

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

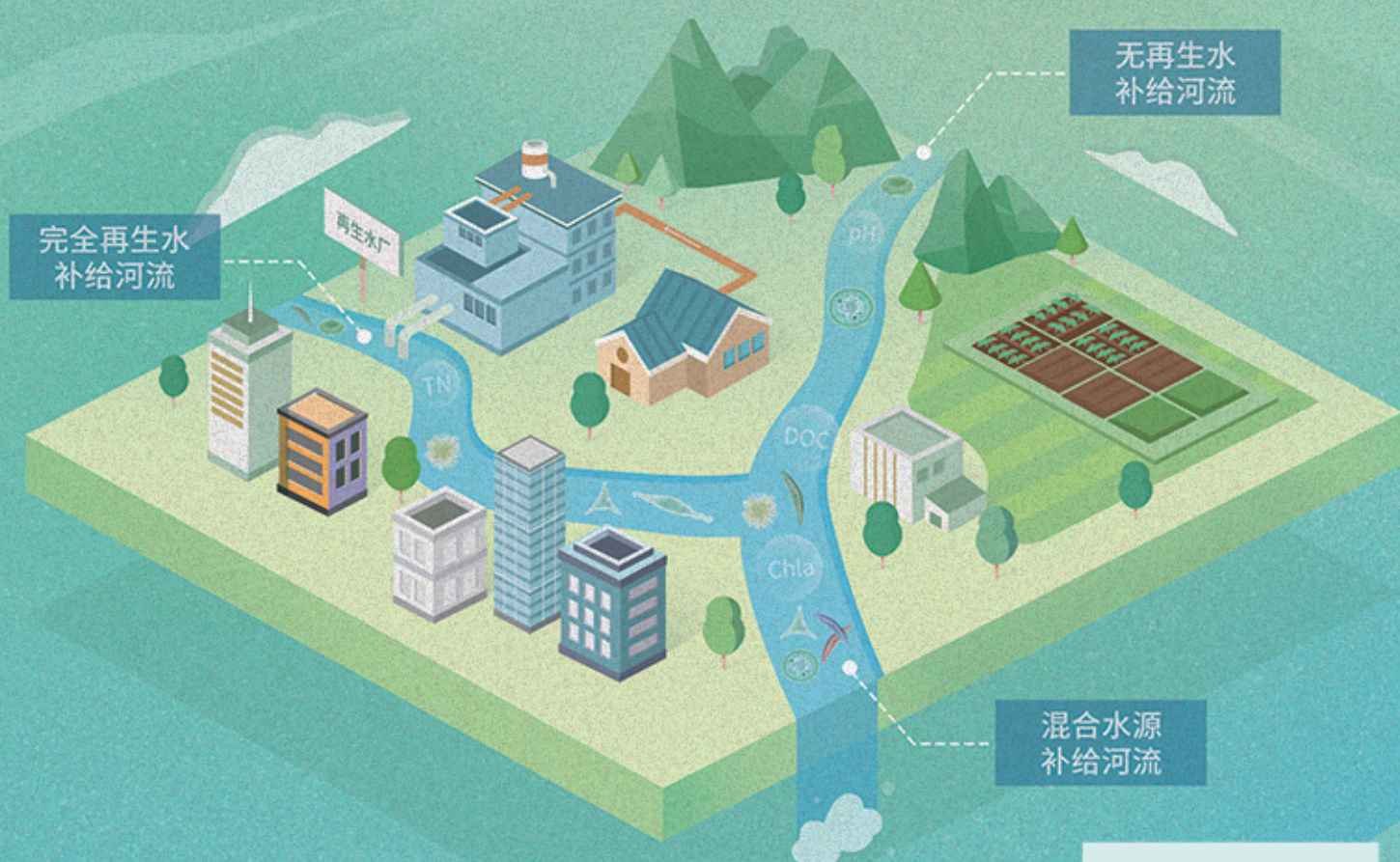
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系

侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年12月

第43卷 第12期

Vol.43 No.12

目次(卷终)

关中平原城市群 PM _{2.5} 时空演变格局及其影响因素	张军, 金梓函, 王玥, 李旭, 戴恩华 (5333)
中原城市群 PM _{2.5} 浓度驱动因子联动效应及非线性影响	周志衡, 周廷刚, 秦宁 (5344)
长株潭城市群 PM _{2.5} 和 O ₃ 浓度时空分布特征及影响因素分析	刘贤赵, 张国桥, 杨文涛, 吴业荣, 李朝奎, 任毅 (5354)
张掖市城区大气细颗粒物 PM _{2.5} 的化学组成及来源解析	潘成珂, 黄韬, 高宏, 常莉敏, 宋世杰, 毛潇萱, 王佳欣, 赵渊, 马建民 (5367)
2018~2019年冬季天津和青岛 PM _{2.5} 中重金属污染特征与健康风险评估	赵明升, 任丽红, 李刚, 刘亚妮, 赵刚, 张佳浩, 高元官, 杨小阳 (5376)
青岛大气降水中金属浓度、溶解度及其来源解析	孔令冬, 祁建华, 张旭 (5387)
2015~2021年陕西关中城市群臭氧污染变化趋势	赵伟, 王硕, 庞晓蝶, 高博, 卢清, 刘明, 陈来国, 范绍佳 (5399)
海南省背景区域臭氧及其前体物污染特征	谢文晶, 邢巧, 谢东海, 吴晓晨, 胡珊珊, 徐文帅 (5407)
基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别	杨雷峰, 谢丹平, 杨俊, 韩静磊, 刘丽君, 袁自冰 (5421)
郑州市夏季大气 VOCs 污染特征及来源解析	齐一谨, 王玲玲, 倪经纬, 何海洋, 赵东旭, 龚山陵 (5429)
兰州市夏季挥发性有机物污染特征及来源解析	杨燕萍, 陈强, 孟宪红, 孙健, 王莉娜, 陶会杰, 杨丽丽 (5442)
地下停车场 VOCs 污染特征与健康风险评估	刘妍, 杨宁, 孙露娜, 吴亚君, 宋鹏飞, 赵耀, 姜昆, 毛洪钧 (5453)
缸内直喷汽油车颗粒物化学组分特征	李家琛, 葛蕴珊, 王浩浩, 王欣, 郝利君, 谭建伟 (5464)
废弃物焚烧处理温室气体排放情景模拟与预测	严薇, 刘舒乐, 吴正方, 高庆先, 杜海波, 马占云, 冯鹏 (5470)
长江颗粒(类)金属元素分布、来源和向海输送	刘珈铭, 吴文涛, 刘笑天, 刘军, 王昊, 臧家业, 张爱周, 冉祥滨 (5478)
澜沧江水系氮磷污染及硝酸盐来源解析	郭树芳, 陈安强, 刁斌, 居学海, 黄宏坤, 刘建香, 毛妍婷, 郭云周, 雷宝坤 (5491)
小浪底水库水沙调控期滨河湿地地下水与河水转化关系	肖春艳, 刘怡凡, 赵同谦, 郭晓明, 陈飞宏, 杨晨 (5499)
磨刀门水道输水水库群饮用水水源水质的时空变化	张坤峰, 昌盛, 张琦, 王思瑞, 谢琼, 张茉莉, 樊月婷, 杨光, 付青 (5509)
疫情背景下长江中游地区典型饮用水源中 PPCPs 分布特征与风险评估	樊月婷, 昌盛, 张坤峰, 涂响, 杨光, 王山军, 张茉莉, 谢琼, 付青 (5522)
北江中上游地表水和沉积物中 PAHs 和 PCBs 污染特征和风险评估	昌盛, 白云松, 涂响, 付青, 张坤峰, 潘杨, 王山军, 杨光, 汪星 (5534)
平朔矿区不同水体水化学特征及氟分布成因	孙龙, 刘廷玺, 段利民, 张文瑞, 郑国峰 (5547)
三峡水库典型消落带土壤 DOM 组分特征及其对有效态镉释放影响	张宝豪, 武亚遵, 徐东昱, 高丽, 李艳艳, 王启文, 高博 (5560)
不同溶解氧条件下沉积物-水体系磷循环	刘笑天, 刘军, 王以斌, 刘珈铭, 吴文涛, 冯耀, 臧家业, 冉祥滨 (5571)
2011~2019年鄱阳湖水水质演化特征及主要污染因子解析	谢慧钰, 胡梅, 嵇晓燕, 曹炳伟, 贾世琪, 徐建, 金小伟 (5585)
乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价	杜彩丽, 黎佳茜, 李国文, 李晓光, 赵琛, 张列宇 (5598)
生物炭吸附雨水径流难生物降解有机氮效能及机制	苏增辉, 孙萍, 陈友媛, 罗冠杨, 王秀海, 郑天元 (5608)
不同水源补给河流浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系	侯颖, 李信, 白灵, 白乙娟, 张淑荣, 王圣瑞, 郑蕾, 丁爱中 (5616)
锰氧化物改性生物炭基质材料对典型喹诺酮类抗生素的吸附及其在人工湿地的应用	高惠子, 田伟君, 张子钰, 邹梦圆, 杨淑洁, 赵婧, 储美乐, 江俊峰 (5627)
KOH 活化小麦秸秆生物炭对废水中四环素的高效去除	徐晋, 马一凡, 姚国庆, 张宇珊, 杨李琪, 周娜, 范世锁 (5635)
改性凹凸棒负载硫化亚铁的制备及其对水中 Mo(VI)的吸附机制	练建军, 郭洪艳, 叶天然, 孔巧平, 徐晴, 吴朝阳, 陈波, 牛司平 (5647)
桉树生物炭负载绿色合成纳米零价铁去除水中 Cr(VI)	刘沁文, 丁爱中, 梁信, 谢领辉, 鄢俊彬, 李娜 (5657)
镁改性硅藻土回收废水氮磷产物对水中 Pb ²⁺ 和 Zn ²⁺ 的去除	吴盈秋, 夏鹏, 李远, 王学江 (5667)
钠化改性河南南部膨润土吸附亚甲基蓝性能分析	程飞鹏, 杨冬亮, 常乐, 吴登峰 (5676)
上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价	李晓曼, 李青青, 杨洁, 黄沈发, 张施阳, 吉敏 (5687)
重庆市煤矸山周边农用地土壤重金属污染评价和定量溯源解析	马杰, 刘萍, 刘今朝, 郭春会, 张秀, 王玲灵 (5698)
典型石油场地周边土壤重金属形态特征及源解析	官健, 何连生, 李强, 王耀锋, 曹莹, 刘晓雪, 高存富 (5710)
基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析	张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 林承奇, 黄华斌 (5718)
香河县农田土壤重金属污染生态与健康风险评估	陈瑜佳, 屈星辰, 张斌, 李现涛, 朱国平, 查同刚 (5728)
地质构造单元交接带表土中重金属污染特征对比及源解析:以重庆城口地区为例	刘永林, 吴梅, 刘睿, 李军, 倪润祥, 刘双燕, 田兴磊, 赵家宇, 刘怡, 夏传波 (5742)
新疆典型地区植物和土壤多环芳烃污染特征、来源解析及健康风险评估	杨北辰, 解启来, 郑芊, 郑晓波, 叶金明, 唐成金, 梁晓晖 (5751)
肥料调控强化象草对重度 Cd 污染农田修复效果	伍港繁, 周航, 唐棋, 辜娇峰, 曾鹏, 廖柏寒 (5761)
微碱性土壤施用烟秆生物炭与磷酸盐降低小麦籽粒镉积累	杨艳征, 张银鸽, 李畅, 扶海超, 秦世玉, 王龙, 刘亥扬, 刘红恩, 睢福庆, 赵鹏 (5769)
产多胺细菌提高小麦 Cd 抗性和消减 Cd 吸收机制	姬明飞, 吴雪姣, 李晓哲, 陈兆进, 姚伦广, 张君, 庞发虎, 韩群 (5778)
硫酸盐还原菌对碱性和酸性农田土壤中重金属的钝化效果及其作用机制	高羽, 刘雨辰, 郭晓方, 吉莉, 张桂香, 张哲海, 夏红丽, 何文峰, 张博远 (5789)
巨大芽孢杆菌对土壤理化性质及植物富集镉的影响	王萍, 李一曼, 王雪佳, 许亚琼, 张书强, 李倩, 徐凯莉, 李荣华, 张增强 (5798)
嘉陵江滨岸带不同土地利用类型土壤真菌群落结构与功能多样性	竹兰萍, 徐飞, 王佳颖, 朱智豪, 张拓, 张富斌 (5808)
添加生物炭对琼北地区双季稻田生物固氮的影响	赵炎, 袁新生, 唐瑞杰, 邵晓辉, 李凯凯, 文昌丽, 陈琦琦, 伍延正, 孟磊, 汤水荣 (5819)
基于g-C ₃ N ₄ 研究环境中甲氧苄啶的光降解行为及其毒性	朱娜, 王星阳, 焦俊恒, 王磊, 梁栋, 李广科, 桑楠 (5832)
“双碳”目标下中国省域碳排放核算分析	杨柏, 秦广鹏, 郭钦 (5840)
长株潭城市群地类转移的碳传导效应与预测	杨旭, 刘贤赵 (5850)
基于分类的张家港市生活垃圾典型处置情景环境效益分析	张涛, 郑钧文, 孙煜璨, 白冬锐, 杨婷, 张冰, 郭含文, 陈坦, 王洪涛 (5861)
《环境科学》第43卷(2022年)总目录	(5873)
《环境科学》征订启事(5386) 《环境科学》征稿简则(5521) 信息(5607,5741,5768)	

基于双维度校验的珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化特征识别

杨雷峰¹, 谢丹平^{1*}, 杨俊², 韩静磊¹, 刘丽君¹, 袁自冰²

(1. 生态环境部华南环境科学研究所华南生态环境监测分析中心(南海生态环境监测评价研究中心), 广州 510655; 2. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006)

摘要: 臭氧(O_3)污染已经成为我国主要城市区域大气环境的首要污染物, 由于其生成与前体物之间呈现高度非线性关系, O_3 生成机制的识别对前体物的减排具有基础性的重要作用. 针对常规方法难以较好对机制的长期演化特征进行识别问题, 基于常规观测数据(O_3 、 NO_2)和温度(T)与挥发性有机物活性(VOCR)之间的关系, 从 NO_2 和 T 两个维度对珠三角区域 O_3 的生成机制进行了识别并做校验, 分析了2006~2020年期间 O_3 的趋势变化规律和原因, 研究了机制的长期演化特征. 结果表明, O_3 浓度随 NO_2 和 T 水平的升高呈现升高、稳定、下降和再次升高的趋势变化规律, 当 $\rho(NO_2)$ 处于0~35、35~45、>45 $\mu g \cdot m^{-3}$ 和 T 处于>30、25~30、<25℃时, 机制分别处于 NO_x 控制区、过渡区和VOCR控制区. 不同时间段, 随着 T 升高VOCR随之升高, 推动了 O_3 浓度上升. 由于前体物排放趋势变化和 O_3 生成机制状况不同, O_3 浓度在不同时间段和 T 条件下的趋势变化规律不同. 整体上, 珠三角区域西部偏VOCR控制区, 东部偏过渡区, 两个维度机制的识别结果具有较高一致性. 随时间变化, 西部区域的过渡区向VOCR控制区转变, 东部区域的VOCR控制区向 NO_x 控制区转变. 在不同时间段, 随着 T 升高 O_3 生成对 NO_x 的敏感性增强, 随时间变化, 高温和低温条件下 O_3 生成分别对 NO_x 和VOCR的敏感性增强.

关键词: 臭氧(O_3); 臭氧生成机制; VOCR活性; 长期; 时空演化

中图分类号: X515 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)12-5421-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201229

Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification

YANG Lei-feng¹, XIE Dan-ping^{1*}, YANG Jun², HAN Jing-lei¹, LIU Li-jun¹, YUAN Zi-bing²

(1. South China Center of Ecological Environmental Monitoring and Analysis (South China Sea Research Center of Ecological Environmental Monitoring and Evaluation), South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510655, China; 2. School of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Ozone (O_3) pollution has become the primary pollutant in the atmospheric environment of major urban areas in China. Due to the highly nonlinear relationship between O_3 and its precursors, the identification of the O_3 formation mechanism (OFM) is fundamental to emission restraining. An overview of previous related investigations indicated that it is rather difficult to ideally recognize OFM long-term evolutions with conventional methods. In this study, based on the relationship between ambient temperature and volatile organic compound activity (VOCR) and O_3 and NO_2 conventional observation data from 2006 to 2020 in the Pearl River Delta (PRD), OFM was identified from the two dimensions of NO_2 and temperature. Then, OFM was verified to ensure accuracy. Afterward, O_3 concentration and OFM in different periods and temperature levels were analyzed. The results showed that O_3 concentration presented a trend of increasing, stabilizing, decreasing, and increasing again with the increase in NO_2 and temperature levels. Overall, NO_x -limited, transitional, and VOCR-limited corresponded to NO_2 in 0-35 $\mu g \cdot m^{-3}$, 35-45 $\mu g \cdot m^{-3}$, and greater than 45 $\mu g \cdot m^{-3}$, and temperature ranged from higher than 30℃, 25-30℃, and lower than 25℃, respectively. VOCR increased with the increase in temperature during different time periods, which promoted O_3 to a higher level. O_3 concentration in different time periods and temperature levels varied with precursor emission fluctuations in different OFM. On average, during 2006 to 2020, VOCR-limited and transitional were in the west and east of PRD, respectively, and OFM identified from NO_2 and temperature dimension were consistent. The transitional tended toward the VOCR-limited in the west, and VOCR-limited in the east of PRD tended toward the NO_x -limited with time. O_3 formation was more related to NO_x as temperature increased, and it became more sensitive to NO_x and VOCR at high and low temperatures, correspondingly.

Key words: ozone (O_3); ozone formation mechanism (OFM); volatile organic compounds activity (VOCR); long-term trend; spatial-temporal evolution

随着一系列减排措施的推行,我国大气环境中常规污染物 NO_x 、 SO_2 、CO、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 整体呈现下降的趋势,唯独臭氧(O_3)浓度不但不降,反而呈现上升的趋势^[1,2].在我国三大光化学活跃区域珠三角(PRD)、长三角和京津冀区域, O_3 分别于2015、2017和2018年成为大气环境的首要污染物^[3-5],特别是对于珠三角区域来说,其防控重点已由颗粒物转向 O_3 污染.

O_3 是其前体物 NO_x 和挥发性有机污染物(VOCs)在紫外光作用下发生光化学反应的产物,在前体物不同排放比例下, O_3 生成机制有 NO_x 控

收稿日期: 2022-01-23; 修订日期: 2022-04-06

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(PM-zx097-202104-065)

作者简介: 杨雷峰(1988~),男,博士,助理研究员,主要研究方向为大气污染成因机制分析和控制措施, E-mail: yangleifeng@scies.org

* 通信作者, E-mail: xiedanping@scies.org

制、过渡区和 VOCs 控制区之分^[6-9],不合理的减排措施不仅不能够降低 O₃ 浓度,还会导致污染程度的进一步加剧,因此,对 O₃ 污染防治来说,生成机制 (OFM) 的识别是前体物减排措施制定的基础. 有研究结果表明 O₃ 生成机制具有时空演化特征,如 Ye 等^[10]的研究发现珠三角西南和东北区域 O₃ 生成机制分别处于 VOCs 和 NO_x 控制区,中部则处于过渡区. Li 等^[11]发现 1 d 中不同时间 O₃ 生成机制空间分布具有较大差异. 文献[11,12]发现 O₃ 生成机制具有明显的月季变化特征. MEIC 清单显示 2008~2017 年,广东 NO_x 排放下降幅度为 20%,VOCs 则呈现 10% 的上升趋势^[13]. 由于 O₃ 生成机制与 NO_x 和 VOCs 的排放比有关,随着减排措施的实施,前体物排放水平不同程度的变化势必会对机制产生一定的影响,识别此过程中机制的长期时空演化特征,既是评估以往控制措施影响和成效的需求,也是制定下一个阶段前体物减排措施的基础. 然而,截止到目前,针对珠三角区域相关研究的报道相对较少.

识别 O₃ 生成机制最常用的方法有 3 种,分别为:基于排放源清单的数值模型 (EBM)^[9,14]、基于观测数据的 OBM 模型^[15,16] 和基于 NO₂ 与甲醛 (HCHO) 比值的卫星反演 (FNR)^[17,18]. EBM 方法相对灵活和方便,但是受排放源清单的影响,结果具有较大的不确定性,OBM 识别结果相对准确,但是严重依赖观测数据,更加重要的是两种方法均难以对长期范围内的情况进行研究. FNR 方法在一定程度上缓解了这一难题,但是卫星反演结果较大的不确定性给研究结果的准确性带来了一定的影响,即现有的常规方法难以较好地实现对不同站点 O₃ 生成机制长期时空演化特征的识别.

前人研究显示温度 (*T*) 与 VOCs 总活性 (VOCR) 之间存在着正相关的关系,不同 *T* 区间 O₃ 浓度的差异反映着 O₃ 对 VOCR 的敏感性,由于在不同 O₃ 生成机制条件下 O₃ 浓度对前体物变化的敏感性不同,从 *T* 和 NO₂ 两个维度出发对 O₃ 的生成机制进行识别并做相互校验是行之有效的思路和方法^[19-21]. 基于此,本文以珠三角为研究区域,利用 O₃、*T* 和 NO₂ 数据,首先分析了 O₃ 浓度与 NO₂ 和 *T* 的关系,以及不同时间和 *T* 区间 O₃ 随 NO₂ 的变化规律,此后,从 NO₂ 和 *T* 两个维度对该区域 2006~2020 年期间 O₃ 生成机制进行了识别,并研究了其长期时空演化特征,以期为下一个环节前体物控制措施的制定提供参考和建议.

1 材料与方法

1.1 研究区域和数据

选取了珠三角区域 8 个城市 10 个站点 2006~2020 年 8~11 月的数据为研究区域和时间段开展研究. O₃ 和 NO₂ 逐小时观测数据来源于粤港澳空气质量监测网 (<https://www-app.gdeei.cn> 和 <https://cd.epic.epd.gov.hk>),具体城市名称、站点名称及其空间分布如表 1 和图 1 所示. 为保留较多站点和时间段数据,O₃ 和 NO₂ 缺失值结合其所在日期的状况和临近站点进行了补全. 气象要素 *T* 和降雨数据来源于欧洲中期天气预报中心气象再分析数据资料 (时间和空间分辨率分别为 1 h 和 0.25°×0.25°; <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-interim>),根据临近原则选取最能反映空气质量监测站点的气象数据. O₃ 日际值取日 8 h 滑动平均浓度最大值 (MDA8),NO₂ 取日 08:00~16:00 的均值,*T* 取日最大值,剔除日降雨总量大于 10 mm 的日期以减少降雨的影响,每个站点数据量为 1 547 条.

表 1 研究区域城市经纬度信息

Table 1 Longitudes and latitudes of cities involved				
城市	站点	缩写	东经/(°)	北纬/(°)
肇庆	城中	CZ	112.5	23.1
江门	东湖	DH	113.1	22.6
广州	麓湖	LH	113.3	23.2
深圳	荔园	LY	114.1	22.6
香港	东涌	TC	113.9	22.3
珠海	唐家	TJ	113.6	22.3
香港	塔门	TM	114.4	22.5
香港	荃湾	TW	114.1	22.4
惠州	下埔	XP	114.4	23.1
中山	紫马岭	ZML	113.4	22.5

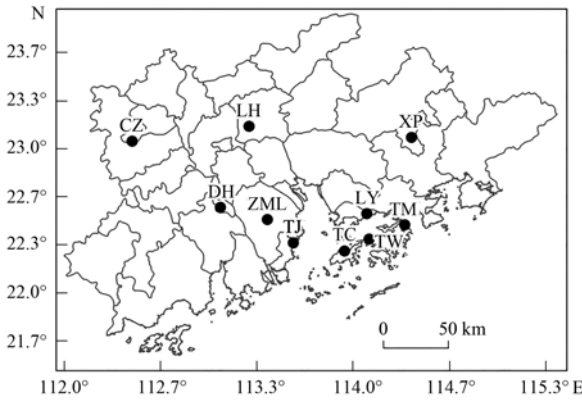


图 1 研究区域和城市站点空间分布示意

Fig. 1 Geographical location of air pollutant monitoring stations

1.2 研究方法

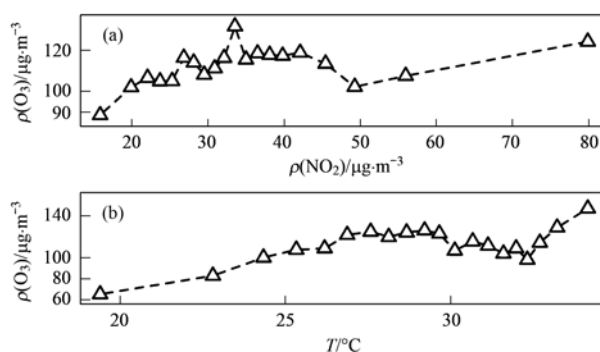
为降低研究结果的不确定性,将 15 a 的数据划

分为 5 个时间段(2006 ~ 2008、2009 ~ 2011、2012 ~ 2014、2015 ~ 2017 和 2018 ~ 2020 年)以研究 O_3 生成机制随时间的变化状况. 在分析 O_3 、 NO_2 和 T 之间的关系时, 分别取 NO_2 和 T 的 21 个分位数(0%、5%、10%、15%、20%, ..., 100%) 将其划分为 20 个区间, 计算每个区间 O_3 、 NO_2 和 T 的均值以用于后续研究. 从 T 和 NO_2 两个维度对 O_3 的生成机制进行识别, 在 T 维度, 将其划分为 3 个区间($>31^\circ\text{C}$ 为高温、 $27.5 \sim 31^\circ\text{C}$ 为中温和 $<27.5^\circ\text{C}$ 为低温), 以指示高、中和低 VOCR(此划分标准使得每个区间数据量相近), 通过分析不同 T 区间 O_3 浓度的差异 d 来识别 O_3 对 VOCR 的敏感性. d 取低温到中温和中温到高温 O_3 浓度均值差异的最大值, 定义所有站点 d 的最大值为 $d_{\max}$, 当 d 为 $<0.01d_{\max}$ 、 $0.01d_{\max} \sim 0.6d_{\max}$ 和 $>0.6d_{\max}$ 时, 机制分别处于 NO_x 控制区、过渡区和 VOCR 控制. 在 NO_2 维度, 用多项式拟合的方式拟合 O_3 与 NO_2 的非线性关系(三次函数), 拟合曲线的斜率(p)反映着 O_3 浓度对 NO_2 变化的敏感性, 取 NO_2 平均水平对应的 p 对 O_3 生成机制进行识别. 定义所有站点 p 最大值记为 $p_{\max}$, 当 p 处于 <0 、 $0 \sim 0.75p_{\max}$ 和 $>0.75p_{\max}$ 时, 机制分别处于 VOCs 控制区、过渡区和 NO_x 控制区. 该方法详细介绍见文献[21].

2 结果与讨论

2.1 珠三角区域臭氧浓度随 NO_2 和温度变化

O_3 浓度随 NO_2 变化情况如图 2(a) 所示, 随着 NO_2 浓度的升高, $\rho(O_3)$ 呈现先升高($0 \sim 35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、稳定($35 \sim 45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)、下降($45 \sim 50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和再次上升($>50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的趋势变化特征. 这是因为 NO_2 浓度较低时 O_3 生成机制处于 NO_x 控制区, O_3 随 NO_2 的升高而升高. 随着 NO_2 排放水平的升高, 机制向过渡区转变, O_3 浓度对 NO_x 变化的敏感性降低. 此后随着 NO_2 浓度的继续升高, 机制向 VOCR 控制区转变, NO_2 对 O_3 起消耗作用, 因此 O_3 随 NO_2 浓度的升高而降低. 值得注意的是, 当 $\rho(NO_2)$ 高于 $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, O_3 随 NO_2 浓度的升高而升高, 这很可能是因为此时 T 相对较高, 具有较高活性天然源的排放较多, 导致 O_3 生成机制向过渡区或者 NO_x 控制区转变. O_3 浓度随 T 变化状况与 NO_2 类似[图 2(b)], 呈现升高、稳定、下降和再次上升的趋势变化规律, 这是因为 T 较低时($<25^\circ\text{C}$) VOCR 水平较低, 机制处于 VOCR 控制区, O_3 随着 T 的升高而升高, 而当 T 处于 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 时, 机制向过渡区转变, O_3 对 VOCR 的敏感性降低, 而当 T 大于 30°C 时, VOCR 水平较高, 机制向 NO_x 控制区转变,



(a) 和 (b) 分别 O_3 随 NO_2 和 T 变化状况

图 2 整体上珠三角区域 O_3 随 NO_2 和 T 趋势变化

Fig. 2 O_3 concentration varies with NO_2 and temperature in PRD

此时 O_3 浓度与 NO_2 趋势变化保持一致.

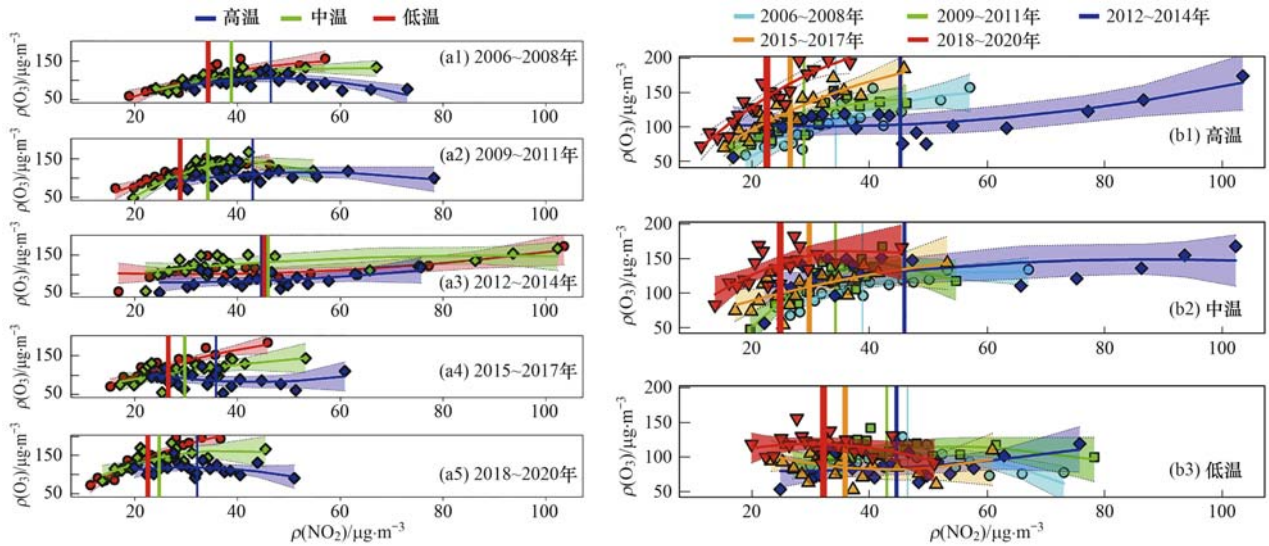
2.2 珠三角区域不同时间段和不同温度区间臭氧浓度的趋势变化状况

珠三角区域不同时间和 T 区间 O_3 浓度的变化情况如图 3(a) 所示, 5 个时间段中当 NO_2 浓度较小时, 机制处于 NO_x 控制区, 此时 O_3 随 NO_2 的升高而升高, 改变 T (VOCR) 对 O_3 的影响较小. 随着 NO_2 浓度的升高, 曲线的斜率变小, 机制向过渡区和 VOCR 控制区转变, 可以发现此时中温和高温条件下 O_3 浓度要高于低温, 这是因为 VOCR 升高使得 O_3 生成速率增加, 进而导致 O_3 的浓度增加. 而当 NO_2 水平超过一定的程度, O_3 生成机制向 VOCR 控制区转变, 随 NO_2 的继续升高 O_3 浓度呈现下降的趋势. 此外, 5 个时间区间, 低温向高温变化过程中 NO_2 平均浓度逐渐降低, 对应的 O_3 浓度整体呈现上升的趋势, 由于此时机制处于过渡区, 因此推断 O_3 浓度上升的重要原因为 VOCR 的升高.

不同 T 区间 O_3 浓度随时间变化如图 3(b) 所示. 高温(H)条件下自 2006 ~ 2008 年至 2009 ~ 2011 年和 2012 ~ 2014 年 NO_2 平均水平呈现先下降后升高的趋势, 而对应的 O_3 浓度与 NO_2 平均浓度相反, 呈现先升高后下降的趋势, 注意到 5 个时间段中只有 2012 ~ 2014 年的 NO_2 平均浓度对应的拟合曲线的斜率为负, 推测 2006 ~ 2008 年至 2009 ~ 2011 年 VOCs 排放水平的升高是导致 O_3 浓度升高的主要原因, 而 2009 ~ 2011 年至 2012 ~ 2014 年 NO_x 排放的升高导致对 O_3 滴定作用的增加很可能是导致 O_3 浓度降低的重要原因, 2012 ~ 2014 年至 2015 ~ 2017 年和 2015 ~ 2017 年至 2018 ~ 2020 年 O_3 浓度的持续升高则可能分别是 NO_x 滴定作用的减少和 VOCs 排放量增多的原因. 中温和低温区间 O_3 趋势变化状况整体与高温保持一致, 区别在于中温时 NO_2 平均水平对应的拟合曲线的斜率均为正值, 机制处于过渡区或 NO_x 控制区, 因此 2012 ~ 2014 年至 2015 ~ 2017

年, NO_x 排放水平的减少有可能是导致 O_3 浓度降低的驱动因素, 其他阶段 O_3 浓度趋势变化的控制因素则为 VOCs 排放. 低温条件下 2006 ~ 2008、2009 ~ 2011 和 2012 ~ 2014 年 NO_2 平均水平对应的斜率为正值, 机制偏 NO_x 控制, 但是 O_3 浓度先上升后下降趋

势与 NO_2 趋势变化相反, 推测 VOCR 是该阶段 O_3 浓度变化的主控因素. 2015 ~ 2017 年和 2018 ~ 2020 年 NO_2 平均水平对应的斜率为负值, 机制处于 VOCR 控制区, NO_x 排放水平的降低导致的滴定作用的减少很可能是导致 O_3 浓度上升的重要原因.



(a) 不同温度水平, (b) 不同时间段; 竖直垂线为不同情况下 NO_2 平均水平所处位置, 曲线为多项式拟合值, 阴影部分表示 95% 置信区间

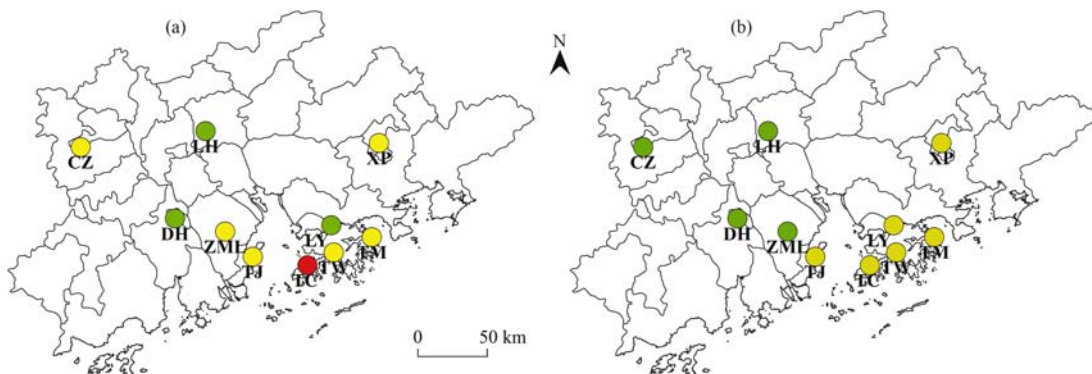
图 3 珠三角区域不同时间和温度区间 O_3 浓度随 NO_2 变化状况

Fig. 3 O_3 concentration variations with NO_2 and temperature in different time periods and temperature levels in PRD

2.3 珠三角区域臭氧生成机制的空间分布特征及其双维度校验

利用 O_3 与 NO_2 以及 T 与 VOCR 之间的关系, 从 NO_2 和 T 两个维度对机制进行识别. NO_2 维度识别结果如图 4(a) 所示, O_3 浓度对 NO_2 的敏感性为负值的站点有深圳的 LY (−0.6)、江门的 DH (−0.3) 和广州的站点 LH (−0.1), 根据机制识别标准将其归为 VOCR 控制区, 香港区域的 TC 站点最高为 1.1, 将其归于 NO_x 控制区, 其他站点的敏感性值在 0 ~ 0.75 $p_{\max}$ 之间, 将其归为过渡区. 广州 (LH)、江门 (DH) 和深圳 (LY) 处于 VOCR 控制区, 这与这些区域相对较多的 NO_x 排放有关, 其他区域

相对来说 VOCs 排放较多, 机制向 NO_x 控制区偏移, 该研究结果与前人的保持一致^[10,22,23]. 从 T 维度来说[图 4(b)], 改变 T 时 O_3 浓度变化最大的站点为江门的 DH 站点 (54.7), 其次为肇庆的 CZ (47.1)、中山的 ZML (42.9) 和广州的 LH (35.1) 站点, 根据识别标准将其归为 VOCR 控制区, 其他站点归为过渡区. 通过对比可以发现, 在所选取的 10 个站点中, 6 个站点两个维度的识别结果完全相同, 一定程度上说明了利用 NO_2 和 T 来识别 O_3 生成机制的合理性和可靠性. 剩下的 4 个站点的识别结果略有偏差, 这一方面是因为不同站点的识别阈值不同, 采用统一的识别阈值会对结果产生一定的影响. 另一方面,



(a) 和 (b) 分别为从 NO_2 和 T 两个维度对 O_3 生成机制的识别结果, 其中绿、黄和红点分别表示 VOCR 控制区、过渡区和 NO_x 控制区

图 4 2006 ~ 2020 年珠三角区域 O_3 生成机制的双维度识别及其空间分布

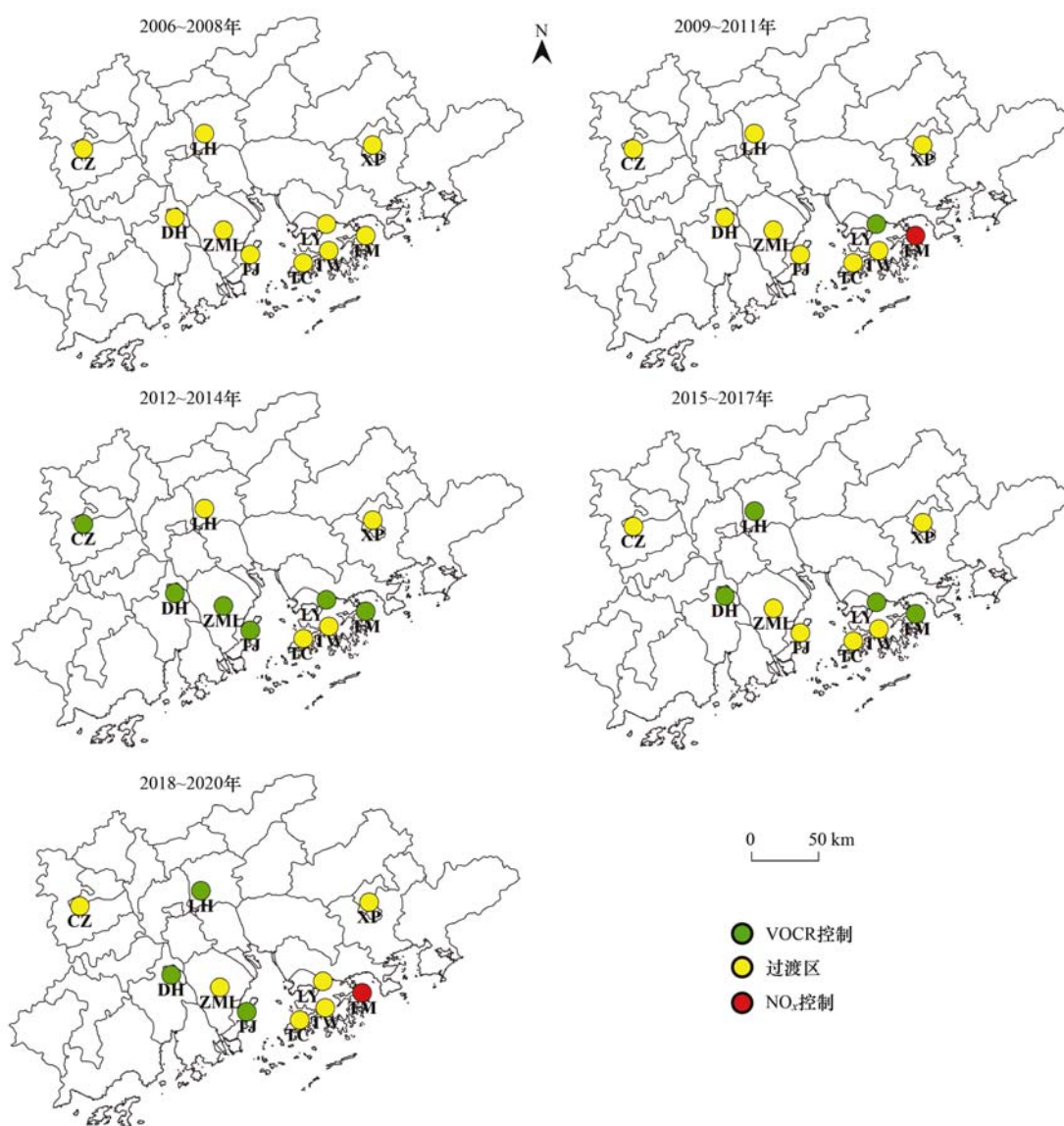
Fig. 4 Average OFM estimated from NO_2 and temperature dimensions and its spatial distribution in PRD from 2006 to 2020

由于 O_3 与前体物之间关系复杂, 现有数学模型难以准确描述两者之间的非线性关系, 是导致识别结果有所偏差的另一重要因素。

2.4 珠三角区域臭氧生成机制长期时空演化

为了降低气象等因素的影响, 将 2006 ~ 2020 年共计 15 a 的数据根据年份分成了 5 个时间段, 以研究珠三角区域 O_3 生成机制的长期时空演化特征。结果如图 5 所示, 2006 ~ 2008 年至 2009 ~ 2011 年, 珠三角区域大部分站点 O_3 生成机制无明显变化, 这是因为在此阶段 O_3 前体物 NO_x 和 VOCs 排放均呈现上升的趋势^[13], 使得两种前体物之间的比值变化较小。具有明显变化特征的两个站点为深圳的 LY 和香港的 TM, 分别由过渡区向 VOCR 控制区和 NO_x 控制区转变。观测数据显示两个站点 NO_2 均呈现下降的趋势^[24], 因此推断在这两个时间区间 LY 和

TM 站点 VOCs 排放分别具有下降和上升的趋势, 使得两个站点 O_3 浓度分别对 VOCR 和 NO_x 的敏感性增强。2009 ~ 2011 年至 2012 ~ 2014 年, PRD 西南部区域的 DH、TJ、ZML 和香港东部的 TM 站点 O_3 生成机制由过渡区向 VOCR 控制区转变, 这很可能是因为这些站点 NO_x 上升幅度大于 VOCs 的原因^[13,24]。自 2012 ~ 2014 年至 2015 ~ 2017 年和 2018 ~ 2020 年, 广州的 LH 站点由过渡区向 VOCR 控制区转变, CZ、LY、TM 和 ZML 站点由 VOCR 控制区向过渡区或者 NO_x 控制区变化, 形成了最近阶段珠三角中部区域偏 VOCR 控制、四周为过渡区和 NO_x 控制区空间分布格局。这是因为珠三角中部城市相对发达, 较多的化石燃料使用使得 NO_x 排放多, 导致机制偏 VOCR 控制, 周边区域由于相对较多的天然源排放, 使得机制偏 NO_x 控制和过渡区。该研究



绿、黄和红点分别表示 VOCR 控制区、过渡区和 NO_x 控制区

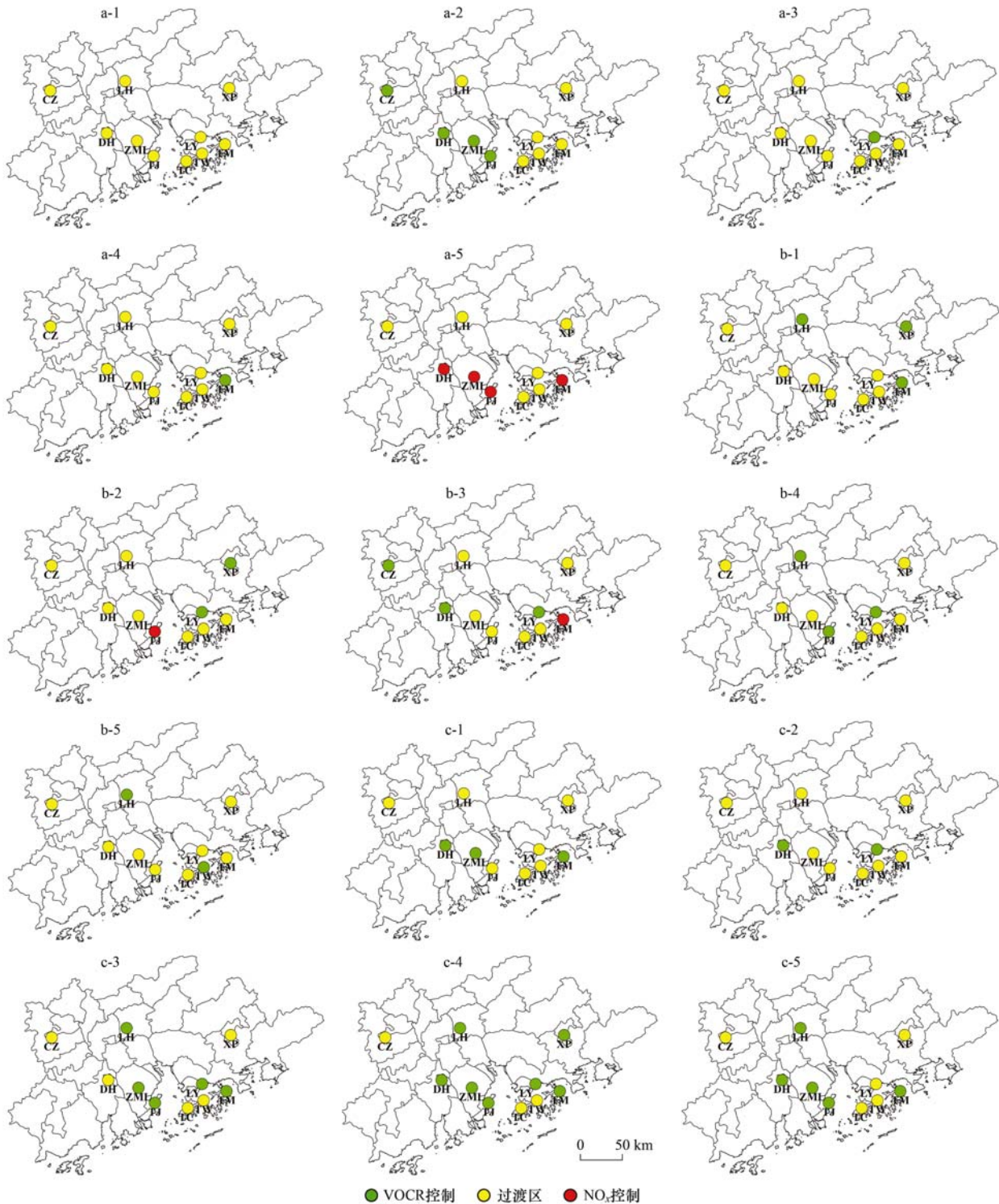
图 5 2006 ~ 2020 年珠三角区域 O_3 生成机制时空演化整体状况

Fig. 5 Spatio-temporal evolution of average OFM of PRD from 2006 to 2020

结果提示中部区域 O_3 污染防治需大力强化 VOCs 的减排力度,周边区域则需要 NO_x 和 VOCs 协同减排以降低 O_3 浓度.

以上分析了 O_3 生成机制的整体状况随时间演化,以下对不同 T 区间机制的变化情况进行分析. 结果如图 6 所示,低温条件下珠三角区域整体上以

VOCR 控制区和过渡区为主,提示在 T 相对较低时 O_3 污染防治需要以 VOCs 控制为主. 随着 T 的升高,机制向过渡区和 NO_x 控制区转变,这是因为随着 T 的升高 VOCR 升高,导致 NO_x 的相对比例降低^[25],使得 O_3 浓度对 NO_x 的敏感性增强. 该研究结果强调了建立基于 T 变化的 O_3 污染前体物减排措



a、b 和 c 分别表述高、中和低温条件,1~5 分别表示 2006~2008、2009~2011、2012~2014、2015~2017 和 2018~2020 年这 5 个时间区间,绿、黄和红点分别表示 VOCR 控制区、过渡区和 NO_x 控制区

图 6 2006~2020 年珠三角区域不同温度水平下 O_3 生成机制的时空演化

Fig. 6 Spatio-temporal evolution of OFM of PRD at different temperature levels from 2006 to 2020

施的重要性,当 T 升高时,适度加大 NO_x 的减排力度将更加有利于 O_3 浓度的降低。

3 种 T 水平下, O_3 生成机制随时间的空间演化特征不同。2006 ~ 2008 年至 2009 ~ 2011 年机制的变化较小,这与此阶段 NO_x 和 VOCs 排放趋势变化相同有关。自 2006 ~ 2008 年和 2009 ~ 2011 年到此后的 3 个时间段(2012 ~ 2014、2015 ~ 2017 和 2018 ~ 2020 年),低温时,机制有向 VOCs 控制区转变的趋势,推测 VOCs 的排放相对减弱。中温条件下,机制整体以过渡区为主,少数站点处于 VOCR 控制区,随时间变化无明显变化特征。高温时,机制除了在 2012 ~ 2014 年由于西南区域站点 NO_x 排放增多导致机制向 VOCR 控制区变化之外,2006 ~ 2008、2009 ~ 2011 和 2015 ~ 2017 年这 3 个时间段 O_3 生成机制保持相对稳定,而在 2018 ~ 2020 年,西南区域站点(DH、TJ 和 ZML)和香港的 TM 站点机制由过渡区转为了 NO_x 控制区,说明了这些区域控制策略的有效性,提示在 T 较高时,珠三角西南区域下一个阶段 O_3 污染防治需以 NO_x 控制为主,其他区域则需 NO_x 和 VOCs 的协同减排以实现 O_3 浓度的降低。

3 结论

(1)对珠三角整体区域来说, O_3 浓度随 NO_2 和 T 水平的升高呈现升高、稳定、下降和再次升高的趋势变化规律,当 $\rho(\text{NO}_2)$ 和 T 分别处于 $0 \sim 35 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $> 30^\circ\text{C}$ 、 $35 \sim 45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $25 \sim 30^\circ\text{C}$ 以及 $> 45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $< 25^\circ\text{C}$ 时, O_3 生成机制分别处于 NO_x 控制区、过渡区和 VOCR 控制区。

(2)不同时间段,随着 T 的升高,VOCR 升高是推动 O_3 浓度升高的重要因素。2006 ~ 2020 年,高温和低温条件下 O_3 浓度呈现先升高后下降、此后持续升高的趋势,中温条件下呈现先升高后持续下降此后再升高的趋势,不同情况下 O_3 趋势的变化驱动因素有较大差异。

(3)整体上,珠三角区域西部偏 VOCR 控制区,东部偏过渡区,从 NO_2 和 T 两个维度识别的 O_3 生成机制具有较高的一致性。随着时间变化,西部和东部区域分别对 VOCR 和 NO_x 的敏感性增强。随着 T 的升高,机制由 VOCR 控制区和过渡区分别向过渡区和 NO_x 控制区转变。高温和低温条件下,随着时间变化 O_3 生成分别对 NO_x 和 VOCR 的敏感性增强。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Li K, Jacob D, Liao H, *et al.* Anthropogenic drivers of 2013-2017 trends in summer surface ozone in China [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(2): 422-427.
- [3] 中华人民共和国生态环境部. 2015 年中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201606/P020160602333160471955.pdf>, 2016-06-01.
- [4] 中华人民共和国生态环境部. 2017 年中国环境状况公报 [EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201805/P020180531534645032372.pdf>, 2018-05-31.
- [5] 中华人民共和国生态环境部. 2018 年中国环境状况公报 [EB/OL]. <https://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/zghjzkgb/201905/P020190619587632630618.pdf>, 2019-05-29.
- [6] Cardelino C A, Chameides W L. An observation-based model for analyzing ozone precursor relationships in the urban atmosphere [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1995, **45**(3): 161-180.
- [7] Wang W N, van der A R, Ding J Y, *et al.* Spatial and temporal changes of the ozone sensitivity in China based on satellite and ground-based observations [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(9): 7253-7269.
- [8] 李光耀, 陈强, 郭文凯, 等. 基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(2): 616-623.
Li G Y, Chen Q, Guo W K, *et al.* Nonlinear response characteristics and control scheme for ozone and its precursors based on orthogonal experimental methods [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(2): 616-623.
- [9] 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.
- [10] Ye L M, Wang X M, Fan S F, *et al.* Photochemical indicators of ozone sensitivity: application in the Pearl River Delta, China [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2016, **10**(6), doi: 10.1007/s11783-016-0887-1.
- [11] 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.
- [12] Jin X M, Fiore A M, Murray L T, *et al.* Evaluating a space-based indicator of surface ozone- NO_x -VOC sensitivity over midlatitude source regions and application to decadal trends [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(19): 10439-10461.
- [13] 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.
- [14] Xie M, Shu L, Wang T J, *et al.* Natural emissions under future climate condition and their effects on surface ozone in the Yangtze River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **150**: 162-180.
- [15] 钱骏, 徐晨曦, 陈军辉, 等. 2020 年成都市典型臭氧污染过程特征及敏感性 [J]. *环境科学*, 2021, **42**(12): 5736-5746.
Qian J, Xu C X, Chen J H, *et al.* Chemical characteristics and contaminant sensitivity during the typical ozone pollution processes of Chengdu in 2020 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(12): 5736-5746.
- [16] 张玉欣, 安俊琳, 王俊秀, 等. 南京工业区挥发性有机物来

- 源解析及其对臭氧贡献评估[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 502-510.
- Zhang Y X, An J L, Wang J X, *et al.* Source analysis of volatile organic compounds in the Nanjing industrial area and evaluation of their contribution to ozone[J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 502-510.
- [17] Jin X M, Fiore A, Boersma K F, *et al.* Inferring changes in summertime surface ozone-NO_x-VOC chemistry over U. S. urban areas from two decades of satellite and ground-based observations [J]. Environmental Science & Technology, 2020, **54**(11): 6518-6529.
- [18] 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.
- [19] Pusede S E, Steiner A L, Cohen R C. Temperature and recent trends in the chemistry of continental surface ozone [J]. Chemical Reviews, 2015, **115**(10): 3898-3918.
- [20] Pusede S E, Cohen R C. On the observed response of ozone to NO_x and VOC reactivity reductions in San Joaquin Valley California 1995-present [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**(18): 8323-8339.
- [21] Yang L F, Yuan Z B, Luo H H, *et al.* Identification of long-term evolution of ozone sensitivity to precursors based on two-dimensional mutual verification [J]. Science of the Total Environment, 2021, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143401.
- [22] 单源源, 李莉, 刘琼, 等. 基于 OMI 数据的中国中东部臭氧及前体物的时空分布[J]. 环境科学研究, 2016, **29**(8): 1128-1136.
- Shan Y Y, Li L, Liu Q, *et al.* Spatial-temporal distribution of ozone and its precursors over central and eastern China based on OMI data [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, **29**(8): 1128-1136.
- [23] Zheng J Y, Shao M, Che W W, *et al.* Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(22): 8580-8586.
- [24] 广东省生态环境厅. 粤港澳珠三角区域空气监测网络监测结果报告 2006-2020 [EB/OL]. <http://gdee.gd.gov.cn/kqjc/index.html>, 2012-04-23.
- [25] Rubin J I, Kean A J, Harley R A, *et al.* Temperature dependence of volatile organic compound evaporative emissions from motor vehicles [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, **111**(D3), doi: 10.1029/2005jd006458.



CONTENTS

Temporal and Spatial Evolution Pattern of PM _{2.5} and Its Influencing Factors in Guanzhong Plain Urban Agglomeration	ZHANG Jun, JIN Zi-han, WANG Yue, <i>et al.</i>	(5333)
Linkage Effect and Nonlinear Impact of PM _{2.5} Concentration Driving Factors in Central Plains Urban Agglomeration	ZHOU Zhi-heng, ZHOU Ting-gang, QIN Ning	(5344)
Analysis of Spatiotemporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of PM _{2.5} and O ₃ in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan Urban Agglomeration, China	LIU Xian-zhao, ZHANG Guo-qiao, YANG Wen-tao, <i>et al.</i>	(5354)
Chemical Composition and Source Apportionment of PM _{2.5} in Zhangye City	PAN Cheng-ke, HUANG Tao, GAO Hong, <i>et al.</i>	(5367)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of PM _{2.5} Heavy Metals in Tianjin and Qingdao in Winter of 2018-2019	ZHAO Ming-sheng, REN Li-hong, LI Gang, <i>et al.</i>	(5376)
Concentration, Solubility, and Sources of Metal Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	KONG Ling-dong, QI Jian-hua, ZHANG Xu	(5387)
Trends of Ozone Pollution in Guanzhong Urban Agglomeration from 2015 to 2021	ZHAO Wei, WANG Shuo, PANG Xiao-die, <i>et al.</i>	(5399)
Pollution Characteristics of Ozone and Its Precursors in Background Region of Hainan Province	XIE Wen-jing, XING Qiao, XIE Dong-hai, <i>et al.</i>	(5407)
Identification of Ozone Formation Mechanism Long-term Spatio-temporal Evolutions in PRD Based on Two-dimensional Mutual Verification	YANG Lei-feng, XIE Dan-ping, YANG Jun, <i>et al.</i>	(5421)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Summer Volatile Organic Compounds in Zhengzhou, China	QI Yi-jin, WANG Ling-ling, NI Jing-wei, <i>et al.</i>	(5429)
Summer Pollution Characteristics and Sources of Volatile Organic Compounds in Lanzhou	YANG Yan-ping, CHEN Qiang, MENG Xian-hong, <i>et al.</i>	(5442)
Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in an Underground Parking Garage	LIU Yan, YANG Ning, SUN Lu-na, <i>et al.</i>	(5453)
Chemical Characterizations of Particles from Direct-injection Gasoline Vehicles	LI Jia-chen, GE Yun-shan, WANG Hao-hao, <i>et al.</i>	(5464)
Scenario Simulation and Prediction of Greenhouse Gas Emissions from Incineration of Solid Waste	YAN Wei, LIU Shu-le, WU Zheng-fang, <i>et al.</i>	(5470)
Distribution, Sources, and Export of the (Sub-) Metal Elements in the Changjiang River	LIU Jia-ming, WU Wen-tao, LIU Xiao-tian, <i>et al.</i>	(5478)
Analysis of Nitrogen and Phosphorus Pollution and Nitrogen Sources in the Lancang River	GUO Shu-fang, CHEN An-qiang, XI Bin, <i>et al.</i>	(5491)
Transformation Relationship of Groundwater and River Water in Riparian Wetland During Water and Sediment Regulation of Xiaolangdi Reservoir in Yellow River	XIAO Chun-yan, LIU Yi-fan, ZHAO Tong-qian, <i>et al.</i>	(5499)
Spatiotemporal Variation in Water Quality of Modaomen Waterway Conveyance Reservoir Drinking Water Sources	ZHANG Kun-feng, CHANG Sheng, ZHANG Qi, <i>et al.</i>	(5509)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PPCPs in Typical Drinking Water Sources in the Middle Reaches of the Yangtze River During the COVID-19 Pandemic	FAN Yue-ting, CHANG Sheng, ZHANG Kun-feng, <i>et al.</i>	(5522)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of PAHs and PCBs in Surface Water and Sediments in Middle and Upper Reaches of Beiji River	CHANG Sheng, BAI Yun-song, TU Xiang, <i>et al.</i>	(5534)
Hydrochemical Characteristics and Fluorine Distribution and Causes of Different Water Bodies in Pingshuo Mining Area	SUN Long, LIU Ting-xi, DUAN Li-min, <i>et al.</i>	(5547)
Characteristics of Dissolved Organic Matters and Their Influence on Labile Cadmium Release from Soils of Typical Water Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir	ZHANG Bao-hao, WU Ya-zun, XU Dong-yu, <i>et al.</i>	(5560)
Phosphorus Cycling in a Sediment-water System Controlled by Different Dissolved Oxygen Levels of Overlying Water	LIU Xiao-tian, LIU Jun, WANG Yi-bin, <i>et al.</i>	(5571)
Water Quality Evolution Characteristics and Pollution Factor Analysis in Poyang Lake from 2011 to 2019	XIE Hui-yu, HU Mei, JI Xiao-yan, <i>et al.</i>	(5585)
Distribution and Risk Assessment on the Nutrients and Heavy Metals in Surface Sediments of Wuliangsu Lake	DU Cai-li, LI Jia-xi, LI Guo-wen, <i>et al.</i>	(5598)
Effect and Mechanism of Biochar Adsorption on Unbiodegradable Organic Nitrogen in Stormwater Runoff	SU Zeng-hui, SUN Ping, CHEN You-yuan, <i>et al.</i>	(5608)
Phytoplankton Community Structures and Their Relationship with Environmental Factors in Rivers Supplied with Different Water Sources	HOU Ying, LI Xin, BAI Ling, <i>et al.</i>	(5616)
Adsorption of Typical Quinolone Antibiotics by Manganese Oxide-Modified Biochar Substrate and Its Application in CWs	GAO Hui-zi, TIAN Wei-jun, ZHANG Zi-yu, <i>et al.</i>	(5627)
Effect of KOH Activation on the Properties of Biochar and Its Adsorption Behavior on Tetracycline Removal from an Aqueous Solution	XU Jin, MA Yi-fan, YAO Guo-qing, <i>et al.</i>	(5635)
Preparation of Modified Attapulgite-supported Iron Sulfide and Its Adsorption Mechanism for Mo(VI)	LIAN Jian-jun, WU Hong-yan, YE Tian-ran, <i>et al.</i>	(5647)
Removal of Cr(VI) from Water Using Green Synthesis Nanoscale Zero-Valent Iron Supported on <i>Eucalyptus</i> Biochar	LIU Qin-wen, DING Ai-zhong, LIANG Xin, <i>et al.</i>	(5657)
Removal of Pb(II) and Zn(II) from Wastewater via Magnesium-Modified Diatomite Product Recovering Nitrogen and Phosphorus	WU Ying-qiu, XIA Peng, LI Yuan, <i>et al.</i>	(5667)
Adsorption of Methylene Blue on Sodium-Modified Bentonite from Southern Part of Henan	CHENG Fei-peng, YANG Dong-liang, CHANG Le, <i>et al.</i>	(5676)
Compound Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soil and Groundwater of Typical Industrial Lands in Shanghai	LI Xiao-man, LI Qing-qing, YANG Jie, <i>et al.</i>	(5687)
Pollution Evaluation and Quantitative Traceability Analysis of Heavy Metals in Farmland Soils Around the Gangue Heap of a Coal Mine in Chongqing	MA Jie, LIU Ping, LIU Jin-zhao, <i>et al.</i>	(5698)
Species Distribution and Source Analysis of Heavy Metals in Surrounding Soil Around Typical Petroleum Sites	GONG Jian, HE Lian-sheng, LI Qiang, <i>et al.</i>	(5710)
Source Analysis of Heavy Metals in Farmland Soil Around a Waste Incineration Plant Based on PMF Model	ZHANG Tian-yu, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i>	(5718)
Ecological and Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of Xianghe County	CHEN Yu-jia, QU Xing-chen, ZHANG Bin, <i>et al.</i>	(5728)
Comparison of the Concentrations, Sources, and Distributions of Heavy Metals in Topsoils of the Junction Zone of Geological Tectonic Units: A Case Study in Chengkou County, China	LIU Yong-lin, WU Mei, LIU Rui, <i>et al.</i>	(5742)
Occurrence, Source Analysis, and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Plants and Soils from Typical Areas of Xinjiang, China	YANG Bei-chen, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i>	(5751)
Effects of Strengthening <i>Pennisetum purpureum</i> Schumacher with Fertilizer Application Strategy on Remediation of Severely Cadmium-polluted Farmland	WU Gang-fan, ZHOU Hang, TANG Qi, <i>et al.</i>	(5761)
Tobacco Stem Biochar and Phosphate Application Decrease Wheat Grain Cadmium Accumulation in Alkaline Soils	YANG Yan-zheng, ZHANG Yin-ge, LI Chang, <i>et al.</i>	(5769)
Polyamine-producing Bacteria Improve Cd Resistance and Reduce Uptake of Cd in Wheat	JI Ming-fei, WU Xue-jiao, LI Xiao-zhe, <i>et al.</i>	(5778)
Effect and Mechanism of Sulfate-Reducing Bacteria on the Passivation of Heavy Metals in Alkaline and Acidic Agricultural Soils	GAO Yu, LIU Yu-chen, GUO Xiao-fang, <i>et al.</i>	(5789)
Effects of <i>Bacillus megaterium</i> on Soil Physicochemical Properties and Its Effects on the Accumulation of Cd and Zn in Plant	WANG Ping, LI Yi-man, WANG Xue-jia, <i>et al.</i>	(5798)
Soil Fungal Community Structure and Function Diversity of Different Land Use Types in the Waterfront Area Along the Jialing River	ZHU Lan-ping, XU Fei, WANG Jia-ying, <i>et al.</i>	(5808)
Effect of Biochar Application on Biological Nitrogen Fixation in Double Cropping Paddy Field in Northern Hainan	ZHAO Yan, YUAN Xin-sheng, TANG Rui-jie, <i>et al.</i>	(5819)
Photodegradation Behaviors and Toxicity Characteristics of Trimethoprim into Different Environmental Media with the Presence of g-C ₃ N ₄	ZHU Na, WANG Xing-yang, JIAO Jun-heng, <i>et al.</i>	(5832)
Analysis of Provincial CO ₂ Emission Accounting in China Under the Carbon Peaking and Carbon Neutrality Goals	YANG Bai, QIN Guang-peng, WU Qin	(5840)
Temporal and Spatial Differences in Carbon Conduction and Prediction Effect of Land Type Transfer in Chang-Zhu-Tan Urban Agglomeration	YANG Xu, LIU Xian-zhao	(5850)
Environmental Benefit Analysis of Municipal Solid Waste Typical Disposal Scenarios in Zhangjiagang City Based on Classification	ZHANG Tao, ZHENG Jun-wen, SUN Yu-can, <i>et al.</i>	(5861)