

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, 王洪太 (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, 吴锴彬, 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, 陈云嫩, 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, 郭露, 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	闫文豪, 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)

杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征

林旭, 严仁嫦*, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平

(浙江省杭州生态环境监测中心, 杭州 310007)

摘要: 2019年12月1日至2020年3月31日新型冠状病毒肺炎(COVID-19)期间,采用 Syntech Spectras GC955 在线气相色谱仪对杭州市大气环境中挥发性有机物(VOCs)进行了在线连续监测,分析了 VOCs 的组成特征、日变化规律和大气化学反应活性。结果表明,不同站点疫情前 φ (总 VOCs) 均最高,一级响应期间均最低;夜间 φ (总 VOCs) 普遍高于白天,卧龙桥 φ (总 VOCs) 日变化幅度小于下沙,一级响应期间 φ (总 VOCs) 日变化幅度小于其他3个时期;下沙 φ (总 VOCs) 日变化呈现“V”字型特征,而卧龙桥则呈现出典型的双峰结构;下沙 OFP 高于卧龙桥,2个站点疫情前 OFP 均最高,下沙一级响应期间 OFP 最低,卧龙桥二级响应期间 OFP 最低。下沙芳香烃和烯烃的 OFP 较高,炔烃 OFP 最低;卧龙桥烯烃 OFP 远高于其他3个组分,烷烃次之,炔烃 OFP 最低。

关键词: 新型冠状病毒肺炎(COVID-19); 挥发性有机物(VOCs); 日变化; 化学反应活性; 臭氧生成潜势(OFP)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0123-09 DOI: 10.13227/j. hjkx. 202103202

Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period

LIN Xu, YAN Ren-chang*, JIN Jia-jia, XU Kai-er, HE Xi, YE Hui, HE Ji-ping

(Hangzhou Ecological Environment Monitoring Center, Hangzhou 310007, China)

Abstract: A continuous observation campaign was carried out with the Syntech Spectras GC955 volatile organics online monitoring system from December 1, 2019 to March 31, 2020 during the COVID-19 period in Hangzhou. Composition characteristics, diurnal variation, and atmospheric chemical reactivity of VOCs were analyzed. The results showed that φ (total VOCs) were the highest before the COVID-19 pandemic in different sites and the lowest during the first response period. The φ (total VOCs) at night was higher than that during the day. The daily variation in Wolongqiao φ (total VOCs) was less than that in Xiasha. The daily variation in φ (total VOCs) during the first level response period was less than that during the other three periods. The diurnal variation in the φ (total VOCs) in Xiasha showed a "V" shape, and that in Wolongqiao showed a typical bimodal structure. The OFP in Xiasha was higher than that in Wolongqiao. The OFP were the highest at the two sites before the COVID-19 pandemic. The OFP was the lowest during the first response period in Xiasha and the lowest during the second response period in Wolongqiao. The OFP of aromatics and olefins was higher, and the OFP of alkynes was the lowest in Xiasha. The OFP of olefin in Wolongqiao was much higher than that of the other three components, followed by alkane and alkyne.

Key words: COVID-19; volatile organic compounds (VOCs); daily variation; chemical reactivity; ozone formation potential(OFP)

作为世界上发展最快的经济体之一,中国城市化正在迅速发展,自洛杉矶光化学烟雾事件发生以来,城市光化学问题一直备受关注。近几年,中国各大城市已进入到大气环境复合污染时期^[1,2],以臭氧(ozone, O_3)和二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)为代表的大气环境二次污染频繁发生,已成为制约城市环境空气质量进一步改善的重要因素之一^[3,4]。挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)是大气中的一类痕量气体,也是 O_3 和 SOA 的重要前体物,降低 VOCs 的排放对于协同控制 O_3 和 $PM_{2.5}$ 污染具有至关重要的作用。然而大气环境中的 VOCs 种类繁多,来源千差万别,其来源主要分为天然源和人为源两大类,城市中 VOCs 主要的人为来源有:机动车排放、燃料燃烧、工业排放和溶剂使用等^[5,6]。因此对 VOCs 变化特征及光化学反应活性和来源等相关研究是制定光化学污染防控策略的重要基础。

近年来,已有不少研究报道了京津冀^[7~12]、

长三角^[13~17]、成渝地区^[18,19]和珠三角^[20~22]等地的 VOCs 污染特征、化学活性和来源等。环境空气中 VOCs 浓度与人类生产生活产生的排放密切相关,在实施污染物防控时,应首先明确不同排放源的贡献。目前国内已经有不少学者针对一些人类排放特殊时期如春节等重大活动时期的环境空气中 VOCs 进行了研究。吴方堃等^[23]对北京奥运会期间 VOCs 浓度的变化、臭氧产生潜势和来源进行了分析,结果表明汽车尾气和溶剂挥发是 VOCs 两大来源,北京地区对大气中 O_3 产生潜力最大的是芳香烃类化合物占 47%,其次是烯烃占 40%,烷烃最低占 13%;Li 等^[11]研究了北京春节期间 VOCs 浓度的变化情况,显示春节期间 VOCs 浓度下降了约 60%,并指出春节期间烟花爆竹是乙腈、

收稿日期: 2021-03-24; 修订日期: 2021-06-23

基金项目: 2019 年杭州市科技计划引导项目(20191231Y059); 杭州市农业与社会发展科研项目(20201203B126)

作者简介: 林旭(1989~),女,硕士研究生,工程师,主要研究方向为大气化学与大气环境, E-mail: 1057674326@qq.com

* 通信作者, E-mail: 331028669@qq.com

芳香烃、OVOCs(乙醛、丙酮、乙酸、甲醇)、CO、SO₂ 和NO_x 的重要来源,强调了控制烟花爆竹燃放的重要性。王红丽等^[24]研究了上海市城区春节和“五一”节期间大气挥发性有机物的组成特征,结果显示“五一”节观测期间 VOCs 平均小时浓度比春节期间高 11.9%;赵金帅等^[25]对郑州市少数民族运动会期间 O₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估进行了分析,结果表明运动会保障期间 φ (PAMS) 为 26.21×10^{-9} , OFP 仅为 $222.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,二者均低于历史同期水平;张璘等^[26]分析了 G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源,结果显示,在强化管控期间, NMHCs、氯代烃和乙腈等一次排放污染物显著下降,工业排放占比显著减少、植物源占比升高和机动车尾气排放占比变化幅度较小,且与机动车尾气排放较为密切的 NO₂ 降幅(9.3%) 低于与工业排放有关的 SO₂ 降幅(36.1%)。

以上重大活动期间,本地污染物减排力度较强,但周边区域的影响仍然存在,而本次新型冠状病毒肺炎(COVID-19)发生(2019年12月)以来,截至2020年1月25日,中国有30个省区市启动突发公共卫生事件一级响应,各种聚集性活动都受到了限制,全国范围内因人为活动产生的大气污染物都得到了较大程度地减少,因此也为评估人为来源对城市群空气质量的影响提供了一个有利的机会。地处经济发达长三角地区的杭州是中国经济活动总量最大、工业门类最全、能源消耗强度最大和污染物排放密度最高的城市之一。近年来,杭州经济不断发展,城市地位不断提升,同时以 O₃ 为代表的城市光化学污染问题也日益突出,本研究基于 Syntech Spectras GC955 在线气相色谱仪对杭州市 2019 年 12 月 1 日至 2020 年 3 月 31 日环境空气中 VOCs 进行了连续在线监测,详细分析了 COVID-19 前后杭州市不同功能区 VOCs 的组成特征、日变化规律和大气化学反应活性变化特征,以期相关部门的环境管理决策提供一定的技术支持。

1 材料与方法

1.1 观测地点与时间

观测地点位于杭州市卧龙桥站点(30°14'N, 120°07'E)和下沙站点(30°18'N, 120°20'E),两者均为空气质量国控监测点位。卧龙桥站点位于西湖风景名胜区内,四周植被丰富,没有明显的污染源,下沙站点位于城区东面高教园内,周边有高架路和绕城高速,观测点北面有造纸企业,西面有加油站,西南方向分布着香精香料、橡胶和纺织印染等工业企

业。采样时间为 2019 年 12 月 1 日至 2020 年 3 月 31 日,为了便于分析疫情前后 φ (VOCs) 的变化特征,将采样期分为 4 个阶段:疫情前(2019 年 12 月 1 日至 2020 年 1 月 22 日)、一级响应期(2020 年 1 月 23 日至 2020 年 3 月 1 日)、二级响应期(2020 年 3 月 2 ~ 22 日)和三级响应期(2020 年 3 月 23 ~ 31 日)。

1.2 仪器与分析方法

本研究采用荷兰 SYNSPEC 公司生产的 Syntech Spectras GC955 在线气相色谱仪对杭州大气环境中的 VOCs 进行在线监测。仪器主要由自动采样系统、进样系统、校准系统、FID(火焰离子化检测器)/PID(光离子化检测器)和工作站等组成,色谱仪分为低碳分析仪(C2 ~ C5)和高碳分析仪(C6 ~ C12)2 台,时间分辨率均为 1 h。C2 ~ C5 的低沸点物种采用低碳分析仪监测,内置低温富集管,检测器为 PID 和 FID 双检测器。C6 ~ C12 的高沸点物种采用高碳分析仪监测,内置常温富集管,检测器为 PID。

检测分析步骤主要包括气体采集、预浓缩、脱附和分离及检测。气体样品经采样管进入预浓缩管,被富集后预浓缩管快速升温,在很短时间内脱附,用载气吹扫进入分离柱,分离柱根据不同 VOCs 组分的保留时间将物质分离,分离后的组分依次到达检测器,转换成易于测量的电信号,最终输出色谱图和基于标准曲线定量的浓度。为保证数据的可靠性,每月检查校准保留时间漂移和峰面积响应,每月检查正戊烷、甲苯、环戊烷和 1,3,5-三甲苯这 4 种物种,当月各次通标样品与前一月最后一次通标定量标准样品保留时间的差异需在 $\pm 5\%$ 及 1 min 以内,确认无漂移;同一浓度的标准气体,当月各次通标样品的峰面积与第一笔峰面积值相比,以及当月第一笔标准样品峰面积与前一个月最后一笔峰面积的相对误差应小于 $\pm 20\%$ 。每季度利用至少 5 点不同体积分数的标准气体开展对仪器的线性化测试,线性相关系数 $R \geq 0.99$ 。采样期间,数据采集有效率均在 90% 以上。

1.3 大气 VOCs 化学反应活性研究方法

臭氧生成潜势(ozone formation potentials, OFP)可用来表征环境大气中 VOCs 的化学反应活性(VOCs reactivity)。OFP 的计算公式为:

$$\text{OFP} = [\text{VOC}]_i \times \text{MIR} \quad (1)$$

式中, OFP 为某 VOC 物种 i 的臭氧生成潜势($\times 10^{-9}$), $[\text{VOC}]_i$ 为实际观测到的某种 VOC 的体积分数($\times 10^{-9}$), MIR 为某 VOC 物种的最大增量反应活性,各物种 MIR 值取自文献[27],详见表 1。

表 1 杭州市 VOCs 物种 MIR 和 COVID-19 不同时期 VOCs 平均小时体积分数 $\times 10^{-9}$ Table 1 MIR and hourly average mixing ratio of VOCs species in different periods of COVID-19 in Hangzhou $\times 10^{-9}$

组分	物种名称	MIR	下沙				卧龙桥			
			疫情前	一级响应	二级响应	三级响应	疫情前	一级响应	二级响应	三级响应
烷烃	乙烷	0.25	4.94	4.54	3.80	2.90	5.19	4.18	3.02	8.41
	丙烷	0.48	4.34	2.50	3.31	3.02	5.19	2.70	2.71	2.95
	异丁烷	1.21	1.22	0.59	1.12	1.08	1.73	0.65	0.77	0.69
	正丁烷	1.02	1.53	0.69	1.22	1.15	1.99	0.87	0.88	0.88
	环戊烷	2.40	0.13	0.05	0.06	0.05	0.12	0.12	0.13	0.12
	异戊烷	1.38	0.78	0.31	0.70	0.76	0.92	0.43	0.61	0.87
	正戊烷	1.04	0.77	0.25	0.44	0.60	0.54	0.23	0.32	0.45
	甲基环戊烷	2.80	0.16	0.19	0.19	0.19	0.18	0.21	0.21	0.21
	2,3-二甲基丁烷	1.07	1.01	0.08	0.09	0.09	0.36	0.50	0.50	0.50
	2-甲基戊烷	1.50	0.84	0.15	0.25	0.31	0.20	0.15	0.49	0.36
	2,4-二甲基戊烷	1.50	0.22	0.06	0.07	0.06	0.13	0.06	0.06	0.06
	2,2-二甲基丁烷	0.82	0.24	0.43	0.43	0.43	0.29	0.40	0.42	0.40
	3-甲基戊烷	1.50	0.65	0.13	0.28	0.32	0.16	0.05	0.06	0.09
	正己烷	0.98	0.94	0.23	0.66	0.57	0.36	0.14	0.46	0.57
	环己烷	1.28	0.28	0.14	0.20	0.19	0.36	0.19	0.34	0.35
	2-甲基己烷	1.08	0.18	0.07	0.11	0.10	0.15	0.05	0.08	0.05
	3-甲基己烷	1.40	0.10	0.08	0.08	0.08	0.16	0.06	0.14	0.23
	2,3-二甲基戊烷	1.31	0.22	0.08	0.12	0.11	0.23	0.07	0.08	0.09
	2,2,4-三甲基戊烷	0.93	0.26	0.08	0.18	0.15	0.17	0.08	0.12	0.13
	正庚烷	0.81	0.29	0.08	0.15	0.12	0.15	0.05	0.05	0.05
	甲基环己烷	1.80	0.05	0.07	0.07	0.07	1.43	0.32	1.33	1.66
	2,3,4-三甲基戊烷	1.60	0.15	0.08	0.11	0.11	0.16	0.05	0.07	0.08
	2-甲基庚烷	0.96	0.05	0.05	0.05	0.05	0.10	0.05	0.06	0.06
	3-甲基庚烷	0.99	0.07	0.05	0.06	0.06	0.20	0.08	0.19	0.21
	正辛烷	0.60	0.24	0.10	0.12	0.15	0.24	0.07	0.23	0.35
	正壬烷	0.54	0.08	0.08	0.08	0.08	0.20	0.20	0.20	0.20
	正癸烷	0.46	0.08	0.08	0.09	0.09	0.16	0.05	0.05	0.05
	十一烷	0.42	0.11	0.18	0.18	0.18	0.12	0.09	0.09	0.10
	十二烷	0.38	0.11	0.19	0.19	0.20	0.18	0.11	0.11	0.11
烯烃	乙烯	7.40	3.09	1.75	2.25	2.23	2.59	1.15	0.49	1.03
	丙烯	9.40	0.56	0.35	0.55	0.54	0.61	0.23	0.37	0.45
	反-2-丁烯	10.0	0.18	0.08	0.09	0.10	0.09	0.06	0.07	0.07
	1-丁烯	8.90	0.15	0.06	0.09	0.06	0.08	0.05	0.06	0.06
	顺-2-丁烯	10.0	0.14	0.05	0.05	0.05	0.08	0.06	0.06	0.06
	反-2-戊烯	8.80	0.10	0.16	0.16	0.16	0.17	0.11	0.11	0.11
	1-戊烯	6.20	0.07	0.02	0.02	0.02	0.20	0.13	0.13	0.14
	顺-2-戊烯	8.80	0.06	0.04	0.04	0.04	0.15	0.10	0.10	0.10
	异戊二烯	9.10	0.10	0.17	0.17	0.16	0.22	0.25	0.25	0.24
	1-己烯	4.40	0.09	0.09	0.09	0.09	0.18	0.34	0.34	0.34
炔烃	乙炔	0.50	1.26	0.85	1.64	1.28	0.75	0.92	0.89	0.90
芳香烃	苯	0.42	1.19	0.86	0.76	0.56	0.68	0.26	0.81	0.63
	甲苯	2.70	3.52	0.72	2.32	2.69	0.22	0.06	0.06	0.06
	乙基苯	2.70	0.62	0.10	0.25	0.30	0.59	0.16	0.53	0.84
	间/对-二甲苯	7.40	1.68	0.27	0.67	0.86	0.10	0.08	0.08	0.08
	苯乙烯	2.20	0.17	0.15	0.15	0.15	0.18	0.16	0.17	0.25
	邻-二甲苯	6.50	0.58	0.18	0.22	0.26	0.08	0.04	0.04	0.04
	异丙苯	2.20	0.06	0.08	0.07	0.07	0.17	0.08	0.08	0.07
	正丙苯	2.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.16	0.07	0.07	0.07
	间/对-乙基甲苯	—	0.11	0.21	0.20	0.20	0.20	0.10	0.10	0.10
	1,3,5-三甲基苯	10.1	0.04	0.04	0.04	0.04	0.17	0.07	0.07	0.07
	邻-乙基甲苯	—	0.08	0.11	0.11	0.11	0.10	0.05	0.05	0.04
	1,2,4-三甲基苯	8.80	0.10	0.14	0.13	0.14	0.11	0.08	0.07	0.07
	1,2,3-三甲基苯	8.90	0.09	0.16	0.16	0.16	0.11	0.11	0.10	0.11
	间/对-二乙基甲苯	—	0.30	0.49	0.49	0.48	0.17	0.11	0.11	0.11
烷烃			20.03	11.61	14.41	13.26	21.38	12.21	13.79	20.27
烯烃			4.55	2.75	3.50	3.44	4.37	2.48	1.97	2.61
炔烃			1.26	0.85	1.64	1.28	0.75	0.92	0.89	0.90
芳香烃			8.65	3.59	5.68	6.14	3.06	1.40	2.34	2.54
总 VOCs			34.49	18.80	25.23	24.12	29.55	17.01	19.00	26.32

2 结果与讨论

2.1 COVID-19 不同时期 VOCs 体积分数组成变化特征

观测期间共检测出 54 种 VOCs, 包括 29 种烷烃、14 种芳香烃、10 种烯烃和 1 种炔烃(乙炔), 表 1 和图 1 给出了不同时期 VOCs 各组分及具体物质的体积分数. 不同站点疫情前 φ (总 VOCs) 均最高, 一级响应期间均最低, 下沙疫情前 φ (总 VOCs) 为 34.49×10^{-9} , 比一级响应期间高 83.5% [一级响应 φ (总 VOCs) 为 18.8×10^{-9}], 卧龙桥疫情前 φ (总 VOCs) 为 29.55×10^{-9} , 比一级响应期间高 73.7% [一级响应 φ (总 VOCs) 为 17.01×10^{-9}], 表明 COVID-19 一级响应期间 VOCs 排放强度显著降低. 疫情前、一级响应和二级响应期间下沙 φ (总 VOCs) 分别较卧龙桥高 16.7%、10.5% 和 32.8%, 而三级响应期间则低于卧龙桥. 下沙站点疫情前 φ (总 VOCs) 要远高于其他 3 个时期, 而卧龙桥虽然疫情前 φ (总 VOCs) 也最高, 但其三级响应期间 φ (总 VOCs) 已经上升到接近疫情前水平且已经高于同期下沙水平, 这可能与两个站点周边的能源结构和环境有关, 卧龙桥位于西湖景区内, 周边没有工业污染源, 只有景区内部道路, 而下沙周边工业企业较多, 可能三级响应期间工业企业的复工复产率和疫情前相比还有较大差距. 由此可见工业排放是

VOCs 的重要来源之一, 工业企业 VOCs 的治理可以很大程度上削减城市尤其是工业区附近大气中的 VOCs.

就 VOCs 不同组分而言, 下沙站点 φ (烷烃) 和 φ (烯烃) 呈现: 疫情前 > 二级响应 > 三级响应 > 一级响应; φ (芳香烃) 呈现: 疫情前 > 三级响应 > 二级响应 > 一级响应; φ (炔烃) 呈现: 二级响应 > 三级响应 > 疫情前 > 一级响应; 卧龙桥站点 φ (烷烃) 和 φ (芳香烃) 呈现: 疫情前 > 三级响应 > 二级响应 > 一级响应; φ (烯烃) 呈现: 疫情前 > 三级响应 > 一级响应 > 二级响应; φ (炔烃) 呈现: 一级响应 > 三级响应 > 二级响应 > 疫情前. 值得注意的是疫情前后卧龙桥的 φ (炔烃) 变化规律与其他组分截然不同, 其 φ (炔烃) 总体比较稳定, 变化不大, 这可能与该站点周边环境有关. 有研究表明乙炔是燃烧产生的代表性物种, 城市空气中的乙炔主要来自于机动车尾气的排放^[28], 而卧龙桥站点位于西湖景区内, 周边没有主干道及相关污染源, 因而疫情管控措施对其影响较小.

就 VOCs 物种的体积分数而言, 下沙疫情前后体积分数排名前 5 的物种分别为: 乙烷 (4.94×10^{-9})、丙烷 (4.34×10^{-9})、甲苯 (3.52×10^{-9})、乙烯 (3.09×10^{-9}) 和间/对-二甲苯 (1.68×10^{-9}), 累计贡献率为 50.9% (疫情前); 乙烷 (4.54×10^{-9})、丙烷 (2.50×10^{-9})、乙烯 (1.75×10^{-9})、苯 (0.86×10^{-9}) 和乙炔 (0.85×10^{-9}), 累计贡献率为 55.9% (一级响应); 乙烷 (3.80×10^{-9})、丙烷 (3.31×10^{-9})、甲苯 (2.32×10^{-9})、乙烯 (2.25×10^{-9}) 和乙炔 (1.64×10^{-9}), 累计贡献率为 52.8% (二级响应); 丙烷 (3.02×10^{-9})、乙烷 (2.90×10^{-9})、甲苯 (2.69×10^{-9})、乙烯 (2.23×10^{-9}) 和乙炔 (1.28×10^{-9}), 累计贡献率为 50.2% (三级响应). 卧龙桥疫情前后体积分数排名前 5 的物种分别为: 乙烷 (5.19×10^{-9})、丙烷 (5.19×10^{-9})、乙烯 (2.59×10^{-9})、正丁烷 (1.99×10^{-9}) 和异丁烷 (1.73×10^{-9}), 累计贡献率为 56.5% (疫情前); 乙烷 (4.18×10^{-9})、丙烷 (2.70×10^{-9})、乙烯 (1.15×10^{-9})、乙炔 (0.92×10^{-9}) 和正丁烷 (0.87×10^{-9}), 累计贡献率为 57.7% (一级响应); 乙烷 (3.02×10^{-9})、丙烷 (2.71×10^{-9})、甲基环己烷 (1.33×10^{-9})、乙炔 (0.89×10^{-9}) 和正丁烷 (0.88×10^{-9}), 累计贡献率为 46.5% (二级响应); 乙烷 (8.41×10^{-9})、丙烷 (2.95×10^{-9})、甲基环己烷 (1.66×10^{-9})、乙烯 (1.03×10^{-9}) 和乙炔 (0.90×10^{-9}), 累计贡献率为 56.8% (三级响应). 可见, 不同功能区站点周边大气环境中 VOCs 的关键物种存

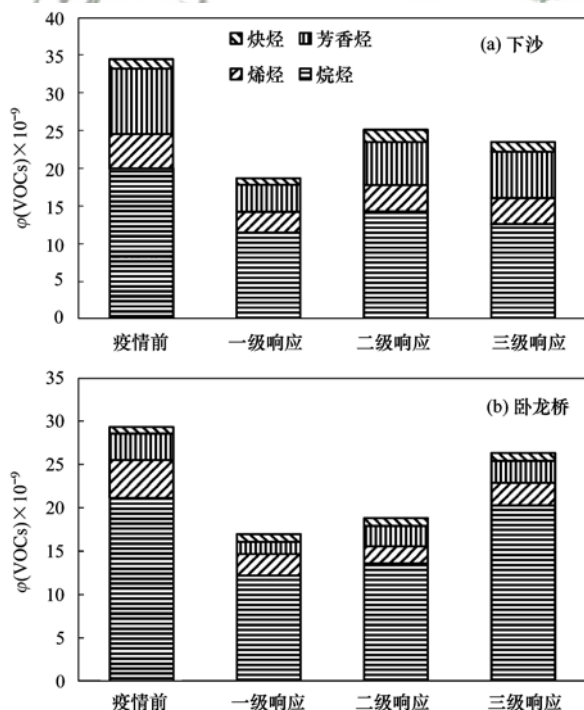


图 1 COVID-19 不同时期 VOCs 各组分体积分数

Fig. 1 Hourly average mixing ratio of VOCs components in different periods of COVID-19

在差异,下沙为 C2 ~ C3 的烷烃、乙烯、乙炔和苯系物;而卧龙桥为 C2 ~ C7 的烷烃、乙烯和乙炔.表明处于工业区的下沙站点,其环境中 φ (苯系物) 远高于卧龙桥.下沙疫情前后 VOCs 关键物种也存在差异,不同时期排名前 5 的 VOCs 中苯系物质量分数分别为: 29.6% (疫情前)、8.2% (一级响应)、17.4% (二级响应) 和 22.2% (三级响应),表明由于疫情期间工业生产得到了很大限制,苯系物排放量大大降低,有研究显示苯系物主要来自溶剂涂料行业^[19],因而溶剂涂料行业的治理可以有效地降低 φ (苯系物),从而大大降低下沙周边环境 φ (VOCs).

2.2 COVID-19 不同时期 VOCs 体积分数日变化特征

图 2 给出了不同站点不同时期 φ (VOCs) 日变

化曲线.可以看出,整体而言夜间 φ (总 VOCs) 普遍高于白天,卧龙桥站点 φ (总 VOCs) 日变化幅度小于下沙站点,一级响应期间 φ (总 VOCs) 日变化幅度小于其他 3 个时期.下沙疫情前夜间(20:00 ~ 06:00) 平均 φ (总 VOCs) 为 37.67×10^{-9} ,白天(07:00 ~ 19:00) 平均为 31.67×10^{-9} ;一级响应期间夜间平均 φ (总 VOCs) 为 19.51×10^{-9} ,白天平均为 17.93×10^{-9} ;二级响应期间夜间平均 φ (总 VOCs) 为 27.47×10^{-9} ,白天平均为 23.12×10^{-9} ;三级响应期间夜间平均 φ (总 VOCs) 为 24.77×10^{-9} ,白天平均为 22.35×10^{-9} .卧龙桥疫情前夜间平均 φ (总 VOCs) 为 30.39×10^{-9} ,白天平均为 28.35×10^{-9} ;一级响应期间夜间平均 φ (总 VOCs) 为 $17.61 \times$

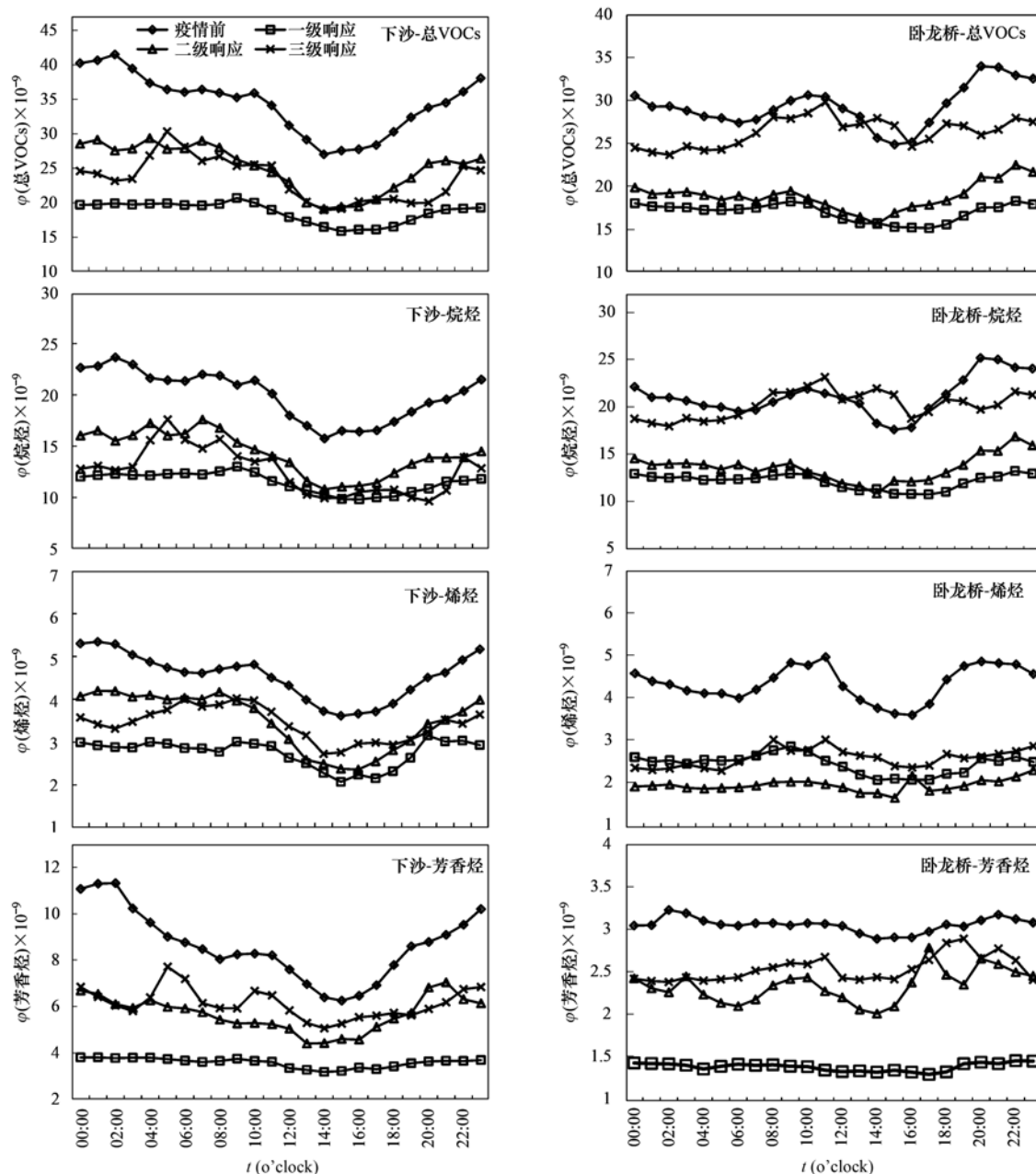


图 2 COVID-19 不同时期 φ (VOCs) 日变化

Fig. 2 Diurnal variations of φ (VOCs) in different periods of COVID-19

10^{-9} , 白天平均为 16.43×10^{-9} ; 二级响应期间夜间平均 φ (总 VOCs) 为 19.97×10^{-9} , 白天平均为 17.83×10^{-9} ; 三级响应期间夜间平均 φ (总 VOCs) 为 25.28×10^{-9} , 白天平均为 27.20×10^{-9} . 下沙 φ (总 VOCs) 日变化幅度分别为: 14.47×10^{-9} (疫情前)、 4.82×10^{-9} (一级响应)、 10.24×10^{-9} (二级响应) 和 11.38×10^{-9} (三级响应); 卧龙桥 φ (总 VOCs) 日变化幅度分别为: 9.09×10^{-9} (疫情前)、 3.15×10^{-9} (一级响应)、 6.86×10^{-9} (二级响应) 和 6.13×10^{-9} (三级响应).

不同时期各 VOCs 组分日变化存在显著差异. 下沙烷烃在三级响应期间日变化幅度最大 (7.97×10^{-9})、一级响应期间日变化幅度最小 (3.20×10^{-9}); 烯烃在二级响应期间日变化幅度最大 (1.84×10^{-9})、一级响应期间日变化幅度最小 (1.08×10^{-9}); 芳香烃在疫情前日变化幅度最大 (5.06×10^{-9})、一级响应期间日变化幅度最小 (0.63×10^{-9}). 卧龙桥烷烃在疫情前日变化幅度最大 (7.55×10^{-9})、一级响应期间日变化幅度最小 (2.46×10^{-9}); 烯烃在疫情前日变化幅度最大 (1.36×10^{-9})、二级响应期间日变化幅度最小 (0.65×10^{-9}); 芳香烃在二级响应期间幅度最大 (0.77×10^{-9})、一级响应期间日变化幅度最小 (0.16×10^{-9}).

其中值得注意的是疫情前下沙和卧龙桥 φ (总 VOCs) 日变化差异较大. 下沙 φ (总 VOCs) 日变化基本呈现“V”字型特征, 除了上午 10 时出现了一个“小鼓包”外, 基本上没有明显的早晚峰值出现, 且下沙夜间 φ (总 VOCs) 远高于卧龙桥; 而卧龙桥 φ (总 VOCs) 日变化则呈现出较为典型的双峰结构特征, 10:00 和 20:00 出现了 2 个高峰, 与交通早晚高峰的时间较为吻合, 表明卧龙桥站点可能受机动车排放的影响较大, 而下沙站点除了受机动车影响外, 可能还受到工业排放等其他排放源的影响, 其夜间的高浓度可能与周边的工业生产有关. 这与二者站点周边的能源和环境结构较吻合.

2.3 COVID-19 不同时期 VOCs 的光化学活性特征

下沙不同时期 OFP 分别为: 94.69×10^{-9} (疫情前)、 46.98×10^{-9} (一级响应)、 66.39×10^{-9} (二级响应) 和 68.70×10^{-9} (三级响应); 卧龙桥不同时期 OFP 分别为: 63.55×10^{-9} (疫情前)、 35.42×10^{-9} (一级响应)、 34.64×10^{-9} (二级响应) 和 43.21×10^{-9} (三级响应). 总体而言, 下沙不同时期 OFP 均远高于卧龙桥, 表明工业区下沙大气光化学反应活性更强; 两个观测点疫情前 OFP 均最高, 下沙一级响应期间 OFP 最低, 卧龙桥二级响应期间

OFP 最低 (图 3).

下沙芳香烃和烯烃的 OFP 均较高, 炔烃 OFP 最低. 下沙不同时期 VOCs 各组分的 OFP 分别呈现如下规律: 芳香烃 > 烯烃 > 烷烃 > 炔烃 (疫情前)、烯烃 > 芳香烃 > 烷烃 > 炔烃 (一级响应)、烯烃 > 芳香烃 > 烷烃 > 炔烃 (二级响应) 和 芳香烃 > 烯烃 > 烷烃 > 炔烃 (三级响应). 卧龙桥烯烃 OFP 远高于其他 3 个组分, 烷烃次之, 炔烃 OFP 最低. 卧龙桥不同时期 VOCs 各组分的 OFP 均呈现烯烃 > 烷烃 > 芳香烃 > 炔烃的特征. 可见, 下沙不同时期芳香烃 OFP 均远高于卧龙桥, 这可能与两个站点周边的能源结构和环境有关, 卧龙桥位于西湖景区内, 周边没有工业污染源, 而下沙周边工业企业较多, 对 OFP 贡献较大的芳香烃的排放量较大, 表明控制芳香烃排放量可以有效降低工业区下沙大气化学反应活性.

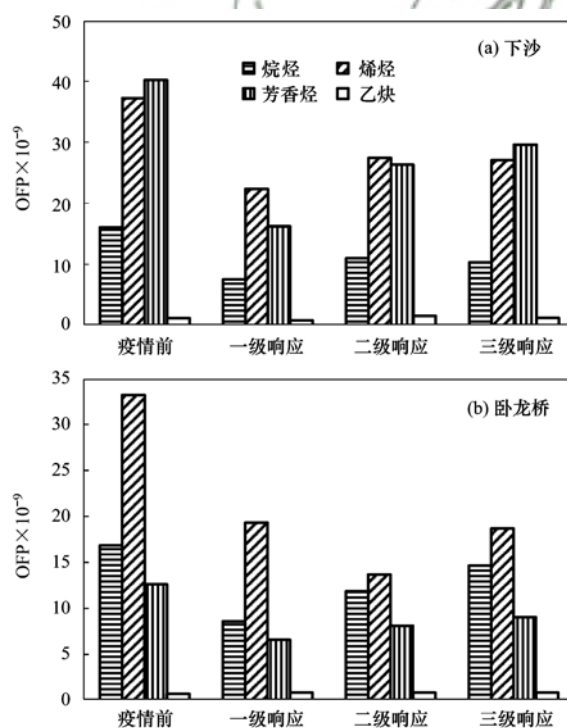


图 3 COVID-19 不同时期 OFP

Fig. 3 OFP in different periods of COVID-19

图 4 显示下沙不同时期 OFP 排名前 10 的物种分别为: 乙烯、甲苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、反-2-丁烯、顺-2-丁烯、丙烷、间/对-二乙基苯、乙苯和正丁烷, 累计贡献率为 74.9% (疫情前); 乙烯、间/对-二乙基苯、甲苯、间/对-二甲苯、1,2,3-三甲苯、异戊二烯、反-2-戊烯、邻-二甲苯、间/对-乙基甲苯和 1,2,4-三甲苯, 累计贡献率为 69.2% (一级响应); 乙烯、甲苯、间/对-二甲苯、间/对-二乙基苯、1,2,3-三甲苯、异戊二烯、邻-二甲苯、反-2-戊烯、乙炔和丙烷, 累计贡献率为 71.4% (二级响应); 乙烯、甲苯、间/对-二甲苯、间/对-二乙基苯、

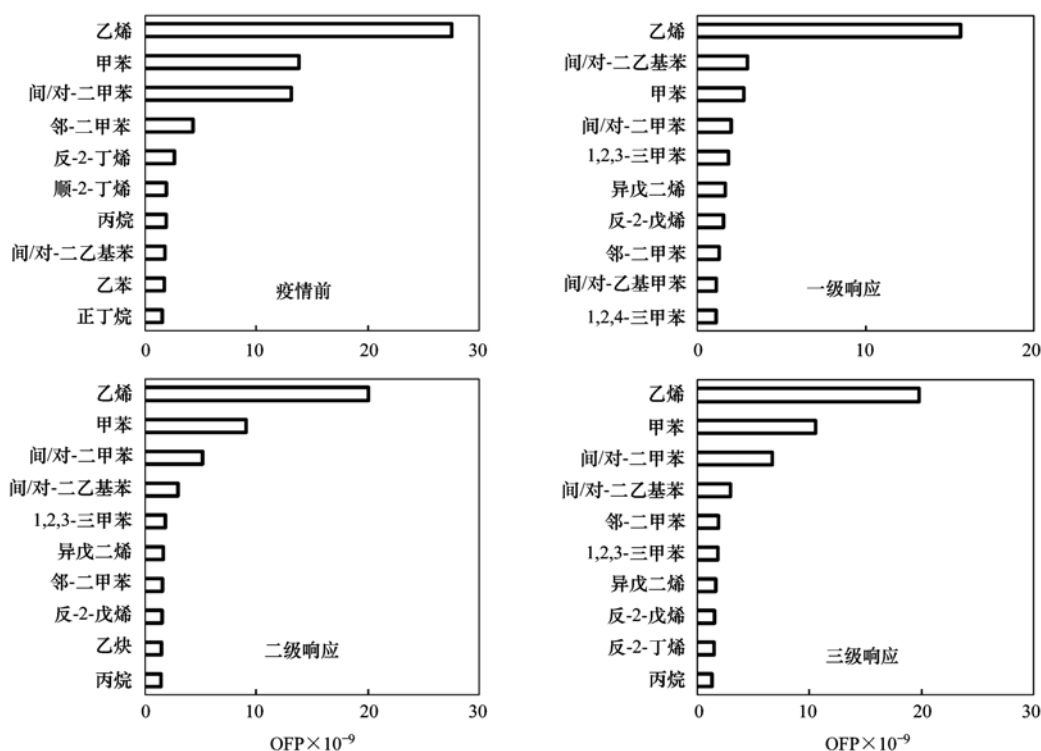


图4 下沙 COVID-19 不同时期对 OFP 贡献最大的 10 种 VOCs 物质

Fig. 4 Species of VOCs with the top ten contribution to the OFP in different periods of COVID-19 in Xiasha

邻-二甲苯、1,2,3-三甲苯、异戊二烯、反-2-戊烯、反-2-丁烯和丙烷, 累计贡献率为 73.2% (三级响应). 图 5 显示卧龙桥不同时期 OFP 排名前 10 的物种分别为: 乙烯、丙烷、1-己烯、甲苯、正丁烷、异丁烷、1,3,5-三甲苯、反-2-戊烯、间/对-二甲苯和

顺-2-戊烯, 累计贡献率为 64.6% (疫情前); 乙烯、1-己烯、甲基环戊烷、1,2,3-三甲苯、丙烷、反-2-戊烯、乙烷、顺-2-戊烯、反-2-丁烯和正丁烷, 累计贡献率为 62.9% (一级响应); 乙烯、1-己烯、甲苯、甲基环戊烷、间/对-二甲苯、1,2,3-三甲苯、丙烷、

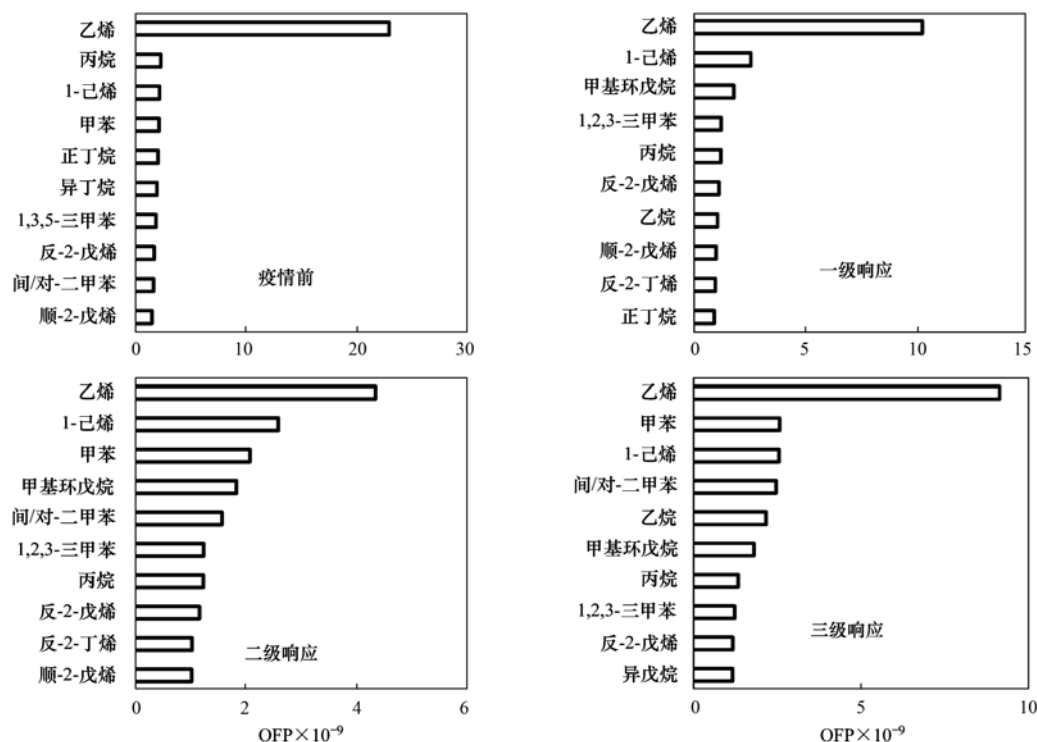


图5 卧龙桥 COVID-19 不同时期对 OFP 贡献最大的 10 种 VOCs 物质

Fig. 5 Species of VOCs with the top ten contribution to the OFP in different periods of COVID-19 in Wolongqiao

反-2-戊烯、反-2-丁烯和顺-2-戊烯,累计贡献率为 52.5% (二级响应); 乙烯、甲苯、1-己烯、间/对-二甲苯、乙烷、甲基环戊烷、丙烷、1,2,3-三甲苯、反-2-戊烯和异戊烷,累计贡献率为 59.6% (三级响应)。

下沙和卧龙桥 2 个站点对 OFP 贡献较大的物种呈现出一定的共同特征,即二者不同时期贡献最大的物种均为乙烯。同时又存在很多差异,下沙站点对 OFP 贡献较大的除了乙烯外,芳香烃中的苯系物(甲苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、间/对-二乙基苯等)贡献也较大;卧龙桥站点芳香烃对 OFP 的贡献相对较小,烷烃的贡献率相对较多,如贡献率排名前 5 的物种中烷烃分别有:2 个(疫情前)、2 个(一级响应)、1 个(二级响应)和 1 个(三级响应),而下沙站点不同时期对 OFP 贡献排名前 5 的物质中均没有烷烃。可见,控制烯烃尤其是乙烯的排放量能有效降低杭州大气环境 VOCs 的光化学活性,此外,对于工业区下沙站点,控制芳香烃尤其是苯系物的排放量能显著降低其大气光化学反应活性。

3 结论

(1) 不同站点疫情前 φ (总 VOCs) 均最高,一级响应期间均最低,下沙疫情前 φ (总 VOCs) 为 34.49×10^{-9} ,比一级响应期间高 83.5%,卧龙桥疫情前 φ (总 VOCs) 为 29.55×10^{-9} ,比一级响应期间高 73.7%。不同功能区站点周边大气环境中 VOCs 的关键物种存在差异,下沙为 C2 ~ C3 的烷烃、乙烯、乙炔和苯系物,卧龙桥为 C2 ~ C7 的烷烃、乙烯和乙炔,工业区下沙站点环境中的苯系物浓度远高于卧龙桥。

(2) φ (VOCs) 呈现明显的日变化特征。夜间 φ (总 VOCs) 普遍高于白天,卧龙桥站点 φ (总 VOCs) 日变化幅度小于下沙站点,一级响应期间 φ (总 VOCs) 日变化幅度小于其他 3 个时期。疫情前下沙和卧龙桥 φ (总 VOCs) 日变化差异较大。下沙 φ (总 VOCs) 日变化基本呈现“V”字型特征,且下沙夜间 φ (总 VOCs) 远高于卧龙桥;而卧龙桥 φ (总 VOCs) 日变化则呈现出较为典型的双峰结构特征,与交通早晚高峰的时间较为吻合,表明卧龙桥站点可能受机动车排放影响较大,而下沙站点除了受机动车影响外,可能还受到工业排放等其他排放源的影响。

(3) 下沙不同时期 OFP 均远高于卧龙桥,两个观测点疫情前 OFP 均最高,下沙一级响应期间 OFP 最低,卧龙桥二级响应期间 OFP 最低。下沙芳香烃和烯烃的 OFP 均较高,炔烃 OFP 最低。卧龙桥烯烃

OFP 远高于其他 3 个组分,烷烃次之,炔烃 OFP 最低。下沙和卧龙桥对 OFP 贡献最大的物种均为乙烯,除此之外下沙芳香烃中的苯系物(甲苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯、间/对-二乙基苯等)对 OFP 贡献也较大;卧龙桥芳香烃对 OFP 的贡献相对较小,烷烃的贡献率相对较大。可见,控制烯烃尤其是乙烯的排放量能有效降低杭州大气环境 VOCs 的光化学活性,此外,对于工业区下沙站点,控制芳香烃尤其是苯系物的排放量能显著降低其大气光化学反应活性。

参考文献:

- [1] Hofzumahaus A, Rohrer F, Lu K D, *et al.* Amplified trace gas removal in the troposphere[J]. *Science*, 2009, **324** (5935): 1702-1704.
- [2] 安俊琳,王跃思,孙扬. 气象因素对北京臭氧的影响[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(3): 944-951.
An J L, Wang Y S, Sun Y. Assessment of ozone variations and meteorological effects in Beijing[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, **18**(3): 944-951.
- [3] Song M D, Li X, Yang S D, *et al.* Spatiotemporal variation, sources, and secondary transformation potential of volatile organic compounds in Xi'an, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2021, **21**(6): 4939-4958.
- [4] Lu X, Hong J, Zhang L, *et al.* Severe surface ozone pollution in China: a global perspective[J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2018, **5**(8): 487-494.
- [5] Zheng H, Kong S F, Xing X L, *et al.* Monitoring of volatile organic compounds (VOCs) from an oil and gas station in northwest China for 1 year[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(7): 4567-4595.
- [6] Baudic A, Gros V, Sauvage S, *et al.* Seasonal variability and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the Paris megacity (France)[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(18): 11961-11989.
- [7] Wang M, Shao M, Chen W, *et al.* Validation of emission inventories by measurements of ambient volatile organic compounds in Beijing, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2013, **13**: 26933-26979.
- [8] 孙杰,王跃思,吴方堃,等. 唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化[J]. *环境科学*, 2010, **31**(7): 1438-1443.
Sun J, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Concentration and change of VOCs in summer and autumn in Tangshan[J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1438-1443.
- [9] 张博韬,安欣欣,王琴,等. 2015 年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(10): 4400-4407.
Zhang B T, An X X, Wang Q, *et al.* Temporal variation, spatial distribution, and reactivity characteristics of air VOCs in Beijing 2015[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(10): 4400-4407.
- [10] 姚青,韩素芹,张裕芬,等. 天津夏季郊区 VOCs 对臭氧生成的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(4): 1573-1581.
Yao Q, Han S Q, Zhang Y F, *et al.* Effects of VOCs on ozone formation in the Tianjin suburbs in summer[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(4): 1573-1581.
- [11] Li K, Li J L, Tong S R, *et al.* Characteristics of wintertime VOCs in suburban and urban Beijing: concentrations, emission

- ratios, and festival effects [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(12): 8021-8036.
- [12] 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.
- [13] 陈长虹, 苏雷燕, 王红丽, 等. 上海市城区 VOCs 的年变化特征及其关键活性组分[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(2): 367-376.
- Chen C H, Su L Y, Wang H L, *et al.* Variation and key reactive species of ambient VOCs in the urban area of Shanghai, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(2): 367-376.
- [14] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 424-433.
- Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 424-433.
- [15] 蔡长杰, 耿福海, 俞琼, 等. 上海中心城区夏季挥发性有机物(VOCs)的源解析[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(5): 926-934.
- Cai C J, Geng F H, YU Q, *et al.* Source apportionment of VOCs at city centre of Shanghai in summer [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(5): 926-934.
- [16] 安俊琳, 朱彬, 李用宇. 南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4504-4512.
- An J L, Zhu B, Li Y Y. Variation characteristics of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Nanjing northern suburb, China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4504-4512.
- [17] 安俊琳, 朱彬, 王红磊, 等. 南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4454-4464.
- An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the northern suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4454-4464.
- [18] 邓媛元, 李晶, 李亚琦, 等. 成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(12): 5323-5333.
- Deng Y Y, Li J, Li Y Q, *et al.* Characteristics of ambient VOCs at the Shuangliu site in Chengdu, China, during summer and autumn[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(12): 5323-5333.
- [19] 王成辉, 陈军辉, 韩丽, 等. 成都市城区大气 VOCs 季节污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(9): 3951-3960.
- Wang C H, Chen J H, Han L, *et al.* Seasonal pollution characteristics and analysis of the sources of atmospheric VOCs in Chengdu Urban Area [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(9): 3951-3960.
- [20] 邓雪娇, 王新明, 赵春生, 等. 珠江三角洲典型过程 VOCs 的平均浓度与化学反应活性[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(9): 1153-1161.
- Deng X J, Wang X M, Zhao C S, *et al.* The mean concentration and chemical reactivity of VOCs of typical processes over Pearl River Delta Region[J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(9): 1153-1161.
- [21] 王伯光, 张远航, 邵敏. 珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征[J]. *环境科学*, 2004, **25**(S1): 7-15.
- Wang B G, Zhang Y H, Shao M. Special and temporal distribution character of VOCs in the ambient air of Pearl River Delta Region [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(S1): 7-15.
- [22] 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.
- [23] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(1): 10-16.
- Wu F K, Wang Y S, An J L, *et al.* Study on concentration, ozone production potential and sources of VOCs in the atmosphere of Beijing during olympics period [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(1): 10-16.
- [24] 王红丽, 陈长虹, 黄成, 等. 上海市城区春节和“五一”节期间大气挥发性有机物的组成特征[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(9): 1749-1757.
- Wang H L, Chen C H, Huang C, *et al.* Characterization of volatile organic compounds (VOCs) around the Chinese Spring Festival and International Labour Day in the urban area of Shanghai, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(9): 1749-1757.
- [25] 赵金帅, 于世杰, 王楠, 等. 郑州市少数民族运动会期间 O₃ 及 VOCs 污染特征的演变和评估[J]. *环境科学*, 2020, **41**(10): 4436-4445.
- Zhao J S, Yu S J, Wang N, *et al.* Evolution and evaluation of O₃ and VOCs in Zhengzhou during the national traditional games of ethnic minorities period [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(10): 4436-4445.
- [26] 张璘, 张祥志, 秦玮, 等. G20 峰会期间宜兴市大气 VOCs 特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(7): 2718-2727.
- Zhang L, Zhang X Z, Qin W, *et al.* VOCs characteristics and sources apportionment in Yixing City during the G20 summit [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(7): 2718-2727.
- [27] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [28] Guo H, Lee S C, Louie P P K, *et al.* Characterization of hydrocarbons, halocarbons and carbonyls in the atmosphere of Hong Kong [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(10): 1363-1372.

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 Macroenthos 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	LÜ 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)