

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                |                                          |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM <sub>2.5</sub> 的影响 .....                 | 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦 (4069)                |
| 浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 .....                                  | 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇 (4080)                |
| 山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 .....                                | 闫雨龙,彭林 (4086)                            |
| 某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 .....                               | 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文 (4094)          |
| 加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 .....                                    | 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇 (4103)            |
| 北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 .....                                        | 崔彤,李金香,杨妍研,程刚 (4110)                     |
| 西安市人为源大气氨排放清单及特征 .....                                         | 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟 (4117)            |
| 佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 .....                                         | 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华 (4124)   |
| 天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 .....                                    | 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧 (4133)            |
| 戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 .....                                       | 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪 (4142)                |
| 青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 .....                                    | 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华 (4147)               |
| 玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 .....                                   | 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武 (4156)             |
| 极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 .....                                   | 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎晨,王圣瑞,张文丽,肖尚斌 (4162) |
| 典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析 .....                    | 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强 (4168)          |
| 西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 .....                                    | 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕 (4179)                |
| 周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 .....                                  | 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超 (4187)                |
| 太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 .....                                     | 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥 (4194)           |
| 多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 .....                                        | 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇 (4203)          |
| 丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 .....                                | 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏 (4212)           |
| 营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 .....                                     | 岳冬梅,李洁,肖琳 (4220)                         |
| 氯灭活地下水源中 3 种优势真菌的效能与机制 .....                                   | 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任巍,徐向前 (4228)              |
| 净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 .....                                  | 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧 (4235)                  |
| 单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 .....                        | 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒 (4241)                   |
| 三维有序介孔 Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B ..... | 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖 (4247)        |
| 调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 .....                                         | 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志 (4255)                 |
| 初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N <sub>2</sub> O 释放的影响 .....         | 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田 (4261)                   |
| 3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 .....                          | 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强 (4268)                    |
| 基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 .....                                       | 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京 (4275)                |
| 基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 .....                              | 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良 (4282)                 |
| 中常温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 .....                            | 袁砚,朱亮 (4289)                             |
| 生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 .....                           | 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉 (4296)              |
| ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 .....                                  | 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程 (4302)   |
| 间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 .....                             | 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军 (4309)           |
| 应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 .....                                          | 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明 (4317)                  |
| 应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 .....                          | 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨 (4326)                 |
| 南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 .....                                        | 苗迎,孔祥胜 (4333)                            |
| 杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 .....                                 | 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳 (4341)           |
| 应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 .....                            | 王佳怡,毕二平 (4349)                           |
| 表流湿地细菌群落结构特征 .....                                             | 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞 (4357)     |
| 城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 .....                                        | 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪 (4366)            |
| DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 .....                         | 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵 (4372)             |
| 培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 .....                                | 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强 (4380)    |
| 1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 .....                                   | 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿 (4389)                |
| 北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 .....                                     | 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明 (4395)        |
| 梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 .....                                        | 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强 (4402)               |
| 几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 .....                                  | 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平 (4410)           |
| 添加复合吸附剂对土壤吸附菲和 Cr(VI) 的影响 .....                                | 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽 (4419)                 |
| 生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 .....                                         | 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英 (4428)             |
| 集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 .....                             | 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成 (4437)       |
| 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 .....                            | 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽 (4446)               |
| 《环境科学》征稿简则 (4161)                                              | 《环境科学》征订启事 (4365)                        |
| 信息 (4123,4132,4409)                                            |                                          |

# 某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析

高松<sup>1</sup>, 崔虎雄<sup>1</sup>, 伏晴艳<sup>1\*</sup>, 高爽<sup>2</sup>, 田新愿<sup>3</sup>, 方方<sup>4</sup>, 衣学文<sup>4</sup>

(1. 上海市环境监测中心, 上海 200235; 2. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237; 3. 上海贝瑟环保科技有限公司, 上海 200011; 4. 上海市金山区环境监测站, 上海 201500)

**摘要:** 使用在线色谱观测了冬季某化工区典型雾霾污染时段 VOCs 污染特征, 同时应用 PMF 模型对化工区 VOCs 来源进行分析。结果表明, 观测期间 VOCs 主要组分是甲苯、二甲苯、C3~C4 烷烃和氯仿等, 有机硫组分是化工区异味的主要来源之一。2 个高污染时段内主要污染因子为异丁烷、正丁烷、丙烷和丙烯腈这 4 种组分。VOCs 和 NO<sub>x</sub> 具有夜间高而白天低的日变化特征, 体现了其主要受化工区排放源的影响。O<sub>3</sub> 的日变化特征反映出明显的光化学反应过程, 表明由于化工区 VOCs 排放影响, 虽时处冬季, 区域仍受到较明显的光化学污染影响。PMF 解析得到 6 个因子, 分别表征合成材料、涉硫工艺与废水处理、工业有机溶剂使用和石化工艺, 排放贡献率分别是 48.0%、24.0%、14.7% 和 13.3%。化工企业的废水处理单元为区域异味的重要来源之一。

**关键词:** 化工区; 在线观测; VOCs; 污染特征; PMF

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4094-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201603104

## Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China

GAO Song<sup>1</sup>, CUI Hu-xiong<sup>1</sup>, FU Qing-yan<sup>1\*</sup>, GAO Shuang<sup>2</sup>, TIAN Xin-yuan<sup>3</sup>, FANG Fang<sup>4</sup>, YI Xue-wen<sup>4</sup>

(1. Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200235, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China; 3. Shanghai Besser Environmental Technology Company Limited, Shanghai 200011, China; 4. Shanghai Jinshan Environmental Monitoring Station, Shanghai 201500, China)

**Abstract:** Online GC was adopted to monitor VOCs of high pollution process near a chemical industrial area in winter. PMF model was used to identify the major sources of VOCs and evaluate their contributions. The result showed that the main components during the period of observation were toluene, xylene, C3-C4 hydrocarbon and chloroform, etc. Organic sulfur compounds were the major odor pollutants at the chemical industrial area. The compounds including isobutane, n-butane, propane and acrylonitrile were enriched during two pollution periods. VOCs and NO<sub>x</sub> had the diurnal features of high concentration in the evening versus lower concentration during daytime, indicating the main influence from chemical industrial sources. While O<sub>3</sub> had the diurnal features reflecting the photochemical reaction at chemical industrial area in winter. The PMF result showed that 48.0% of the total VOCs concentrations were attributed to synthetic materials industry, 24.0% to industrial organic sulfur process and wastewater treatment (including three sources), 14.7% to industrial organic solvent usage, and 13.3% to petrochemical process. So the wastewater treatment unit was a major source of odor pollution at chemical industrial area.

**Key words:** chemical industrial area; online monitor; VOCs; pollution characteristics; PMF

近年来, 各类化工集中区(化工区)发展迅速<sup>[1]</sup>, 在带来巨大经济收益的同时, 其污染问题成为各级部门的棘手工作。化工区排放的 VOCs 等空气特征污染, 其影响主要表现在四方面: 一是恶臭或异味气体排放, 直接影响周边环境, 成为环保投诉热点, 部分区域厂群矛盾突出; 二是突发性污染事故易发, 存在潜在环境安全; 三是污染因子中部分为有毒有害物, 威胁人民生产生活安全; 四是化工区排放的大气污染物是光化学污染、霾污染等二次污染问题的重要前驱体<sup>[2]</sup>, 严重影响城市空气质量。因此, 深入了解化工区 VOCs 污染特征, 是科学和有效控制化工区 VOCs 的基础。

目前国内关于化工区 VOCs 污染特征的研究,

主要集中在使用离线采样和实验室分析的方法, 这些研究初步得到化工区 VOCs 浓度水平、化学组成、季节性时空分布特征和大气反应活性等特征<sup>[3~7]</sup>, 也有研究使用受体模型的源解析方法分析了化工区 VOCs 来源<sup>[8~10]</sup>。但是, 化工区 VOCs 污染具有易变化和突发性的特征, 离线研究方法具有较大的局限性。

随着 VOCs 监测技术发展和研究需求的深入,

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-06-02

基金项目: 上海市科委科研项目(15DZ1205300); 上海市环保科研基金项目(沪环科[2015]第2号); 环境保护公益性行业科研专项(201409019)

作者简介: 高松(1978~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为大气环境监测, E-mail: gs@semc.gov.cn

\* 通讯联系人, E-mail: qingyanf@semc.gov.cn

在线连续的监测技术逐步用于化工区 VOCs 特征研究,如徐锋等<sup>[11]</sup>使用便携式 GC-MS 对绍兴市某化工区 VOCs 特征进行了研究;裴冰等<sup>[12]</sup>使用在线气相色谱法分析了上海市某化工区 VOCs 组成特征,并计算了其化学反应活性。但是对于化工区典型大气过程,特别是高污染时段 VOCs 特征的研究较少,这对于制定化工区 VOCs 污染的管理措施具有较大的局限性。

针对 VOCs 来源识别是进行控制工作的前提,目前,众多学者在城市和区域尺度上的 VOCs 来源解析方面做了较多研究工作<sup>[13~16]</sup>,但针对小尺度的工业区研究较少。基于实验室分析,Wei 等<sup>[3]</sup>分别使用 PMF 对北京和土耳其的石化工业区大气中 VOCs 来源进行了研究<sup>[10]</sup>,表明各工业区源信息存在较大差异。使用在线连续的化工区 VOCs 组分观测数据进行污染来源分析,对于了解化工区 VOCs 特征排放源有较大帮助。

因此,本研究选取某化工区冬季一次典型雾霾高污染过程(区域大气静稳)中的在线监测数据,评估了几个典型时段 VOCs 组成及特征,并使用 PMF 模型探讨了本次典型大气过程中 VOCs 主要来源,以期对化工区 VOCs 污染的管控和高污染期间应急减排提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 观测时间与地点

本研究采样点位于华东地区某精细化工园区的东北边界处,该化工区以合成材料制造、涂料油墨、医药/农药为主,包括企业百余家。以 VOCs 废气排放为主的 30 多家企业中,合成材料相关行业占 55.5%,涂料生产和使用行业占 18.4%。采样点南部数公里外,是综合性石油化工园区。因此该采样点受到各类化工企业的污染排放影响,VOCs 成分复杂多变。

观测点设置在距离地面约 12 m 的楼顶,点位示意如图 1 所示,点位周围较为开阔,可反映受到化工区污染排放影响的污染特征。

观测时间是 2015 年 12 月 21~27 日,历时 7 d,观测期间该市  $PM_{2.5}$  日均值最高达  $187 \mu g \cdot m^{-3}$ ,观测期间以小风静风天气为主,不利于污染物扩散。平均温度是  $9.3^{\circ}C$ ,平均相对湿度为 88.7%,观测期间阴雨天气,相对湿度较大。

### 1.2 监测仪器与方法

VOCs 在线监测仪为 SynspecGC-955 型(615/

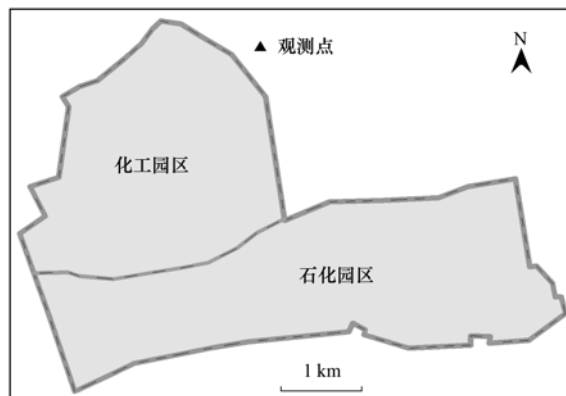


图 1 观测点位置示意

Fig. 1 Design of observation site in this measurement

810/815 系列)气相色谱仪,其中 615 用于监测高沸点 VOCs(C6~C12),内置常温富集管,检测器采用光离子化检测器(PID)和火焰离子化检测器(FID)双检测器;810 系列用于监测有机硫化物,内置低温富集管,检测器是 PID;815 用于监测低沸点 VOCs(C2~C5),内置低温富集管,同样采用 PID 和 FID 双检测器。615 和 815 监测时间分辨率为 0.5 h,810 监测时间分辨率为 20 min,具体分析方法详见文献[17, 18]。除 VOCs 外, $NO_x$ 、 $O_3$  和  $H_2S$  所使用的监测仪器分别是 API M200E 型(化学发光法)、M400E(紫外光度法)和 T101(紫外荧光法)。

### 1.3 质控质保与数据统计

监测过程中系统执行质量保证和质量控制,主要包括:仪器每周进行日常维护并使用标准气体进行单点校准,每月使用 TO-15 标气、PAMS 标气和有机硫标气进行仪器单点校准,相关系数达到 0.9 以上,每季进行通标多点校准。每日专人对 VOCs 监测数据及谱图的峰窗漂移情况进行检查和修正。

选取数据有效率超过 75% 的 21 种 VOCs 组分进行统计分析,体积分数如表 1 所示。其中乙烷和乙烯,间-二甲苯和对-二甲苯是色谱峰重叠组分,本研究将作为一种组分表示。对于低于检出限以下的 VOCs 组分浓度以 1 a 内检出限的 0.5 来表示。

### 1.4 源解析方法

PMF 模型是根据长时间序列的受体化学组分数据集进行源解析,其思路是:首先利用权重计算出中各 VOCs 化学组分的误差,然后通过带约束的最小二乘迭代法来确定出主要污染源及其贡献率,基本原理如公式(1)所示:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^m f_{ik} S_{jk} + e_{ij} \quad (1)$$

式中,  $c_{ij}$  表示组分  $j$  在样品  $i$  中的体积分数

表 1 在线监测的 VOCs 组分体积分数<sup>1)</sup> × 10<sup>-9</sup>

Table 1 Volume fractions of VOCs compounds during online monitoring period × 10<sup>-9</sup>

| 序号 | 物种         | 最小值  | P25   | P50   | P90    | 检出限   |
|----|------------|------|-------|-------|--------|-------|
| 1  | 乙烷/乙烯      | 8.84 | 10.54 | 11.08 | 12.01  | 1.17  |
| 2  | 丙烷         | 8.47 | 17.29 | 24.34 | 93.01  | 0.51  |
| 3  | 正丁烷        | 4.61 | 10.55 | 19.45 | 178.88 | 0.93  |
| 4  | 异丁烷        | 3.39 | 10.59 | 20.73 | 362.80 | 2.42  |
| 5  | 正戊烷        | 1.47 | 1.47  | 3.72  | 6.93   | 2.94  |
| 6  | 异戊烷        | 3.12 | 4.78  | 7.23  | 15.35  | 1.29  |
| 7  | 丙烯         | 2.24 | 4.17  | 6.29  | 13.77  | 0.16  |
| 8  | 顺-2-丁烯     | 0.27 | 3.81  | 4.88  | 8.27   | 0.54  |
| 9  | 乙炔         | 0.81 | 2.48  | 3.09  | 4.90   | 1.62  |
| 10 | 苯          | 3.11 | 6.25  | 10.85 | 17.56  | 0.07  |
| 11 | 甲苯         | 7.50 | 21.34 | 35.94 | 70.35  | 0.15  |
| 12 | 间/对-二甲苯    | 1.71 | 6.10  | 11.57 | 35.60  | 0.56  |
| 13 | 邻-二甲苯      | 0.62 | 2.06  | 4.17  | 13.85  | 0.33  |
| 14 | 乙苯         | 1.75 | 6.39  | 11.54 | 31.43  | 0.33  |
| 15 | 苯乙烯        | 0.20 | 0.20  | 1.44  | 7.30   | 0.40  |
| 16 | 氯仿         | 0.31 | 3.77  | 10.63 | 23.16  | 0.62  |
| 17 | 顺-1,2-二氯乙烯 | 5.90 | 5.90  | 5.90  | 19.27  | 11.81 |
| 18 | 甲硫醇        | 0.03 | 1.31  | 1.96  | 3.16   | 0.07  |
| 19 | 乙硫醇        | 0.07 | 0.07  | 2.34  | 5.50   | 0.14  |
| 20 | 甲硫醚        | 0.04 | 1.52  | 2.74  | 8.59   | 0.08  |
| 21 | 丙烯腈        | 0.75 | 0.75  | 8.09  | 65.46  | 1.50  |

1) P25、P50 和 P90 分别表征第 25、50 和 90 百分位数,分别表征各组分的浓度低值、中值和高值

( $\times 10^{-9}$ );  $m$  为源的数量;  $f_{ik}$  是第  $k$  个排放源对样品  $i$  的贡献率;  $S_{jk}$  表示  $k$  排放源中  $j$  组分的质量占比;  $e_{ij}$  是随机误差.

PMF 的输入数据是环境空气中 VOCs 各组分体积分数及其不确定度,要求有效样品数量不少于 80 个,输入的组分体积分数不可以为 0 或 ND,对于低于分析方法检出限的化学组分,采用 5/6 检出限作为输入参数. 输出结果包括因子数量、因子中各组分组成比例与各因子对受体组分的贡献率. PMF 主要原理及应用参见文献[14, 19].

2 结果与讨论

2.1 化工区 VOCs 整体污染水平

21 种 VOCs 组分的体积分数如表 1 所示, P50 体积分数高于  $10 \times 10^{-9}$  的 VOCs 组分分别有异丁烷、正丁烷、甲苯、丙烷、间/对-二甲苯、乙苯、苯、氯仿和乙烷/乙烯,主要组分体积分数高于其他研究城市的环境空气中 VOCs 相应组分体积分数<sup>[14, 19]</sup>,与其他研究中的化工区 VOCs 组分体积分数相当<sup>[10, 12]</sup>,表明本研究与其他研究具有可比性,进一步表征了化工区 VOCs 污染水平高.

从 P90 体积分数来看,大于  $100 \times 10^{-9}$  的组分有异丁烷和正丁烷,其高值和低值的差距较大,且

P90 体积分数远高于其他物种,初步判断是受局地污染排放影响. 也表明了化工区 VOCs 排放规律复杂.

值得注意的是,本研究通过对有机硫化物的监测,得到该化工区甲硫醇、乙硫醇和甲硫醚的 P50 体积分数分别是  $1.96 \times 10^{-9}$ 、 $2.34 \times 10^{-9}$ 、 $2.74 \times 10^{-9}$ . 有机硫组分均存在异味,检出率较高;其中甲硫醇的 P50 体积分数接近 (GB 14554-1993) 甲硫醇厂界二级排放限值,为该物质的嗅阈值 28 倍<sup>[20]</sup>;有 5 h 的甲硫醇浓度超过标准限值. 表明有机硫是该化工区产生异味的主要原因之一.

2.2 典型时段下 VOCs 污染特征

2.2.1 观测期间 VOCs 体积分数时间序列

从图 2 观测期间总 VOCs 体积分数的时间序列可见,风向以偏北为主;观测点虽主要处于上风向,但在 12 月 24 日 09:00~21:00 和 12 月 26 日 23:00~12 月 27 日 12:00 两个时段内总 VOCs 体积分数依然出现高值,并持续稳定较长时间;两个时段的总 VOCs 体积分数均升高至  $2000 \times 10^{-9}$  以上,较前一小时体积分数增长 10 倍以上. 从风速来看,这两个时段的风速基本在  $1.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以下,处于静稳状态,当风速升高至  $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,总 VOCs 体积分数开始下降至正常范围内. 可以看出:①化工区局地

的污染排放是导致 VOCs 体积分数突现高值的主要原因; ②小风静稳天气下污染物的不易扩散, 也是造成 VOCs 体积分数持续高值的原因之一。

除这以上两个时段污染物体积分数出现高值外, 其他时段内总 VOCs 体积分数基本保持在相同的水平内, 浓度均不超过  $1\,000 \times 10^{-9}$ , 表征化工区的平均水平。将 12 月 24 日 09:00 ~ 21:00、12 月 26 日 23:00 ~ 12 月 27 日 12:00 分别称之为 episode2 和 episode3, 其他时段称之为 episode1, 分别分析 VOCs 组分特征。

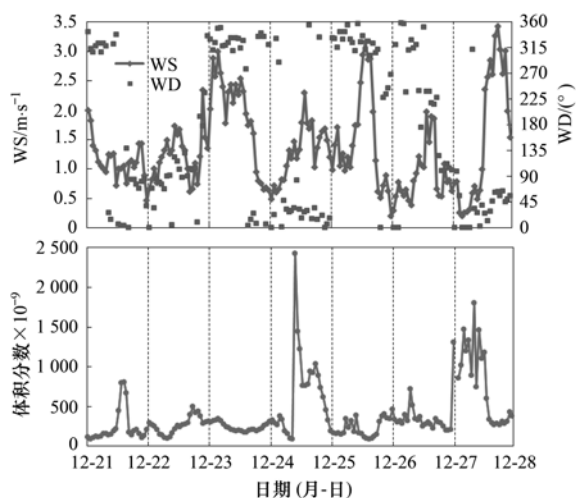


图2 观测期间总 VOCs 体积分数时间序列

Fig. 2 Time series of TVOCs concentration during the observation period

### 2.2.2 episode1 化工区 VOCs 组分特征

图3是 episode1 情况下 VOCs 组分特征。从中可见, 通常情况下观测点主要 VOCs 组分为芳香烃, 包括甲苯、间/对-二甲苯、乙苯和苯; 其次为烷烃,

包括异丁烷、正丁烷和丙烷。以上这些组分均是我国工业源 VOCs 排放特征研究中的主要成分<sup>[21~23]</sup>, 特别是甲苯, 是石油化工、工业溶剂使用等工业排放源的首要组分。

值得注意的是, 氯仿和顺-1,2-二氯乙烯平均体积分数分别达到  $11.06 \times 10^{-9}$  和  $10.45 \times 10^{-9}$ , 在 VOCs 组成中占有较高比例, 这在其他研究中少有报道<sup>[6]</sup>。初步分析, 由于氯代烃价格低廉, 现作为工业溶剂正逐步取代苯系物等传统溶剂, 造成化工区内该物种浓度升高。而氯代烃多具有一定毒性, 因此在工业 VOCs 防控中需要引起重视。

### 2.2.3 episode2 和 episode3 化工区 VOCs 组分特征

图4表示 episode2 和 episode3 化工区 VOCs 组分特征。从中看出, episode2 和 episode3 的 VOCs 最主要组分均是异丁烷、正丁烷、丙烷和丙烯腈这4种, 其中异丁烷的体积分数分别达到  $459.92 \times 10^{-9}$  和  $446.50 \times 10^{-9}$ , 远高于 episode1, 其他如甲苯、间/对-二甲苯等组分体积分数与 episode1 相当。说明 episode2 和 episode3 主要均是受到以异丁烷、正丁烷、丙烷和丙烯腈为污染特征的排放影响, 初步判断可能来源于合成材料相关行业。

由此可以看出, 化工区的高污染时有发生, 同时也具有以下明显的特征: ①总 VOCs 的体积分数在短时间内急剧上升, ②受排放影响, VOCs 特征组分明显。因此在化工区空气污染的管理上, 需要对化工区存在的各排放源 VOCs 指纹图谱有详细了解, 以便在发生突发性污染事件时, 能够及时发现源头, 并提出相关控制措施, 减轻污染造成的影响。

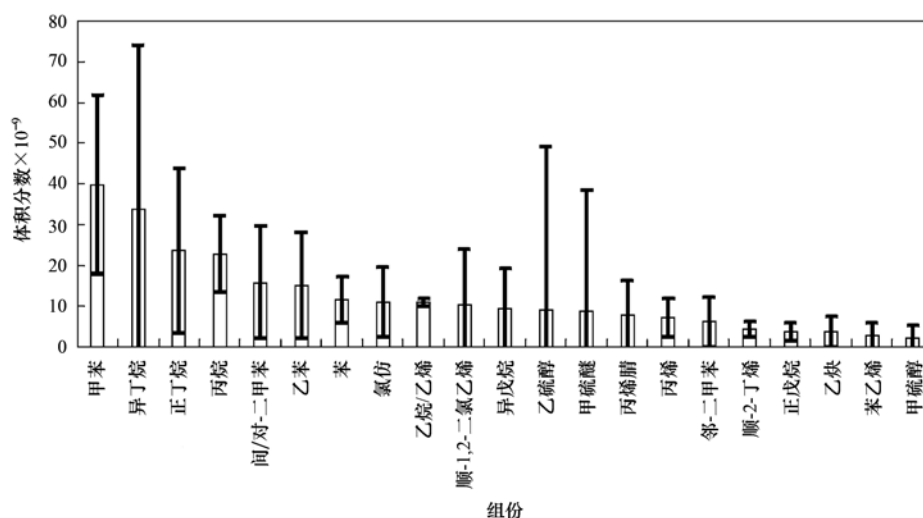


图3 episode1 化工区 VOCs 组分特征

Fig. 3 Characteristics of VOCs during episode1 at chemical industrial area

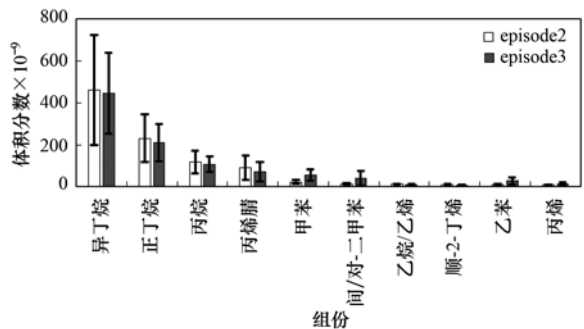


图4 episode2 和 episode3 化工区 VOCs 各组分特征  
Fig. 4 Characteristics of VOCs during episode2 and episode3 at chemical industrial area

2.2.4 本研究与其他研究的比较

表2列出了各类型工业区和城市环境空气中VOCs体积分数及组分特征,从中看出,该化工区总VOCs体积分数与北京<sup>[3]</sup>、高雄<sup>[9]</sup>和土耳其<sup>[10]</sup>水平相当,较上海<sup>[12]</sup>和成都<sup>[5]</sup>相对较高.城市环境空气中的VOCs体积分数远远低于工业区的水平,体现了工业VOCs污染排放的影响大.

从主要组分来看,工业区和城市环境空气中的VOCs主要组分均是以甲苯为主的芳香烃和以C2~C5短链烷烃,但工业区的氯代烃,酯类组分占有较大比例,本研究得到有机硫化物在化工区VOCs中占有较大比例.

有研究使用甲苯和苯的比值(T/B)来初步判断VOCs主要来源,一般认为T/B小于2.0表示机动车尾气为主要来源,T/B大于2.0表示受工业排放影响较大<sup>[24]</sup>.由表可知,各研究得到化工区的T/B值均远大于2.0,印证了主要受局地的化工工艺排放影响较大.而各地区环境空气中T/B差异较大,

这与当地VOCs污染源分布和气象条件有关.

2.3 化工区VOCs日变化特征

图5是NO<sub>x</sub>、O<sub>3</sub>和VOCs体积分数日变化特征.从总VOCs体积分数最大值可以看出,夜间01:00~06:00的总VOCs体积分数高于白天12:00~18:00,可能的原因是:①夜间化工区各企业排放较白天严重;②大气边界层降低使近地面出现逆温层,不利于污染物扩散;③夜间缺少光照,VOCs不易发生化学反应,从而损耗会变少.总VOCs体积分数最小值浓度变化范围是86.24×10<sup>-9</sup>~201.62×10<sup>-9</sup>,变化幅度较小,这可反映该化工区VOCs本底水平.

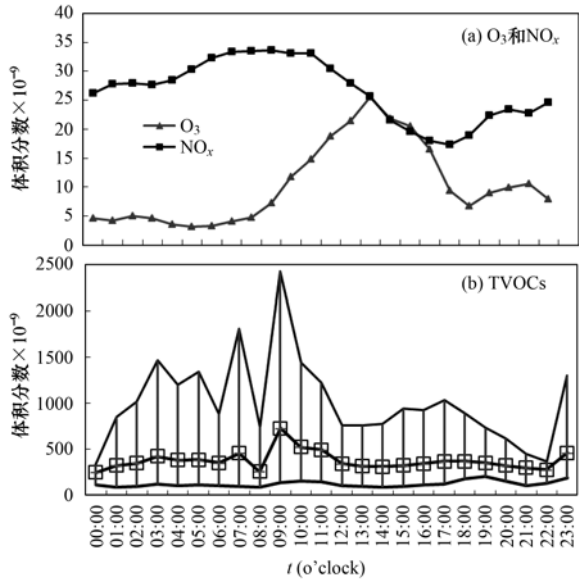


图5 观测期间各污染物浓度日变化特征

Fig. 5 Diurnal variation of each pollution concentration during the observation period

表2 不同研究VOCs浓度及特征对比<sup>1)</sup>

Table 2 Comparison of VOCs concentration and characteristics with different studies

| 项目   | 城市/工况    | VOCs 物种数 | 总 VOCs 体积分数 × 10 <sup>-9</sup> | 主要组分                | T/B   | 文献   |
|------|----------|----------|--------------------------------|---------------------|-------|------|
| 工业区  | episode1 | 21       | 260.71                         | 甲苯、异丁烷、氯仿、乙硫醇、甲硫醚   | 3.40  | 本研究  |
|      | episode2 | 21       | 1 001.04                       | 异丁烷、正丁烷、丙烷、丙烯腈      | 3.81  | 本研究  |
|      | episode3 | 21       | 1 086.42                       | 异丁烷、正丁烷、丙烷、丙烯腈      | 4.62  | 本研究  |
|      | 上海       | 52       | 120.34                         | 甲苯、乙烷、环戊烷、异戊烷、氯仿    | 28.00 | [12] |
|      | 高雄       | 32       | 40.50~403.20                   | 甲醇、甲苯、正戊烷、异戊烷       | /     | [9]  |
|      | 北京       | 52       | 10~200                         | 甲苯、苯、乙炔、正丁烷、异丁烷     | /     | [3]  |
|      | 土耳其      | 58       | 8.77~1 791.07                  | 正戊烷、异戊烷、甲苯、1,2-二氯乙烷 | 2.85  | [10] |
| 环境空气 | 成都       | 41       | 130.55                         | 烷烃类、芳香烃、酯类          | 3.85  | [5]  |
|      | 南京       | 56       | 43.52                          | 乙烷、乙烯、丙烷、苯、甲苯       | 0.67  | [25] |
|      | 广州       | /        | 40.99~65.40                    | 烷烃、芳香烃              | /     | [26] |
|      | 上海       | 93       | 32.25                          | 甲苯、异戊烷、丁烷、乙酸乙酯      | 2.60  | [14] |
|      | 珠三角      | 60       | 42                             | 乙烯、乙炔、甲苯、乙苯、二甲苯     | /     | [15] |
|      | 长沙       | 76       | 30.5                           | 异戊烷、丙烷、甲苯、苯         | 1.27  | [24] |

1) 总VOCs浓度以体积分数×10<sup>-9</sup>表示,文献中以μg·m<sup>-3</sup>作单位时,以C<sub>12</sub>的摩尔质量进行转换为体积分数

从  $\text{NO}_x$  和  $\text{O}_3$  的变化特征可以看出,  $\text{NO}_x$  在夜间出现高值, 说明在化工区  $\text{NO}_x$  受工业源影响较大, 受机动车排放的影响较小.  $\text{O}_3$  小时均值最大是  $25.49 \times 10^{-9}$ , 小于国家二级排放标准, 是最小小时

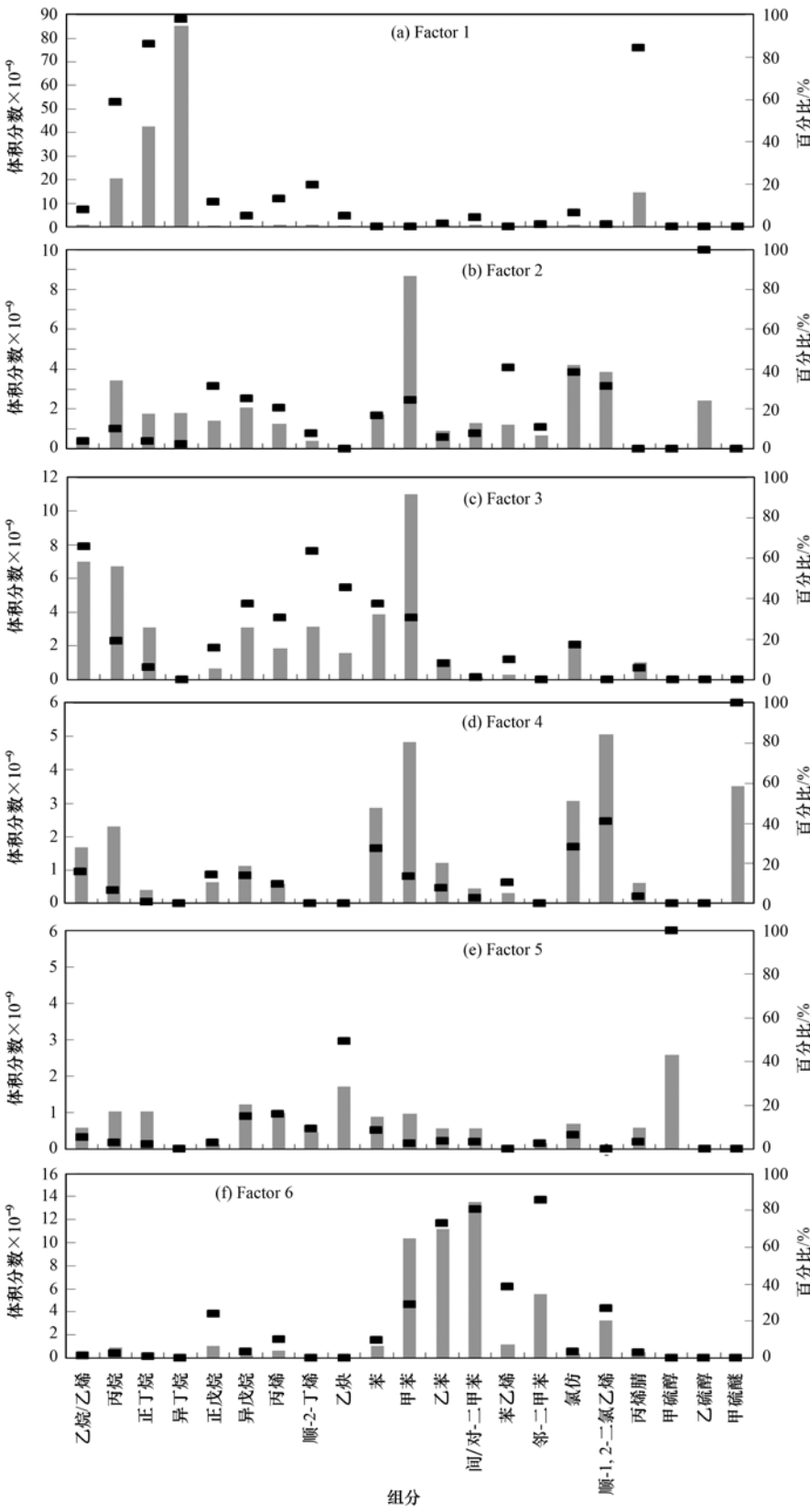


图6 PMF 解析得到的各因子 VOCs 排放组成

Fig. 6 Source profiles of VOCs compounds calculated by PMF model

均值的 8 倍以上。O<sub>3</sub> 在 14:00 点左右出现高值,化工区 O<sub>3</sub> 变化规律与城市环境大气中 O<sub>3</sub> 变化规律较为一致;表明虽然处于冬季,但由于化工区挥发性有机物排放的影响,区域仍存在较为明显的光化学反应过程,O<sub>3</sub> 污染不容小视。

#### 2.4 PMF 源解析

本研究使用 EPA PMF5.0 版本的模型,通过对因子数的多次试验,使解析得到的大部分残差值在 -3.0 ~ 3.0 之间,确定 6 个因子的解析结果为最终结果。

图 6 是 PMF 解析得到的各 VOCs 组分在 6 个因子中的体积分数及组成占比。从中看出,Factor1 的特征组分是丙烷、正丁烷、异丁烷和丙烯腈,这与 episode2 和 episode3 的 VOCs 特征组分相吻合,丙烯腈是生产合成材料的主要原料,丙烷、正丁烷和异丁烷这些短链烷烃也是化学合成的主要原料,因此 Factor1 可认为是合成材料相关行业排放。

Factor 2、Factor4 和 Factor5 这 3 个因子的特征组分较为繁多且较为类似,烷烃、苯系物和卤代烃均占有一定比例,此外乙硫醇、甲硫醚和甲硫醇 3 中含硫化合物浓度的 99.9% 以上分别体现在这 3 个因子中,通过调研,该化工区生产过程中存在涉硫工艺,另外有监测指出化工区废水处理存在有机硫化物排放,因此将这 3 个因子统一定性为涉硫工艺和废水处理。

Factor 3 的特征组分主要是甲苯、苯、乙烷/乙烯和丙烷等组分,根据其 T/B 特征比值为 2.83,说明其受工业排放影响较大,这与石化工艺的 VOCs 排放特征较为吻合,指示受到南部石化排放的影响。

Factor 6 的特征组分是甲苯、二甲苯、乙苯等苯系物,是目前主要的工业溶剂组分,指示其主要来自化工园区众多溶剂使用企业,可认为是工业有机溶剂使用源。

根据 PMF 源解析结果,可得到观测期间各污染源对 VOCs 的贡献率,如图 7 所示,近距离化工区的合成材料行业排放影响占 48.0%,是诱发本次观测期间两次 VOCs 高浓度事件的主导因素,与该类别企业在园区的占比较为吻合;涉硫工艺和废水处理占 24.0% (涉硫工艺和废水处理 1 + 涉硫工艺和废水处理 2 + 涉硫工艺和废水处理 3),表明涉硫工艺及废水处理装置的影响较大;工业有机溶剂使用和石化工艺排放分别占 14.7% 和 13.3%。

从源解析结果可以看出,与城市环境空气排放来源有明显区别<sup>[16, 27]</sup>,城市环境空气中机动车来源

占有较大比例,而在化工区中,工业排放几乎是空气中 VOCs 的全部来源。多个源解析因子均指向涉硫工艺和废水处理,表明化工企业的废水处理单元,成为区域异味来源的一大因素。建议加强监管并可考虑集中处理。

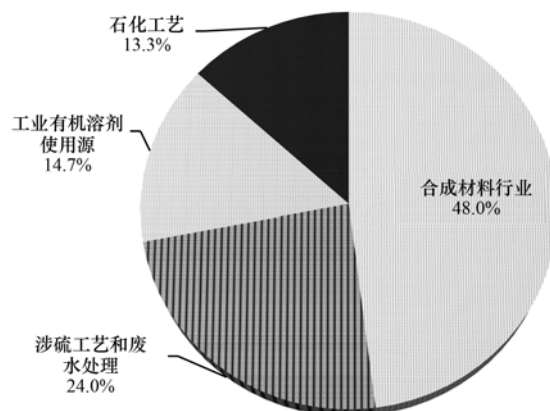


图 7 PMF 解析得到的各因子对观测期间 VOCs 贡献率

Fig. 7 Individual contributions of VOCs source during the observation period obtained by PMF model

### 3 结论

(1) 观测期间 episode1 化工区 VOCs 主要组分是甲苯、二甲苯、C3 ~ C4 烷烃和氯仿等。episode2 和 episode3 期间总 VOCs 体积分数远高于 episode1, 主要组分是异丁烷、正丁烷、丙烷和丙烯腈 4 种。有机硫组分是化工区异味的主要来源之一,其中甲硫醇影响最为突出。

(2) VOCs 和 NO<sub>x</sub> 日变化呈现夜间高白天低的特征,主要与化工区排放源密切相关。O<sub>3</sub> 的日变化特征主要受光化学作用的影响,日最高值出现在光照强烈的 14:00 左右,O<sub>3</sub> 小时浓度是夜间的 8 倍以上。表明虽然处于冬季,但由于化工区挥发性有机物排放的影响,区域仍存在较为明显的光化学反应过程,

(3) 使用 PMF 模型对观测期间 VOCs 进行源解析,得到 6 个因子,合成材料生产排放源占 48.0%,涉硫工艺和废水处理占 24.0% (包含 3 个涉硫工艺及废水处理工艺或装置),工业有机溶剂使用和石化工艺分别占 14.7% 和 13.3%。化工企业的废水处理单元成为区域异味来源的一大因素。通过源解析模型,从行业类别角度,可了解污染的主要来源。

致谢:感谢北京大学陆思华高级工程师和李悦博士对源解析分析的指导;感谢上海市环境监测中心原副总工魏海萍教授给予本文的帮助。

## 参考文献:

- [1] 高松, 徐捷, 魏海萍, 等. 工业园区大气特征污染监测系统构建研究[A]. 见: 中国环境科学学会 2013 年学术年会论文集[C]. 昆明: 中国环境科学学会, 2014. 2205-2210.
- [2] Zheng J Y, Shao M, Che W W, *et al.* Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(22): 8580-8586.
- [3] Wei W, Cheng S Y, Li G H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from a petroleum refinery in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **89**: 358-366.
- [4] 魏恩棋, 王艳丽, 时庭锐, 等. 鞍山市大气中挥发性有机物的污染特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2011, **33**(6): 61-64, 70.  
Wei E Q, Wang Y L, Shi T R, *et al.* Study on the pollution characteristic of VOCs in ambient air of Anshan [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2011, **33**(6): 61-64, 70.
- [5] 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.
- [6] 吴晓怡. 工业区大气挥发性有机物特征研究[J]. *环境科学与管理*, 2015, **40**(1): 127-131.  
Wu X Y. Study on pollution characteristics of ambient volatile organic compounds in a industry district of Shanghai [J]. *Environmental Science and Management*, 2015, **40**(1): 127-131.
- [7] 魏恩棋, 时庭锐, 李利荣, 等. 天津市大气中挥发性有机物的组成及分布特点[J]. *中国环境监测*, 2010, **26**(4): 4-8.  
Wei E Q, Shi T R, Li L R, *et al.* The composition and distribution of VOCs in the atmosphere of Tianjin [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2010, **26**(4): 4-8.
- [8] 吴海. 工业区总悬浮颗粒物和挥发性有机物浓度特征的研究[J]. *环境污染与防治*, 2015, **37**(12): 62-65, 70.  
Wu H. Research on the concentration characteristics of TSP and VOCs in the industrial zone [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2015, **37**(12): 62-65, 70.
- [9] 郑任轩, 陈康兴, 林渊淙, 等. 高雄市某工业区大气中 VOCs 特征与来源解析[A]. 见: 2015 年中国环境科学学会学术年会论文集[C]. 深圳: 中国环境科学学会, 2015. 4947-4953.
- [10] Dumanoglu Y, Kara M, Altioek H, *et al.* Spatial and seasonal variation and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in a heavily industrialized region [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **98**: 168-178.
- [11] 徐锋, 钱晓曙, 孙志刚, 等. 绍兴市某工业区大气中挥发性有机物污染状况的研究[J]. *中国环境监测*, 2011, **27**(2): 45-47.  
Xu F, Qian X S, Sun Z G, *et al.* Studys on volatile organic compounds pollution in the atmosphere of some industrial district of Shaoxing City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2011, **27**(2): 45-47.
- [12] 裴冰, 刘娟, 孙焱婧. 某化学工业区挥发性有机物组成特征及大气化学反应活性[J]. *环境监测管理与技术*, 2011, **23**(S1): 1-6, 23.
- Pei B, Liu J, Sun Y J. The composition and chemical reactivity of volatile organic compounds (VOCs) in a certain chemical industry park [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2011, **23**(S1): 1-6, 23.
- [13] 冯小琼, 彭康, 凌镇浩, 等. 香港地区 2005-2010 年 VOCs 污染来源解析及特征研究[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(1): 173-180.  
Feng X Q, Peng K, Ling Z H, *et al.* Source apportionments and characteristics of VOCs from 2005 to 2010 in Hong Kong[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(1): 173-180.
- [14] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(38): 5005-5014.
- [15] Guo H, Cheng H R, Ling Z H, *et al.* Which emission sources are responsible for the volatile organic compounds in the atmosphere of Pearl River Delta? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **188**(1-3): 116-124.
- [16] Liu Y, Shao M, Lu S H, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in the Pearl River Delta, China: part II [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6261-6274.
- [17] 孙炎婧, 刘娟, 伏晴艳, 等. 环境空气中 VOCs 在线监测法与 SUMMA 罐采样气相色谱-质谱法比对研究[J]. *中国环境监测*, 2009, **25**(3): 23-28.  
Sun Y J, Liu J, Fu Q Y, *et al.* Research of the comparison of continuous emission monitoring method and SUMMA canister sampling & GC-MS analyzing method of VOCs [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2009, **25**(3): 23-28.
- [18] 黄俊梅, 赵波. 上海市吴泾工业区 VOCs 的监测分析与来源解析[J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(S2): 382-386, 390.  
Huang J M, Zhao B. Monitoring analysis and source apportionment of volatile organic compounds in Shanghai Wujing industrial zone[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S2): 382-386, 390.
- [19] 高蒙, 安俊琳, 杭一纤, 等. PMF 和 PCA/APCS 模型对南京北郊大气 VOCs 源解析对比研究[J]. *气象与环境学报*, 2014, **30**(1): 43-50.  
Gao M, An J L, Hang Y X, *et al.* Comparison of PMF and PCA/APCS for VOCs source apportionment in north suburb of Nanjing[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2014, **30**(1): 43-50.
- [20] 王亘, 翟增秀, 耿静, 等. 40 种典型恶臭物质嗅阈值测定[J]. *安全与环境学报*, 2015, **15**(6): 348-351.  
Wang G, Zhai Z X, Geng J, *et al.* Testing and determination of the olfactory thresholds of the 40 kinds of typical malodorous substances[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, **15**(6): 348-351.
- [21] 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.
- [22] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds (VOCs) measured in China: part I [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [23] 莫梓伟, 邵敏, 陆思华. 中国挥发性有机物 (VOCs) 排放源成分谱研究进展[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(9): 2179-2189.

- Mo Z W, Shao M, Lu S H. Review on volatile organic compounds (VOCs) source profiles measured in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(9): 2179-2189.
- [24] 刘全, 王跃思, 吴方堃, 等. 长沙大气中 VOCs 研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3543-3548.
- Liu Q, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Observation and study on atmospheric VOCs in Changsha City [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3543-3548.
- [25] 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.
- [26] 邹宇, 邓雪娇, 王伯光, 等. 广州番禺大气成分站挥发性有机物的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(5): 808-813.
- Zou Y, Deng X J, Wang B G, *et al.* Pollution characteristics of volatile organic compounds in Panyu composition station [J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(5): 808-813.
- [27] 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 center of Shanghai in summer [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(5): 926-934.

## CONTENTS

|                                                                                                                                                                                                     |                                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Air Pollutant Emission Inventory and Impact of Typical Industries on PM <sub>2.5</sub> in Chengde .....                                                                                             | CHEN Guo-lei, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> ( 4069 )     |
| Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Woodwork-making Industry in Zhejiang Province .....                                                           | YAO Yi, WANG Zhe-ming, HE Zhi-qiao, <i>et al.</i> ( 4080 )           |
| Emission Inventory of Anthropogenic VOCs and Its Contribution to Ozone Formation in Shanxi Province .....                                                                                           | YAN Yu-long, PENG Lin ( 4086 )                                       |
| Characteristics and Source Apportionment of VOCs of High Pollution Process at Chemical Industrial Area in Winter of China .....                                                                     | GAO Song, CUI Hu-xiong, FU Qing-yan, <i>et al.</i> ( 4094 )          |
| Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station .....                                                                                                 | HUANG Yu-hu, CHANG Yao-qing, REN Bi-qi, <i>et al.</i> ( 4103 )       |
| NH <sub>3</sub> Emission Characteristics in Landfill Sites in Beijing .....                                                                                                                         | CUI Tong, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan, <i>et al.</i> ( 4110 )         |
| Inventory and Characteristics of Anthropogenic Ammonia Emission in Xi'an .....                                                                                                                      | SU Hang, YAN Dong-jie, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> ( 4117 )         |
| Pollution Characteristics of Non-methane Hydrocarbons During Winter and Summer in Foshan City .....                                                                                                 | ZHOU Xue-ming, XIANG Ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> ( 4124 )    |
| Water-soluble Inorganic Ions in the Road Ambient Atmospheric Particles of Tianjin .....                                                                                                             | ZHAO Meng-xue, WU Lin, FANG Xiao-zhen, <i>et al.</i> ( 4133 )        |
| Characteristics of Nitrogen Deposition in Daiyun Mountain National Nature Reserve .....                                                                                                             | YUAN Lei, LI Wen-zhou, CHEN Wen-wei, <i>et al.</i> ( 4142 )          |
| Microbial Activity in Bioaerosols in Winter at the Coastal Region of Qingdao .....                                                                                                                  | MENG Xiang-bin, LI Meng-zhe, LI Hong-tao, <i>et al.</i> ( 4147 )     |
| Molecular and Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanoic Acids in Smoke from Maize Straw Combustion .....                                                                                   | LIU Gang, SUN Li-na, XU Hui, <i>et al.</i> ( 4156 )                  |
| Gas Transfer Velocity of CH <sub>4</sub> at Extremely Low Wind Speeds .....                                                                                                                         | ZHANG Cheng, LÜ Xin-biao, LONG Li, <i>et al.</i> ( 4162 )            |
| Spectral Characteristics of Chromophoric Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake from Inland of Three Gorges Reservoir Areas: In the View of Riparian Ecosystem Analysis ..... | CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> ( 4168 )          |
| Characteristics and Pollution Source Analysis of Nutrients in Tributary Outlets of Xitaoxi Watershed .....                                                                                          | CHEN Shi-wen, YUAN Xu-yin, JIN Jing, <i>et al.</i> ( 4179 )          |
| Analysis of Driving Factors on the Nitrogen Decrease in the Early Stage of the Thermal Stratification in Main Area of Zhoucun Reservoir .....                                                       | ZHANG Chun-hua, HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, <i>et al.</i> ( 4187 ) |
| Characteristics of Organic Phosphorus Fractions in the Sediments of the Black Water Aggregation in Lake Taihu .....                                                                                 | DONG Dan-ping, ZHANG Ting-xi, ZHANG Ding-yu, <i>et al.</i> ( 4194 )  |
| Impacts of Multiple Disturbance on Migration and Transformation of Endogenous Phosphorus in Lake .....                                                                                              | CAI Shun-zhi, LI Da-peng, WANG Ren, <i>et al.</i> ( 4203 )           |
| Change of Soil Nitrogen Leaching with Summer Maize Growing Periods Under Plastic Film Mulched Cultivation in Danjiangkou Reservoir Area, China .....                                                | WANG Wei, YU Xing-xiu, HAN Qiang, <i>et al.</i> ( 4212 )             |
| Nutrients Recovery on the Growth of Nitrogen and Phosphorus Starved <i>Microcystis aeruginosa</i> .....                                                                                             | YUE Dong-mei, LI Jie, XIAO Lin ( 4220 )                              |
| Inactivation Efficiency and Mechanism of Three Dominant Fungal Spores in Drinking Groundwater by Chlorine .....                                                                                     | WEN Gang, ZHU Hong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> ( 4228 )           |
| Effect of Water Treatment Process on the Bacterial Multidrug Resistance in Drinking Water .....                                                                                                     | MA Xiao-lin, LU Yang, WANG Yu, <i>et al.</i> ( 4235 )                |
| Characteristics of Disinfection By-products and Genotoxicity During Drinking Water Disinfection with Potassium Monopersulfate Compound Powder .....                                                 | AO Xiu-wei, LI Hao-jie, LIU Wen-jun, <i>et al.</i> ( 4241 )          |
| Heterogeneous Activation of Peroxymonosulfate with Three-dimensional Ordered Mesoporous Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> for the Degradation of Rhodamine B .....                                     | FENG Shan-fang, DENG Si-ping, DU Jia-wen, <i>et al.</i> ( 4247 )     |
| Enhanced Mitigation of Membrane Fouling by Regulations on Floc Morphology in Electrocoagulation .....                                                                                               | ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> ( 4255 )       |
| Effect of Initial pH on Nitrogen Removal Performance and N <sub>2</sub> O Emission of a Sequencing Batch CANON Reactor .....                                                                        | FU Kun-ming, WANG Hui-fang, SU Xue-ying, <i>et al.</i> ( 4261 )      |
| Operational Characteristics of the Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal and Removal of Phthalate Esters by Three-dimensional Biofilm-electrode Coupled with Iron/Sulfur Reactor .....       | ZHANG Ya, HAO Rui-xia, XU Peng-cheng, <i>et al.</i> ( 4268 )         |
| Phosphorus Removal Mechanism of Sulfur/Sponge Iron Composite Fillers Based on Denitrification .....                                                                                                 | FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, LI Meng, <i>et al.</i> ( 4275 )            |
| Optimization of Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process .....                                                                                                 | CHENG Chao-yang, ZHAO Shi-hui, LÜ Liang, <i>et al.</i> ( 4282 )      |
| Effect of Moderate and Room Temperature on Nitrogen Removal in PN-ANAMMOX Process .....                                                                                                             | YUAN Yan, ZHU Liang ( 4289 )                                         |
| Influence of Biological Activated Carbon on Simultaneous Nitrification and Denitrification in Inflow with Different C/N Ratios .....                                                                | CUI Yan-ni, QIU Xin, ZHANG Qing-rong, <i>et al.</i> ( 4296 )         |
| Biotransformation of Nitrate to Nitrogen Gas Driven by ANAMMOX Microbes via Zero-valent Iron Under Anaerobic Conditions .....                                                                       | ZHOU Jian, WANYAN De-qing, HUANG Yong, <i>et al.</i> ( 4302 )        |
| A Comparative Study on Performance of an Intermittent Aeration SBR and a Traditional SBR for Treatment of Digested Piggery Wastewater .....                                                         | DONG Bao-gang, SONG Xiao-yan, LIU Rui, <i>et al.</i> ( 4309 )        |
| Biological Pre-treatment of Surplus Sludge Using the Protease-secreting Bacteria .....                                                                                                              | HE Pin-jing, WANG Ying, HU Jie, <i>et al.</i> ( 4317 )               |
| Transfer and Fate of Polybrominated Diphenyl Ethers in an Electrical Equipment Dismantling Area Using a Multimedia Fugacity Model .....                                                             | XUE Nan-dong, CHEN Xuan-yu, YANG Bing, <i>et al.</i> ( 4326 )        |
| Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Environmental Media in Nanning City .....                                                                                       | MIAO Ying, KONG Xiang-sheng ( 4333 )                                 |
| PBDEs Levels in House Dust and Human Exposure to PBDEs via Dust Ingestion in Hangzhou .....                                                                                                         | JIN Man-tong, TENG Dan-dan, ZHENG Yan-xia, <i>et al.</i> ( 4341 )    |
| Evaluating Biochar-Water Sorption Coefficients of Pharmaceutically Active Compounds by Using a Linear Free Energy Relationship .....                                                                | WANG Jia-yi, BI Er-ping ( 4349 )                                     |
| Characteristics of Bacterial Communities in Surface-flow Constructed Wetlands .....                                                                                                                 | WEI Jia-ming, CUI Li-juan, LI Wei, <i>et al.</i> ( 4357 )            |
| Community Structure and Activity Analysis of the Nitrifiers in Raw Sewage of Wastewater Treatment Plants .....                                                                                      | YU Li-fang, DU Qian-qian, FU Xue-tao, <i>et al.</i> ( 4366 )         |
| Effects of Fertilization on Soil Microbial Abundance and Community Structure at DNA and cDNA Levels in Paddy Soils .....                                                                            | WANG Cong, WU Ne, HOU Hai-jun, <i>et al.</i> ( 4372 )                |
| Effects of Bisphenol A on Characteristics of Paddy Soil Microbial Community Under Different Cultural Conditions .....                                                                               | LIU Chang, HUANG Ya-dan, ZHANG Ying, <i>et al.</i> ( 4380 )          |
| Identification of a Facultative Bacterium Strain with the Ability to Methylate Mercury Under Both Aerobic and Anaerobic Conditions .....                                                            | TAO Lan-lan, XIANG Yu-ping, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> ( 4389 )   |
| Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Vegetable Soils in Beijing .....                                                                                                     | ZHANG Lan-he, WANG Jia-jia, HA Xue-jiao, <i>et al.</i> ( 4395 )      |
| Distribution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Sika Deer Farm .....                                                                                                                 | HUANG Fu-yi, AN Xin-li, CHEN Qing-lin, <i>et al.</i> ( 4402 )        |
| Comparison of Toxic Effect of Siliceous Mineral Dusts on Lung Epithelial A549 Cells .....                                                                                                           | HUO Ting-ting, DONG Fa-qin, DENG Jian-jun, <i>et al.</i> ( 4410 )    |
| Effect of Adding Compound Adsorbent on Phenanthrene and Cr(VI) Absorption by Lou Soil .....                                                                                                         | LI Wen-bin, MENG Zhao-fu, WU Qiong, <i>et al.</i> ( 4419 )           |
| Effect of Biochar on Adsorption Behavior of Nonylphenol onto Loess Soil in Northwest China .....                                                                                                    | ZHANG Zhen-guo, JIANG Yu-feng, MU Zhong-feng, <i>et al.</i> ( 4428 ) |
| Soil Respiration in Response to Different Ridge/Furrow Ratios and Its Relationship with Soil Moisture and Temperature Under Ridge-Furrow Planting Patterns .....                                    | WANG Chang-jiang, SHI Cheng-xiao, FENG Fan, <i>et al.</i> ( 4437 )   |
| Effects of Straw in Combination with Reducing Fertilization Rate on Soil Nutrients and Enzyme Activity in the Paddy-Vegetable Rotation Soils .....                                                  | HUANG Rong, GAO Ming, WAN Yi-lin, <i>et al.</i> ( 4446 )             |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 主 管     | 中国科学院                                                                                                                                                               | Superintended    | by | Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                                                                             |
| 主 办     | 中国科学院生态环境研究中心                                                                                                                                                       | Sponsored        | by | Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences                                                                                                                                             |
| 协 办     | (以参加先后为序)<br>北京市环境保护科学研究院<br>清华大学环境学院                                                                                                                               | Co-Sponsored     | by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>School of Environment, Tsinghua University                                                                                                          |
| 主 编     | 赵进才                                                                                                                                                                 | Editor-in -Chief |    | ZHAO Jin-cai                                                                                                                                                                                                            |
| 编 辑     | 《环境科学》编辑委员会<br>北京市2871信箱(海淀区双清路<br>18号, 邮政编码:100085)<br>电话:010-62941102, 010-62849343<br>传真:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | Edited           | by | The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE )<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343<br>E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出 版     | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街16号<br>邮政编码:100717                                                                                                                             | Published        | by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>Beijing 100717, China                                                                                                                                            |
| 印 刷 装 订 | 北京北林印刷厂                                                                                                                                                             | Printed          | by | Beijing Bei Lin Printing House                                                                                                                                                                                          |
| 发 行     | 科 学 出 版 社<br>电话:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                | Distributed      | by | Science Press<br>Tel:010-64017032<br>E-mail: journal@ mail. sciencep. com                                                                                                                                               |
| 订 购 处   | 全国各地邮电局                                                                                                                                                             | Domestic         |    | All Local Post Offices in China                                                                                                                                                                                         |
| 国外总发行   | 中国国际图书贸易集团有限公司<br>(北京399信箱)                                                                                                                                         | Foreign          |    | China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China                                                                                                                      |

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行