

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期
Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价	彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)
植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述	陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)
基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展	曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)
不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析	阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)
北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析	赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)
武汉冬季大气 PM _{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析	蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)
运城市 PM _{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析	王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)
中国东部冷锋推进中的 PM _{2.5} 三维结构变化特征	牟南南, 朱彬, 卢文 (85)
粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估	李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)
西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估	李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)
拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析	余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)
杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征	林旭, 严仁娣, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)
上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用	金丹 (132)
铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O ₃ 和 SOA 形成潜势分析	易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)
电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子	谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)
不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系	伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)
淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析	王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)
昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险	庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)
城市路面积尘微塑料污染特征	方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)
塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源	宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)
赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估	吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)
无定河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素	李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)
白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估	陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪志 (230)
九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系	刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)
北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价	胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)
城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析	刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)
苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析	李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)
苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征	叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)
信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放	徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)
三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响	田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)
李家水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析	梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)
岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征	张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)
宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估	王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)
快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素;以珠江三角洲为例	吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)
长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估	张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)
洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估	黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)
基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算	李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴铭彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)
三峡库区万州段河流水-气界面 CO ₂ 通量支干流对比及影响机制初探	秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)
功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb ²⁺ 的吸附行为	廖晓峰, 钟静萍, 陈云熾, 邱廷省, 任嗣利 (387)
铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价	吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)
沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性	邓翠兰, 邓露, 汪晓军, 陈振国 (409)
温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析	吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)
填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征	罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)
基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析	夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)
浙中典型硫铁矿农田土壤重金属含量特征及健康风险	成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)
农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区	吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)
基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素	宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)
调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应	李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)
设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估	董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)
电子垃圾拆解固废-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估	张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张峰, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)
雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估	梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)
重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响	郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)
长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响	吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)
土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性	姜宽雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)
化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响	杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)
秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征	薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)
全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响	闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)
秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响	万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系

伍永康, 陈伟华*, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅

(暨南大学环境与气候研究院, 粤港澳环境质量协同创新联合实验室, 广州 510443)

摘要: 高度城市化的珠三角地区臭氧污染频发, 臭氧污染的非线性、区域性以及气象过程影响使臭氧精确防控面临巨大挑战。本研究利用臭氧源解析技术 OSAT, 分析不同传输通道下珠三角臭氧敏感区分布差异, 量化城市间的臭氧传输贡献, 并通过敏感性试验, 探讨珠三角及典型城市的臭氧污染控制策略。结果表明, 静风条件下, VOCs 敏感区集中在珠三角中部城市群区域, NO_x 敏感区分布在外围郊区地带; 东北风盛行时, 珠三角下风向转变为 VOCs 敏感区, 上风向为 NO_x 敏感区; 东南风盛行时, VOCs 敏感区沿东南至西北方向呈带状分布, 两边呈 NO_x 敏感。城际传输方面, 在东南和东北方向的传输通道影响下, 下风向城市臭氧污染受上风向传输贡献明显 (41%~87%), 静风时各城市以本地贡献为主 (60%~87%)。敏感性试验结果表明, 当对应臭氧敏感区分别削减 30% 的 VOCs 和 NO_x 时能使珠三角臭氧下降面积最大 (20%~36%), 而单独削减 30% VOCs 时能使臭氧浓度降幅最大 (9%~18%), 但下降范围局限于 VOCs 敏感区。对典型城市江门而言, 静风和东南风条件下对应敏感区削减 VOCs 和 NO_x 时达标面积增加最大 (11% 和 8%)。而东北风条件下, 单独削减 VOCs 更能有效控制污染, 达标面积增加 140%。

关键词: 珠江三角洲 (PRD); 臭氧污染; 传输通道; 臭氧生成敏感性; 来源解析

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0160-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104141

Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels

WU Yong-kang, CHEN Wei-hua*, YAN Feng-hua, MAO Jing-ying, YUAN Bin, WANG Wei-wen, WANG Xue-mei

(Guangdong-Hongkong-Macau Joint Laboratory of Collaborative Innovation for Environmental Quality, Institution for Environmental and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 510443, China)

Abstract: With the rapid development of urbanization, ozone (O_3) pollution is an ongoing occurrence in the Pearl River Delta (PRD) region in China. The effective control of O_3 pollution is a great challenge owing to the nonlinear relationship between O_3 and precursor emissions and the effect of meteorological conditions. Based on the regional air quality model CAMx-OSAT (ozone source apportionment technology), O_3 formation regimes were determined, and inter-city transportation across PRD was quantified under different transmission channels. The results showed that spatial differences were observed for the O_3 formation regimes under different transmission channels. The VOCs-sensitive regime was mainly located in the central areas of the PRD region, and the NO_x -sensitive regime was distributed in the suburban areas of the PRD regions under calm wind conditions. When the northeast wind was prevailing, the polluted air mass of the urban agglomeration was transmitted southwesterly downward, resulting in the downwind areas being transformed to VOCs-sensitive; the upwind areas were still NO_x -sensitive. Under the southeast wind, the VOCs-sensitive regime had a banding distribution along the southeast-northwest direction, and the remaining areas were NO_x -sensitive. With the influence of transmission channels, downwind cities were significantly affected by the transmission of upwind urban agglomerations (41%-87%), whereas the local formation was the main contributor under the calm wind conditions (60%-87%). To explore the relationship between O_3 and precursor emissions, a series of sensitivity tests were designed. The results showed that maximized areas (20%-36%) with reductions in O_3 can be achieved by reducing VOCs and NO_x in the corresponding sensitive regimes, and the maximized level with the reduction in O_3 can be fulfilled by reducing VOCs in the VOCs-sensitive regime. For the typical city Jiangmen, the area that met the standard increased the most under the calm wind (11%) and southeast wind (8%) conditions when VOCs and NO_x were reduced in the corresponding sensitive regimes. Additionally, under northeast wind conditions, reducing VOCs in the VOCs-sensitive regime can more effectively control O_3 , as the area up to the standard increased by 140%.

Key words: Pearl River Delta (PRD); ozone pollution; transmission channels; ozone sensitivity; source apportionment

快速城市化和工业化带来的一系列以细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和臭氧 O_3 为主的空气污染问题一直是社会关注的热点。有研究表明, 臭氧污染对人体和植被均有危害。人体暴露在高浓度臭氧中会诱发呼吸道与心血管疾病, 长期接触相对低浓度的臭氧也会增加过早死亡的风险^[1,2], 另外臭氧污染也会损害植物的气孔功能并造成农作物减产^[3,4]。同时, 臭氧也是重要的温室气体。IPCC 报告中指出^[5], 臭氧的辐射强迫效应仅次于二氧化碳 CO_2 和甲烷 CH_4 , 其温室效应不可忽视。在过去 20 年间, 政府一直致力于治理

空气污染问题, 一次排放污染物和以 $\text{PM}_{2.5}$ 为主的二次生成污染物已经呈现持平甚至下降趋势^[6-9], 然而臭氧浓度不减反增。在 2014~2018 年间, 中国地

收稿日期: 2021-04-15; 修订日期: 2021-06-05

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFE0106300, 20017YFC0210105); 国家自然科学基金项目 (41905086, 42077205, 41425020); 中国博士后科学基金项目 (2020M683174); 国家环境保护区域空气质量监测重点实验室开放基金项目 (SRAQM02202001); 暨南大学高性能计算公共服务平台项目

作者简介: 伍永康 (1996~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为区域空气质量数值模拟, E-mail: wuyongkang1010@stu2019.jnu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: chenwh26@163.com

区的臭氧平均日最大 8 h 浓度(MDA8)保持平均每年 4.6% 的速度增长^[10],京津冀、长三角和珠三角城市群的高浓度臭氧污染事件仍然时有发生,并且频率远大于世界其他工业化程度高的国家(日本、韩国、欧洲和美国)^[11~14]. 这表明,臭氧仍然是当下防控重点.

近地面的臭氧主要由光化学反应生成,受前体物挥发性有机化合物 VOCs 和氮氧化物 NO_x 共同控制,并且与前体物呈非线性关系^[15]. 单一削减某一方前体物并不能够实现有效降低臭氧浓度的目的,甚至有可能导致臭氧浓度上升. 例如,当臭氧生成对 VOCs 敏感时,削减 VOCs 能使臭氧浓度降低,而削减 NO_x 却会起反效果. 2019 年新冠肺炎暴发,各国采取封城措施,人为活动大幅减少,一次污染物排放也降至最低,然而臭氧浓度却不降反升^[16~18]. 有研究指出,在疫情期间,东亚区域平均 NO_2 浓度比相同气象条件下的正常水平还要低 7×10^{-9} ,但臭氧浓度却增加了 4×10^{-9} ^[19]. 而在美国的一项研究表明,美国在疫情期间各区域臭氧变化不一,臭氧浓度上升现象多出现在 VOCs 敏感的城市区域,而臭氧下降多在 NO_x 敏感的城郊与乡镇^[20]. 因此,辨别区域臭氧生成的敏感性,研究臭氧对前体物的非线性响应关系对制定有效的臭氧污染控制策略有重要意义.

目前,在珠三角已有较多的区域臭氧敏感性研究工作. 过去多数研究表明^[21~26],珠三角城市地区的臭氧通常表现为 VOCs 敏感,而植被覆盖率较高的郊区乡镇则多表现为 NO_x 敏感. 然而臭氧敏感区并非一成不变,在不同的季节和时段,区域的臭氧敏感性也会有所不同^[27,28]. 在广州郊区站点的观测研究表明,在夏季和秋季的中午时段,广州郊区的臭氧

表现为 NO_x 敏感,而在早上和傍晚则表现为 VOCs 敏感^[29]. 另有研究表明,区域的敏感性还会受到传输因素的影响^[30,31]. 在南海万山群岛上的一项现场观测研究指出^[32],南海在非臭氧污染时段表现为 NO_x 敏感区,污染时段由于大陆的污染气团传输影响,南海转变为 VOCs 敏感区. 以上臭氧敏感区研究多集中在特定臭氧污染时段,并未考虑区域传输因素,因此本研究将综合探究不同传输通道下珠三角臭氧敏感性分布差异,并评估前体物的非线性响应.

本文将以珠三角城市群为研究对象,以 2017 年 9~10 月为研究时段,利用空气质量模式 CAMx 耦合臭氧源解析技术 OSAT,探究在不同传输通道下珠三角区域的臭氧敏感性分布差异与臭氧的城际相互传输贡献,并设置前体物减排的敏感性试验,分析珠三角地区臭氧对前体物的非线性响应关系,以期制定科学有效的臭氧控制策略提供科学基础.

1 材料与方法

1.1 WRF-CAMx 模式

本次研究采用中尺度气象模式 WRF(3.9.1 版本)联合三维多尺度空气质量模式 CAMx 系统,对珠三角区域的臭氧污染进行模拟再现. WRF 模式中采用两层嵌套,分辨率分别为 27 km 和 3 km,投影中心点设置为(25.4°N,113.7°E),使用 Lambert 投影,外层网格覆盖中国南部地区,内层网格覆盖珠三角地区(如图 1). 模式中所需的初始气象边界场条件采用的是美国国家环境预报中心 NECP 提供的 FNL 再分析数据集. WRF 模拟具体的物理化学参数化方案设置如表 1 所示.

空气质量模式 CAMx 是基于三维欧拉方程开发的化学传输模式,它能够在城市或区域尺度上,通过

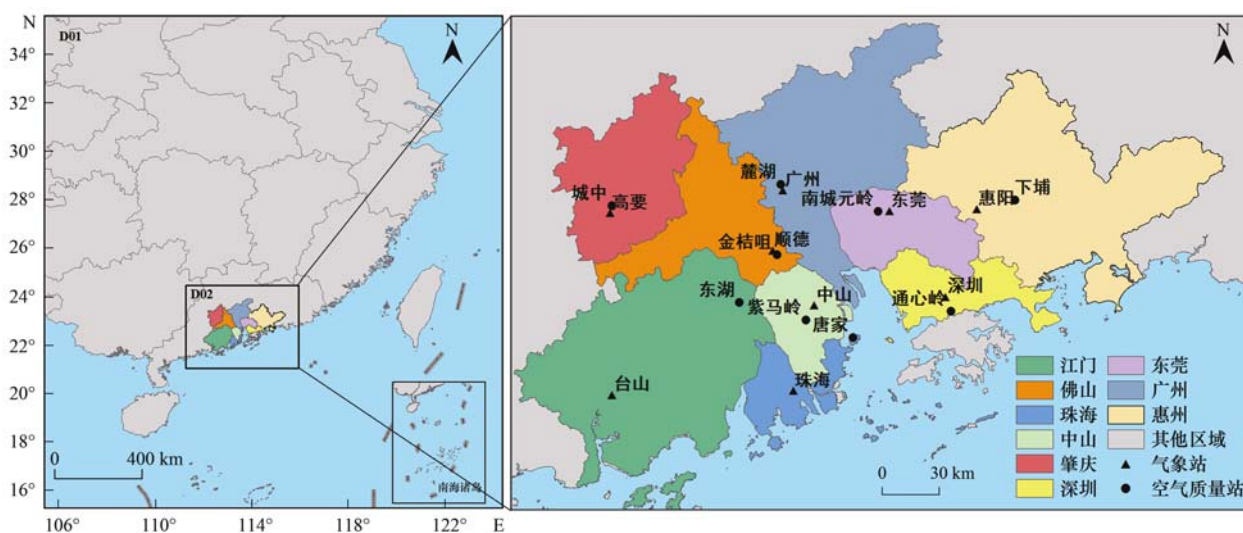


图 1 模拟区域及观测站点

Fig. 1 Model domains and location of monitoring stations

表 1 物理和化学参数化方案设置

Table 1 Physical and chemical parameterization schemes

模式	物理化学过程	参数化方案
WRF	微物理方案	Lin
	长波辐射方案	RRTMG
	短波辐射方案	RRTMG
	陆面过程方案	Monin-Obukhov
	边界层方案	MYJ
	积云方案	Grell-3
	城市冠层方案	Multi-layer
CAMx	化学机制	SAPRC 07
	气溶胶机制	AE6

计算求解空气污染物在每个模拟网格中由排放、扩散、沉降和化学过程导致的浓度变化,实现模拟再现空气污染过程的目的. 在本研究中,模式使用与 WRF 相同的嵌套方案,分辨率分别为 27 km 和 3 km,采用 SAPRC07 化学机制^[33],最外层所需的边界条件和初始条件由全球模式 MOZART4 提供,网格化排放清单采用清华大学发布的中国多尺度排放清单 MEIC^[34,35],分辨率 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,基准年为 2016 年. 内层网格的边界和初始条件由外层网格提供,网格化排放清单使用珠三角地区的高分辨率排放清单^[36],分辨率为 3 km,基准年为 2017 年,包括农业源、固定燃烧源、工业过程源、道路移动源、非道路移动源、燃油储运源、扬尘源、溶剂使用源、生物质燃烧源和其他源共 10 个排放部门,生物排放源使用气体和气溶胶排放模式 MEGAN 在线计算,并经过珠三角本地化处理^[37].

CAMx 中耦合的臭氧源解析工具 OSAT^[38] 主要用于在化学传输模块运行过程中,通过追踪 O_3 及其前体物在经过一系列的大气物理传输和化学反应后的来源与去向,达到归因区域臭氧的目的. 具体而言,OSAT 采用物种标记法标记,以 N 和 V 标记特定排放源区和排放源部门所排放的前体物 NO_x 和 VOCs,同时利用指示因子 $\Delta H_2O_2/\Delta HNO_3$ 辨别臭氧敏感区,分别标记在不同敏感区下生成的臭氧 O_3N 和 O_3V . 在物种标记后,OSAT 通过持续跟踪传输模块运行过程中的臭氧生成 ($+\Delta O_3$) 和消耗 ($-\Delta O_3$),并根据指示因子归因到不同排放源区和排放部门的 O_3N 和 O_3V 中,前体示踪物 N 和 V 则在化学反应过程中被消除,最终实现臭氧的来源解析^[39]. 使用源解析功能前需要对模拟区域进行标识划分和数字化处理,在本研究中,主要对第二层嵌套进行排放源区域标记,标记区域包括珠三角 9 个城市(广州、东莞、惠州、江门、佛山、中山、珠海、肇庆和深圳)及 9 个城市外、模拟区域内的其他区域(图 1).

本研究中以 2017 年 9 ~ 10 月为模拟时段,重点分析该时段内出现的两次臭氧连续污染,污染时段为 2017 年的 9 月 13 ~ 20 日和 10 月 18 ~ 30 日,利用前文所述的珠三角区域气象和污染物观测数据,对本次的模拟结果进行验证. 为达到理想的模拟效果,模拟前多预留 3 d 模拟时间,以降低模型初始条件的影响.

1.2 观测数据

本研究中使用的气象观测数据为 2017 年 9 ~ 10 月珠三角区域内的国家基本气象观测站的逐日逐时气象观测资料,站点主要包括广州、东莞、惠阳、台山、顺德、中山、珠海、高要和深圳,分别代表珠三角 9 个城市的气象条件;污染物观测数据则选用粤港澳珠三角区域空气质量监测网的污染物观测数据,该监测网由 23 个站点组成,在本研究中,选取麓湖、荔园、金桔咀、唐家、东湖、下埔、紫马岭和南城元岭等 9 个观测站代表珠三角污染状况,数据包含 NO_2 、 SO_2 、CO、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 O_3 等 6 种污染物的逐时观测资料. 本次研究具体的模拟区域及观测站点分布情况如图 1 所示.

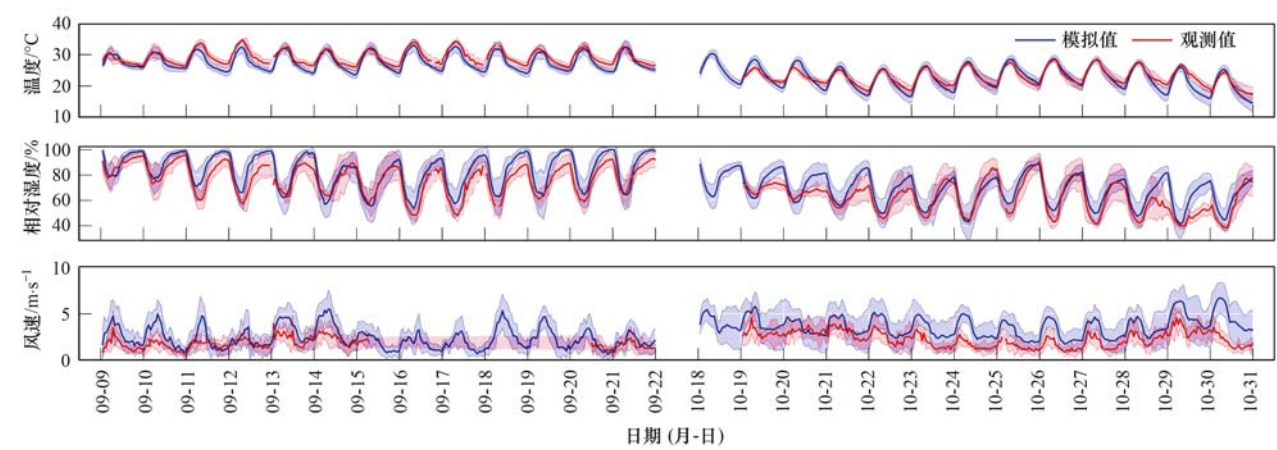
1.3 模式验证

本次评价采用的评价标准包括平均绝对偏差 (MAE)、相关系数 (R)、均方根误差 (RMSE) 和符合指数 (IOA) 等 4 个指标,具体验证结果如表 2 所示. 图 2 和图 3 分别为各个站点气象要素和臭氧的观测值与模拟值时序对比. 图 4 为污染时段的风向频率玫瑰图. 在本次模拟结果中,温度和相对湿度的模拟值与观测值较为吻合,各站点模拟效果均表现良好,相关系数均在 0.7 以上. 风速模拟存在高估,大部分站点偏差范围在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间;风向模拟同样存在偏差,但模拟和观测值的主导风向一致,模拟结果较好地再现了风向的变化,各站点的 IOA 均在 0.8 以上. 臭氧的模拟结果较好,偏差处于较低水平,相关系数均在 0.6 以上. 综上,本次的模拟结果能够很好地再现珠三角地区的气象条件和臭氧污染情况.

2 结果与讨论

2.1 污染时段主导风向分析

由臭氧污染时段的风向频率玫瑰图可以看到(图 4),东北方向的 NE、ENE 和东南方向的 ESE、SE 和 SSE 为出现较为频繁的风向,频率均在 10% 以上. 因此,本研究以东北风和东南风为主要传输通道. 对臭氧污染时段(2017 年的 9 月 13 ~ 20 日和 10 月 18 ~ 30 日)进行风向筛选,并将风速小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的污染时段定义为静风时段,从而划分在东



阴影为各站点的偏差范围,实线分别代表模拟和观测的平均值,下同

图 2 温度、相对湿度和风速的模拟值与观测值时序对比

Fig. 2 Comparison of observed and simulated temperature, relative humidity and wind speed

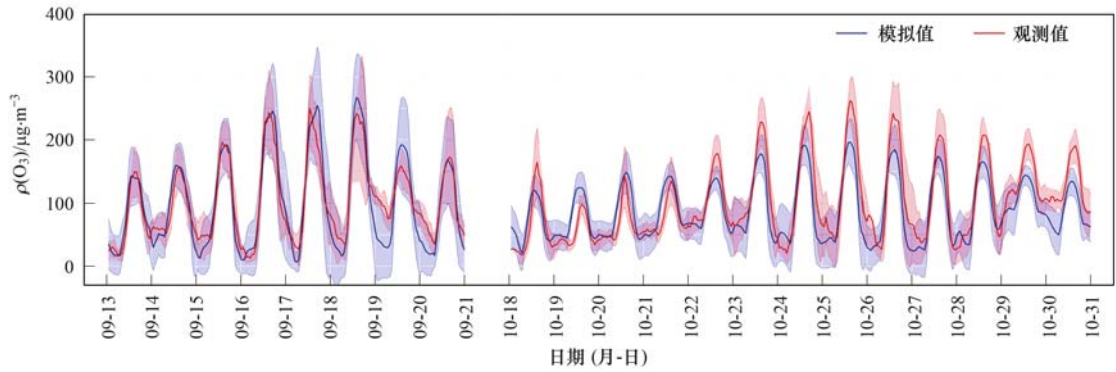


图 3 臭氧模拟值和观测值时序对比

Fig. 3 Comparison of observed and simulated O₃

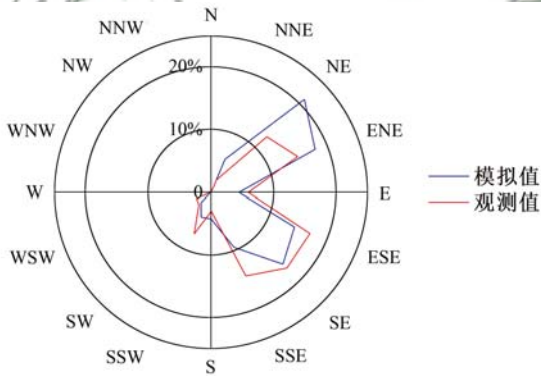


图 4 模拟与观测风玫瑰图

Fig. 4 Wind rose diagram for simulation and observation

北风、东南风和静风条件下的臭氧污染案例(东北风:10月18~23日、10月27~30日;东南风:9月18~20日;静风:9月13~17日、10月24~26日),后续分析将基于这3种传输通道影响下的臭氧污染案例进行展开.不同传输通道影响下珠三角地区叠加风场的MDA8臭氧浓度空间分布如图5所示.从中可以看到,静风条件下,臭氧污染集中在珠三角中部城市群区域,而东北风条件下,高浓度的臭氧主要分布在下风向,覆盖江门、中山、珠海和佛

山等城市,东南风条件下则是分布在西北方,覆盖广州、东莞、佛山、肇庆和江门北部的部分区域.

2.2 不同传输通道下的臭氧敏感区分布差异

对上述分类的不同传输通道下臭氧污染案例进行分析,探究在不同传输通道下的臭氧敏感区分布差异,图6为分别在静风、东北风和东南风条件下的臭氧敏感区空间分布格局.结果表明,在静风条件下,VOCs控制区集中分布在珠三角中心区域(广州南部、东莞西部、深圳、佛山和中山),外围为NO_x控制区.这与珠三角城市与郊区的分布有关;前体物NO_x排放相对较高的城市群和工业区集中分布在珠三角中部地区,外围为乡村郊区,这导致在静风条件下,VOCs控制区集中分布在珠三角中心区域,外围为NO_x控制区.

由于佛山顺德区、东莞和深圳宝安区为珠三角主要的工业区,广州中下部为交通繁忙的市区,均存在大量以NO_x为主的前体物排放,在东北风条件下,前体物向下风向传输,导致VOCs控制区以佛山顺德、广州荔湾和深圳宝安为上边界,向西南方向蔓延,江门、中山和珠海等下风向城市从NO_x敏感区转变为VOCs敏感区,而珠三角上风向的乡镇郊

区仍然表现为 NO_x 敏感区. 在东南风条件下, 珠三角工业区和城市群排放的污染物气团向左上方传输, VOCs 控制区以城市区域为中心、沿东南至西北方向呈带状分布, 两边为 NO_x 控制区.

表 2 模拟结果验证

Table 2 Verification of the simulation results										
要素	指标	广州	东莞	惠州	江门	佛山	中山	珠海	肇庆	深圳
温度/ $^{\circ}\text{C}$	MAE	1.6	1.6	1.2	2.6	2.0	1.4	1.9	2.2	1.8
	R	0.9	0.9	1.0	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9	0.9
	RMSE	2.1	2.0	1.6	3.1	2.4	1.8	2.3	2.6	2.1
	IOA	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
相对湿度/%	MAE	9.8	9.1	8.4	13.1	11.8	8.3	9.7	12.2	17.7
	R	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.8
	RMSE	13.3	11.2	10.3	15.5	14.2	10.4	11.9	15.4	19.9
	IOA	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	MAE	0.9	0.9	1.3	1.5	2.1	2.0	1.1	1.6	2.3
	R	0.7	0.6	0.4	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.5
	RMSE	1.1	1.1	1.7	1.9	2.5	2.3	1.3	2.0	2.8
	IOA	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.8
风向/ $^{\circ}$	MAE	54.9	30.1	38.4	31.8	26.9	20.3	26.1	40.7	22.4
	R	0.7	0.4	0.6	0.4	0.5	0.6	0.4	0.4	0.7
	RMSE	76.0	46.6	53.2	53.3	38.9	31.4	43.4	56.5	37.3
	IOA	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.9
臭氧/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MAE	27.5	26.0	32.3	26.7	39.0	27.1	24.5	22.5	25.0
	R	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	0.8	0.6	0.8
	RMSE	38.4	35.6	44.2	37.8	51.1	33.4	34.2	30.0	35.4
	IOA	0.9	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0

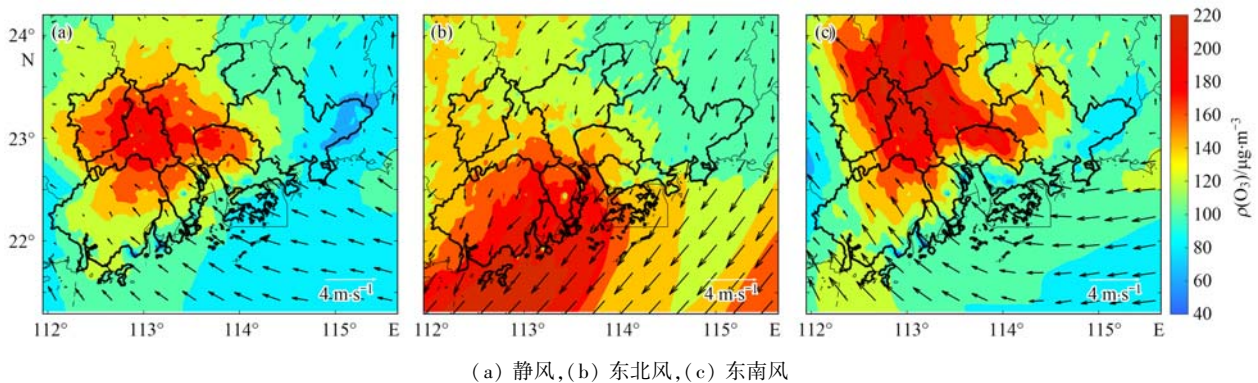


图 5 不同传输通道下,珠三角 MDA8 臭氧浓度空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of O_3 MDA8 in the PRD in different transmission channels

在珠三角过往研究中, Wang 等^[22] 和庄立跃等^[26] 的研究利用 OMI 卫星数据划分珠三角臭氧敏感区,发现珠三角中部为 VOCs 敏感区,外围为 NO_x 敏感区,与本研究中风下的敏感区分布一致;

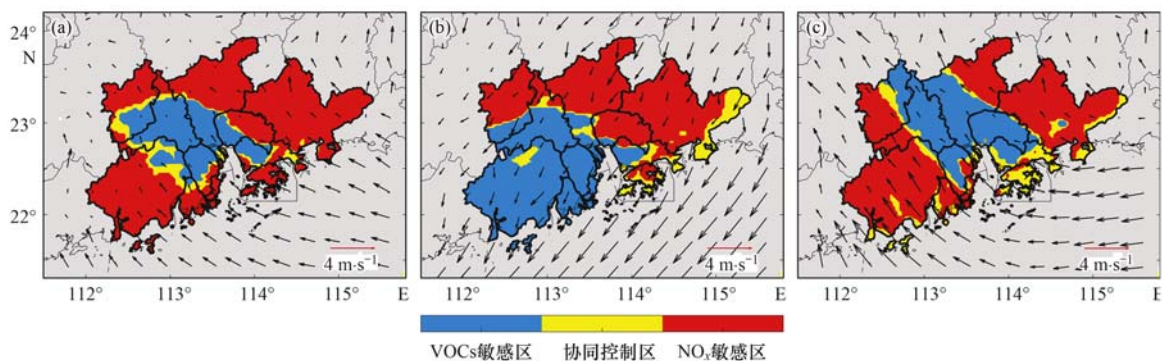


图 6 不同传输通道下臭氧敏感区分布

Fig. 6 Spatial distribution of ozone formation regimes in different transmission channels

Wang 等^[30]的研究利用 CMAQ 模型分析珠三角 10 月的一次臭氧污染,发现中部城市群及其下风向区域为 VOCs 敏感. 叶绿萌等^[24]利用 WRF-Chem 探究秋季臭氧敏感区分布,结果显示珠三角西南部为 VOCs 敏感区,东北部为 NO_x 敏感区,与本研究东北风下的敏感性分布结果相近; Ou 等^[25]的研究表明,广州南沙区的敏感性在 8 月和 10 月均表现为 VOCs 敏感,江门在 8 月为 NO_x 敏感,10 月转变为 VOCs 和 NO_x 协同控制. 两个站点的敏感性变化与本研究东北风和东南风下的敏感性变化吻合.

基于以上分析,在 3 种传输通道的影响下,江门地区臭氧敏感性变化较大. 在静风条件下,江门西南部的大部分区域为 NO_x 敏感区,而与珠三角中部城市群接壤的小部分区域为 VOCs 敏感区和协同控制的过渡区. 当受到东北方向的传输通道影响时,江门受上风向城市群污染气团传输影响严重,江门区域转变为 VOCs 敏感,而在东南传输通道影响下,江门处于上风向,受传输影响较小,臭氧生成受本地控制,从而再次转变为 NO_x 敏感. 由此表明,江门地区的臭氧敏感性受传输通道影响严重,可作为典型城市进行深入分析.

2.3 珠三角城际相互传输影响分析

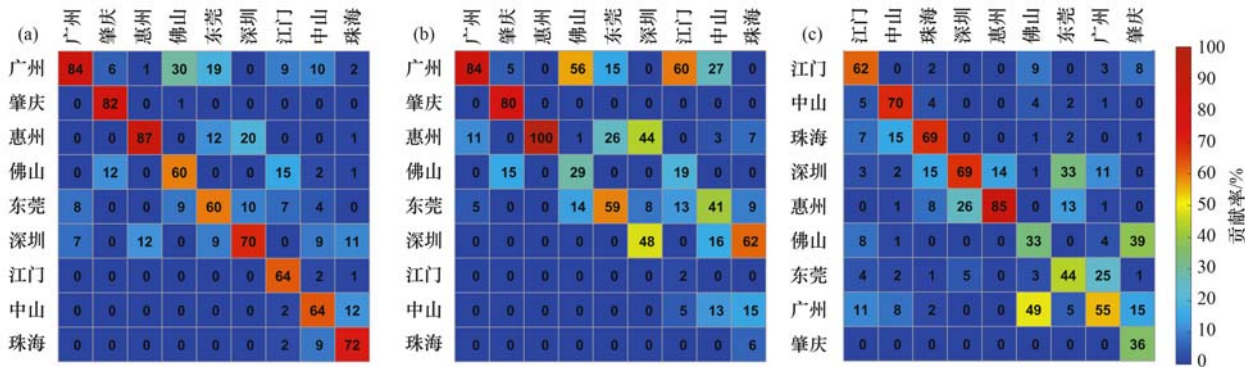
进一步探究在不同传输通道下的珠三角 9 城市臭氧城际相互传输贡献情况,结果如图 7 所示. 在不同传输通道下,臭氧的传输贡献模式有所差异,在静风条件下,臭氧的区域传输特性较弱,各个城市的臭氧污染均以本地贡献为主. 上部城市广州、肇庆和惠州本地贡献 82%~87%; 中部城市佛山、东莞和深圳本地贡献 60%~70%,其中,佛山受广州影响较大,占比 30%,东莞受广州贡献 19%,深圳受惠州贡献 20%; 下部城市江门、中山和珠海的本地贡献占比 64%~72%,周边城市传输贡献为 28%~37%.

在东北风条件下,珠三角臭氧表现出明显的区

域污染特征,上、下风向城市的臭氧传输贡献有较大差异. 对于处在上风向的广州、肇庆和惠州而言,臭氧污染以本地贡献为主,外来传输贡献占比小于 20%; 位于中部的佛山、东莞和深圳受到上风向城市的臭氧传输影响,本地贡献相对减小,贡献占比分别为 29%、59% 和 48%,其中,东莞和深圳均受到上风向城市惠州的传输贡献,占比分别为 26% 和 44%,而佛山则受广州影响严重,传输贡献大于本地贡献,占比达 56%,并受到东莞 14% 的贡献; 下风向城市受外来传输影响最为严重,江门、中山和珠海相比上、中部城市的本地贡献最小,外来传输贡献均大于本地贡献并占主导地位,其中,广州对江门贡献为 60%,深圳对珠海贡献占比 62%,中山则受到东莞(41%)、广州(27%)共同影响.

在东南风条件下,由于风向不同,城市间相互传输贡献也与东北风情况相去甚远,但仍表现出臭氧区域传输特性. 上风向城市(江门、中山、珠海、深圳和惠州)以本地贡献为主,其中深圳还受到惠州影响,占比 26%; 中部城市佛山由于临近广州,且广州城区位于佛山上风向,因此佛山受广州影响,占比 49%,东莞则以本地贡献为主,并受深圳影响(33%); 下风向城市广州以本地贡献为主(55%),并受到上风向东莞(25%)和深圳(11%)影响,肇庆则受佛山传输影响严重,占比 39%,本地贡献 36%.

对于典型城市江门而言,在静风和东南风条件下,江门受臭氧区域传输影响不大,污染主要为本地贡献(64% 和 62%),而在东北风条件下,江门处于珠三角中部城市群的下风向,受上风向污染气团传输影响严重,传输贡献占比在 90% 以上. 这与上述江门地区的敏感性分析中,静风和东南风条件下臭氧生成受本地控制,东北风条件下受上风向传输影响的推断一致.



(a) 静风, (b) 东北风, (c) 东南风; 横坐标为受体城市, 纵坐标为排放源区, 颜色和数值表示贡献率

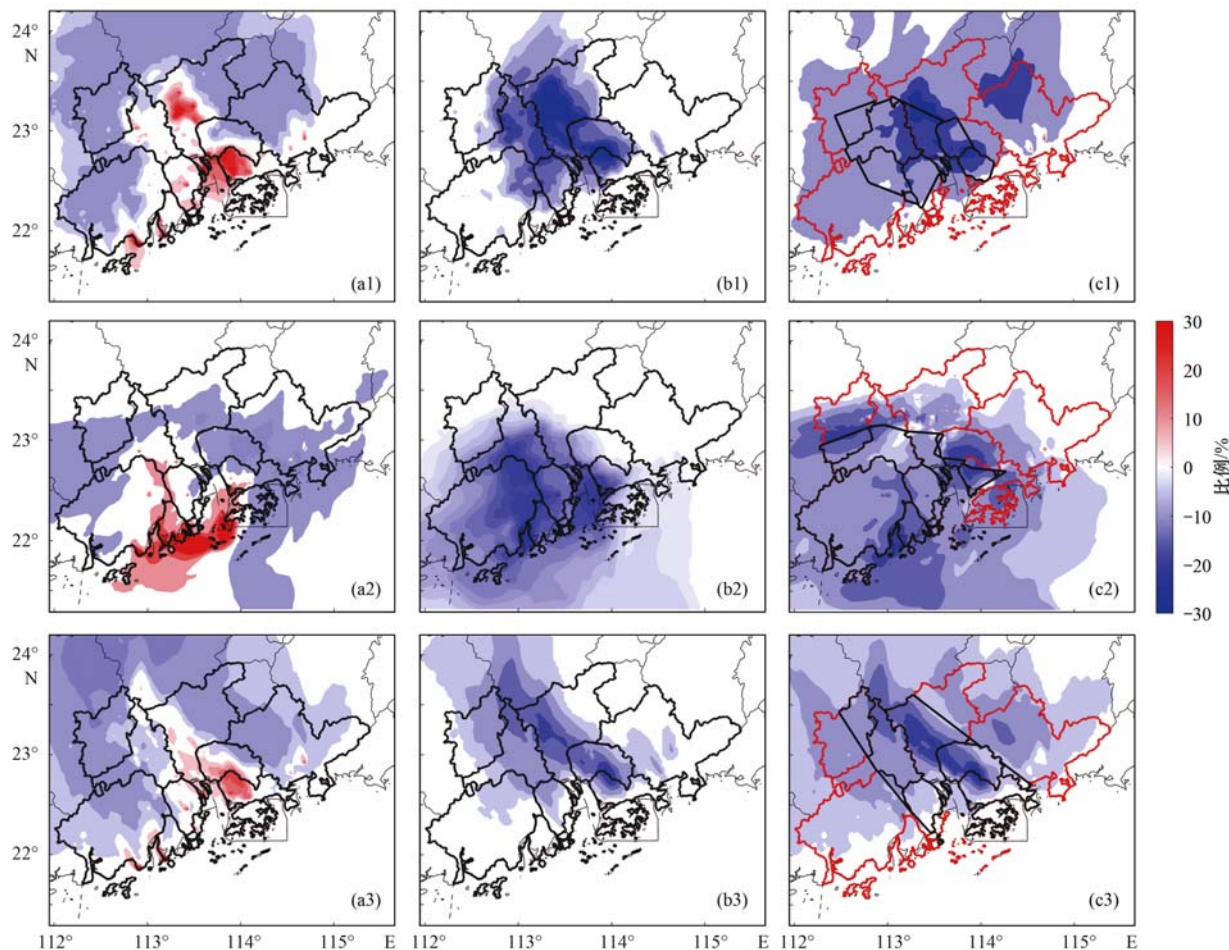
图 7 不同传输通道下珠三角地区臭氧城际传输矩阵

Fig. 7 Intercity transmission matrix of ozone in different transmission channels

2.4 珠三角臭氧生成对前体物敏感性的响应分析

为探究珠三角地区臭氧生成对前体物的响应关系,结合上述不同传输通道下的臭氧敏感区分布结果,设计了3组臭氧前体物减排的敏感性实验.图8为在不同传输通道下,分别削减珠三

角全区域30%人为源 NO_x 排放、全区域30%人为源VOCs排放以及对应削减该传输通道下 NO_x 敏感区的30%人为源 NO_x 排放和VOCs敏感区的30%人为源VOCs排放后,珠三角区域MDA8臭氧浓度变化百分比.



(a) 珠三角人为源削减30% NO_x 排放, (b) 珠三角人为源削减30%VOCs排放, (c) NO_x 敏感区(红线区)削减30% NO_x ; (a1)、(b1)和(c1)静风, (a2)、(b2)和(c2)东北风, (a3)、(b3)和(c3)东南风; VOCs敏感区(黑线区)削减30%VOCs排放; 不同色块表示MDA8臭氧下降比例

图8 不同传输通道下,不同减排方案的MDA8臭氧下降比例

Fig. 8 Under different transmission channels, the O_3 MDA8 reduction ratio with different emission reduction schemes

结果表明,当全区域削减30%的人为源 NO_x 排放后,在3种传输条件下均出现对应的 NO_x 敏感区臭氧浓度下降、VOCs敏感区臭氧浓度上升的现象.这主要是由于在VOCs敏感区中,VOCs/ NO_x 的比值相对较小,臭氧的生成受到过氧自由基的限制,削减VOCs能够减少 $\text{HO}_2\cdot$ 和 $\text{RO}_2\cdot$,截断NO转换成 NO_2 的通道,导致臭氧无法通过 NO_2 光解反应生成,使臭氧的生成和积累受到抑制,从而达到降低臭氧浓度的效果;相反,由于在VOCs敏感区中, NO_x 浓度并不是臭氧生成的限制条件,削减 NO_x 反而影响NO滴定效应消耗臭氧,导致臭氧浓度不降反升.

对比在实施3种减排策略后珠三角地区的

MDA8臭氧浓度变化百分比(表3),可以看到,当全区域削减 NO_x 时,出现臭氧下降的区域多在 NO_x 敏感区内,臭氧浓度下降8%~14%,而VOCs敏感区臭氧浓度上升11%~16%,臭氧达标面积无明显增加,甚至在东北风条件下达标面积占比下降2%;当全区域削减VOCs时,下降面积集中在臭氧高污染区域,浓度下降9%~18%,降幅为3种减排方案中最高,臭氧达标面积增加4%~9%;当对应敏感区削减VOCs和 NO_x 时,臭氧浓度降幅为9%~15%,下降区域面积占比20%~36%,明显大于单独削减VOCs或 NO_x 时的下降面积,达标面积增加5%~7%,除东北风条件,达标面积大于另外两种减排方案.

由于不同城市实际减排能力存在差异,减排策

略需要根据城市的实际情况进行调整. 根据珠三角污染源研究^[36,40,41], 珠三角人为源 VOCs 排放占总 VOCs 排放的 70.8%, 其中工业溶剂使用源、工业过程源和道路移动源为主要贡献源, 占人为 VOCs 排放的 84.9%, 而珠三角 NO_x 排放由电力源、工业燃烧源、道路移动源和非道路移动源主导, 占比在 80% 以上. 人为源 VOCs 和 NO_x 排放均集中在广州、东莞、深圳和佛山, 另外各个城市有点源分布. 因此

在控制 VOCs 和 NO_x 排放时可优先考虑控制广州、东莞、深圳和佛山的污染物排放, 其他城市则根据本地情况, 重点控制排放较高的点源.

总体而言, 在出现臭氧严重超标事件时, 可削减 VOCs 使重点污染区域的臭氧更大幅度下降, 当臭氧超标不严重或是存在超标危险时, 两个敏感区共同削减 NO_x 和 VOCs 能更大范围预防臭氧污染事件发生.

表 3 不同减排方案下, 珠三角 MDA8 臭氧浓度变化率和面积变化率¹⁾/%

Table 3 PRD O ₃ MDA8 concentration and area change percentage in different emission reduction plans/%				
传输条件	削减方案	下降率(下降面积占比)	上升率(上升面积占比)	达标面积变化率
静风	(a) NO _x 削减 30%	-14(17)	14(4)	0
	(b) VOCs 削减 30%	-18(11)	—	5
	(c) 共同削减	-15(22)	—	7
东北风	(a) NO _x 削减 30%	-8(14)	16(7)	-2
	(b) VOCs 削减 30%	-11(22)	—	9
	(c) 共同削减	-10(36)	—	5
东南风	(a) NO _x 削减 30%	-8(16)	11(2)	1
	(b) VOCs 削减 30%	-9(9)	—	4
	(c) 共同削减	-9(20)	—	6

1) “—”表示无数据, 括号外为 MDA8 臭氧浓度变化率, 括号内为臭氧下降/上升区域面积占比, 正为增加, 负为减少, 下同

以江门为例, 进一步探讨臭氧区域污染背景下, 城市间臭氧与前体物的敏感性关系. 表 4 与表 3 类似, 但为江门地区在不同减排方案下的臭氧浓度变化情况. 结合图 5、图 8 和表 4 综合分析, 在静风条件下, 臭氧超标区域集中在江门北部, 污染范围较小, 超标程度较轻. 当全区域削减 NO_x 时, 江门北部臭氧变化较小, 臭氧下降多在江门北部以外区域, 降幅 7%, 而全区域削减 VOCs 时, 江门只有北部区域臭氧下降, 降幅 11%, 当在对应敏感区分别削减 NO_x 和 VOCs 时, 江门大部分区域均下降, 虽然降幅比单独削减 VOCs 时小 2%, 但是达标面积增加最多, 为

11%. 东南风条件与静风条件类似. 因此, 在静风和东南风条件时, 对应敏感区削减 NO_x 和 VOCs 能更大范围控制江门臭氧污染.

在东北风条件下, 江门大部分地区臭氧浓度超过 160 μg·m⁻³, 小部分在 180 μg·m⁻³ 以上, 属于臭氧严重超标. 当全区域削减 NO_x 时, 22% 的江门区域臭氧上升, 增幅 14%, 而削减 VOCs 时江门 91% 的区域臭氧浓度下降, 降幅 13%, 达标区域增加最大, 为 140%, 当对应敏感区削减 NO_x 和 VOCs 时, 江门出现臭氧下降的面积最大, 为 96%, 达标面积增加 71%. 因此, 在东北风条件下, 重点削减 VOCs 更能有效控制江门臭氧污染.

表 4 不同减排方案下, 江门地区臭氧浓度变化率和面积变化率/%

Table 4 Jiangmen O ₃ MDA8 concentration and area change percentage in different emission reduction plans/%				
传输条件	削减方案	下降率/%(下降面积占比)	上升率/%(上升面积占比)	达标面积变化率/%
静风	(a) NO _x 削减 30%	-7(70)	11(6)	5
	(b) VOCs 削减 30%	-11(13)	—	7
	(c) 共同削减	-7(84)	—	11
东北风	(a) NO _x 削减 30%	-8(23)	14(22)	11
	(b) VOCs 削减 30%	-13(91)	—	140
	(c) 共同削减	-9(96)	—	71
东南风	(a) NO _x 削减 30%	-7(73)	13(3)	6
	(b) VOCs 削减 30%	-7(5)	—	3
	(c) 共同削减	-6(66)	—	8

3 结论

(1) 珠三角地区臭氧敏感区分布受传输通道影响较大, 不同传输通道下臭氧敏感区分布差异明显.

静风时, 珠三角中部城市群(广州南部、东莞西部、深圳、佛山和中山)表现为 VOCs 敏感, 外围郊区为 NO_x 敏感; 当盛行东北风时, VOCs 控制区以佛山顺德、广州荔湾和深圳宝安为上边界, 覆盖珠三角西

南部,东北部为 NO_x 敏感区;当东南风盛行时, VOCs 敏感区以中部城市群为中心,沿东南至西北方向呈带状分布,两边为 NO_x 控制区。

(2)不同传输通道下,珠三角9城市臭氧城际传输贡献不同。静风条件下,各城市臭氧污染以本地贡献为主,占比在60%以上,区域传输贡献较弱。在东北和东南方向的传输通道影响下,上风向城市仍以本地贡献为主,中部城市本地贡献开始降低,占比在29%~59%之间,下风向城市降至最低(2%~13%),受传输影响严重,其中广州、深圳、东莞和佛山是重要的臭氧排放源区,对下风向城市的传输贡献达20%以上。

(3)在不同传输通道下,对应臭氧敏感区共同削减 VOCs 和 NO_x 能够最大范围降低臭氧,下降面积占比20%~36%,达标面积增加5%~7%,适合作为轻度超标或是存在超标危险时的区域防控手段,而单独削减 VOCs 能使 VOCs 敏感区的臭氧最大幅度下降,降幅9%~18%,达标面积增加4%~9%,适合于严重超标时控制臭氧。

(4)以江门为例分析臭氧对前体物的响应关系,在静风和东南风条件下,江门地区臭氧污染程度较轻,对应臭氧敏感区削减 VOCs 和 NO_x 能使臭氧达标面积增加最大,分别增加11%和8%。而在东北风条件下,江门臭氧污染严重,单独削减 VOCs 能更有效控制臭氧污染,江门臭氧达标面积增加140%。

参考文献:

- [1] Fleming Z L, Doherty R M, Von Schneidmesser E, *et al.* Tropospheric ozone assessment report: present-day ozone distribution and trends relevant to human health[J]. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 2018, **6**, doi: 10.1525/elementa.273.
- [2] Turner M C, Jerrett M, Pope C A, *et al.* Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study[J]. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 2016, **193** (10): 1134-1142.
- [3] Mills G, Hayes F, Wilkinson S, *et al.* Chronic exposure to increasing background ozone impairs stomatal functioning in grassland species[J]. *Global Change Biology*, 2009, **15** (6): 1522-1533.
- [4] Ghude S D, Jena C, Chate D M, *et al.* Reductions in India's crop yield due to ozone[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, **41** (15): 5685-5691.
- [5] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, *et al.* Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: University Press, 2013.
- [6] Zhong L J, Louie P K K, Zheng J Y, *et al.* Science-policy interplay: air quality management in the Pearl River Delta region and Hong Kong[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 3-10.
- [7] Song C B, Wu L, Xie Y C, *et al.* Air pollution in China: Status and spatiotemporal variations[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **227**: 334-347.
- [8] Li S S, Williams G, Guo Y M. Health benefits from improved outdoor air quality and intervention in China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **214**: 17-25.
- [9] Yan F H, Chen W H, Jia S G, *et al.* Stabilization for the secondary species contribution to $\text{PM}_{2.5}$ in the Pearl River Delta (PRD) over the past decade, China: a meta-analysis[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **242**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117817.
- [10] Fan H, Zhao C F, Yang Y K. A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014-2018[J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **220**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117066.
- [11] 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.
- [12] Lu X, Hong J Y, Zhang L, *et al.* Severe surface ozone pollution in China: a global perspective[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5** (8): 487-494.
- [13] 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.
- [14] 颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 等. 珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $\text{PM}_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素[J]. *环境科学*, 2021, **42** (4): 1600-1614.
- [15] Yan F H, Chen W H, Chang M, *et al.* Characteristics and meteorological factors of complex nonattainment pollution of atmospheric photochemical oxidant (O_3) and $\text{PM}_{2.5}$ in the Pearl River Delta region, China[J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (4): 1600-1614.
- [16] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33** (12): 1821-1845.
- [17] Huang X, Ding A J, Gao J, *et al.* Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China[J]. *National Science Review*, 2021, **8** (2), doi: 10.1093/nsr/nwaa137.
- [18] Le T H, Wang Y, Liu L, *et al.* Unexpected air pollution with marked emission reductions during the COVID-19 outbreak in China[J]. *Science*, 2020, **369** (6504): 702-706.
- [19] Zhao Y B, Zhang K, Xu X T, *et al.* Substantial changes in nitrogen dioxide and ozone after excluding meteorological impacts during the COVID-19 outbreak in mainland China[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2020, **7** (6): 402-408.
- [20] Tang R, Huang X, Zhou D R, *et al.* Global air quality change during the COVID-19 pandemic: regionally different ozone pollution responses COVID-19[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2021, **14**, doi: 10.1016/j.aosl.2020.100015.
- [21] Chen L W A, Chien L C, Li Y, *et al.* Nonuniform impacts of COVID-19 lockdown on air quality over the United States[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **745**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141105.
- [22] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *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.
- [23] Wang N, Lyu X, Deng X J, *et al.* Aggravating O_3 pollution due to NO_x emission control in eastern China[J]. *Science of the Total*

- Environment, 2019, **677**: 732-744.
- [23] Xing J, Wang S X, Jang C, *et al.* Nonlinear response of ozone to precursor emission changes in China: a modeling study using response surface methodology [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, **11**(10): 5027-5044.
- [24] 叶绿萌, 樊少芬, 常鸣, 等. 珠三角地区秋季臭氧生成敏感性时空变化模拟研究[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2016, **52**(6): 977-988.
Ye L M, Fan S F, Chang M, *et al.* Spatial and temporal distribution of ozone sensitive district in Pearl River Delta region during autumn [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2016, **52**(6): 977-988.
- [25] Ou J M, Yuan Z B, Zheng J Y, *et al.* Ambient ozone control in a photochemically active region: short-term despiking or long-term attainment? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, **50**(11): 5720-5728.
- [26] 庄立跃, 陈瑜萍, 范丽雅, 等. 基于 OMI 卫星数据和 MODIS 土地覆盖类型数据研究珠江三角洲臭氧敏感性[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(11): 3581-3592.
Zhuang L Y, Chen Y P, Fan L Y, *et al.* Study on the ozone formation sensitivity in the Pearl River Delta based on OMI satellite data and MODIS land cover type products [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(11): 3581-3592.
- [27] Li Y, Lau A K H, Fung J C H, *et al.* Importance of NO_x control for peak ozone reduction in the Pearl River Delta region [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(16): 9428-9443.
- [28] Wang X S, Zhang Y H, Hu Y T, *et al.* Decoupled direct sensitivity analysis of regional ozone pollution over the Pearl River Delta during the PRIDE-PRD2004 campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(28): 4941-4949.
- [29] 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.
- [30] Wang X, Zhang Y, Hu Y, *et al.* Process analysis and sensitivity study of regional ozone formation over the Pearl River Delta, China, during the PRIDE-PRD2004 campaign using the Community Multiscale Air Quality modeling system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(9): 4423-4437.
- [31] Guo H, Jiang F, Cheng H R, *et al.* Concurrent observations of air pollutants at two sites in the Pearl River Delta and the implication of regional transport [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(19): 7343-7360.
- [32] Wang Y, Guo H, Zou S C, *et al.* Surface O₃ photochemistry over the South China Sea: application of a near-explicit chemical mechanism box model [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **234**: 155-166.
- [33] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(40): 5324-5335.
- [34] Li M, Liu H, Geng G N, *et al.* Anthropogenic emission inventories in China: a review [J]. *National Science Review*, 2017, **4**(6): 834-866.
- [35] Zheng B, Tong D, Li M, *et al.* Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(19): 14095-14111.
- [36] Zhong Z M, Zheng J Y, Zhu M N, *et al.* Recent developments of anthropogenic air pollutant emission inventories in Guangdong province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1080-1092.
- [37] Wang X M, Situ S P, Guenther A, *et al.* Spatiotemporal variability of biogenic terpenoid emissions in Pearl River Delta, China, with high-resolution land-cover and meteorological data [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2011, **63**(2): 241-254.
- [38] Environ R. User's Guide Comprehensive air quality model with extensions version 6.30 [EB/OL]. <https://www.camx.com>, 2016-04-08.
- [39] Dunker A M, Yarwood G, Ortman J P, *et al.* Comparison of source apportionment and source sensitivity of ozone in a three-dimensional air quality model [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(13): 2953-2964.
- [40] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(32): 5112-5122.
- [41] 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.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil: A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	JIN Dan (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macrobenenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangnan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitrification Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors: Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pe, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LÜ Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)