

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心  
■ 出版 科学出版社



**2020**

Vol.41 No.7  
第41卷 第7期

目次

|                                                                    |                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 中国钢铁行业大气环境影响 .....                                                 | 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981) |
| 华北地区大气细颗粒物(PM <sub>2.5</sub> )年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 .....            | 杨伟, 姜晓丽 (2995)                                                      |
| 郑州市民运会期间大气PM <sub>2.5</sub> 改善效果评估 .....                           | 王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)                                 |
| 成都夏冬季PM <sub>2.5</sub> 中水溶性无机离子污染特征 .....                          | 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)                                   |
| 川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 .....                                    | 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)                          |
| 四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 .....                                            | 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)                                        |
| 成都市工业挥发性有机物排源成分谱 .....                                             | 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)                   |
| 郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估 .....                                       | 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)                                  |
| 阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 .....                                  | 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)                    |
| 典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 .....                                 | 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)                        |
| 华北地区典型重工业城市夏季近地面O <sub>3</sub> 污染特征及敏感性 .....                      | 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)                         |
| 稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 .....                                         | 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)               |
| 苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 .....                                          | 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)                         |
| 轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 .....                                            | 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)      |
| 非超低与超低排放煤电机组启动过程NO <sub>x</sub> 排放特征对比分析 .....                     | 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)                  |
| 邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 .....                                      | 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)                                             |
| 叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 .....                                         | 魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)                                                  |
| 关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 .....                                        | 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)                                  |
| 岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 .....                                             | 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)                                   |
| 木沥河流域氮素污染及其污染源解析 .....                                             | 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)                                             |
| 辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 .....                                        | 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)                                        |
| 鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 .....                                         | 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)                              |
| 象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 .....                                    | 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)                                |
| 乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 .....                                  | 张慧, 王世亮, 余杨 (3204)                                                  |
| 连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 .....                                    | 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)                              |
| 茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 .....                                      | 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)                                 |
| 金盆水库沉积物铁锰释放规律 .....                                                | 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)                               |
| 城市湖泊沉积物微塑料污染特征 .....                                               | 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)                                         |
| 西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 .....                                         | 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)                                   |
| 海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响 .....                                          | 王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)                                                  |
| 梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 .....                                         | 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)                                           |
| 宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 .....                                         | 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)                                   |
| 分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控 .....                                        | 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)                            |
| 长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 .....                                    | 毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)                              |
| 供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 .....                                         | 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)                                 |
| 碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 .....                                  | 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)                             |
| 弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe <sup>0</sup> /WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制 ..... | 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)                                        |
| 一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素 .....                                            | 廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)                         |
| 生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征 .....                                     | 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)                                             |
| 低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 .....                                     | 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)                                    |
| 羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 .....                                              | 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)                           |
| 低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 .....                                            | 高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)                           |
| 我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 .....                                         | 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)                                        |
| 城镇河流CO <sub>2</sub> 及CH <sub>4</sub> 排放与市政排水管网污水输入的关联影响 .....      | 李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)                           |
| 控释尿素对黄河故道沙性潮土N <sub>2</sub> O排放的影响 .....                           | 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)                                       |
| 我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 .....                                           | 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)                                            |
| 不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异 .....                                   | 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)                                |
| 锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响 .....                            | 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)                                        |
| 钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 .....                                       | 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)                                        |
| 叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 .....                            | 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)                                 |
| 《环境科学》征订启事 (3011)                                                  | 《环境科学》征稿简则 (3084)                                                   |
| 信息 (3174, 3185, 3391)                                              |                                                                     |

# 典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性

景盛翱<sup>1</sup>, 叶旭红<sup>2</sup>, 高雅琴<sup>1</sup>, 彭亚荣<sup>1,3</sup>, 李英杰<sup>1</sup>, 王倩<sup>1</sup>, 沈建东<sup>2</sup>, 王红丽<sup>1\*</sup>

(1. 上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 2. 杭州市环境监测中心站, 杭州 310007; 3. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433)

**摘要:** 在2018年9月14~23日选取了典型光化学污染期间, 在长三角重点城市杭州市城区开展大气中挥发性有机物(VOCs)的加密观测。对80个有效样品分析结果表明, 观测期间大气VOCs的122种化合物平均体积分数为 $(59.5 \pm 19.8) \times 10^{-9}$ , 含氧化合物(OVOC)是其中最主要的组分。用臭氧生成潜势(OFP)评估大气反应活性结果表明, 观测期间OFP平均值为 $145 \times 10^{-9}$ , 其中贡献最大的是芳烃和醛酮化合物。其大气VOCs整体活性水平与丙烯腈相当。运用正交矩阵因子(PMF)模型对VOCs进行源解析后, 识别出杭州市大气VOCs的5个主要污染源, 分别为二次生成(25.2%)、燃烧及工艺过程(27.2%)、溶剂使用(17.3%)、天然源(9.2%)和机动车排放(21.2%)。本研究结果可为深入掌握杭州市VOCs污染特征以及科学制定防控措施提供技术支撑。

**关键词:** 挥发性有机物(VOCs); 污染特征; 反应活性; 来源解析; 杭州

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3076-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201911187

## Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode

JING Sheng-ao<sup>1</sup>, YE Xu-hong<sup>2</sup>, GAO Ya-qin<sup>1</sup>, PENG Ya-rong<sup>1,3</sup>, LI Ying-jie<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, SHEN Jian-dong<sup>2</sup>, WANG Hong-li<sup>1\*</sup>

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of Urban Air Pollution Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. Hangzhou Environmental Monitoring Central Station, Hangzhou 310007, China; 3. Department of Environmental Science & Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China)

**Abstract:** An intensive observation of ambient volatile organic compounds (VOCs) was carried out in Hangzhou, a key city in the Yangtze River Delta, during a typical photochemical pollution episode from September 14-23, 2018. The analysis results of 80 effective samples showed that the average concentration of 122 compounds of VOCs was  $(59.5 \pm 19.8) \times 10^{-9}$  during the observation period, and oxygenated VOCs (OVOCs) were the most abundant component. The assessment results of atmospheric reaction activity with ozone formation potential (OFP) showed that the average value of OFP was  $145 \times 10^{-9}$  during the observation period, of which alkenes and carbonyl compounds were the most abundant components. The chemical reactivity of VOCs in Hangzhou was equivalent to acrylonitrile. Based on the positive matrix factorization (PMF) model, five major sources of VOCs in Hangzhou were identified, including secondary formation (25.2%), combustion and industrial processing (27.2%), solvent use (17.3%), biogenic sources (9.2%), and vehicular exhaust (21.2%). The results can provide guidance for further understanding of VOC characteristics and the basis for scientific prevention and control measures in Hangzhou.

**Key words:** volatile organic compounds (VOCs); characteristics; reactivity; source apportionment; Hangzhou

近年来随着环境保护工作的深入开展, 城市大气环境质量持续改善, 长三角城市进入细颗粒物和臭氧并重的大气环保工作新阶段。挥发性有机化合物(VOCs)作为细颗粒物和臭氧的共同前体物, 相关研究和防控工作近年被放在突出的地位。挥发性有机物的研究在京津冀<sup>[1,2]</sup>、长三角地区<sup>[3]</sup>和珠三角地区<sup>[4]</sup>开展较多, 武汉<sup>[5]</sup>和石家庄<sup>[6]</sup>等地也有报道, 而作为长三角重点城市的杭州, 相关研究数量仍不多<sup>[7]</sup>。

对于VOCs的观测方法, 一种是使用在线气相色谱等方法开展较长时间的连续采样, 另一种是使用钝化的不锈钢罐开展离线采样, 再送实验室分析。

在线监测的优点是数据时间分辨率高, 但一般气相色谱法能分辨的化合物种类较少, 通常只关注57种臭氧前驱化合物, 若使用气质联用仪能大大提高分析化合物的数量, 但材料和人力消耗较高。罐采样通常能覆盖较多的点位, 适合做VOCs的空间分布, 实验室通常使用气质联用仪分析, 能分析的化合物数

收稿日期: 2019-11-21; 修订日期: 2020-02-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0209801); 国家自然科学基金项目(21607104); 上海市科委项目(18QA1403600); 上海市浦江人才计划项目(18PJ1431400); 上海市自然科学基金项目(18ZR1432100)

作者简介: 景盛翱(1982~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为大气挥发性有机物测量及来源, E-mail: jingsa@saes.sh.cn

\* 通信作者, E-mail: wanghl@saes.sh.cn

量较多,但是数据时间分辨率通常较低,且采样时对于人力的投入和素质要求较高。

本研究在典型臭氧污染期间开展挥发性有机物的连续观测,结合风向风速及氮氧化物、臭氧等常规污染物信息,分析了挥发性有机物的污染特征、臭氧生成潜势和污染来源等,以期为深入掌握杭州市城区挥发性有机物特征并开展科学防控提

供依据。

## 1 材料与方法

采样点位于杭州市下城区朝晖四区内普通民居 7 楼楼顶,  $120^{\circ}10'38''\text{E}$ ,  $30^{\circ}17'29''\text{N}$ , 高度约 20 m. 为典型城区居住区域点位,周边无明显污染源. 采样点位示意图见图 1。



图1 采样点位示意

Fig. 1 Location of observation site

观测时段为 2018 年 9 月 14 ~ 23 日,连续 10 d,使用钝化的不锈钢罐结合 ENTECH 1900 自动留样仪连续采样,采样间隔为 3 h,具体采样时段为每天 00:00 ~ 03:00、03:00 ~ 06:00、06:00 ~ 09:00、09:00 ~ 12:00、12:00 ~ 15:00、15:00 ~ 18:00、18:00 ~ 21:00 和 21:00 ~ 24:00,除去平行样和空白样等质控样品外,实际采集 80 个有效环境大气样品。

使用安捷伦 7890A-5975C 气质联用仪分析,液氮制冷经由 ENTECH 7200 预浓缩系统进样,配合微流平板控制的 Dean-switch 中心切割技术,使得乙烷、乙烯、乙炔、丙烷和丙烯在 FID 检测器上检测,其余目标化合物在 MS 检测器上检测. FID 色谱柱为 PLOT(Al/KCl),  $30\text{ m} \times 0.25\text{ mm} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ ; MS 色谱柱为 BD-624,  $60\text{ m} \times 0.25\text{ mm} \times 1.4\text{ }\mu\text{m}$ . FID 保留时间定性,外标法定量; MS 用全扫描(SCAN)模式分析,保留时间及质荷比信息定性,内标法定量. 质控要求:分析时每天分析 1 个体积分数为  $2 \times 10^{-9}$  的臭氧前驱物(PAMS)标气及 1 个样品平行样,偏差应不大于 10%。

分析目标化合物为美国光谱公司产标气,包括臭氧前驱物标气(PAMS)、美国环保署 TO-15 标气及定制标气( $\alpha$ -蒎烯、 $\beta$ -蒎烯、柠檬烯、丙醛、异丁烯醛、正丁醛、正戊醛、正己醛、甲基乙烯基酮、2-戊酮、3-戊酮、乙酸甲酯、乙酸正丙酯、乙酸正丁酯、乙酸异戊酯和乙腈),共 122 种挥发性有机化合物。

通过相同地点的大气环境监测站获得气象要素参数和常规气体参数,其中  $\text{NO}$ - $\text{NO}_2$ - $\text{NO}_x$  使用热电

公司 42i 氮氧化物分析仪分析, $\text{O}_3$  使用热电公司 49i 紫外光度法臭氧分析仪分析. 上述仪器连续 24 h 在线监测,每 5 min 读取 1 次数据. 通过定期校正、精度检查等方法保证数据准确性。

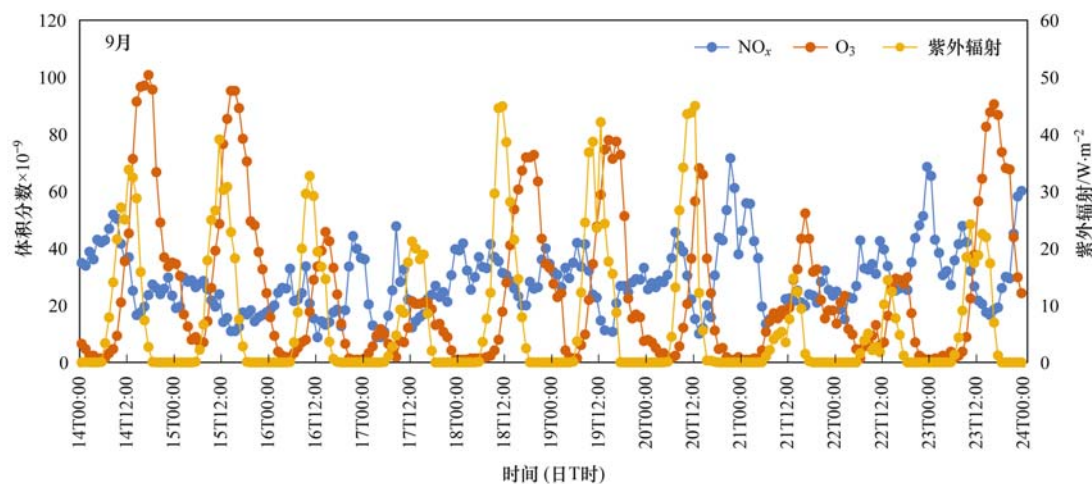
## 2 结果与讨论

### 2.1 观测期间 $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$ 和紫外辐射水平

观测期间平均温度为  $27.2^{\circ}\text{C}$ ,最高温度达到  $35.3^{\circ}\text{C}$ . 观测期间主导风向为南风,平均风速为  $0.9\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . 观测期间  $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  和辐射水平的时间序列见图 2,其中  $\text{O}_3$  的体积分数在  $(0.9 \sim 101) \times 10^{-9}$ ,峰值出现在 9 月 14 日 17:00,9 月 15 日和 9 月 23 日臭氧体积分数也较大,高值均超过  $90 \times 10^{-9}$ ,臭氧峰值时段一般出现在每日 14:00 ~ 17:00,峰值时段出现的时间略晚于之前的报道<sup>[8,9]</sup>. 观测期间  $\text{NO}_x$  的体积分数在  $(8.8 \sim 71.6) \times 10^{-9}$ ,平均值为  $28.6 \times 10^{-9}$ . 紫外辐射水平最高值为  $45\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,出现在 9 月 20 日 12:00,9 月 18 ~ 20 日的中午 12:00 连续出现紫外辐射高值,紫外辐射值的变化趋势与臭氧的体积分数变化一致性较好,且臭氧的日最大浓度值一般出现在紫外辐射最大值之后的 2 ~ 4 h 后,这是因为臭氧作为典型二次污染物在大气中需要一定的转化生成时间。

### 2.2 观测期间 VOCs 组成特征

观测期间 VOCs 中各组分的时间序列如图 3 所示,观测期间 VOCs 的体积分数范围为  $(13.7 \sim 133) \times 10^{-9}$ ,平均值为  $(59.5 \pm 19.8) \times 10^{-9}$ ,对应质量浓

图2 观测期间  $\text{NO}_x$ 、 $\text{O}_3$  和辐射水平的时间序列Fig. 2 Time series of  $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ , and UV radiation during the observation period

度平均值为  $(190 \pm 67.8) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 其中非甲烷烃的平均体积分数为  $(21.7 \pm 7.9) \times 10^{-9}$ , 质量浓度平均值为  $(60.9 \pm 23.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . 观测期间 VOCs 浓度有 2 个高值, 分别出现在 9 月 14 日 21:00 和 9 月 18 日 21:00, 而 9 月 17 日 03:00 因为降雨获得本次观测的最低值. 观测期间各组分平均值分别为烷烃  $13.2 \times 10^{-9}$ 、烯烃  $2.0 \times$

$10^{-9}$ 、炔烃  $1.5 \times 10^{-9}$ 、芳烃  $4.9 \times 10^{-9}$ 、卤代烃  $8.3 \times 10^{-9}$ 、醛酮化合物  $15.6 \times 10^{-9}$  和其它 OVOC  $14.0 \times 10^{-9}$ . 本次观测非甲烷烃的质量浓度显著低于 2006 年同时段同点位的观测数据<sup>[10]</sup> (约  $140 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ), 也低于 2015 年秋季上海城区观测结果<sup>[11]</sup> (VOCs  $63.6 \times 10^{-9}$ , 非甲烷碳氢化合物  $42.9 \times 10^{-9}$ ).

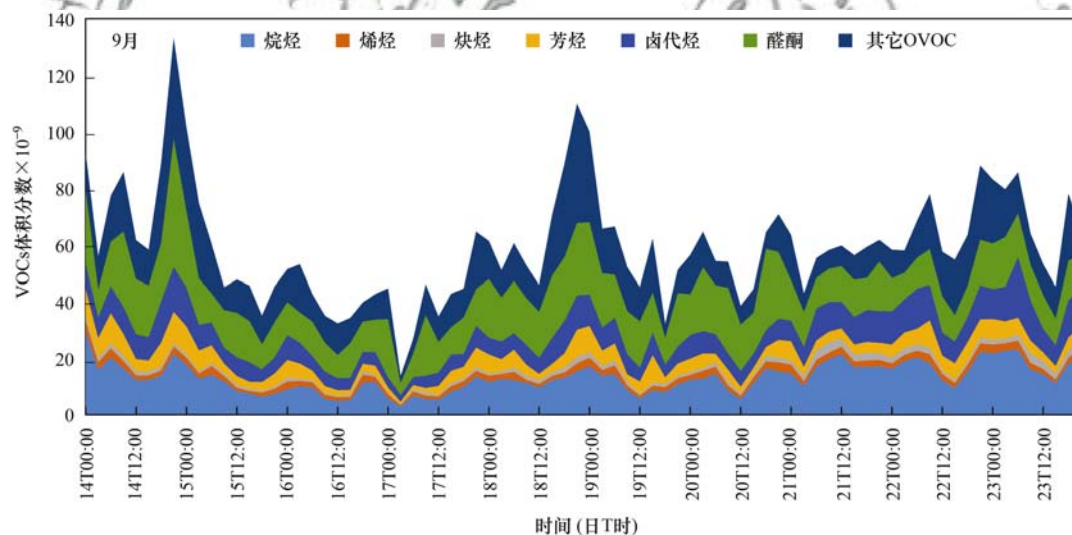


图3 观测期间 VOCs 中各组分的时间序列

Fig. 3 Time series of the mixing ratios of VOCs components

从图 4 的 VOCs 组成的日变化可见, 观测期间 VOCs 浓度出现双峰变化特征, 第 1 个峰值出现在早上 06:00 ~ 09:00 时段, 第 2 个峰值出现在夜间 21:00 ~ 24:00 时段, 且夜间的峰值浓度高于早上的. 白天出现体积分数高值 ( $59.8 \times 10^{-9}$ ) 的时间与早高峰出行时间一致, 该浓度水平也与晚高峰的体积分数水平 ( $59.4 \times 10^{-9}$ ) 相当, 判断杭州朝晖站点受到机动车排放的影响, 而夜间出现体积分数高值是因为大气边界层下降, 晚高峰排放的污染物持续

累积造成的. VOCs 的日变化受到排放强度、光化学反应和边界层厚度等因素的共同作用, 3 h 的时间分辨率仍嫌偏低, 有条件时可以进一步加密.

### 2.3 VOCs 反应活性特征

常用臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 来定量估算挥发性有机物的对臭氧生成的相对贡献, 通过 OFP 的相对大小, 可以识别对臭氧生成贡献大的化合物种类, 再结合本地化源清单的信息, 进而确定该地区优先控制的行业类别. OFP 的计

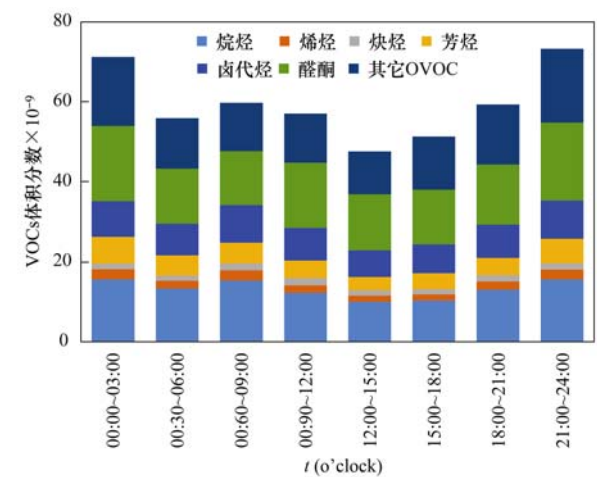


图4 观测期间 VOCs 组成的日变化

Fig. 4 Diurnal variation of the mixing ratios of VOCs components

算方法为某种挥发性有机物的环境浓度与该物种的最大增量反应活性常数 (maximum increment

reactivity, MIR) 的乘积. 其公式为:

$$OFP = \sum OFP_i = \sum ([VOC_i] \times MIR_i)$$

式中,  $OFP_i$  为 VOCs 组分  $i$  的臭氧生成潜势, 单位:  $10^{-9}$ ;  $[VOC_i]$  为 VOCs 组分  $i$  的体积分数, 单位:  $10^{-9}$ ;  $MIR_i$  为组分  $i$  的最大增量反应活性常数, 以  $O_3/VOCs$  计, 本研究使用的 MIR 值来自 Carter 的修正<sup>[12]</sup>.

图5和图6展示了观测期间 VOCs 体积分数和 OFP 的组成, 以及相应排名前10的化合物. 其中各组分体积分数在总 VOCs 中的顺序依次是醛酮化合物 26%、其它 OVOC 24%、烷烃 22%、卤代烃 14%、芳烃 8%、烯烃和炔烃均为 3%. VOCs 体积分数前10化合物依次为丙酮、丙烷、乙酸乙酯、乙酸甲酯、二氯甲烷、异丙醇、乙烷、1,2-二氯乙烷、二硫化碳和正丁烷, 前10化合物合计占总 VOCs 的 55%.

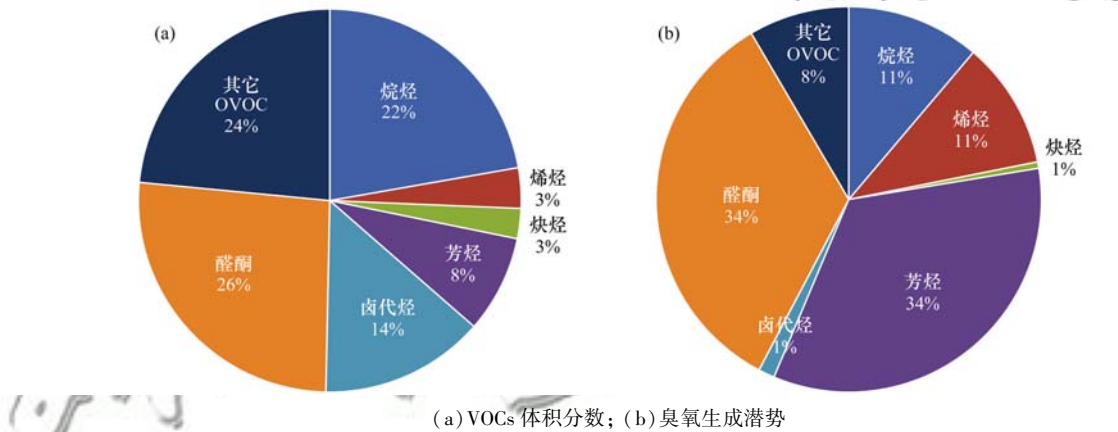


图5 观测期间 VOCs 体积分数和臭氧生成潜势的组成

Fig. 5 Composition of VOCs and OFP during the observation period

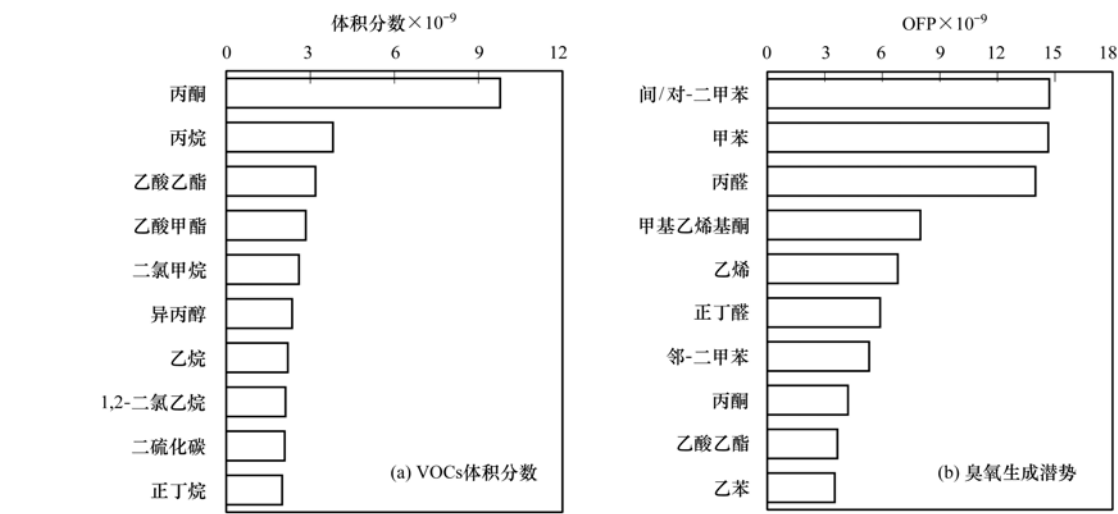


图6 观测期间 VOCs 体积分数和臭氧生成潜势前10的物种

Fig. 6 Top 10 species in VOCs and OFP during the observation period

本次观测获得的 OFP 平均值为  $145 \times 10^{-9}$ , 其中贡献最大的组分是芳烃和醛酮化合物, 二者贡献均占总 OFP 的 34%, 其次是烷烃和烯烃, 二者贡献

均为 11%, 其它 OVOC 贡献 8%. 对 OFP 贡献前10化合物依次为间/对-二甲苯、甲苯、丙醛、甲基乙基酮、乙烯、正丁醛、邻-二甲苯、丙酮、乙酸乙酯和乙

苯,前 10 化合物合计占总 OFP 的 56%.对比观测期间的臭氧体积分数(最高为  $101 \times 10^{-9}$ ),可以发现相关前体物还是有很大的转化生成臭氧的潜力,这与上海的研究结果一致<sup>[13]</sup>.对比发现杭州烯烃在 OFP 中占比贡献显著低于南京的情形<sup>[14]</sup>.

对比图 5 可见,就臭氧生成潜势而言,芳烃、烯烃和醛酮化合物的贡献将会扩大,其中芳烃占比从 8% 扩大到 34%,烯烃占比从 3% 扩大到 11%,醛酮化合物占比从 26% 扩大到 34%;而其它 OVOC、烷烃、卤代烃的贡献被缩小;其中其它 OVOC 占比从 24% 减小到 8%,烷烃占比从 22% 减小到 11%,卤代烃占比从 14% 减小到 1%;这种缩放关系直接与相应化合物的 MIR 系数相关,更是反映了控制城市大气臭氧问题应该关注的重点——大气反应活性高的醛酮化合物、芳烃和烯烃.考虑到各组分不同的大气化学消耗以及醛酮化合物较高二次转化的特征,大气中 VOCs 各组分对于 OFP 的贡献情况值得继续研究.

对比图 6 发现除了丙酮和乙酸乙酯外,2 个前 10 化合物清单中再无重复出现的化合物,说明杭州大气中体积分数高的化合物与对臭氧生成贡献大的化合物差异性较大.延伸开来可以得出若要开展某地区的大气环境质量提升工作,应有必要针对排放浓度和大气反应活性分别建立控制清单,以便更具科学性地开展减排工作.

为了评价某地区的大气活性水平,可以将观测获得的 VOCs 体积分数与计算得到的 OFP 值进行拟合,进而得到 1 个平均的 MIR 值,与已知的各化合物 MIR 值比较后可知该地区的大气活性水平相当于何种化合物.因此,能分析定量的 VOCs 化合物数量越多越能全面地、准确地反映该地区的大气反应活性特征.

本次观测获得的 VOCs 的体积分数与 OFP 的拟合结果如图 7 所示,将 122 种化合物拟合后得到的平均 MIR 值(以  $O_3/VOCs$  计,下同)为 2.44,与丙烯腈的反应活性值相当(2.47),为与其它研究比较,将其中非甲烷烃组分单独进行拟合,进而得到的平均 MIR 值为 3.75,与苯乙烯的反应活性值相当(3.76).邵敏等<sup>[15]</sup>的研究表明,北京的大气活性高于乙烯,陈长虹等<sup>[16]</sup>的研究表明,上海的大气活性水平与乙烯相当,郑伟巍等<sup>[17]</sup>的研究结论也是与乙烯活性相当,均高于本研究的结果,其原因一方面是杭州市的排放结构中大气活性较高的烯烃和芳烃占比可能不如北京和上海这 2 座城市,而宁波化工排放的烯烃含量较高,另一方面可能是通过近几年大气污染源减排工作的持续推进,杭州市本地大气活

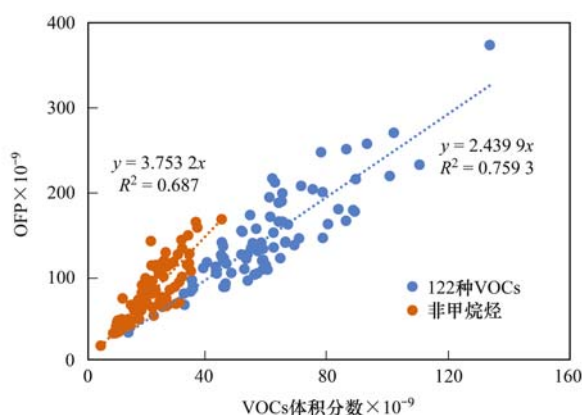


图 7 VOCs 体积分数和臭氧生成潜势的相关性

Fig. 7 Relationship between the mixing ratios of VOCs and OFP

性化合物的排放量可能已经显著低于之前的水平.

## 2.4 臭氧生成敏感性分析

使用 VOCs 与  $NO_x$  体积分数的比值,是判断某地区臭氧生成敏感性的经典方法<sup>[18]</sup>,若  $VOCs/NO_x$  的值  $< 5.5$ ,则判断该地区臭氧生成对 VOCs 更敏感;若  $VOCs/NO_x$  的值  $> 5.5$ ,则判断该地区臭氧生成对  $NO_x$  更敏感.

本次观测期间 VOCs(以碳计)体积分数与  $NO_x$  体积分数的相关性的拟合结果为 3.5(如图 8),小于 5.5 说明杭州城区属于典型的 VOCs 控制区.本次得到的杭州城区敏感性分析结果与在嘉善的研究较为一致<sup>[19]</sup>.

结合臭氧的体积分数分布发现,观测期间臭氧值大部分在  $40 \times 10^{-9}$  以下,这些数据点的 VOCs 体积分数分布范围较大,但是  $NO_x$  体积分数集中在  $20 \times 10^{-9}$  以上.而臭氧高值区域(大于  $70 \times 10^{-9}$ )集中分布在  $VOCs/NO_x$  比值大的区域,这些数据点的  $NO_x$  一般小于  $20 \times 10^{-9}$ .

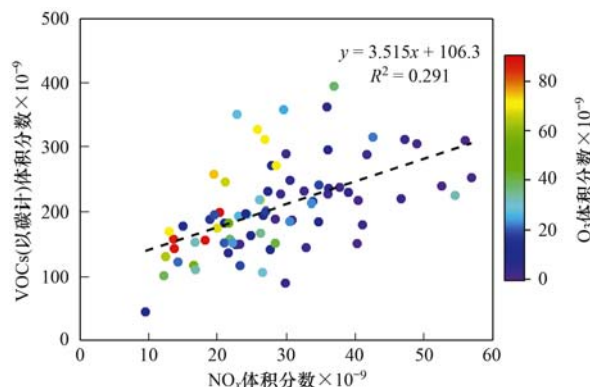


图 8 VOCs(以碳计)、 $NO_x$  与  $O_3$  体积分数的相关性

Fig. 8 Relationship between VOCs (counted by carbon atoms),  $NO_x$ , and  $O_3$

## 2.5 VOCs 与风速风向关系

将本次研究获得的 VOCs 数据与风向风速信息结合后作出的分布见图 9,从中可见观测期间整体

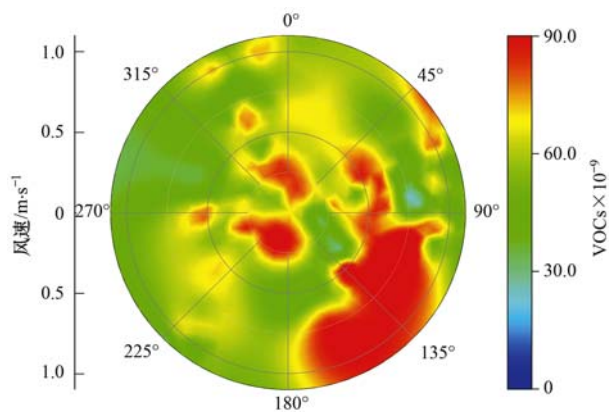


图9 VOCs 体积分数与风向风速的关系

Fig. 9 Relationship between VOCs and wind direction and wind speed

VOCs 浓度较高,基本都在  $30 \times 10^{-9}$  以上,结合本次

观测期间  $0.9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的平均风速说明观测期间大气整体呈现静稳态势,污染物扩散能力一般,而在东南方向出现浓度高值区,说明在东南风的作用下,朝晖站点 VOCs 浓度会升高,结合杭州行政区分布,推测污染可能来自杭州市萧山区.

2.6 VOCs 来源解析

大气 VOCs 对于臭氧和细颗粒物的生成有重要影响,所以对其来源的研究有重要意义,本研究使用美国环保署推荐的 PMF5.0 模型对获得 VOCs 数据进行来源解析工作,PMF 模型的原理详见文献[20, 21].

考虑到化合物示踪性和覆盖度后,在分析的 122 种化合物中选择 40 种具备较好代表性的化合物输入模型(图 10),经过模型多次拟合解析后最终

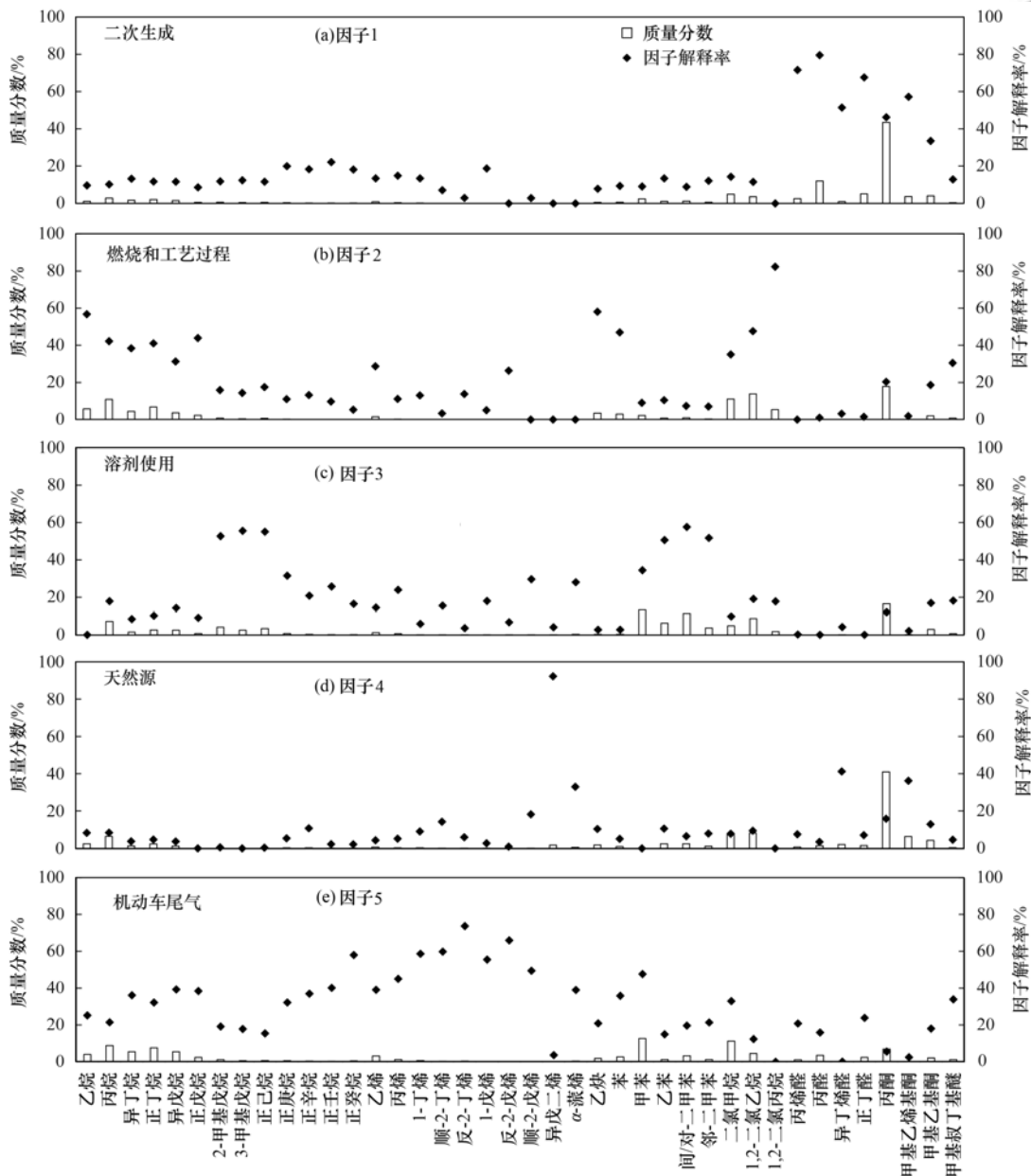


图10 本研究 PMF 解析出的各因子 VOCs 化学组成特征

Fig. 10 VOCs profiles of the resolved factors from the PMF in this study

确定 5 个比较合理的解析因子,各因子化学组成和相对贡献如图 10 所示。

其中因子 1 对于醛酮类化合物有较高的解释度,因为醛酮类化合物有显著的二次生成特征<sup>[22]</sup>,故将因子 1 识别为二次生成源。

因子 2 对于乙炔和苯的解释度较高,C2~C5 的烷烃质量占比和解释度也较高,符合不完全燃烧的特征;因子 2 对于二氯甲烷、1,2-二氯乙烷和 1,2-二氯丙烷有较高的解释度,一般认为卤代烃主要来自人为排放,精细化工和电子电路等相关产业使用较多,结合杭州工业特征,符合工艺过程源<sup>[23]</sup>的排放特征,故最后将因子 2 识别为燃烧和工艺过程源。

因子 3 中甲苯、乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯的质量占比和解释度最高,此类化合物均为常见的溶剂<sup>[24]</sup>,故将因子 3 识别为溶剂使用源。

因子 4 对于异戊二烯、 $\alpha$ -蒎烯解释度最高,同时异丁烯醛和甲基乙烯基酮也在这个因子中获得较高的解释度,异戊二烯、 $\alpha$ -蒎烯是重要的天然源识别因子,而异丁烯醛和甲基乙烯基酮又是异戊二烯重要的氧化产物,因此将因子 4 识别为天然源。

因子 5 中正壬烷、正癸烷、丁烯的异构体、戊烯的异构体、甲苯等均有较高的解释度<sup>[25]</sup>,另外作为汽油添加剂的甲基叔丁基醚在该因子中也有最高的解释度,故而将因子 5 识别为机动车排放<sup>[26]</sup>。

图 11 是识别出的各类源对于 VOCs 的平均贡献率,从中可见,本研究中识别的 5 个因子中,二次生成占 25.2%、燃烧和工艺过程占 27.2%、溶剂使用占 17.3%、天然源占 9.2% 和机动车占 21.2%。本次源解析结果与林燕芬等<sup>[27]</sup>在上海获得的结果基本类似。对比王倩等<sup>[28]</sup>在 2011 年秋季上海的研究结果发现,本次研究因为引入了醛酮类化合物的分析而多识别了二次生成源这 1 因子,而且浙江省及杭州市的绿化覆盖高于上海市,所以本次研究也多识别出了天然源的贡献,其他机动车、化工工艺和溶剂

使用等源类的识别及平均占比则差别不明显。

### 3 结论

(1)2018 年 9 月 14~23 日杭州加密观测期间,大气 VOCs 平均体积分数为  $(59.5 \pm 19.8) \times 10^{-9}$ ,非甲烷烃的平均体积分数为  $(21.7 \pm 7.9) \times 10^{-9}$ ,各类化合物占比贡献依次为醛酮化合物 26%、其它 OVOC 24%、烷烃 22%、卤代烃 14%、芳烃 8%、烯烃 3%、炔烃 3%。VOCs 体积分数前 10 化合物依次为丙酮、丙烷、乙酸乙酯、乙酸甲酯、二氯甲烷、异丙醇、乙烷、1,2-二氯乙烷、二硫化碳和正丁烷。

(2)活性分析结果表明,观测期间 OFP 平均值为  $145 \times 10^{-9}$ ,各类化合物对于 OFP 贡献依次为芳烃 34%、醛酮化合物 34%、烷烃 11%、烯烃 11%、其它 OVOC 8%。OFP 贡献前 10 化合物依次为间/对-二甲苯、甲苯、丙醛、甲基乙烯基酮、乙烯、正丁醛、邻-二甲苯、丙酮、乙酸乙酯和乙苯。杭州市朝晖站点大气平均活性水平与丙烯腈相当。

(3)臭氧生成敏感性分析表明朝晖站点具有明显城市属性,属于典型 VOCs 控制区。观测期间大气整体呈现静稳态势,在东南风时出现浓度高值,推测污染可能来自萧山区方向。

(4)观测所得 VOCs 浓度数据经 PMF 解析后识别出 5 个因子,其中二次生成占 25.2%、燃烧和工艺过程占 27.2%、溶剂使用占 17.3%、天然源占 9.2% 和机动车占 21.2%。

#### 参考文献:

- [1] 王琴,刘保献,张大伟,等.北京市大气 VOCs 的时空分布特征及化学反应活性[J].中国环境科学,2017,37(10):3636-3646.  
Wang Q, Liu B X, Zhang D W, et al. Temporal and spatial distribution of VOCs and their role in chemical reactivity in Beijing[J]. China Environmental Science, 2017, 37(10): 3636-3646.
- [2] 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.
- [3] 乔月珍,陈凤,赵秋月,等.2015 年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性[J].环境科学,2019,40(5):2062-2068.  
Qiao Y Z, Chen F, Zhao Q Y, et al. Composition and atmospheric reactivity of ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in the urban area of Nanjing, China[J]. Environmental Science, 2019, 40(5): 2062-2068.
- [4] Li L F, Wang X M. Seasonal and diurnal variations of atmospheric non-methane hydrocarbons in Guangzhou, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2012, 9(5): 1859-1873.
- [5] 沈龙娇,梁胜文,吴玉婷,等.武汉市居民区大气 VOCs 的污染特征和来源解析[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2018,10(5):527-535.

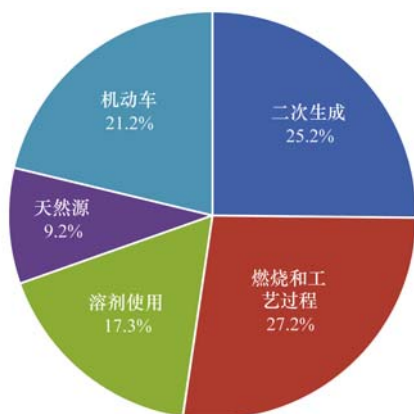


图 11 PMF 解析出各类源对 VOCs 的平均贡献率

Fig. 11 Percentages of various sources resolved from PMF

- Shen L J, Liang S W, Wu Y T, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of VOCs in ambient air of a residential area in Wuhan[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, **10** (5): 527-535.
- [6] 赵乐, 刘新军, 范莉茹, 等. 石家庄夏季典型时段臭氧污染特征及来源解析[J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(4): 78-84.
- Zhao L, Liu X J, Fan L R, *et al.* Pollution characteristic and source apportionment of VOCs during summer typical periods in Shijiazhuang[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35** (4): 78-84.
- [7] 李康为, 应方, 陈玲红, 等. 杭州市主城区 VOCs 污染特征及影响因素[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, **53**(4): 671-683.
- Li K W, Ying F, Chen L H, *et al.* Ambient VOCs characteristics and associated effects in urban Hangzhou [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2019, **53** (4): 671-683.
- [8] 陈超, 林旭, 叶辉, 等. 杭州市臭氧污染特征及过程分析[J]. *中国环境监测*, 2019, **35**(3): 73-81.
- Chen C, Lin X, Ye H, *et al.* Characteristics and process analysis of ozone pollution in Hangzhou [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2019, **35**(3): 73-81.
- [9] 齐冰, 牛彧文, 杜荣光, 等. 杭州市近地面大气臭氧浓度变化特征分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(2): 443-451.
- Qi B, Niu Y W, Du R G, *et al.* Characteristics of surface ozone concentration in urban site of Hangzhou [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(2): 443-451.
- [10] 洪盛茂, 焦荔, 何曦, 等. 杭州典型区域 C2-12 质量浓度变化及臭氧潜势量分析[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(8): 938-943.
- Hong S M, Jiao L, He X, *et al.* Variations in mass concentrations and ozone formation potentials of C2-12 hydrocarbons in typical areas of Hangzhou, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, **22**(8): 938-943.
- [11] 罗达通, 高健, 王淑兰, 等. 上海秋季大气挥发性有机物特征及污染物来源分析[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 987-994.
- Luo D T, Gao J, Wang S L, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and relative pollutants observed in autumn Shanghai[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 987-994.
- [12] Carter W P L. SAPRC chemical mechanisms, test simulations, and environmental chamber simulation files[EB/OL]. <https://www.cert.ucr.edu/~carter/SAPRC/SAPRCfiles.htm>, 2019-11-18.
- [13] 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 等. 上海城区典型臭氧污染 VOCs 特征及潜势分析[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, **23**(S1): 18-23.
- Cui H X, Wu Y M, Duan Y S, *et al.* VOCs Characteristics of ozone pollution and its potential in Shanghai Urban Area[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, **23**(S1): 18-23.
- [14] Xia L, Cai C J, Zhu B, *et al.* Source apportionment of VOCs in a suburb of Nanjing, China, in autumn and winter[J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2014, **71**(3): 175-193.
- [15] 邵敏, 付琳琳, 刘莹, 等. 北京市大气挥发性有机物的关键活性组分及其来源[J]. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 2005, **35**(S1): 123-130.
- Shao M, Fu L L, Liu Y, *et al.* Major reactive species of ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) and their sources in Beijing [J]. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 2005, **48** (S2): 147-154.
- [16] 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.
- [17] 郑伟巍, 毕晓辉, 吴建会, 等. 宁波市大气挥发性有机物污染特征及关键活性组分[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(12): 1411-1419.
- Zheng W W, Bi X H, Wu J H, *et al.* Pollution characteristics and key reactive species of ambient VOCs in Ningbo City[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(12): 1411-1419.
- [18] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] 邹巧莉, 孙鑫, 田旭东, 等. 嘉善夏季典型时段大气 VOCs 的臭氧生成潜势及来源解析[J]. *中国环境监测*, 2017, **33** (4): 91-98.
- Zou Q L, Sun X, Tian X D, *et al.* Ozone formation potential and sources apportionment of atmospheric VOCs during typical periods in summer of Jiashan[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, **33**(4): 91-98.
- [20] Norris G A, Vedantham R, Wade K, *et al.* EPA Positive Matrix Factorization (PMF) 3.0 fundamentals & user guide[EB/OL]. [https://cfpub.epa.gov/si/si\\_public\\_record\\_report.cfm?Lab=NERL&direntryid=199368](https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&direntryid=199368), 2008-09-22.
- [21] 王鸣, 项萍, 牛其恺, 等. 南阳市冬春交替期大气 VOCs 污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(6): 2233-2241.
- Wang M, Xiang P, Niu Q K, *et al.* Characteristics and source apportionment of ambient VOCs during alternating period between winter and spring in Nanyang City, Henan Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(6): 2233-2241.
- [22] Liu Y H, Wang H L, Jing S A, *et al.* Characteristics and sources of Volatile Organic Compounds (VOCs) in Shanghai during summer: implications of regional transport [J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **215**: 116902, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116902.
- [23] 景盛翱, 王红丽, 朱海林, 等. 典型工业源 VOCs 治理现状及排放组成特征[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3090-3095.
- Jing S A, Wang H L, Zhu H L, *et al.* Treatment status and emission characteristics of volatile organic compounds in typical industrial sources[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3090-3095.
- [24] Liu B S, Liang D N, Yang J M, *et al.* Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 757-769.
- [25] An J L, Wang J X, Zhang Y X, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds in an urban environment at the Yangtze River Delta, China[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, **72**(3): 335-348.
- [26] 应方, 包贞, 杨成军, 等. 杭州市道路空气中挥发性有机物及其大气化学反应活性研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32** (12): 3056-3064.
- Ying F, Bao Z, Yang C J, *et al.* Analysis of Volatile Organic Compounds (VOCs) and their atmospheric chemical reactivity in ambient air around urban traffic roads in Hangzhou[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(12): 3056-3064.

- [27] 林燕芬, 段玉森, 高宗江, 等. 基于 VOCs 加密监测的上海典型臭氧污染过程特征及成因分析[J]. 环境科学学报, 2019, 39(1): 126-133.

Lin Y F, Duan Y S, Gao Z J, *et al.* Typical ozone pollution process and source identification in Shanghai based on VOCs intense measurement[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39(1): 126-133.

- [28] 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.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8 000 字 (含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明 (在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站 ([www.hjkx.ac.cn](http://www.hjkx.ac.cn)) 进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果 (包括主要数据) 和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作 (引文即可) 和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg (毫克), m (米), h (小时) 等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:  
期刊: 作者 (外文也要姓列名前). 论文名 [J]. 期刊名, 年, 卷 (期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名 [M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名 [A]. 见 (In): 编者. 文集名 [C]. 出版地: 出版社 (单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名 [D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名 [R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名 [P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: [hjkx@rcees.ac.cn](mailto:hjkx@rcees.ac.cn); 网址: [www.hjkx.ac.cn](http://www.hjkx.ac.cn)

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                              |                                                                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China .....                                                                                                     | TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)                |
| Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change .....                                                         | YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)                                      |
| Evaluation of the Reduction in PM <sub>2.5</sub> Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou .....                                                 | WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)           |
| Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter .....                                                                                              | FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)  |
| Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province .....                                                         | LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)            |
| Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan .....                                                                                             | XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)              |
| Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu .....                                                                                                                           | ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)         |
| Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou .....                                                                         | QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)          |
| Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan .....                                                                    | NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)       |
| Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode .....                                                                                    | JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)         |
| Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer .....                                                         | OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)            |
| Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language .....                                                                           | GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)          |
| Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou .....                                                                                           | LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)       |
| Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode .....                                                                                  | XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)             |
| Comparative Analysis of NO <sub>x</sub> Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process .....                           | LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)                |
| Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City .....                                                        | SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)                |
| Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter .....                                                                                         | WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)                            |
| Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain .....                                                               | ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)       |
| Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin .....                                                                                                                       | TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)          |
| Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin .....                                                                                                       | QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)                  |
| Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors .....                                       | QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)            |
| Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake .....                                                      | WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)               |
| Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed .....                                                                                            | WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)             |
| Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China .....                                                          | ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)                           |
| Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang .....                                                                               | LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)         |
| Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin .....                                                                                          | WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)            |
| Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir .....                                                                                                            | LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)           |
| Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes .....                                                                                                               | WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)        |
| Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet .....                                                                                      | LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)         |
| Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater .....                                                                                                               | WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)                             |
| Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River .....                                                                      | WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)       |
| Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo .....                                                                                | XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)          |
| Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir .....                                                                          | YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285) |
| Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems .....                                                 | BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)            |
| Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water .....                                                                                                               | LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)        |
| Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar .....                                                             | CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)           |
| Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe <sup>0</sup> /WMF) ..... | JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)           |
| Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite .....                                                                                                     | LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)    |
| Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter .....                                                                                                      | WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)            |
| Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater .....                                              | ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)           |
| Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge .....                                                                                                                                 | XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)       |
| Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature .....                                                                                                                   | GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)                |
| Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China .....                                                                                       | DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)                 |
| Relationship Between CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network .....                                            | LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)                      |
| Effects of Controlled-Release Urea Application on N <sub>2</sub> O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil .....                                                                        | JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)      |
| Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China .....                                                                                                          | ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)      |
| Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils .....                                                                                                  | HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)              |
| Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil .....                                              | SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)                   |
| Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai .....        | CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)        |
| Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings .....                                                       | YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441) |