

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第12期

Vol.39 No.12

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

中国燃煤电厂大气污染物排放的健康影响特征	秦雨, 张强, 李鑫, 赵红艳, 同丹, 郑逸璇, 耿冠楠, 贺克斌 (5289)
基于 LUR 模型的中国 PM _{2.5} 时空变化分析	刘炳杰, 彭晓敏, 李继红 (5296)
长三角淳安地区二次颗粒物污染形成机制	黄丹丹, 周敏, 余传冠, 朱书慧, 王裕成, 乔利平, 楼晟荣, 陶士康, 杨强, 李莉 (5308)
春季沙尘过程北京市不同粒径大气气溶胶污染特征及来源分析	杨阳, 李杏茹, 陈曦, 刘水桥, 刘雨思, 徐静, 王莉莉, 陶明辉, 王格慧 (5315)
成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征	邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东 (5323)
佛山市典型铝型材行业表面涂装 VOCs 排放组成	李霞, 苏伟健, 黎碧霞, 龙森, 黎丽莉, 张洲, 于跃刚, 王云鹏, 王新明 (5334)
四川省人为源大气污染物排放清单及特征	周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 杨欣悦, 周小玲 (5344)
炼焦工序颗粒物排放特征	王彦辉, 赵亮, 孙文强, 叶竹, 蔡九菊 (5359)
小流域大气氮干湿沉降特征	王焕晓, 庞树江, 王晓燕, 樊彦波 (5365)
流域氮素主要输出途径及变化特征	李文超, 雷秋良, 翟丽梅, 刘宏斌, 胡万里, 刘申, 任天志 (5375)
生物炭配施缓控释肥对稻田田面水氮素动态变化及径流流失的影响	斯林林, 周静杰, 吴良欢, 胡兆平 (5383)
长江上游农业源溪流雨季中 N ₂ O 间接排放特征	田琳琳, 王正, 朱波 (5391)
不同氮污染特征河流 N ₂ O 浓度、释放通量与排放系数	王森, 李亚峰, 雷坤, 杨丽标 (5400)
多种同位素手段的硝酸盐污染源解析: 以会仙湿地为例	彭聪, 潘晓东, 焦友军, 任坤, 曾洁 (5410)
典型岩溶槽谷区土壤水 δD 和 δ ¹⁸ O 时空分布特征: 以重庆市中梁山岩溶槽谷为例	吴韦, 蒋勇军, 贾亚男, 彭学义, 段世辉, 刘九缠, 王正雄 (5418)
沁河冲洪积扇地下水水化学特征及成因分析	刘江涛, 蔡五田, 曹月婷, 蔡月梅, 边超, 吕永高, 陈远铭 (5428)
2017 年最大降水对再生水受水河道径流组成的影响	廖安然, 宋献方, 张应华, 杨丽虎, 卜红梅, 马英, 韩冬梅, 秦文婧, 杨胜天 (5440)
周村水库主库区水体热分层形成过程中沉积物间隙水 DOM 的光谱演变特征	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 李再兴, 罗晓 (5451)
三峡库区沉积物中镍污染特征评价	张伟杰, 殷淑华, 徐东昱, 高丽, 高博 (5464)
四面山大洪湖底泥/水界面汞的迁移转化规律	郭攀, 孙涛, 杨光, 马明 (5473)
大兴安岭南麓河湿地类型对土壤中甲基汞分布的影响	周心劝, 刘玉荣, 李晶, 周志峰 (5480)
模拟三峡库区消落带土壤有机磷酸酯类水释放特征	杨婷, 何明靖, 杨志豪, 魏世强 (5487)
典型旅游城市河流水体及污水厂出水中全氟烷基酸类化合物的空间分布及其前体物的转化	王世亮, 孙建树, 杨月伟, 张敏 (5494)
4 种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析	江肖良, 李孟, 张少辉, 张世羊 (5503)
微量元素锰对威氏海链藻生长及叶绿素荧光的影响	王木兰, 姜玥璐 (5514)
广东省水库拟柱胞藻 (<i>Cylindropermopsis raciborskii</i>) 的分布特征及影响因子分析	雷敏婷, 彭亮, 韩博平, 雷腊梅 (5523)
磁性壳聚糖接枝聚丙烯酰胺去除水体中腐殖酸	尤雯, 刘海成, 曹家玮, 沈耀良, 陈卫 (5532)
臭氧-生物活性炭对微污染原水中典型持久性有机物的去除效果	兰亚琼, 刘锐, 马正杰, 陈吕军 (5541)
水解酸化/AO 组合工艺处理印染废水色度去除与脱氮性能	顾梦琪, 尹启东, 刘爱科, 吴光学 (5550)
“异养-硫自养”组合工艺去除高浓度高氯酸盐特性	刘颖男, 陶华强, 宋圆圆, 张春青, 逯彩彩, 韩懿, 李海波, 郭建博 (5558)
静压快速启动亚硝酸盐依赖型甲烷厌氧氧化反应	王一因, 胡振, 茹东云, 姜丽萍, 刘华清 (5565)
多级 AO 耦合流离生化工艺流量分配比优化及脱氮机制	王帆, 李军, 边德军, 聂泽兵, 张莉, 孙艺齐 (5572)
主流条件下两级式 PN-ANAMMOX 工艺的高效能脱氮过程	刘文如, 杨殿海, 沈耀良, 王建芳, 吴鹏, 钱飞跃, 陈重军 (5580)
不同基质浓度对 ANAMMOX 菌短期储存的影响	高雪健, 张杰, 李冬, 曹正美, 郭跃洲, 李帅 (5587)
主流厌氧氨氧化工艺的优化及其微生物的群落变迁	付昆明, 李慧, 姜姗, 仇付国, 曹秀芹 (5596)
厌氧氨氧化污泥恢复过程中的颗粒特性	陈方敏, 顾澄伟, 胡羽婷, 黄勇, 李祥, 陆明羽, 方文辉, 金润 (5605)
低温反硝化菌——施氏假单胞菌 N3 的筛选及脱氮性能	路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (5612)
复垦工业场地土壤和周边河道沉积物重金属污染及潜在生态风险	吴健, 王敏, 张辉鹏, 黄宇驰, 徐志豪, 李青青, 陈昊, 黄沈发 (5620)
不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险	李春芳, 曹见飞, 吕建树, 姚磊, 吴泉源 (5628)
某大型神渣场土壤 As 污染特征及生态风险评价	刘庚, 石瑛, 田海金, 李豪, 张蕾, 牛俊杰, 郭观林, 张朝 (5639)
亚热带典型岩溶水库细菌丰度和细菌生产力及其与环境因子的关系	辛胜林, 梁月明, 彭文杰, 宋昂, 靳振江, 朱美娜, 李强 (5647)
岩溶区典型灌丛植物根系丛枝菌根真菌群落结构解析	梁月明, 苏以荣, 何寻阳, 陈香碧 (5657)
模拟氮沉降对干旱半干旱温带草原土壤细菌群落结构的影响	李宗明, 沈菊培, 张丽梅, 刘国平, 白文明, 贺纪正 (5665)
添加磷素对低磷稻田根际土壤固碳自养微生物数量的影响	柏菁, 李奕霏, 刘守龙, 祝贞科, 李科林, 彭佩钦, 吴小红, 葛体达, 吴金水 (5672)
长期不同施肥对稻田土壤有机碳矿化及激发效应的影响	马欣, 魏亮, 唐美玲, 徐福利, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5680)
黄土丘陵区撂荒恢复过程中植物群落组成与土壤养分及酶活性变化的关系	乔文静, 戴银月, 张伟, 付淑月, 杨改河, 韩新辉, 陈正兴, 高德新, 冯永忠 (5687)
生活垃圾不同填埋阶段的富里酸对五氯苯酚的降解	刘思佳, 何小松, 张慧, 祖国峰, 席北斗, 李丹, 党秋玲 (5699)
CO ₂ 倍增条件下不同生育期水稻碳氮磷含量及其计量比特征	唐美玲, 肖谋良, 袁红朝, 王光军, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (5708)
基于层次分析法的医疗废物处置技术评价	许晓芳, 谭全银, 刘丽丽, 李金惠 (5717)
中国农田畜禽粪尿氮负荷量及其还田潜力	刘晓永, 王秀斌, 李书田 (5723)
《环境科学》第 39 卷(2018 年)总目录	(5740)
《环境科学》征订启事(5343) 《环境科学》征稿简则(5439) 信息(5595, 5619, 5638)	

成都双流夏秋季环境空气中 VOCs 污染特征

邓媛元, 李晶, 李亚琦, 吴蓉蓉, 谢绍东*

(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要: 为了解成都市大气污染重点防治区域——双流地区的环境大气中挥发性有机物(VOCs)的污染特征和来源, 2016年8月30日~2016年10月7日, VOCs外场观测在成都市双流区展开。结果表明, 在线观测期间, 采样站点总的大气挥发性有机物(TVOCs)的平均体积分数为 $(45.15 \pm 43.74) \times 10^{-9}$, 其中烷烃的贡献最大(29%), 其次是芳香烃(22%)、卤代烃(17%)、含氧挥发性有机物(OVOCs, 15%)、烯烃(9%)、乙炔(7%)、乙腈(1%); 优势物种为丙酮、二氯甲烷、乙炔、乙烯、苯、甲苯、间/对-二甲苯、丙烷、1,2-二氯乙烷以及丁酮。通过比较VOCs的化学反应消耗速率发现, 反应活性最大的为芳香烃, 其次是烯烃; 反应活性最强的物种为苯乙烯、间/对-二甲苯、异戊二烯、乙烯等。整个观测期间, 有两次明显的生物质燃烧活动。国庆假日期间, TVOCs浓度相比之前明显上升, 平均体积分数达 57.65×10^{-9} , 其中, 短链烯烃、卤代烃以及OVOCs浓度上升最为显著。分析某些关键的非甲烷总烃(NMHCs)和OVOCs的日变化特征发现, 其变化规律反映了双流地区不同源排放特点。双流区环境空气中VOCs受本地工业源排放影响较大。

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 反应活性; 日变化; 在线观测; 成都

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)12-5323-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201803084

Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn

DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, WU Rong-rong, XIE Shao-dong*

(College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: To better understand the characteristics and sources of ambient volatile organic compounds (VOCs) in a polluted area in Chengdu, which requires air pollution control, samples were collected hourly at the Shuangliu site from August 2016 to December 2016. Online gas chromatography/mass spectrometry and a flame ionization detector (GC/MS-FID) were used to analyze the mixing ratios and compositions of the VOCs. During the sampling period, the average mixing ratios of the VOCs were $(45.15 \pm 43.74) \times 10^{-9}$. Alkanes contribute the most to the total volatile organic compounds (TVOCs), followed by aromatics (22%), halocarbon (17%), oxygenated volatile organic compounds (OVOCs; 15%), alkenes (9%), acetylene (7%), and acetonitrile (1%). Acetone, dichloromethane, acetylenes, ethylene, toluene, *m/p*-xylenes, propane, 1,2-dichloroethane, and methyl ethyl ketone are the dominant species. By calculating the OH loss rate, the chemical reactivity of the VOCs was estimated. Aromatics contribute the most to the total VOC reactivity, followed by alkenes. The most reactive species are styrene, *m/p*-xylenes, isoprene, and ethylene. Two biomass burning events were detected during the sampling period. The average mixing ratio of TVOCs is 57.65×10^{-9} , which significantly increased during the national holiday. The mixing ratios of several C2-C5 alkenes, halocarbons, and OVOCs increased the most during the national holiday. The diurnal patterns of critical non-methane hydrocarbons (NMHCs) and OVOCs are consistent with the emission sources in this area. The VOC characteristics at the sampling site are mainly influenced by local industrial sources.

Key words: volatile organic compounds(VOCs); chemical reactivity; diurnal variation; online-monitoring; Chengdu

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是指一系列在普通的大气环境下, 较容易挥发的有机化合物^[1]。近年来, 国内外各大城市均观测到严重的近地面臭氧和气溶胶污染现象^[2~4], 而VOCs是近地面臭氧和二次有机气溶胶生成的重要前体物^[5], 并且, 某些VOCs对人体健康有相当大的危害^[6,7]。目前, 在国内外各大城市有大量针对VOCs的浓度水平、排放特征、活性成分及其来源的研究^[8~12]。

Li等^[10]分析了夏季京津冀地区VOCs的化学组成特征和反应活性, 研究发现, 烷烃在总的大气挥发性有机物(total volatile organic compounds,

TVOCs)中占比最高, 而烯烃对化学反应活性贡献最大。在珠三角地区, 苯、甲苯浓度远高于其他特大城市^[13]。大气中的VOCs主要来自工艺过程源、机动车排放源、生物质燃烧源等人为源和植被排放等天然源^[14~16]。目前, 我国多数VOCs研究集中在京津冀、长江三角洲以及珠江三角洲等经济发达地区, 在成渝地区缺少高时间分辨率的观测和研究。

收稿日期: 2018-03-14; 修订日期: 2018-05-23

基金项目: 成都市大气臭氧污染成因及防治研究项目

作者简介: 邓媛元(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制原理与技术, E-mail: denggy_poi@pku.edu.cn

* 通信作者, E-mail: sdxie@pku.edu.cn

成都位于四川盆地北部,是中国西南地区的政治文化中心,由于地处盆地,气候温热潮湿,全年风速较小,大气污染物的物理化学反应条件独特且污染物不易扩散.关于成都地区大气 VOCs 的环境污染状况已有部分研究,李友平等^[6]发现对成都市臭氧生成潜势贡献最大的为芳香烃和烯烃类物种.印红玲等^[17]对夏季成都大气 VOCs 采样发现,非甲烷总烃(non-methane hydrocarbons, NMHCs)早高峰主要受机动车排放影响.目前,针对成都地区的研究多为离线采样,且多在夏季,而由于特殊的地理气候条件,成都市秋季的臭氧污染也相当严重.另外,成都市各功能区 VOCs 污染特征不同,针对成都特定区域的连续在线观测对污染防治工作具有重要的现实意义.

成都双流区位于成都市中心城区的下风向,其工业生产发达,分布着医药制造、皮革制造、电子制造、砖瓦制造、电厂、玻璃制造业等多个 VOCs 排放量巨大的产业,同时,双流区建设有国际机场,是非移动道路源排放的重要来源.双流区的常规环境监测数据表明,该区域大气污染严重.因此,在双流的重点污染源自动监控站点设立采样点,开展逐时在线观测活动,并同步收集采样点的一氧化碳(CO)和气象参数,对双流大气中 VOCs 的污染特征进行研究,尤其对国庆假日 VOCs 的特征变化进行分析,以期成都市臭氧和气溶胶污染的治理工作提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点位置

采样点位于成都市双流区防震减灾局监测点(图1),该采样点位于城市道路旁的社区公园,采

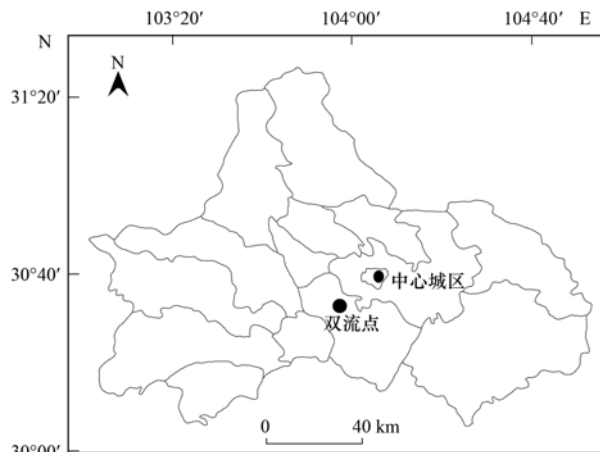


图1 双流采样站点位置示意

Fig. 1 Location of the sampling site in Chengdu

样高度约 16 m. 图2是在线观测期间,采样点的温度、湿度、大气压强随时间变化规律,图3是观测期间的风玫瑰图.站点的平均温度是 22.4℃,平均相对湿度为 84%,平均大气压强为 96 kPa. 平均风速为 1.5 m·s⁻¹.

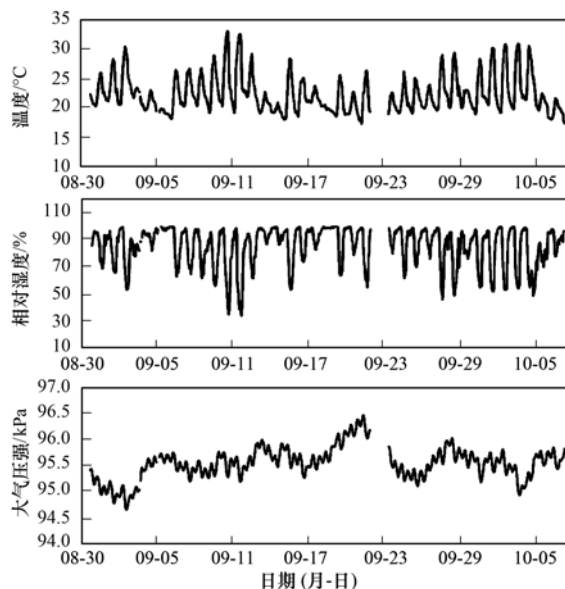


图2 在线观测期间双流站点气象特征

Fig. 2 Meteorological conditions in Shuangliu

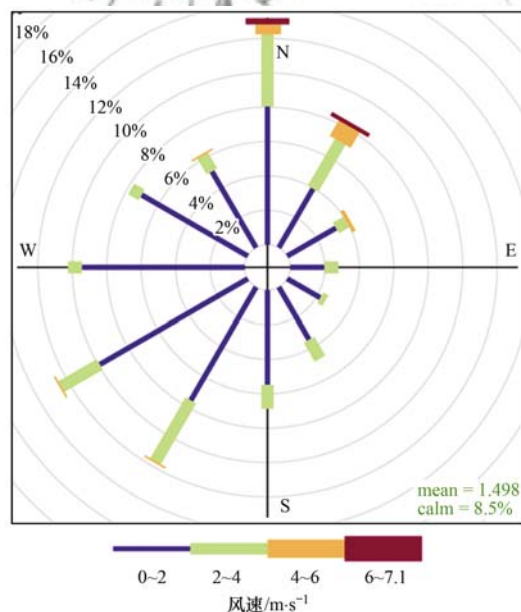


图3 在线观测期间双流站点风玫瑰图

Fig. 3 Surface wind rose in Shuangliu

1.2 样品分析方法

利用一套在线低温冷阱预浓缩和气相色谱质谱联用系统(GC-MS/FID, TH-PKU 300B, 武汉天虹仪器有限公司)进行采样和样品分析.该系统能自动采集空气样品并进行在线测量,其采样时间分辨率

为 1 h. 仪器制冷系统通过压缩空气, 使初始温度降到 -150°C [18]. 采样时, 300 mL 的空气样品先通过有 Teflon 膜过滤的采样头, 除去空气中颗粒物, 并通过除水阱、碱石棉以及 Na_2SO_3 除去水、二氧化碳和氧气, 再以 $60\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的流速通过冷阱预浓缩系统并被捕集柱捕集 [18]. 随后加热解析装置启动, 高浓度的 VOCs 随载气转移至色谱柱. 解析后的 VOCs 进入两个气路, FID 火焰离子化检测器检测 C2 ~ C5 的物种, 另一个气路中, MS 质谱检测 C5 ~ C12 的物种 [19].

本研究使用的标准气体包括 56 种 NMHCs 的混合标气 (Air Environmental Inc., 美国) 和 63 种 VOCs 物种组成的 TO15 标气 (Linde Electronics and Specialty Gases Inc., 美国). 采用内标法和外标法对 VOCs 进行定量, 用溴氯甲烷, 1,4-二氟苯, 氯苯-d5 和溴氟苯做内部标准 (the Environmental Technology Center, 加拿大), 并使用混合标准气体来制作外部标准曲线. 研究所测得 VOCs 物种的标准曲线相关系数的平方 (r^2) 均在 0.99 以上. 所有物种检测限基本低于其环境浓度. 采样期间, 采用了严格的质量控制和保证措施, 通过分析 56 种 NMHCs 标气样品进行日校准. 采样期间, 对所有环境空气样品, 共定量出 90 种 VOCs, 包括 28 种烷烃、11 种烯烃、16 种芳香烃、21 种卤代烃、12 种含氧挥发性有机物 (oxygenated volatile organic compounds, OVOCs)、乙炔以及乙腈.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度特征及反应活性分析

2.1.1 VOCs 浓度特征

2016 年 8 月 30 日至 10 月 7 日观测期间, TVOCs 平均体积分数为 $(45.15 \pm 43.74) \times 10^{-9}$. 90 种 VOCs 采样期间的平均体积分数列于表 1. 其中, 体积分数排名前 10 的物种依次为丙酮、乙烷、

二氯甲烷、乙炔、乙烯、间/对-二甲苯、甲苯、丙烷、1,2-二氯乙烷以及丁酮. 丙酮浓度最高, 占 OVOCs 总量的 55%, 丁酮则占 OVOCs 总量的 22%. 乙烷为浓度最高的烷烃, 其次是丙烷. 二氯甲烷和 1,2-二氯乙烷为卤代烃的优势物种, 二者占卤代烃总量的 73%. 间/对-二甲苯、甲苯为强致癌物质 [20]. 乙烯和乙炔是烯炔烃的优势物种. 图 4 是 VOCs 各组分比例, 烷烃占比最高 (29%), 随后依次为芳香烃 (22%)、卤代烃 (17%)、OVOCs (15%)、烯烃 (9%)、乙炔 (7%)、乙腈 (1%). 由 TVOCs 浓度随时间变化情况 (图 5) 可以看出, 国庆期间 TVOCs 浓度出现剧增, 期间的污染特征将在 2.2 节详细讨论.

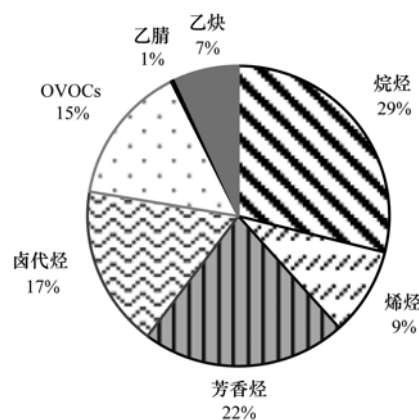


图 4 成都市双流站点 VOCs 组成
Fig. 4 Compositions of VOCs in Shuangliu

如图 6 所示是具有源指示特征的 VOCs (乙烯、苯、甲苯、邻二甲苯、间/对-二甲苯、二氯甲烷、丙酮、乙炔) 采样期间平均体积分数与国内其他城市相似研究的对比 [20~22]. 成都的丙酮浓度高于重庆、北京, 略低于香港. 二氯甲烷、邻-二甲苯以及间/对-二甲苯的浓度均明显高于其他 3 个城市, 其中间/对-二甲苯浓度为其他城市的 4 倍左右. 乙烯和乙炔的浓度略低于重庆, 而比香港和北京高. 苯浓度与重庆相差不大, 比北京和香港略高. 甲苯浓度略低于香港, 而比北京和重庆高近一倍.

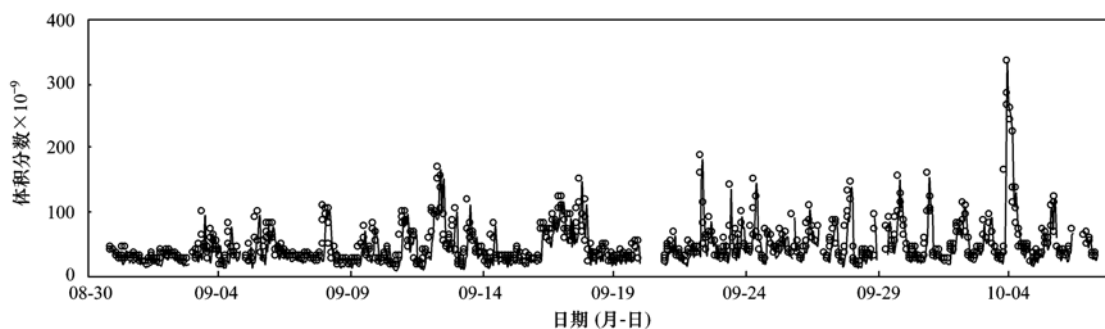


图 5 TVOCs 体积分数随时间变化
Fig. 5 Temporal variations of TVOCs

表 1 观测期间各 VOC 的平均体积分数及其标准偏差 $\times 10^{-9}$

Table 1 Mixing ratios and standard deviations of VOCs $\times 10^{-9}$

项目	体积分数 $\pm$ 标准偏差	项目	体积分数 $\pm$ 标准偏差
乙烷	3.66 ± 1.40	邻-二甲苯	0.96 ± 1.28
丙烷	2.25 ± 1.96	异丙基苯	0.03 ± 0.02
异丁烷	1.05 ± 1.92	正丙苯	0.03 ± 0.02
正丁烷	1.45 ± 1.59	3-乙基甲苯	0.08 ± 0.08
环戊烷	0.05 ± 0.06	4-乙基甲苯	0.05 ± 0.04
异戊烷	1.00 ± 0.74	1,3,5-三甲基苯	0.04 ± 0.04
正戊烷	0.55 ± 0.43	乙基-2-甲基苯	0.04 ± 0.03
2,2-二甲基丁烷	0.04 ± 0.03	1,2,4-三甲基苯	0.19 ± 0.17
2,3-二甲基丁烷	0.07 ± 0.06	1,2,3-三甲基苯	0.04 ± 0.03
2-甲基戊烷	0.42 ± 0.41	间-二乙苯	0.01 ± 0.00
3-甲基戊烷	0.45 ± 0.42	对-二乙苯	0.02 ± 0.01
正己烷	0.55 ± 0.55	氟利昂 114	0.01 ± 0.01
2,4-二甲基戊烷	0.04 ± 0.04	氯甲烷	0.82 ± 0.08
甲基环戊烷	0.23 ± 0.24	氯乙烯	0.01 ± 0.03
2-甲基己烷	0.13 ± 0.18	溴甲烷	0.01 ± 0.00
环己烷	0.14 ± 0.17	氯乙烷	0.03 ± 0.04
2,3-二甲基戊烷	0.07 ± 0.08	氟利昂 11	0.42 ± 0.19
3-甲基己烷	0.16 ± 0.21	氟利昂 113	0.07 ± 0.00
2,2,4-三甲基戊烷	0.07 ± 0.06	二氯甲烷	3.51 ± 3.43
正庚烷	0.20 ± 0.24	1,1-二氯乙烷	0.02 ± 0.03
甲基环己烷	0.18 ± 0.21	顺-1,2-二氯乙烷	0.01 ± 0.00
2,3,4-三甲基戊烷	0.04 ± 0.04	三氯甲烷	0.15 ± 0.15
2-甲基庚烷	0.04 ± 0.05	四氯化碳	0.10 ± 0.04
3-甲基庚烷	0.02 ± 0.03	1,2-二氯乙烷	2.20 ± 3.16
正辛烷	0.06 ± 0.65	1,2-二氯丙烷	0.32 ± 0.42
正癸烷	0.03 ± 0.02	反-1,3-二氯丙烯	0.01 ± 0.01
正十一烷	0.03 ± 0.02	1,1,2-三氯乙烷	0.02 ± 0.01
正十二烷	0.06 ± 0.03	四氯乙烯	0.09 ± 0.09
乙烯	3.03 ± 2.34	1,2-二溴乙烷	0.01 ± 0.00
丙烯	0.54 ± 0.48	氯苯	0.01 ± 0.01
反-2-丁烯	0.09 ± 0.10	1,3-二氯苯	0.01 ± 0.20
1-丁烯	0.13 ± 0.10	1,4-二氯苯	0.02 ± 0.01
顺-2-丁烯	0.05 ± 0.06	丙烯醛	0.14 ± 0.10
1-戊烯	0.03 ± 0.03	丙醛	0.17 ± 0.12
反-2-戊烯	0.02 ± 0.03	丙酮	3.74 ± 2.40
异戊二烯	0.28 ± 0.26	甲基叔丁基醚	0.37 ± 0.35
顺-2-戊烯	0.01 ± 0.01	异丁烯醛	0.11 ± 0.09
1-己烯	0.05 ± 0.04	正丁醛	0.06 ± 0.03
1,3-丁二烯	0.05 ± 0.05	甲基乙烯基酮	0.10 ± 0.10
乙炔	3.08 ± 2.24	丁酮	1.50 ± 2.76
苯	1.03 ± 0.72	2-戊酮	0.02 ± 0.01
甲苯	2.32 ± 2.54	3-戊酮	0.02 ± 0.02
乙苯	1.23 ± 1.51	正戊醛	0.04 ± 0.03
苯乙烯	1.04 ± 1.66	正己醛	0.53 ± 0.59
间/对-二甲苯	2.78 ± 3.67	乙腈	0.24 ± 0.12

图 7 是 CO、乙腈和氯甲烷采样期间浓度变化。乙腈、氯甲烷是生物质燃烧活动示踪物^[23,24]，CO 是生物质燃烧过程中大量排放物质^[25]。在 9 月 8 日~9 月 13 日和 9 月 28 日~10 月 6 日期间，观测到明显的三者浓度同步升高。采样期间正值四川秋收季节，推测成都地区有较强的生物质燃烧活动。利

用可见红外成像辐射仪(VIIRS)的火点数据(数据来源: https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/)，分别生成 9 月 8 日~9 月 13 日以及 9 月 28 日~10 月 6 日的成都地区火点图，如图 8。可以看出，在 9 月 8 日~9 月 13 日，多个火点距离双流站点较近，9 月 28 日~10 月 6 日，火点数较少，但距

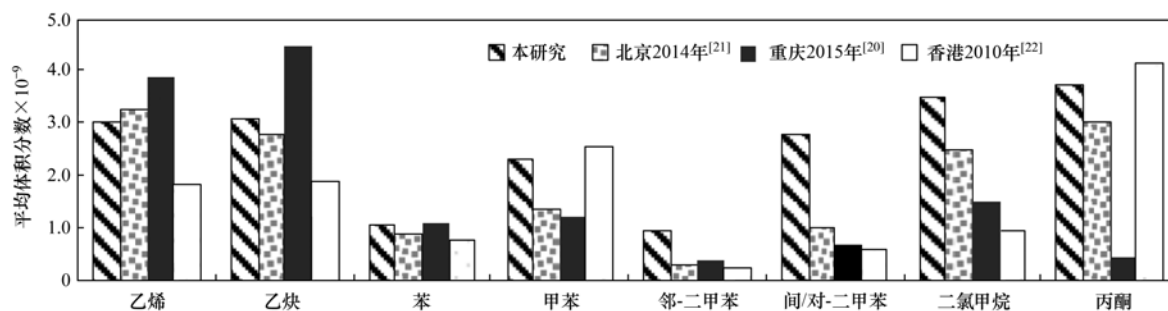


图6 关键 VOCs 的平均体积分数与中国其他大城市对比

Fig. 6 Comparison of critical VOCs mixing ratios between different megacities in China

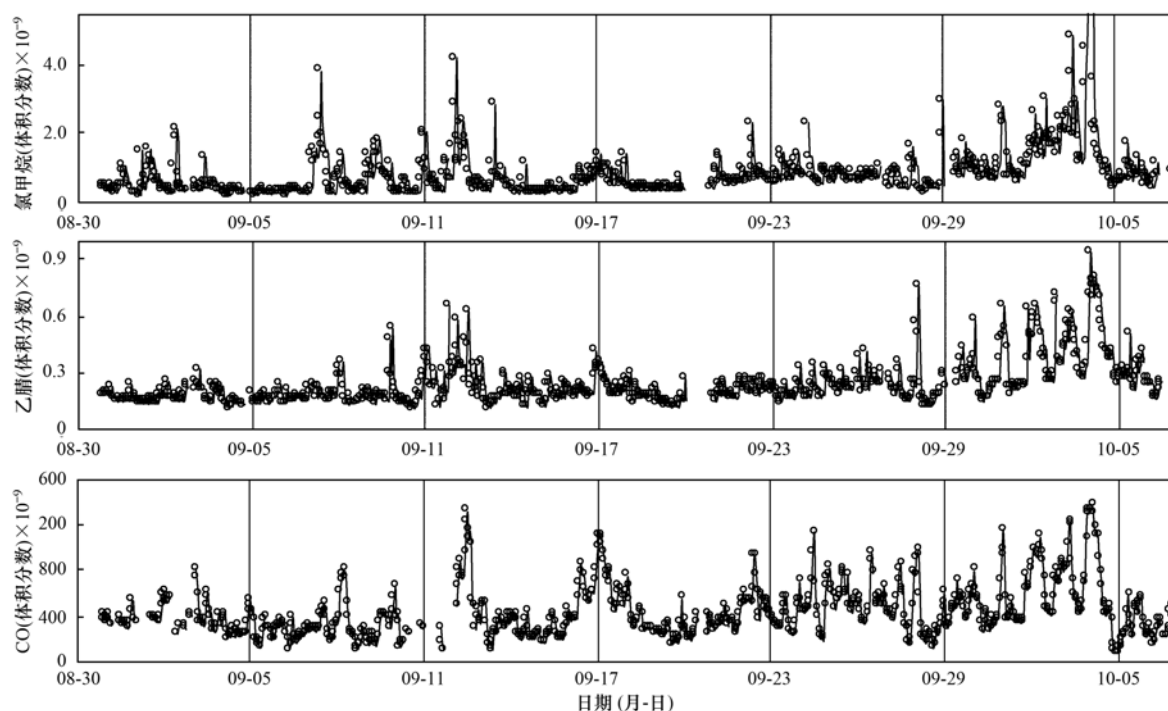


图7 CO、乙腈和氯甲烷体积分数随时间变化

Fig. 7 Temporal variations of CO, acetonitrile, and chloromethane

离采样点近处有火点, 故对采样结果影响较大^[26].

2.1.2 VOCs 反应活性特征

不同的大气 VOCs 化学反应活性表现出巨大差异, 主要受到其组成和浓度的影响, 大小可以通过 $\cdot\text{OH}$ 反应活性 (L_{OH}) 来表征. L_{OH} 代表 VOCs 在大气中与 $\cdot\text{OH}$ 自由基反应的速率, 其值为 VOC 的 $\cdot\text{OH}$ 反应速率常数和该 VOC 在大气中浓度的乘积^[10,27]. 本研究采用的 $\cdot\text{OH}$ 反应速率常数来自文献^[28], 共计算 60 种 VOCs 的 L_{OH} . 在双流, 芳香烃和烯烃对大气 VOCs 反应活性的贡献分别为 54% 和 30%. 图 9 为 L_{OH} 值排名前 20 的物种, 各物种对活性贡献的大小与王倩等^[29] 在成都的观测结果相比有所不同. 芳香烃中, 苯乙烯反应活性最高, 其次为间/对-二甲苯, 甲苯、邻-二甲苯. 烯烃中, 反应活性较高的

物种以 C2 ~ C4 的短链烯烃为主, 如异戊二烯、乙烯、1,3-丁二烯. 短链烯烃多为化石燃料燃烧产物, 1,3-丁二烯是机动车燃烧的示踪物, 异戊二烯是天然源排放的示踪物, 双流站点周围有较为丰富的植被, 异戊二烯主要来自天然源排放^[30]. 烷烃中, 正丁烷、正己烷以及丙烷的反应活性较高. OVOCs 中, 丙醛、异丁烯醛活性较高, 它们主要来自大气氧化反应^[31,32].

2.2 节假日前后 VOC 污染特征对比

图 10 为国庆节前和节日期间, VOCs 各组分的体积分数对比. 节日期间, VOCs 浓度相比节前有明显升高, TVOCs 的平均体积分数为 57.65×10^{-9} , 其中 OVOCs 和卤代烃升高幅度最大. 表 2 所列是节日前后 20 种变化最大的 VOCs, OVOCs 的浓度升

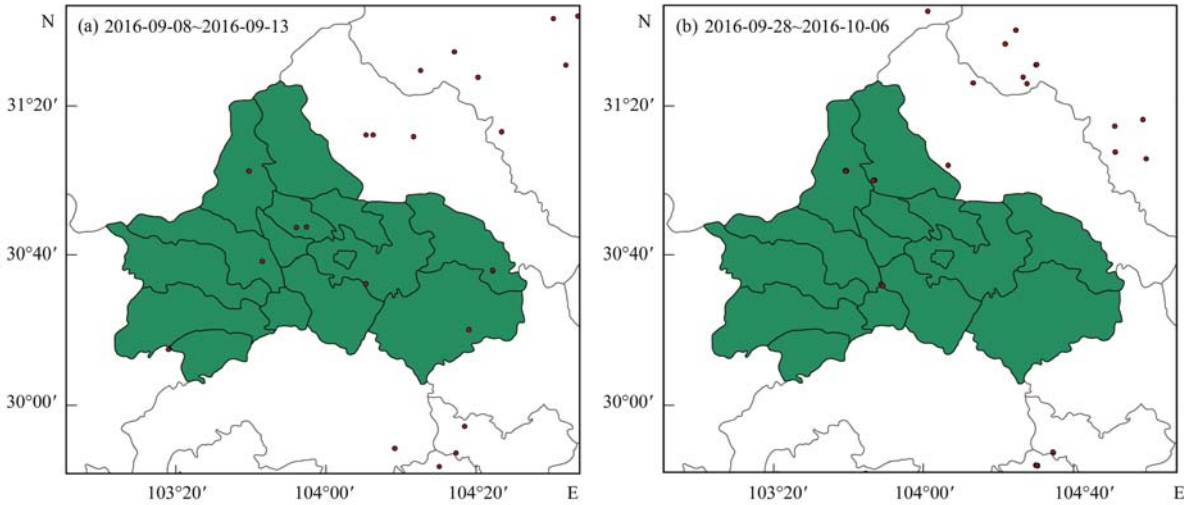


图 8 成都市 2016 年 9 月 8 日~9 月 13 日和 2016 年 9 月 28 日~10 月 6 日火点分布
Fig. 8 Fire map for Chengdu from September 8-13 and from September 28 to October 6

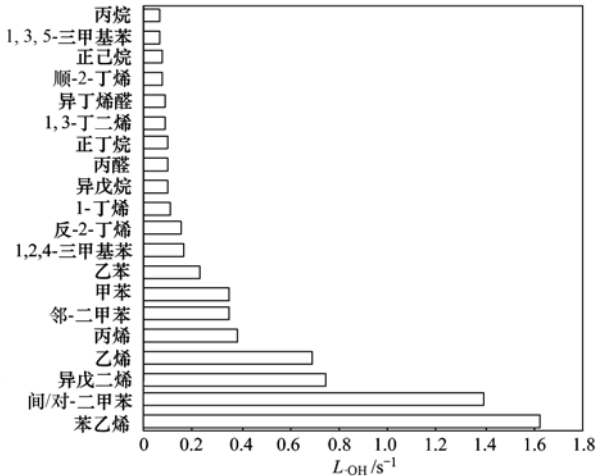


图 9 L_{OH} 值排名前 20 的物种
Fig. 9 The L_{OH} value of the top twenty VOCs

高主要贡献来自丙酮，其次是异丁烯醛、甲基乙基酮、丙醛和甲基叔丁基醚(methyl tert-butyl ether, MTBE)。异丁烯醛和甲基乙基酮为异戊二烯的一次氧化产物^[31]，10 月 3 日~10 月 4 日，双流气温上升约 2℃，天然源排放加强。MTBE 是一种广泛使用的汽油含氧添加剂，是汽油车排放的示踪物^[33]。国庆期间，公众的出行增加，机动车排放强

度加大是造成 MTBE 浓度升高的主要原因。丙酮既来自一次排放源，也来自二次生成，一次来源有溶剂使用、机动车排放等^[34,35]，二次来源包括短链烷烃和烯烃在大气中的氧化反应。国庆期间温度的升高可能加快溶剂挥发以及二次生成反应，从而导致丙酮浓度升高。卤代烃浓度升高的主要贡献物种为 1,2-二氯乙烷，氯甲烷、二氯甲烷。除部分氯甲烷来自生物质燃烧外，三者均是典型的溶剂使用源示踪物^[34]。氟利昂 11 作为大气中长期存在的惰性气体，存在于老化气团中，浓度水平一般为区域背景值，而在节日期间升高^[20]。

2.3 VOCs 日变化特征分析

VOCs 的日变化特征受到如源排放强度、区域传输、化学反应活性以及气象条件等多种因素影响^[11,20]。本节分别对具有代表性的 NMHCs 和 OVOCs 的日变化特征进行分析。大气中的 OVOCs 来源复杂，不仅来自天然源排放、溶剂使用和生物质燃烧等一次排放，也来自大气 VOCs 的光化学反应^[36,37]。平均值的日变化可能会掩盖其污染特征，因此，对于所研究的 OVOCs，挑选出其浓度接近平均值的 2 d 以及浓度较高的 2 d，进行日变化特征分析。

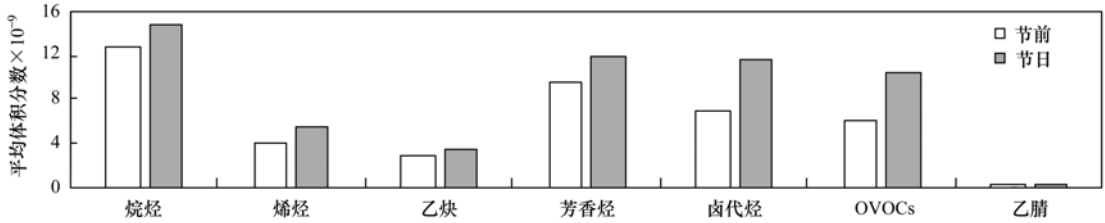


图 10 节日前后 VOCs 各组分平均体积分数对比
Fig. 10 Comparison of the average mixing ratio of the VOC group before and during the holiday

表 2 节日前对比节日期间 20 种变化幅度最大 VOC 物种

Table 2 Comparison of the top 20 most varied VOCs before and during the holiday

序号	物种	节前平均体积分数 $\times 10^{-9}$	节日平均体积分数 $\times 10^{-9}$
1	氯乙烯	0.01	0.03
2	1-己烯	0.04	0.09
3	氯甲烷	0.67	1.55
4	反-2-戊烯	0.01	0.03
5	1,2-二氯乙烷	1.83	4.02
6	异丁烯醛	0.09	0.19
7	四氯化碳	0.08	0.18
8	顺-2-戊烯	0.01	0.02
9	1,3-丁二烯	0.04	0.09
10	甲基乙烯基酮	0.08	0.16
11	丙酮	3.24	6.23
12	丙醛	0.15	0.28
13	氟利昂 11	0.37	0.68
14	乙腈	0.21	0.39
15	1-戊烯	0.03	0.05
16	氯仿	0.13	0.24
17	异戊二烯	0.25	0.42
18	MTBE	0.33	0.55
19	3-戊酮	0.01	0.02
20	正己醛	0.48	0.77

2.3.1 典型 NMHCs 日变化特征

图 11 为乙烯、乙炔、苯、甲苯、异戊二烯、

1,3-丁二烯的日变化特征. 此 6 种物质是不同排放源的示踪物. 乙烯主要来自化石燃料的不完全燃

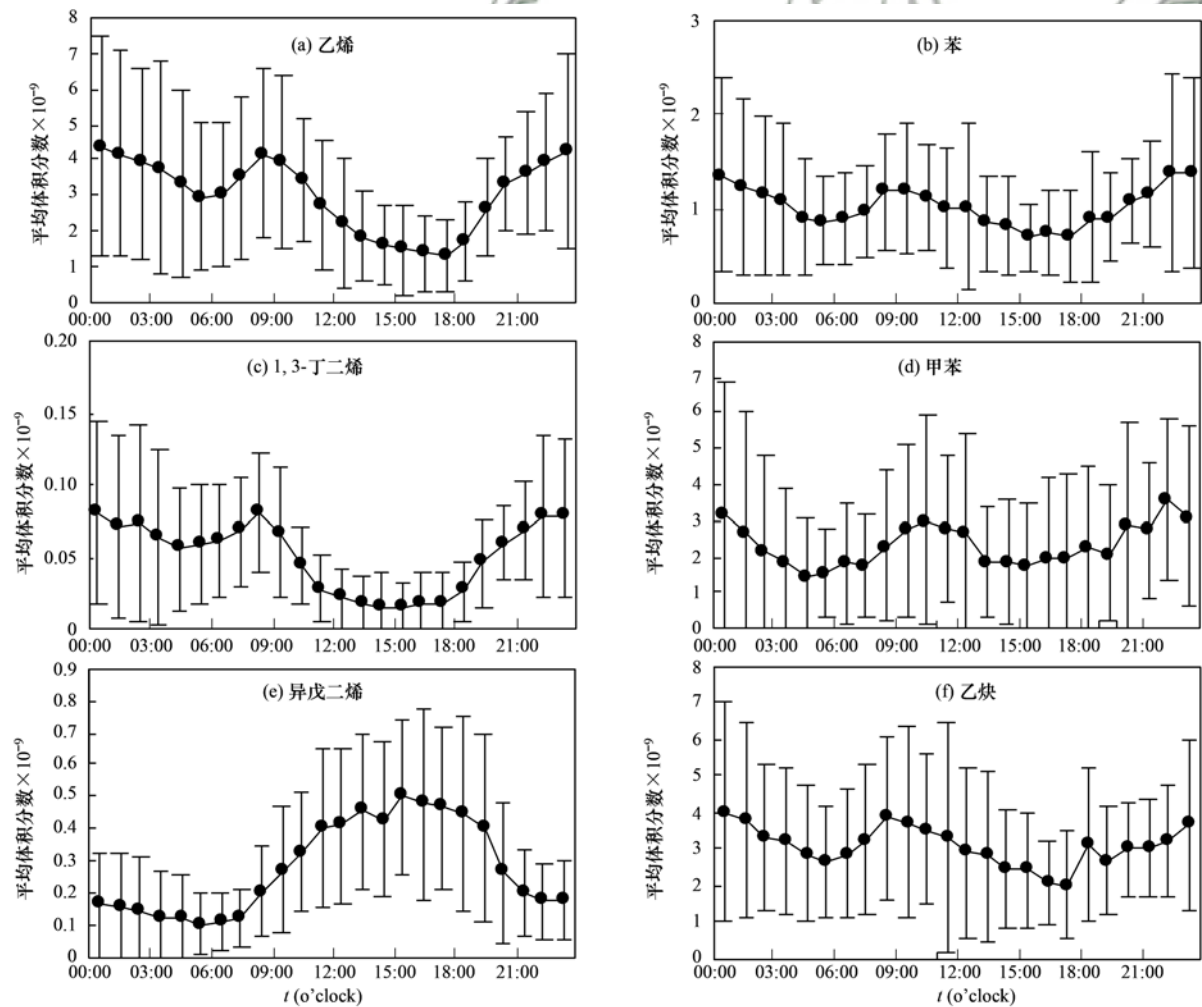


图 11 典型 NMHCs 的日变化
Fig. 11 Diurnal variations of typical NMHCs

烧^[34]. 乙烯的日变化为单峰分布, 峰值出现在 08:00~09:00, 此后, 乙烯浓度随化学反应消耗而降低. 晚上, 受晚高峰影响, 乙烯浓度从 18:00 开始升高, 而由于大气边界层降低和光化学反应减弱, 乙烯的较高浓度得以维持. 1,3-丁二烯的日变化为明显的双峰分布, 表明其主要受到早晚高峰机动车排放的影响, 具有相似日变化的还有乙炔.

苯和甲苯的日变化较为相似, 均为双峰分布, 但出现峰值时间比烯烃类物质晚, 尤其是甲苯, 早高峰出现在 10:00 左右, 晚高峰出现在 22:00. 苯和甲苯均为汽油燃烧的示踪物, 而同时也来自溶剂使用过程^[34]. 峰值延后出现则证明, 成都双流大气中苯和甲苯浓度受到机动车排放和溶剂使用的双重影响.

异戊二烯的日变化为典型天然源排放特征, 从 09:00 开始, 随温度升高和光照加强, 植物排放速率加快, 在午后达峰值, 夜间由于化学反应的消耗, 异戊二烯浓度逐渐降低.

2.3.2 典型 OVOCs 的日变化特征

丙酮、丁酮以及正己醛是 OVOCs 中浓度最高的 3 种物质, 占总 OVOCs 的 80% 以上. 甲基乙烯基酮和异丁烯醛变化与天然源排放活动密切相关. 图 12 是这 5 种 OVOCs 浓度随时间变化. 9 月 12 日和 9 月 17 日, 丙酮的浓度水平接近平常值, 其浓度从 07:00 开始小幅上升, 12:00 后基本不变. 10 月 3 日和 10 月 4 日期间, 丙酮浓度有异常高值, 夜晚浓度骤增, 推测夜晚有强烈的一次源排放, 结合双流当地情况, 可能为溶剂使用源排放和生物质燃烧

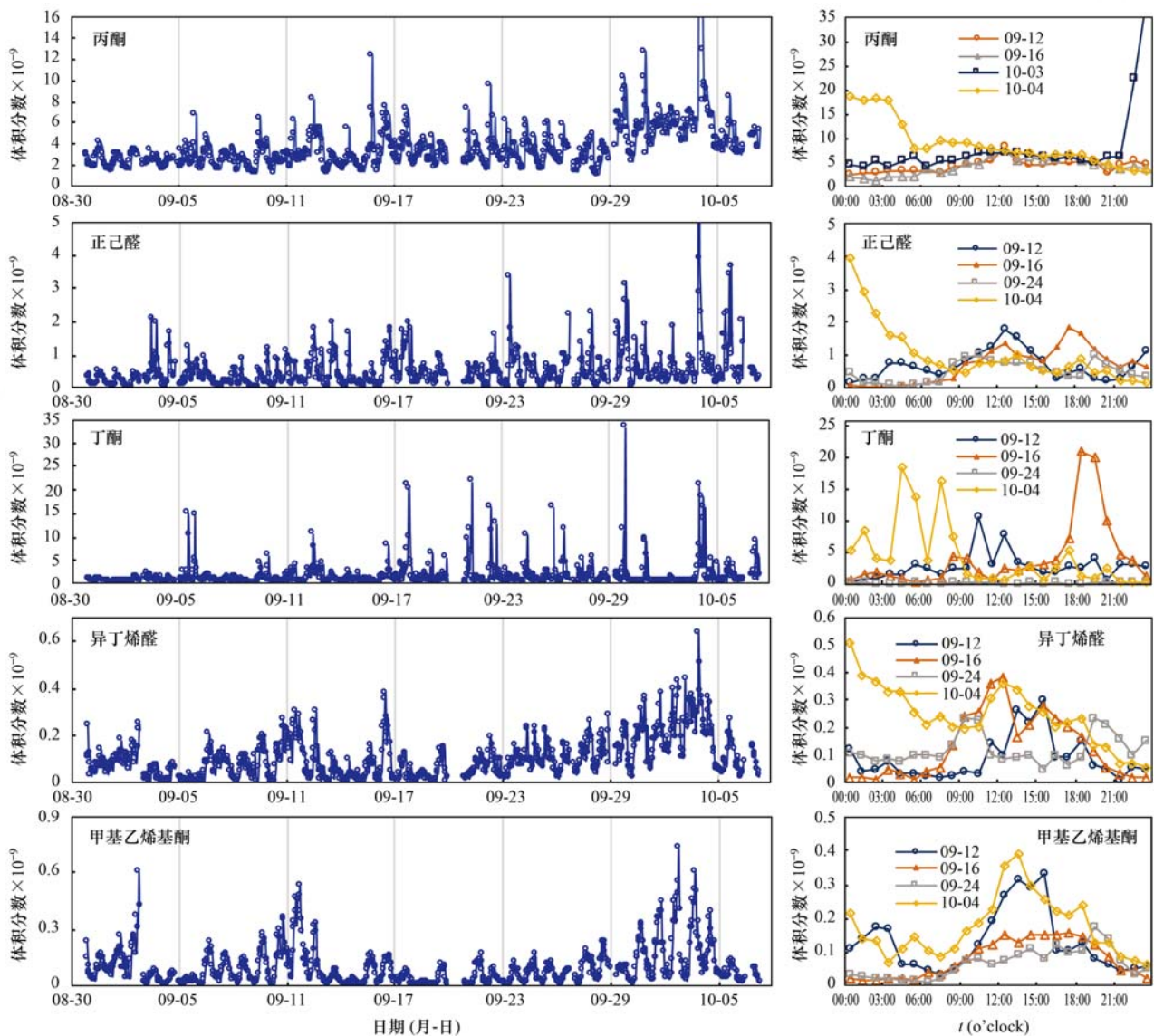


图 12 典型 OVOCs 的时间变化特征

Fig. 12 Temporal variations of typical OVOCs

活动. 正己醛的变化特征与丙酮类似. 丁酮的浓度变化特征与前两者有较大差别, 观测期间, 丁酮无明显周期性变化规律. 丁酮是一种常用的工业溶剂, 也是正丁烷的一次氧化产物, 其无周期地出现浓度高值证明其主要来自工业过程的无组织排放^[32]. 甲基乙烯基酮和异丁烯醛的日变化趋势一致, 呈单峰分布. 二者的两次升高与采样期间的温度升高时间吻合.

2.4 特征物种比值

不同的 VOCs 物种具有不同的光化学反应活性. 由此, 大气中某些 VOCs 物种对的浓度比值, 可以部分反映该区域大气传输、老化的情况, 初步判断采样地区大气所受区域传输影响的大小^[38~40]. 选择乙烯与乙烷、间/对-二甲苯与乙苯作为物种对计算其比值, 并与香港和武汉研究结果进行比较^[39,40], 如图 13. 由于光化学反应的影响, 本地新鲜排放的气团该比值比老化气团大. 香港和武汉的特征物种对比值均低于双流, 而香港的光化学污染主要来自本地排放, 意味着双流大气 VOCs 更加受到本地新鲜排放物质影响^[39,40].

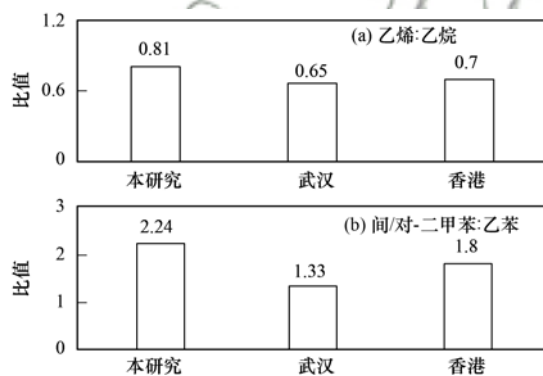


图 13 特征物种对乙烯比乙烷和间/对-二甲苯比乙苯比值与武汉和香港结果对比

Fig. 13 Comparison of ethylene/ethane and *m,p*-xylenes/ethylbenzene between Wuhan and Hongkong

3 结论

(1) 2016 年 8 月 30 日~2016 年 10 月 7 日, 成都双流区 TVOCs 的平均体积分数为 $(45.15 \pm 43.74) \times 10^{-9}$. 其中烷烃的贡献(29%)最大, 其次是芳香烃(22%), 卤代烃(17%), OVOCs(15%), 烯烃(9%), 乙炔(7%), 乙腈(1%). 成都双流地区的优势物种为丙酮、二氯甲烷、乙炔、乙烯、苯、甲苯、间/对-二甲苯、丙烷、1,2-二氯乙烷以及丁酮. 其中, 丙酮、苯、甲苯、邻-二甲苯、间/对-二甲苯应该优先控制.

(2) 成都双流大气 VOCs 的反应活性主要来自芳香烃和烯烃, 其中苯乙烯和间/对-二甲苯、甲苯、邻-二甲苯等是主要贡献者, 多来自溶剂使用和机动车排放活动. 烯烃中, 反应活性较高的物种以 C2~C4 的短链烯烃为主, 多为化石燃料燃烧产物.

(3) 国庆节节假日期间, 成都双流大气 VOCs 的组成和浓度特征与平常有明显不同. 节假日期间, 短链烯烃、卤代烃以及 OVOCs 的浓度明显上升. 机动车排放和溶剂使用强度增大, 大气中 VOCs 二次转化反应强烈. 另外, 国庆期间有明显的生物质燃烧活动.

(4) 乙烯、乙炔以及 1,3-丁二烯的日变化, 明显受到交通早晚高峰的影响. 异戊二烯的日变化符合天然源排放的特征. 苯和甲苯变化类似, 受机动车和溶剂使用源的影响. 丙酮的变化主要受到一次源排放影响, 同时也受二次生成的影响. 正己醛、甲基乙烯基酮和异丁烯醛日变化符合各自排放源特征.

(5) 利用特征物种对比值的方法, 并结合双流 VOCs 源排放特征物种日变化特征显示, 成都市双流区的大气环境中 VOCs 浓度主要受到本地源排放的影响.

参考文献:

- [1] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change (2nd ed.) [M]. New York: Wiley, 2006.
- [2] Guo H, Ling Z H, Cheng H R, et al. Tropospheric volatile organic compounds in China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **574**: 1021-1043.
- [3] Ding A J, Fu C B, Yang X Q, et al. Ozone and fine particle in the western Yangtze River Delta: an overview of 1 yr data at the SORPES station [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, **13**(11): 5813-5830.
- [4] Zhang Q, Yuan B, Shao M, et al. Variations of ground-level O₃ and its precursors in Beijing in summertime between 2005 and 2011 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, **14**(12): 6089-6101.
- [5] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x [J]. Atmospheric Environment, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [6] 李友平, 唐娅, 范忠雨, 等. 成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价 [J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 576-584.
- [7] Li Y P, Tang Y, Fan Z Y, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in Chengdu [J]. Environmental Science, 2018, **39**(2): 576-584.
- [7] 李雷, 李红, 王学中, 等. 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价 [J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4558-4564.
- [7] Li L, Li H, Wang X Z, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in the downtown area

- of Guangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (12): 4558-4564.
- [8] Louie P K K, Ho J W K, Tsang R C W, *et al.* VOCs and OVOCs distribution and control policy implications in Pearl River Delta region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **76**: 125-135.
- [9] Wu F K, Yu Y, Sun J, *et al.* Characteristics, source apportionment and reactivity of ambient volatile organic compounds at Dinghu Mountain in Guangdong Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **548-549**: 347-359.
- [10] Li L Y, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and their role in ground-level ozone formation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **113**: 247-254.
- [11] 杨辉, 朱彬, 高晋徽, 等. 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析 [J]. *环境科学*, 2013, **34** (12): 4519-4528.
Yang H, Zhu B, Gao J H, *et al.* Source apportionment of VOCs in the northern suburb of Nanjing in summer [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (12): 4519-4528.
- [12] Borbon A, Gilman J B, Kuster W C, *et al.* Emission ratios of anthropogenic volatile organic compounds in northern mid-latitude megacities: observations versus emission inventories in Los Angeles and Paris [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118** (4): 2041-2057.
- [13] Yuan B, Chen W T, Shao M, *et al.* Measurements of ambient hydrocarbons and carbonyls in the Pearl River Delta (PRD), China [J]. *Atmospheric Research*, 2012, **116**: 93-104.
- [14] Zheng J Y, Yu Y F, Mo Z W, *et al.* Industrial sector-based volatile organic compound (VOC) source profiles measured in manufacturing facilities in the Pearl River Delta, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2013, **456-457**: 127-136.
- [15] Han M, Lu X Q, Zhao C S, *et al.* Characterization and source apportionment of volatile organic compounds in urban and suburban Tianjin, China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, **32** (3): 439-444.
- [16] Ding X, He Q F, Shen R Q, *et al.* Spatial and seasonal variations of isoprene secondary organic aerosol in China: significant impact of biomass burning during winter [J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 20411.
- [17] 印红玲, 袁桦蔚, 叶芝祥, 等. 成都市大气中挥发性有机物的时空分布特征及臭氧生成潜势研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35** (2): 386-393.
Yin H L, Yuan H W, Ye Z X, *et al.* Temporal and spatial distribution of VOCs and their OFP in the atmosphere of Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35** (2): 386-393.
- [18] 刘兴隆, 曾立民, 陆思华, 等. 大气中挥发性有机物在线监测系统 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29** (12): 2471-2477.
Liu X L, Zeng L M, Lu S H, *et al.* Online monitoring system for volatile organic compounds in the atmosphere [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29** (12): 2471-2477.
- [19] Li J, Wu R R, Li Y Q, *et al.* Effects of rigorous emission controls on reducing ambient volatile organic compounds in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **557-558**: 531-541.
- [20] Li J, Zhai C Z, Yu J Y, *et al.* Spatiotemporal variations of ambient volatile organic compounds and their sources in Chongqing, a mountainous megacity in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 1442-1452.
- [21] Wu R R, Li J, Hao Y F, *et al.* Evolution process and sources of ambient volatile organic compounds during a severe haze event in Beijing, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **560-561**: 62-72.
- [22] Lam S H M, Saunders S M, Guo H, *et al.* Modelling VOC source impacts on high ozone episode days observed at a mountain summit in Hong Kong under the influence of mountain-valley breezes [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **81**: 166-176.
- [23] Li L Y, Chen Y, Zeng L M, *et al.* Biomass burning contribution to ambient volatile organic compounds (VOCs) in the Chengdu - Chongqing Region (CCR), China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **99**: 403-410.
- [24] Zhu Y H, Yang L X, Chen J M, *et al.* Characteristics of ambient volatile organic compounds and the influence of biomass burning at a rural site in Northern China during summer 2013 [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **124**: 156-165.
- [25] Czech H, Miersch T, Orasche J, *et al.* Chemical composition and speciation of particulate organic matter from modern residential small-scale wood combustion appliances [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **612**: 636-648.
- [26] Keywood M, Kanakidou M, Stohl A, *et al.* Fire in the air: Biomass burning impacts in a changing climate [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2013, **43** (1): 40-83.
- [27] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. *Chemical Review*, 2003, **103** (12): 4605-4638.
- [28] Atkinson R, Baulch D L, Cox R A, *et al.* Evaluated kinetic and photochemical data for atmospheric chemistry: volume II - gas phase reactions of organic species [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6** (11): 3625-4055.
- [29] 王倩, 王红丽, 周来东, 等. 成都市夏季大气挥发性有机物污染及其对二次有机气溶胶生成的贡献 [J]. *环境污染与防治*, 2015, **37** (7): 6-12.
Wang Q, Wang H L, Zhou L D, *et al.* Pollution of volatile organic compounds and their contribution to the secondary organic aerosol formation in summer of Chengdu [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2015, **37** (7): 6-12.
- [30] Pacifico F, Folberth G A, Jones C D, *et al.* Sensitivity of biogenic isoprene emissions to past, present, and future environmental conditions and implications for atmospheric chemistry [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117** (D22): D22302.
- [31] Guo H, Ling Z H, Simpson I J, *et al.* Observations of isoprene, methacrolein (MAC) and methyl vinyl ketone (MVK) at a mountain site in Hong Kong [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117** (D19): D19303.
- [32] Singh H B, Salas L J, Chatfield R B, *et al.* Analysis of the atmospheric distribution, sources, and sinks of oxygenated volatile organic chemicals based on measurements over the Pacific during TRACE-P [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2004, **109** (D15): D15S07.
- [33] 陈天增, 葛艳丽, 刘永春, 等. 我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响 [J]. *环境科学*, 2018, **39** (2): 479-492.
Chen T Z, Ge Y L, Liu Y C, *et al.* VOCs emission from motor

- vehicles in China and its impact on the atmospheric environment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 479-492.
- [34] Mo Z W, Shao M, Lu S H. Compilation of a source profile database for hydrocarbon and OVOC emissions in China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **143**: 209-217.
- [35] 王红丽, 杨肇勋, 景盛翱. 工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2617-2628.
- Wang H L, Yang Z X, Jing S A. Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of industrial processing and solvent use emissions: A Review [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2617-2628.
- [36] Chen W T, Shao M, Lu S H, *et al.* Understanding primary and secondary sources of ambient carbonyl compounds in Beijing using the PMF model [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(6): 3047-3062.
- [37] Cheng Y, Lee S C, Huang Y, *et al.* Diurnal and seasonal trends of carbonyl compounds in roadside, urban, and suburban environment of Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 43-51.
- [38] Lyu X P, Guo H, Simpson I J, *et al.* Effectiveness of replacing catalytic converters in LPG-fueled vehicles in Hong Kong [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(10): 6609-6626.
- [39] Guo H, So K L, Simpson I J, *et al.* C₁-C₈ volatile organic compounds in the atmosphere of Hong Kong: Overview of atmospheric processing and source apportionment [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(7): 1456-1472.
- [40] Lyu X P, Chen N, Guo H, *et al.* Ambient volatile organic compounds and their effect on ozone production in Wuhan, central China [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **541**: 200-209.



CONTENTS

Patterns of Mortality from Air Pollutant Emissions in China's Coal-fired Power Plants	QIN Yu, ZHANG Qiang, LI Xin, <i>et al.</i> (5289)
Analysis of the Temporal and Spatial Variation of PM _{2.5} in China Based on the LUR Model	LIU Bing-jie, PENG Xiao-min, LI Ji-hong (5296)
Physicochemical Properties of the Aerosol Particles and Their Impacts on Secondary Aerosol Formation at the Background Site of the Yangtze River Delta	 HUANG Dan-dan, ZHOU Min, YU Chuan-guan, <i>et al.</i> (5308)
Analysis of Different Particle Sizes, Pollution Characteristics, and Sources of Atmospheric Aerosols During the Spring Dust Period in Beijing	YANG Yang, LI Xing-ru, CHEN Xi, <i>et al.</i> (5315)
Characteristics of Ambient VOCs at the Shuangliu Site in Chengdu, China, During Summer and Autumn	DENG Yuan-yuan, LI Jing, LI Ya-qi, <i>et al.</i> (5323)
Source Profiles and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Surface Coating of Aluminum Products in Foshan, China	LI Xia, SU Wei-jian, LI Bi-xia, <i>et al.</i> (5334)
Emission Inventory and Characteristics of Anthropogenic Air Pollutant Sources in the Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (5344)
Characteristics of Particulate Matter Emissions from the Coking Process	WANG Yan-hui, ZHAO Liang, SUN Wen-qiang, <i>et al.</i> (5359)
Dry and Wet Deposition of Atmospheric Nitrogen in Small Catchments	WANG Huan-xiao, PANG Shu-jiang, WANG Xiao-yan, <i>et al.</i> (5365)
Seasonal Changes of the Pathways of Nitrogen Export from an Agricultural Watershed in China	LI Wen-chao, LEI Qiu-liang, ZHAI Li-mei, <i>et al.</i> (5375)
Dynamics and Runoff Losses of Nitrogen in Paddy Field Surface Water Under Combined Application of Biochar and Slow/Controlled-Release Fertilizer	 SI Lin-lin, ZHOU Jing-jie, WU Liang-huan, <i>et al.</i> (5383)
Indirect Nitrous Oxide Emissions from an Agricultural Headwater Stream During the Rainy Season in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, ZHU Bo (5391)
Concentration, Flux, and Emission Factor of N ₂ O in Rivers with Different Nitrogen Pollution Features	WANG Miao, LI Ya-feng, LEI Kun, <i>et al.</i> (5400)
Identification of Nitrate Pollution Sources Through Various Isotopic Methods: A Case Study of the Huixian Wetland	PENG Cong, PAN Xiao-dong, JIAO You-jun, <i>et al.</i> (5410)
Temporal and Spatial Distribution of the Soil Water δD and $\delta^{18}O$ in a Typical Karst Valley: A Case Study of the Zhongliang Mountains, Chongqing City	 WU Wei, JIANG Yong-jun, JIA Ya-nan, <i>et al.</i> (5418)
Hydrochemical Characteristics of Groundwater and the Origin in Alluvial-proluvial Fan of Qinhe River	LIU Jiang-tao, CAI Wu-tian, CAO Yue-ting, <i>et al.</i> (5428)
Impact of Maximum Precipitation in 2017 on the Runoff Component of Reclaimed Water-Intaking River	LIAO An-ran, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (5440)
Spectral Evolution Characteristics of DOM in Sediment Interstitial Water During the Formation Stage of Thermal Stratification in the Main Reservoir Area of the Zhoucun Reservoir	 ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (5451)
Pollution Characteristic of Ni in Sediments in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Wei-jie, YIN Shu-hua, XU Dong-yu, <i>et al.</i> (5464)
Migration and Transformation of Mercury at Sediment-Water Interface of the Dahong Lake Reservoir in the Simian Mountains	GUO Pan, SUN Tao, YANG Guang, <i>et al.</i> (5473)
Effects of Wetland Types on Distribution of Soil Methylmercury Based on the Region of Nanweng River in the Greater Xing'an Mountains	ZHOU Xin-quan, LIU Yu-rong, LI Jing, <i>et al.</i> (5480)
Simulation of the Migration and Release Characteristics of Organophosphate Esters in Fluctuation Zone Soil of the Three Gorges Reservoir During Flooding	 YANG Ting, HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5487)
Spatial Distribution of Perfluoroalkyl Acids and Transformation of Their Precursors in River Water Samples and Effluents of Wastewater Treatment Plants in a Typical Tourism City	 WANG Shi-liang, SUN Jian-shu, YANG Yue-wei, <i>et al.</i> (5494)
Purification Efficiency and Microbial Characteristics of Four Biofilters Operated Under Different Conditions	JIANG Xiao-liang, LI Meng, ZHANG Shao-hui, <i>et al.</i> (5503)
Effects of Manganese on the Growth and Fluorescence Induction Kinetics of <i>Conticribra weisflogii</i>	WANG Mu-lan, JIANG Yue-lu (5514)
Distribution and Factors Affecting <i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> in Guangdong Reservoirs	LEI Min-ting, PENG Liang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (5523)
Removal of Humic Acid from Water by Magnetic Chitosan-Grafted Polyacrylamide	YOU Wen, LIU Hai-cheng, CAO Jia-wei, <i>et al.</i> (5532)
Ozone-Biological Activated Carbon for Advanced Removal of Typical Persistent Organic Pollutants from Micro-Polluted Source Water in the Yangtze Delta Region	 LAN Ya-qiong, LIU Rui, MA Zheng-jie, <i>et al.</i> (5541)
Color and Nitrogen Removal from Synthetic Dye Wastewater in an Integrated Hydrolysis/Acidification and Anoxic/Aerobic Process	GU Meng-qi, YIN Qi-dong, LIU Ai-ke, <i>et al.</i> (5550)
Removal Characteristics of High Concentrations of Perchlorate Using a "Heterotrophic Sulfur Autotrophic" Combination Process	LIU Ying-nan, TAO Hua-qiang, SONG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5558)
Rapid Start-up of a Nitrite-Dependent Methane Anaerobic Oxidation Reaction Under Static Pressure Conditions	WANG Yi-nan, HU Zhen, RU Dong-yun, <i>et al.</i> (5565)
Optimization of the Flow Distribution Ratio and Mechanism of Nitrogen Removal in a Multi-level AO Coupled Flow Biochemical Process	WANG Fan, LI Jun, BIAN De-jun, <i>et al.</i> (5572)
High-rate Nitrogen Removal in a Two-stage Partial Nitrification-ANAMMOX Process Under Mainstream Conditions	LIU Wen-ru, YANG Dian-hai, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (5580)
Effects of Different Substrate Concentrations on the Short-term Storage of ANAMMOX Bacteria	GAO Xue-jian, ZHANG Jie, LI Dong, <i>et al.</i> (5587)
Optimization of the Mainstream Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Changes of the Microbial Community	FU Kun-ming, FU Chao, LI Hui, <i>et al.</i> (5596)
Granular Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Sludge During the Recovery Process	CHEN Fang-min, GU Cheng-wei, HU Yu-ting, <i>et al.</i> (5605)
Characterization of a Newly Isolated Strain <i>Pseudomonas</i> sp. N3 for Denitrification at Low Temperature	LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, XIAO Lin (5612)
Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk of Soil from Reclaimed Industrial Sites and Surrounding River Sediments	WU Jian, WANG Min, ZHANG Hui-peng, <i>et al.</i> (5620)
Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals for Different Types of Land Use and Evaluation of Human Health	LI Chun-fang, CAO Jian-fei, LÜ Jian-shu, <i>et al.</i> (5628)
Soil Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of As at a Large-scale Arsenic Slag-contaminated Site	LIU Geng, SHI Ying, TIAN Hai-jin, <i>et al.</i> (5639)
Relationship Between the Bacterial Abundance and Production with Environmental Factors in a Subtropical Karst Reservoir	XIN Sheng-lin, LIANG Yue-ming, PENG Wen-jie, <i>et al.</i> (5647)
Structure Analysis of Arbuscular Mycorrhizal in Roots from Different Shrubs in Karst Regions	LIANG Yue-ming, SU Yi-rong, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (5657)
Effects of Stimulated Nitrogen Deposition on the Bacterial Community Structure of Semiarid Temperate Grassland	LI Zong-ming, SHEN Ju-pei, ZHANG Li-mei, <i>et al.</i> (5665)
Effect of Phosphorus Addition on the Abundance of Autotrophic CO ₂ -Fixation Microorganisms in Rhizospheric Soil from a Phosphorus-Limited Paddy Field	 BAI Jing, LI Yi-fei, LIU Shou-long, <i>et al.</i> (5672)
Effects of Varying Long-term Fertilization on Organic Carbon Mineralization and Priming Effect of Paddy Soil	MA Xin, WEI Liang, TANG Mei-liang, <i>et al.</i> (5680)
Relationship Between the Vegetation Community and Soil Nutrient and Enzyme Activity During the Restoration of Abandoned Land in the Loess Hilly Region	 QIAO Wen-jing, DAI Yin-yue, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (5687)
Degradation of Pentachlorophenol by Fulvic Acid in a Municipal Solid Waste Landfill	LIU Si-jia, HE Xiao-song, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (5699)
Effect of CO ₂ Doubling and Different Plant Growth Stages on Rice Carbon, Nitrogen, and Phosphorus and Their Stoichiometric Ratios	 TANG Mei-ling, XIAO Mou-liang, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (5708)
Assessment of Medical Waste Disposal Technologies Based on the AHP	XU Xiao-fang, TAN Quan-yin, LIU Li-li, <i>et al.</i> (5717)
Livestock and Poultry Faeces Nitrogen Loading Rate and Its Potential Return to Farmland in China	LIU Xiao-yong, WANG Xiu-bin, LI Shu-tian (5723)