_{2.5} and O₃ in the Pearl River Delta and the sensitivity analysis of VOCs components [J]. Environmental Engineering, 2020, **38**(1): 42-47, 92.
- [32] Xiang S L, Liu J F, Tao W, *et al.* Control of both PM_{2.5} and O₃ in Beijing-Tianjin-Hebei and the surrounding areas [J]. Atmospheric Environment, 2020, **224**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117259.
- [33] Chen X, Situ S P, Zhang Q, *et al.* The synergetic control of NO₂ and O₃ concentrations in a manufacturing city of southern China [J]. Atmospheric Environment, 2019, **201**: 402-416.
- [34] 广州市生态环境局. 2020年广州市环境质量状况公报 [EB/OL]. <http://sthjj.gz.gov.cn/attachment/6/6828/6828990/7386711.pdf>, 2021-07-19.
- [35] 湛社霞. 粤港澳大湾区常规大气污染物变化趋势与影响因素研究 [D]. 广州: 中国科学院大学, 2018.

- Zhan S X. Research on changing trend and influencing factors of conventional air pollutants in Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [36] Guo J P, Miao Y C, Zhang Y, *et al.* The climatology of planetary boundary layer height in China derived from radiosonde and reanalysis data [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(20): 13309-13319.
- [37] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [R]. California Air Resources Board Contract 07-339, Riverside: University of California, 2009.
- [38] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: a non-negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994, **5**(2): 111-126.
- [39] 周炎, 岳珂利, 张涛. 春季广州城区空气中 VOCs 来源解析 [J]. *环境监控与预警*, 2017, **9**(1): 42-47.
- Zhou Y, Yue D L, Zhang T. Source apportionment of spring ambient volatile organic compounds in Guangzhou [J]. *Environmental Monitoring and Forewarning*, 2017, **9**(1): 42-47.
- [40] 虞小芳, 程鹏, 古颖纲, 等. 广州市夏季 VOCs 对臭氧及 SOA 生成潜势的研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 830-837.
- Yu X F, Cheng P, Gu Y G, *et al.* Formation potential of ozone and secondary organic aerosol from VOCs oxidation in summer in Guangzhou, China [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 830-837.
- [41] 孟瑶. 广州城市和郊区站点大气挥发性有机物特征研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- Meng Y. Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) at the urban and suburban sites in Guangzhou, China [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [42] 罗玮, 王伯光, 刘舒乐, 等. 广州大气挥发性有机物的臭氧生成潜势及来源研究 [J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(5): 80-86.
- Luo W, Wang B G, Liu S L, *et al.* VOC ozone formation potential and emission sources in the atmosphere of Guangzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(5): 80-86.
- [43] Zou Y, Deng X J, Zhu D, *et al.* Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO_x and O₃ at a suburban site in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(12): 6625-6636.
- [44] 罗瑞雪, 刘保双, 梁丹妮, 等. 天津市郊夏季的臭氧变化特征及其前体物 VOCs 的来源解析 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 75-87.
- Luo R X, Liu B S, Liang D N, *et al.* Characteristics of ozone and source apportionment of the precursor VOCs in Tianjin suburbs in summer [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 75-87.
- [45] 常艳春, 魏莉, 杨晓红, 等. 2017 年 8-9 月潮州市臭氧污染特征及其生成机制研究 [J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2020, **12**(6): 739-748.
- Chang Y C, Wei L, Yang X H, *et al.* Ozone pollution and its formation mechanism in Huzhou during 2017 [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, **12**(6): 739-748.
- [46] 林燕芬, 段玉森, 高宗江, 等. 基于 VOCs 加密监测的上海典型臭氧污染过程特征及成因分析 [J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(1): 126-133.
- Lin Y F, Duan Y S, Gao Z J, *et al.* Typical ozone pollution process and source identification in Shanghai based on VOCs intense measurement [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(1): 126-133.
- [47] 林理量, 程勇, 曹礼明, 等. 深圳臭氧污染日的 VOCs 组成与来源特征 [J]. *中国环境科学*, 2021, **41**(8): 3484-3492.
- Lin L L, Cheng Y, Cao L M, *et al.* The characterization and source apportionment of VOCs in Shenzhen during ozone polluted period [J]. *China Environmental Science*, 2021, **41**(8): 3484-3492.
- [48] 王帅, 王秀艳, 杨文, 等. 淄博市城区臭氧超标期间的 VOCs 污染特征与来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(3): 1277-1285.
- Wang S, Wang X Y, Yang W, *et al.* Characteristics and source analysis of VOCs pollution during the period of ozone exceeding the standard in Zibo city [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(3): 1277-1285.
- [49] 古颖纲, 虞小芳, 杨闻达, 等. 广州市天河区 2016 年雨季挥发性有机物污染特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(6): 2528-2537.
- Gu Y G, Yu X F, Yang W D, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds in the rainy season of Guangzhou city [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(6): 2528-2537.
- [50] Ou J M, Zheng J Y, Li R R, *et al.* Speciated OVOC and VOC emission inventories and their implications for reactivity-based ozone control strategy in the Pearl River Delta region, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 393-402.
- [51] Wang N, Lyu X P, Deng X J, *et al.* Aggravating O₃ pollution due to NO_x emission control in eastern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, **677**: 732-744.

CONTENTS

Regionalization and Analysis of PM _{2.5} and O ₃ Synergetic Prevention and Control Areas Based on Remote Sensing Data	LI Shen-xin, ZOU Bin, ZHANG Feng-ying, <i>et al.</i> (4293)
Analysis of a Typical Ozone Pollution Process in Guangzhou in Winter	PEI Cheng-lei, XIE Yu-tong, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4305)
Establishment and Application of Foshan Ozone Concentration Forecast Equation	CHEN Chen, HONG Ying-ying, TAN Hao-bo, <i>et al.</i> (4316)
Establishment of High-Resolution Emissions Inventory in Wuhan and Its Application in Exploring the Causes of Ozone Pollution	ZHANG Rui-xin, CHU Bo, SHANG Chun-lin, <i>et al.</i> (4327)
Investigating the Pollutants of Marine Shipping Emissions Along the East China Sea by Combining in-situ Measurements and Automatic Identification System QIU Hao, LIU Dan-tong, WU Yang-zhou, <i>et al.</i> (4338)
Chemical Component of Particulate Matters and VOCs Characteristics During Vehicle Brake Processes	MEN Zheng-yu, LIU Du-you, GUO Quan-you, <i>et al.</i> (4348)
Characterization of VOCs Emissions from Caged Broiler House in Winter	CAO Tian-tian, ZHENG Yun-hao, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (4357)
Concentrations and Community Structures of Culturable Bacteria in Aerosols of Household Garbage Stations in Shanghai	LU Bing-jie, ZHANG Xiang, WANG Chuan, <i>et al.</i> (4367)
Inventory and Distribution Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emissions in Zhejiang Province from 2008 to 2018	FANG Li-jiang, YANG Yi-qun, YE Guan-qiong (4380)
Roadmap of Coal Control and Carbon Reduction in the Steel Industry Under the Carbon Peak and Neutralization Target	XUE Ying-lan, ZHANG Jing, LIU Yu, <i>et al.</i> (4392)
Carbon Emission Reduction Effect of Spatial Correlation Network Structure Characteristics: From the Perspective of Urban Agglomeration	ZHENG Hang, YE A-zhong (4401)
Pollution and Carbon Reduction Effect of OFDI in China and Its Mechanism	BAI Zi-han, LÜ Lian-hong, ZHAO Ming-xuan, <i>et al.</i> (4408)
Variation Characteristics of Surface Water Quality in China in Recent Years	JI Xiao-yan, HOU Huan-huan, WANG Shan-shan, <i>et al.</i> (4419)
Distribution, Risk, and Influencing Factors of Microplastics in Surface Water of Huangshui River Basin	FAN Meng-yuan, HUANG Yi-mei, ZHANG Hai-xin, <i>et al.</i> (4430)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Surface Water of the Fenhe River Basin and Influence Factors	ZHAO Chun-hong, SHEN Hao-yong, WANG Zhi-heng, <i>et al.</i> (4440)
Characteristics and Causes of High-manganese Groundwater in Pearl River Delta During Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4449)
Characteristics and Causes of Groundwater Salinization in the Plain Area of the Lower Kashgar River	LU Han, ZENG Yan-yan, ZHOU Jin-long, <i>et al.</i> (4459)
Sources and Biogeochemical Processes of Nitrate in the Laolongdong Karst Underground River Basin, Chongqing	WANG Yu-yang, YANG Ping-heng, ZHANG Jie-ru (4470)
Succession Pattern and Consequences of the Dominant Species During Cyanobacterial Bloom and Its Influencing Factors	OUYANG Tian, ZHAO Lu, JI Lu-lu, <i>et al.</i> (4480)
Structural Characteristics of Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Group of Drinking Water Reservoirs by Water Transmission from Modaomen Waterway in Zhuhai	ZHANG Mo-li, WANG En-rui, CHANG Sheng, <i>et al.</i> (4489)
Effects of Nutrients on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i> and Bacteria in the Phycosphere	LÜ Ping, LI Hui-li, XU Yong, <i>et al.</i> (4502)
Effect of Aging on Adsorption of Tetracycline by Microplastics and the Mechanisms	WANG Lin, WANG Shu-xin, ZENG Xiang-ying, <i>et al.</i> (4511)
Effect of Colloids in Sediment and Soil on Their Sorption Behavior of Chloramphenicol	YAN Cai-xia, LUO Yan-qing, NIE Ming-hua, <i>et al.</i> (4522)
Historical Antibiotic Stress Changed the Effects of Sulfamethoxazole and Trimethoprim on Activated Sludge; ARGs and Potential Hosts ZHANG Zhong-xing, FAN Xiao-yan, LI Xing, <i>et al.</i> (4536)
Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Soil of a Typical Lead-Zinc Mining Area, Yangshuo	CHEN Meng, PAN Yong-xing, HUANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4545)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Baiyangdian Lake	ZHENG Fei, GUO Xin, TANG Ming-yang, <i>et al.</i> (4556)
Spatial Differentiation and Influencing Factor Analysis of Soil Heavy Metal Content at Town Level Based on Geographic Detector	GONG Cang, WANG Liang, WANG Shun-xiang, <i>et al.</i> (4566)
Heavy Metal Emissions from Coal-fired Power Plants and Heavy Metal Pollution Characteristics and Health Risks in Surrounding Soils CHE Kai, CHEN Chong-ming, ZHENG Qing-yu, <i>et al.</i> (4578)
Enrichment Factors, Health Risk, and Source Identification of Heavy Metals in Agricultural Soils in Semi-arid Region of Hainan Island YANG Jian-zhou, GONG Jing-jing, WANG Zhen-liang, <i>et al.</i> (4590)
Speciation and Pollution Assessment of Heavy Metals in Mangrove Surface Sediments in Jiulong River Estuary	ZHANG Hua-lan, YU Rui-lian, WAN Rui-an, <i>et al.</i> (4601)
Status of Heavy Metal in Organic Fertilizers in Main Tea Growing Regions of China	YI Xiao-yun, FANG Li, YANG Xiang-de, <i>et al.</i> (4613)
Accumulation Characteristics and Sources of PAEs in Agricultural Soils in Gansu Province	CHEN Yu-yu, ZHANG Guang-quan, ZHANG Yang, <i>et al.</i> (4622)
Distribution Characteristics of Soil Phosphorus Forms and Phosphatase Activity at Different Altitudes in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone in Pengxi River, Three Gorges Reservoir GAO Yi-lun, FANG Fang, TANG Zi-chao, <i>et al.</i> (4630)
Characteristics of Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Other Soil Physical and Chemical Factors in Cotton Fields with Different Continuous Cropping Years in the Oasis on the Northern Edge of Tarim Basin	LI Xin-zhu, GONG Lu, TANG Jun-hu, <i>et al.</i> (4639)
Response of Soil Respiration Rates to Soil Temperature and Moisture at Different Soil Depths of <i>Caragana korshinskii</i> Plantation in the Loess-Hilly Region SUN Ya-rong, WANG Ya-juan, ZHAO Min, <i>et al.</i> (4648)
Influence of Biochar Application on Soil Nitrate Leaching and Phosphate Retention: A Synthetic Meta-analysis	JIANG Zhi-xiang, CUI Shuang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4658)
Role and Mechanism of Low Molecular-Weight-Organic Acids in Enhanced Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil	FANG Zhi-guo, XIE Jun-ting, YANG Qing, <i>et al.</i> (4669)
Remediation Effect and Mechanism of Inorganic Passivators on Cadmium Contaminated Acidic Paddy Soil	ZHANG Jian, KONG Fan-yi, LU Sheng-gao (4679)
Mechanism of Lead-zinc Enrichment and Resistance of Spent Mushroom Compost to Lead-Zinc Slag in <i>Koeleruteria paniculata</i>	XIE Tian-zhi, CHEN Yong-hua, SU Rong-kui, <i>et al.</i> (4687)
Phosphorus Enrichment Efficiency of CaO ₂ @FA Composites and the Effect of Its Recovered Material on Soil Improvement	YUE Wei, LI Da-peng, WU Ling-yu, <i>et al.</i> (4697)
Effects of Early Rice Straw Returning with Reducing Potassium Fertilizer on Late Rice Yield and Soil Fertility	HUANG Qiao-yi, HUANG Jian-feng, HUANG Xu, <i>et al.</i> (4706)
Effects of Continuous Straw Returning with Chemical Fertilizer on the Carbon Pool and Crop Yield of Rice-Rape Rotation Soils	CAI Ying, FU Si-wei, ZHANG Bo-rui, <i>et al.</i> (4716)
Effects of Chemical Fertilizer Reduction Combined with Straw Application on Diazotrophic Communities in a Double Rice Cropping System CHEN Kai-peng, WEI Ju-xian, CHEN Dan, <i>et al.</i> (4725)
Impacts of Co-application of Chemical Fertilizer Reduction and Organic Material Amendment on Fluvo-aquic Soil Microbial N-cycling Functional Gene Abundances and N-converting Genetic Potentials in Northern China	LI Sheng-jun, HU He, LI Gang, <i>et al.</i> (4735)
Response Characteristics of Soil Microbial Community Under Long-term Film Mulching	HU Zhi-e, XIAO Mou-liang, DING Ji-na, <i>et al.</i> (4745)
Effects of Long-term Straw Returning on Fungal Community, Enzyme Activity and Wheat Yield in Fluvo-aquic Soil	MA Lei, LI Yan, WEI Jian-lin, <i>et al.</i> (4755)
Effects of Soil Amendments on the Bacterial Diversity and Abundances of Pathogens and Antibiotic Resistance Genes in Rhizosphere Soil Under Drip Irrigation with Reclaimed Water CUI Bing-jian, CUI Er-ping, LIU Chun-cheng, <i>et al.</i> (4765)
Effect of Nitrogen on the Phytoremediation of Cd-PAHs Co-contaminated Dumpsite Soil by Alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) and on the Soil Bacterial Community Structure LI Yi-jia, MA Jun-wei, LI Yu-qian, <i>et al.</i> (4779)
Effect of Antibiotic-Degrading Bacteria on Maturity and Bacterial Community Succession During Pig Manure Composting	LI Wei-lin, ZHANG Xin, MA Jun-wei, <i>et al.</i> (4789)