

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第12期

Vol.34 No.12

**2013**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

|                                                                        |                                          |
|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 序 .....                                                                | 郝郑平(4503)                                |
| 南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征 .....                                             | 安俊琳,朱彬,李用宇(4504)                         |
| 天津中心城区环境空气挥发性有机物污染特征分析 .....                                           | 翟增秀,邹克华,李伟芳,王亘,翟友存(4513)                 |
| 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析 .....                                                | 杨辉,朱彬,高晋徽,李用宇,夏丽(4519)                   |
| 上海市春季臭氧和二次有机气溶胶生成潜势的估算 .....                                           | 崔虎雄(4529)                                |
| 四川省典型人为污染源 VOCs 排放清单及其对大气环境的影响 .....                                   | 韩丽,王幸锐,何敏,郭卫广(4535)                      |
| 武汉市秸秆燃烧 VOCs 排放估算及管理对策 .....                                           | 黄碧捷(4543)                                |
| 北京市冬季灰霾期 NMHCs 空间分布特征研究 .....                                          | 段菁春,彭艳春,谭吉华,郝吉明,柴发合(4552)                |
| 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价 .....                                   | 李雷,李红,王学中,张新民,温冲(4558)                   |
| 天津某家具城挥发性有机物健康风险评估 .....                                               | 张银,王秀艳,高爽(4565)                          |
| 废旧有机玻璃再生利用行业挥发性有机物(VOCs)排放特征研究 .....                                   | 王浙明,徐志荣,叶红玉,许明珠,王晓星(4571)                |
| 农药企业场地空气中挥发性有机物污染特征及健康风险 .....                                         | 谭冰,王铁宇,庞博,朱朝云,王道涵,吕永龙(4577)              |
| 电子产品加工制造企业挥发性有机物(VOCs)排放特征 .....                                       | 崔如,马永亮(4585)                             |
| 汽车涂料生产环节 VOCs 的排放特征及安全评价 .....                                         | 曾培源,李建军,廖东奇,涂翔,许玫英,孙国萍(4592)             |
| 载人汽车室内空气 VOCs 污染的指标评价 .....                                            | 陈小开,程赫明,罗会龙(4599)                        |
| 基于 GC-MS 的烹调油烟 VOCs 的组分研究 .....                                        | 何万清,聂磊,田刚,李靖,邵霞,王敏燕(4605)                |
| VOCs 污染场地挖掘过程的环境健康风险评价 .....                                           | 房增强,甘平,杨乐,戴子瑜,祁世鸿,贾建丽,何绪文(4612)          |
| 挥发性有机物污染场地挖掘过程中污染扩散特征 .....                                            | 甘平,杨乐巍,房增强,郭淑倩,于妍,贾建丽(4619)              |
| 土壤中苯向大气挥发过程的影响因素和通量特征研究 .....                                          | 杜平,王世杰,赵欢欢,伍斌,韩春媚,房吉敦,李慧颖,细见正明,李发生(4627) |
| 土壤组分对四氯乙烯吸附解吸行为的影响 .....                                               | 胡林,邱兆富,何龙,窦颖,吕树光,隋倩,林匡飞(4635)            |
| 自来水常规和深度处理工艺中挥发性有机物的变化规律 .....                                         | 陈锡超,罗茜,陈虎,魏孜,王子健,许科文(4642)               |
| 杭州市典型企业废水中挥发性有机物排放特征及其评价 .....                                         | 陈峰,徐建芬,唐访良,张明,阮东德(4649)                  |
| 维生素 C 工业废水处理系统 VOCs 污染特性 .....                                         | 郭斌,律国黎,任爱玲,杜昭,邢志贤,韩鹏,高博,刘淑娅(4654)        |
| 新型生物滴滤填料性能评价 .....                                                     | 梅瑜,成卓韦,王家德,活泼(4661)                      |
| 微量臭氧强化生物滴滤降解甲苯性能研究 .....                                               | 张超,赵梦升,张丽丽,陈建孟(4669)                     |
| BF 和 BTF 工艺去除 DCM 性能比较 .....                                           | 潘维龙,於建明,成卓韦,蔡文吉(4675)                    |
| 改性 13X 沸石蜂窝转轮对甲苯的吸附性能研究 .....                                          | 王家德,郑亮巍,朱润晔,俞云锋(4684)                    |
| 转轮吸附法处理有机废气的研究 .....                                                   | 朱润晔,郑亮巍,毛玉波,王家德(4689)                    |
| 活性炭吸附有机蒸气性能的研究 .....                                                   | 蔡道飞,黄维秋,王丹莉,张琳,杨光(4694)                  |
| UV-生物过滤联合降解苯乙炔废气的研究 .....                                              | 沙昊雷,杨国靖,夏静芬(4701)                        |
| 蜂窝状 ZSM-5 型分子筛对丙酮和丁酮吸附性能研究 .....                                       | 杜娟,栾志强,解强,叶平伟,李凯,王喜芹(4706)               |
| 内浮顶油罐“小呼吸”对环境影响过程的分析 .....                                             | 吴宏章,黄维秋,杨光,赵晨露,王英霞,蔡道飞(4712)             |
| 基于 Tanks 4.0.9d 模型的石化储罐 VOCs 排放定量方法研究 .....                            | 李靖,王敏燕,张健,何万清,聂磊,邵霞(4718)                |
| 铜铈复合氧化物上石化行业典型 VOCs 的氧化行为与动力学 .....                                    | 陈长伟,于艳科,陈进生,何焜(4724)                     |
| KrBr <sup>+</sup> 准分子灯直接光解一甲胺气体 .....                                  | 赵洁,刘玉海,韦连梅,叶招莲,张善端(4734)                 |
| 异味混合物中组分浓度与其强度贡献关系研究 .....                                             | 颜鲁春,刘杰民,付慧婷,孙媛,林文辉(4743)                 |
| 挥发性有机污染物排放控制标准制订中的关键技术问题研究 .....                                       | 江梅,张国宁,任春,邹兰,魏玉霞(4747)                   |
| 挥发性有机污染物排放控制标准体系的建立与完善 .....                                           | 江梅,张国宁,邹兰,魏玉霞,张明慧(4751)                  |
| 我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究 .....                                             | 王铁宇,李奇锋,吕永龙(4756)                        |
| 固定源废气 VOCs 排放在线监测技术现状与需求研究 .....                                       | 王强,周刚,钟琪,赵金宝,杨凯(4764)                    |
| 石化行业炼油恶臭污染源治理技术评估 .....                                                | 牟桂芹,隋立华,郭亚逢,马传军,杨文玉,高阳(4771)             |
| 植物源挥发性有机化合物排放清单的研究进展 .....                                             | 谢军飞,李延明(4779)                            |
| 基于动态 CGE 的挥发性有机污染物 VOCs 排放预测和控制研究 .....                                | 刘昌新,王宇飞,郝郑平,王铮(4787)                     |
| 《环境科学》第34卷(2013年)总目录 .....                                             | (4792)                                   |
| 《环境科学》征订启事(4717)      《环境科学》征稿简则(4742)      信息(4528, 4626, 4693, 4700) |                                          |

# 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价

李雷<sup>1,2</sup>, 李红<sup>1\*</sup>, 王学中<sup>1</sup>, 张新民<sup>1</sup>, 温冲<sup>3</sup>

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 浙江天昱环保设备有限公司, 嘉兴 314100; 3. 西安市环境保护科学研究院, 西安 710002)

**摘要:** 于2009年11月5~9日, 采用在线监测方法对广州市中心城区环境空气中31种VOCs物种进行了观测, 对其浓度水平与变化特征、组成与来源、化学反应活性进行了分析, 并利用国际公认的健康风险评价方法对VOCs的健康风险进行了评价。结果表明, 31种VOCs物种的平均质量浓度为 $114.51 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (范围为 $29.42 \sim 546.06 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 烷烃和芳香烃是含量最为丰富的组分; 31种VOCs浓度之和及烷烃、烯烃、芳香烃3类化合物的各组分浓度之和都呈现出早晚高, 中午低的日变化特征。机动车尾气排放是研究区环境空气中VOCs的主要来源, 同时汽油、液化石油气的挥发以及涂料和溶剂的挥发也是其重要来源。研究区VOCs气团对臭氧生成潜势贡献率最大的是芳香烃(42.5%)和烯烃(38.6%); 甲苯、反-2-丁烯、间/对二甲苯、正丁烷、1,3,5-三甲苯等是VOCs中的关键活性组分。机动车尾气排放、汽油蒸发是导致研究区环境空气中臭氧形成的重要VOCs排放源。健康风险评价结果表明, 己烷、1,3-丁二烯和BTEX对人体的非致癌风险(HQ)在 $3.95\text{E}-03 \sim 2.45\text{E}-01$ 之间, 对暴露人群不存在非致癌风险; 1,3-丁二烯、苯的致癌风险值(RISK)分别为 $1.47\text{E}-05$ 、 $5.34\text{E}-05$ , 对暴露人群存在潜在的致癌风险。本研究结果与国内其它部分城市环境空气中苯系物健康风险评价结果的比较研究发现, 我国城市环境空气中苯对暴露人群存在着较大的致癌风险, 因此, 我国有必要采取措施严格控制环境空气中苯的污染水平, 尽早研究并制定环境空气中苯的环境基准和标准。

**关键词:** 环境空气; 挥发性有机物; 污染特征; 健康风险评价; 广州市

中图分类号: X511; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)12-4558-07

## Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China

LI Lei<sup>1,2</sup>, LI Hong<sup>1</sup>, WANG Xue-zhong<sup>1</sup>, ZHANG Xin-min<sup>1</sup>, WEN Chong<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Zhejiang Tianyu Environmental Protection Equipment Co., Ltd., Jiaxing 314100, China; 3. Xi'an Municipal Research Institute of Environmental Protection, Xi'an 710002, China)

**Abstract:** The measurements of 31 kinds of VOCs in the ambient air of a site were carried out in the downtown of Guangzhou by online method from November 5, 2009 to November 9, 2009. The ambient level and composition characteristics, temporal variation characteristics, sources identification, and chemical reactivity of VOCs were studied, and the health risk of VOCs in the ambient air in the study area was assessed by using the international recognized health risk assessment method. Results showed that the mean and the range of the mass concentrations of 31 VOCs were  $114.51 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and  $29.42 \sim 546.06 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. The mass concentrations of 31 VOCs, and those of alkanes, alkenes, and aromatics all showed a changing trend of higher in the morning and in the evening, and lower at noontime. Vehicular exhaust, gasoline and liquefied petroleum gas evaporates were the main sources of VOCs with the volatilization of paints and solvents being important emission sources. Toluene, *trans*-2-butene, *m/p*-xylene, *i*-butane, and 1,3,5-trimethylbenzene were the key reactive species among the 31 VOCs. Vehicular exhaust and gasoline evaporation were the main sources of VOCs leading to the formation of ozone. Health risk assessment showed that *n*-hexane, 1,3-butadiene, benzene, toluene, ethylbenzene, *m/p*-xylene and *o*-xylene had no appreciable risk of adverse non-cancer health effect on the exposed population, but 1,3-butadiene and benzene had potential cancer risk. By comparing the corresponding data about health risk assessment of benzene compounds in some cities in China, it is concluded that benzene can impose relatively high cancer risk to the exposed populations in the ambient air of some cities in China. Therefore, strict countermeasures should be taken to further control the pollution of benzene in the ambient air of cities, and it is imperative to start the related studies and develop the atmospheric environmental health criteria and national ambient air quality standard for benzene in China.

收稿日期: 2013-07-01; 修订日期: 2013-08-30

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(20109032); “十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAC16B01); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB05010200)

作者简介: 李雷(1988~), 男, 硕士, 主要研究方向为大气环境基准体系构建及环境健康, E-mail: lileicraes@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: lihong@craes.org.cn

**Key words:** ambient air; VOCs; pollution characteristics; health risk assessment; Guangzhou

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 在大气环境中是臭氧和二次有机气溶胶的重要前体物<sup>[1~3]</sup>, 影响大气光化学烟雾与大气细粒子的形成, 部分 VOCs 物种具有较强的毒性及致癌性<sup>[4,5]</sup>. 随着我国城市化进程的加快, 大气中 VOCs 的污染问题已经较为突出. 我国某些大中城市环境空气中 VOCs 的浓度较高<sup>[6~9]</sup>, 部分监测点苯的质量浓度高于日本、英国等国家环境空气中苯的质量浓度标准<sup>[10]</sup>. 目前我国 VOCs 环境基准的研究尚处于起步阶段, 还没有制定 VOCs 的环境空气质量标准, 但是环境空气中 VOCs 的浓度水平与毒理学研究已经受到了我国学者一定程度的关注<sup>[11~14]</sup>. 我国的环境管理正从“以环境污染控制为导向”向“以环境质量改善为目标导向”过渡, 并向“环境风险防控为目标导向”发展 (<http://www.mep.gov.cn/zhxx/hjyw.htm>). 《国家环境保护“十二五”规划》中强调了对污染物的人群暴露与健康风险评价的研究. 2012 年环境保护部发布的《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)<sup>[15]</sup> 增设了 PM<sub>2.5</sub> 的浓度限值和臭氧 8 h 平均浓度限值. 因此, 在我国开展环境空气中 VOCs 污染特征、暴露与健康风险评价研究是十分必要的.

本研究于 2009 年 11 月 5~9 日在广州市中心城区采用在线监测方法对环境空气中 31 种 VOCs 物种进行了观测, 分析了 VOCs 的浓度水平与变化特征、浓度组成与来源、化学反应活性, 并在此基础上对广州市中心城区环境空气中 VOCs 的健康风险进行了评价, 以期改善广州市环境空气质量提供依据, 同时为我国大气 VOCs 环境基准的研究积累相关基础数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点

采样点设置在广州市环境监测中心站楼顶 (23°07'N, 113°15'E), 采样口距离地面的高度约为 25 m. 广州市环境监测中心站位于越秀区吉祥路 95 号, 地处商业、交通与居民混合区, 周围为城市建筑群, 临近街道, 周边车流量较大, 居住人口密度大, 可以代表广州市典型的城市环境, 监测结果能够反映该区域大部分市民呼吸带的环境空气质量. 因此, 本采样点用于广州市中心城区环境空气中 VOCs 污染特征分析与健康风险评价研究, 具有一定的代表性.

### 1.2 样品采集与分析

VOCs 观测采用荷兰 SYNSPEC 公司生产的 Syntech Spectras GC955 在线监测系统, 环境空气样品经过干燥管后在常压下直接进入 GC955-611 和 GC955-811 两套独立的分析系统, 时间分辨率为 0.5 h. GC955-611 高沸点分析仪采用内置常温预浓缩系统, VOCs 经预浓缩至 Tenax GR 富集管上, 热脱附并在 ATTM-1 柱上分离以达到最佳分离, 并防止其它不相关化合物的干扰; 检测系统采用光离子化检测器 (PID). GC955-811 低沸点分析仪采用内置冷却预浓缩系统, VOCs 在 5℃ 预浓缩至 Carbonsieves SIII 上, 之后在下一循环的初始阶段迅速热脱附, 通过两维色谱柱得到分离, 柱子分别采用了毛细薄膜柱和毛细 PLOT 柱. 通过这种分析方法, 低沸点碳氢化合物可以得到良好分离; 检测器采用 PID 和火焰离子化检测器 (FID).

采用 FID、PID 共检测出 31 种 VOCs 物种, 包含了烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃 4 类化合物, 其中 C<sub>2</sub>~C<sub>5</sub> 的烷烃、烯烃和炔烃共 19 种, C<sub>6</sub>~C<sub>9</sub> 的芳香烃和烷烃共 12 种, 定量限为 0~300×10<sup>-9</sup>. 本研究的观测时间为 2009 年 11 月 5~9 日, 共监测得到 220 组环境空气 VOCs 数据. 同时对观测期间研究区的风向、风速、温度、露点温度、太阳辐射、紫外辐射和能见度等气象要素进行观测, 每小时记录一次数据.

### 1.3 健康风险评价方法

健康风险评价是以风险度作为评价指标, 定量描述环境污染对人体健康危害的风险. 1983 年美国国家科学院提出了健康风险评价“四步法”, 即危害鉴定——鉴定化学物质是否对健康有危害; 剂量-效应评估——暴露与暴露所导致的健康影响的因果关系; 暴露评价——对人群或生态系统暴露于风险因子的方式、强度、频次及时间的评估及描述; 风险特征分析——有害效应发生的概率如何. 该方法已被荷兰、法国、日本、中国等国家采用, 是国际公认的健康风险评价方法. 根据污染物是否具有致癌性, 将健康风险评价分为致癌风险评价和非致癌风险评价. 1989 年, 美国环境保护署 (U. S. EPA) 提出了一种针对特定场所吸入途径污染物的健康风险评价方法 (EPA/540/1-89/002), 并于 2009 年对该方法进行了更新调整 (EPA-540-R-070-002), 新方法指出, 当评价吸入途径污染物的健康风险时, 应该使用空气中化学物质的质量浓度作为暴露量 (例如: mg·m<sup>-3</sup>), 而不再

使用基于人体呼吸速率 (IR) 和体重 (BW) 得到的吸入摄入量 [例如:  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ]. 致癌风险值用呼吸致癌单位风险 (或致癌强度系数) 乘以终生平均暴露浓度来表示. 具体方法说明如下.

慢性和亚慢性暴露时的暴露浓度 (exposure concentration):

$$EC = (CA \times ET \times EF \times ED) / AT$$

非致癌风险危害商值 (hazard quotient):

$$HQ = EC / (RfC \times 1\,000 \mu\text{g} \cdot \text{mg}^{-1})$$

多种污染物危害商值之和, 即危害指数 (hazard index):  $HI = \sum HQ_i$

终生致癌风险值 (Risk):

$$\text{Risk} = EC \times IUR$$

上述公式中相关参数说明见表 1.

表 1 健康风险评价方法中相关参数

Table 1 Related variables used in health risk assessment

| 变量  | 定义                               | 数值       | 单位                                       |
|-----|----------------------------------|----------|------------------------------------------|
| CA  | contaminant concentration in air | 环境浓度     | $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$          |
| ET  | exposure time                    | 暴露时间     | $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$           |
| EF  | exposure frequency               | 暴露频率     | $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$           |
| ED  | exposure duration                | 暴露时间     | a                                        |
| AT  | averaging time                   | 平均时间     | d                                        |
| IUR | inhalation unit risk             | 单位吸入致癌风险 | $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ |
| RfC | reference concentration          | 参考浓度     | $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$          |

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度水平及其变化特征

监测结果表明, 观测期间研究区 31 种 VOCs 的平均质量浓度为  $114.51 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 浓度范围为  $29.42 \sim 546.06 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . 烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃的质量浓度日平均值依次为  $59.97$ 、 $15.18$ 、 $0.12$  和  $39.24 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 浓度变化范围依次为  $10.86 \sim 426.03$ 、 $1.11 \sim 61.75$ 、 $0.01 \sim 4.52$  和  $3.80 \sim 179.25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  (见表 2).

观测期间研究区环境空气中 VOCs 的平均质量浓度的日变化特征如图 1 所示. 可以看出, 3 个时段中均呈现出烷烃的浓度最高、芳香烃次之、烯烃浓度最低的特征. 上午 (07:00 ~ 09:00) 31 种 VOCs 物种的平均浓度为  $110.93 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 中午 (13:00 ~ 15:00) 平均浓度为  $59.05 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 晚上 (18:00 ~ 20:00) 平均浓度为  $93.33 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 上午和晚上的浓度分别是中午浓度的 1.9 和 1.6 倍. 烷烃、烯烃、芳香烃上午和晚上的浓度分别是中午浓度的 2.2 和 1.8 倍、1.2 和 1.6 倍、1.8 和 1.3 倍, 烷烃和芳香烃浓度的日变化幅度大于烯烃. 31 种 VOCs、烷烃、烯烃、芳香烃都呈现出早晚浓度高, 中午浓度低的特征, 表明早晚交通高峰时段机动车尾气排放对大气中 31 种 VOCs、烷烃、烯烃、芳香烃的浓度水平有较明显的影响.

环境空气中 VOCs 浓度的日变化趋势主要受到污染物来源变化、光化学反应强弱、扩散条件变化等因素的影响. 早晚交通高峰时段, 污染物排放增

加, 此时地面温度和大气边界层高度较低, 污染物不易扩散而积累导致浓度较高. 监测得到 VOCs 的浓

表 2 观测期间研究区环境空气中 VOCs 平均质量浓度/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

Table 2 Average mass concentrations of VOCs in the ambient air of the study area/ $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$

| 化合物        | 浓度范围          | 平均浓度  | 中值    |
|------------|---------------|-------|-------|
| 乙烷         | 0.04 ~ 18.09  | 2.95  | 1.83  |
| 丙烷         | 0.16 ~ 40.23  | 7.48  | 5.22  |
| 异丁烷        | 1.49 ~ 56.97  | 11.33 | 6.20  |
| 正丁烷        | 0.12 ~ 111.84 | 21.11 | 12.57 |
| 异戊烷        | 0.02 ~ 0.27   | 0.03  | 0.03  |
| 烷烃 正戊烷     | 0.02 ~ 0.82   | 0.06  | 0.03  |
| 2-甲基戊烷     | 0.04 ~ 2.81   | 1.00  | 0.73  |
| 3-甲基戊烷     | 0.13 ~ 15.25  | 3.66  | 2.63  |
| 己烷         | 0.15 ~ 36.46  | 4.95  | 3.17  |
| 环己烷        | 0.04 ~ 308.68 | 4.76  | 0.54  |
| 庚烷         | 0.02 ~ 17.13  | 2.63  | 1.08  |
| 乙烯         | 0.01 ~ 4.06   | 2.15  | 2.19  |
| 丙烯         | 0.08 ~ 2.71   | 0.62  | 0.37  |
| 1-丁烯       | 0.13 ~ 9.75   | 1.43  | 0.74  |
| 异丁烯        | 0.01 ~ 7.53   | 1.97  | 1.52  |
| 反-2-丁烯     | 0.23 ~ 13.61  | 3.52  | 2.61  |
| 烯烃 顺-2-丁烯  | 0.04 ~ 7.21   | 1.57  | 1.15  |
| 1,3-丁二烯    | 0.01 ~ 3.11   | 0.49  | 0.21  |
| 反-2-戊烯     | 0.01 ~ 5.68   | 0.30  | 0.10  |
| 顺-2-戊烯     | 0.01 ~ 4.86   | 0.54  | 0.13  |
| 异戊二烯       | 0.01 ~ 2.95   | 0.40  | 0.28  |
| 1-己烯       | 0.02 ~ 12.81  | 2.19  | 1.44  |
| 炔烃 乙炔      | 0.01 ~ 4.52   | 0.12  | 0.01  |
| 苯          | 0.28 ~ 54.69  | 6.84  | 3.39  |
| 甲苯         | 0.52 ~ 78.93  | 19.76 | 14.35 |
| 乙苯         | 0.05 ~ 17.97  | 4.26  | 3.11  |
| 芳香烃 间/对二甲苯 | 0.59 ~ 13.83  | 3.06  | 2.03  |
| 邻二甲苯       | 0.30 ~ 12.13  | 2.42  | 1.62  |
| 1,2,4-三甲苯  | 0.21 ~ 14.24  | 1.13  | 0.61  |
| 1,3,5-三甲苯  | 0.10 ~ 14.35  | 1.77  | 0.69  |

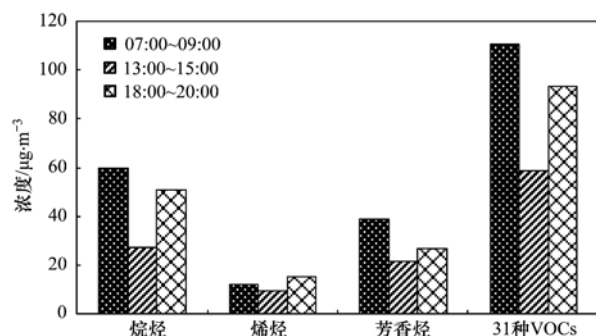


图1 观测期间研究区环境空气中 VOCs 质量浓度的日变化特征

Fig. 1 Diurnal variations of VOCs in the ambient air of the study area

度都在中午 13:00 ~ 15:00 出现最低值,可能此时光强度增强,温度和大气边界层高度升高,对流作用加大,快速的光化学反应消耗和污染物扩散速度显著降低了环境空气中 VOCs 的浓度。

## 2.2 VOCs 组成特征与来源识别

烷烃、烯烃、炔烃和芳香烃的质量浓度在 31 种 VOCs 中所占比例分别为 52.4%、13.3%、0.1% 和 34.3%。由此可见,烷烃的含量占 31 种 VOCs 总量的一半以上,是观测期间研究区环境空气中含量最为丰富的挥发性有机物。正丁烷、异丁烷、丙烷是烷烃中浓度最高的组分,平均质量浓度依次为 21.11、11.33 和 7.48  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,三者共占烷烃总量的 66.6%。文献调研表明城市环境空气中正丁烷、异丁烷、丙烷的主要来源是液化石油气车辆尾气的排放,2-甲基戊烷、3-甲基戊烷大部分来自汽油蒸气和液态石油的挥发<sup>[16]</sup>,因此观测期间研究区环境空气中烷烃的主要来源是机动车尾气排放、汽油蒸气和液态石油的挥发。反-2-丁烯、1-己烯、乙烯、异丁烯、顺-2-丁烯、1-丁烯和 1,3-丁二烯的平均质量浓度之和为 13.32  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,占烯烃总量的 87.7%,是最主要的烯烃组分;而通常作为植物排放标志物的异戊二烯<sup>[17]</sup>的平均质量浓度为 0.40  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,占烯烃含量的 2.6%。反-2-丁烯的主要来源是汽油蒸发<sup>[18]</sup>,1-丁烯和异丁烯大部分来自汽油、柴油、液化石油气 3 种燃料尾气的排放;1,3-丁二烯通常主要来自汽车尾气<sup>[19]</sup>;上述分析表明,观测期间研究区环境空气中烯烃的主要来源是汽油蒸发和机动车尾气排放,植物排放对烯烃的贡献较少。

甲苯、苯、乙苯、间/对二甲苯、邻二甲苯的平均质量浓度之和为 36.33  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,占芳香烃总量的 92.6%。甲苯、间/对二甲苯和 1,2,4-三甲苯是汽车尾气、柴油车尾气、汽油蒸气和液态石油挥发的

主要芳香烃化合物,苯和乙苯除了部分来源于汽车和溶剂挥发外,胶版印刷、家具制造和电路板清洗等过程也会存在这类物质的排放<sup>[20]</sup>。因此,观测期间研究区环境空气中芳香烃的主要来源是机动车尾气排放、汽油蒸气、液体石油挥发和溶剂的使用等。

研究表明,利用苯与甲苯的特征浓度比值 (B/T) 可以用来分析芳香烃的可能来源<sup>[21,22]</sup>。当 B/T ( $\text{m}/\text{m}$ ) 在 0.5 左右时,交通源是城市环境空气中芳香烃的主要来源,较高的 B/T 说明可能受石油化工、化石燃料燃烧的影响,B/T 偏小则说明除交通源外还有涂料的使用、溶剂挥发致使芳香烃物质进入环境空气中。本研究中 B/T 为 0.31 (0.15 ~ 0.79),也说明了除机动车尾气排放外,观测期间研究区环境空气中涂料和溶剂的挥发也是芳香烃的另外一个重要来源。

由上述分析可知,观测期间研究区环境空气中 VOCs 的主要来源是机动车尾气排放,同时汽油蒸气、液态石油的挥发以及涂料和溶剂的挥发也是 VOCs 的一个重要的来源。

## 2.3 VOCs 化学反应活性分析

本研究采用最大增量反应活性 (max incremental reactivity, MIR) 分析方法估算 VOCs 各组分对臭氧生成的贡献。VOCs 增量反应活性 (incremental reactivity, IR) 综合衡量了 VOCs 化合物的反应活性及对  $\text{O}_3$  生成潜势的影响,同时考虑了 VOCs 物质的动力学反应活性和机制反应活性。本研究中 MIR 参数取自文献<sup>[1]</sup>。图 2 给出了观测期间研究区环境空气中烷烃、烯烃、芳香烃的质量分数及对 OFP 的贡献率。由图 2 可以看出,占总 VOCs 质量分数为 52.4% 的烷烃,对 OFP 的贡献率为 18.9%,不足 20.0%; 占总 VOCs 质量分数为 13.3% 的烯烃,对 OFP 的贡献率为 38.6%; 占总

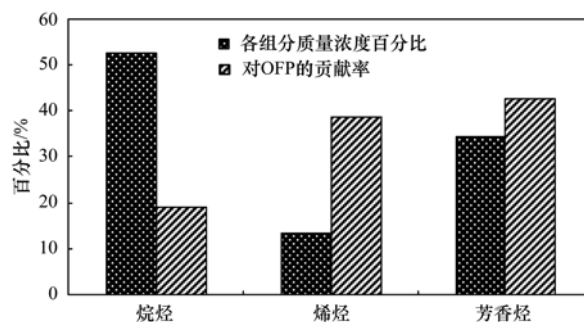


图2 观测期间研究区 VOCs 质量浓度组成及其对 OFP 的贡献率

Fig. 2 Mass concentrations of VOCs and their contribution to OFP in the ambient of the study area

VOCs 质量分数比为 34.3% 的芳香烃,对 OFP 的贡献率为 42.5%;对 OFP 的贡献率最大的是芳香烃,其次是烯烃,二者的贡献率之和高达 81.1%。由此可见,芳香烃和烯烃是广州市中心城区环境空气中 VOCs 中臭氧生成潜势较大的关键活性组分。

根据各 VOCs 物种对 OFP 的贡献率的大小,图 3 给出了对 OFP 贡献率排名前 10 位的物种。从中可见,对 OFP 贡献率排名前 10 位的物种中,芳香烃化合物和烯烃化合物各占 4 种,烷烃占 2 种。这 10 种 VOCs 物种对 OFP 的贡献率为 71.1%;芳香烃、烯烃、烷烃对 OFP 的贡献率分别为 34.8%、25.2%、11.2%。按照对 OFP 贡献率的大小排序,这 10 种 VOCs 物种及对 OFP 的贡献率依次为甲苯 16.9%、反-2-丁烯 11.2%、间/对二甲苯 7.2%、正丁烷 6.8%、1,3,5-三甲苯 5.7%、乙烯 5.0%、邻二甲苯 5.0%、顺-2-丁烯 5.0%、异丁烷 4.4%、1-丁烯 4.0%。由此可见,甲苯、反-2-丁烯、间/对二甲苯、正丁烷、1,3,5-三甲苯等是广州市中心区大气 VOCs 中臭氧生成潜势较大的关键活性组分。结合来源识别分析结果,可以看出机动车尾气排放、汽油蒸发是导致观测期间研究区环境空气中臭氧形成的重要 VOCs 排放源。

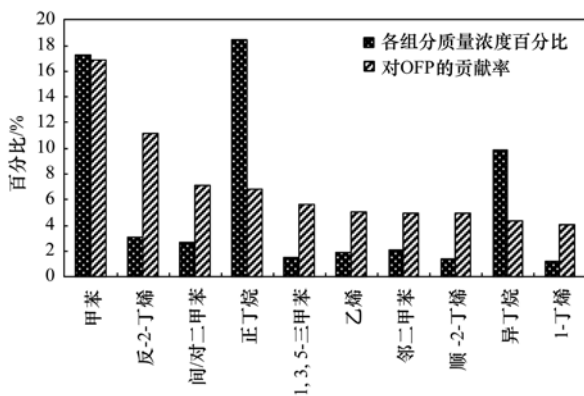


图 3 观测期间研究区环境空气中对 OFP 贡献最大的前 10 种 VOCs 物种

Fig. 3 Species of VOCs with top 10 contribution to the OFP in the ambient air of study area

将 VOCs 作为一个整体,可以研究气团大气化学反应活性的强弱<sup>[23]</sup>。本研究中共获得 220 个连续监测 VOCs 质量浓度数据。图 4 给出了 220 个 VOCs 质量浓度与 OFP 的回归分析结果。从中可见,VOCs 气团的臭氧生成潜势与其质量浓度之间具有良好的线性相关性,说明气团中 VOCs 的化学组成具有一定的稳定性。从相关直线的斜率可以计算 VOCs 的平均最大增量反应活性,其 MIR 约为  $2.67 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,

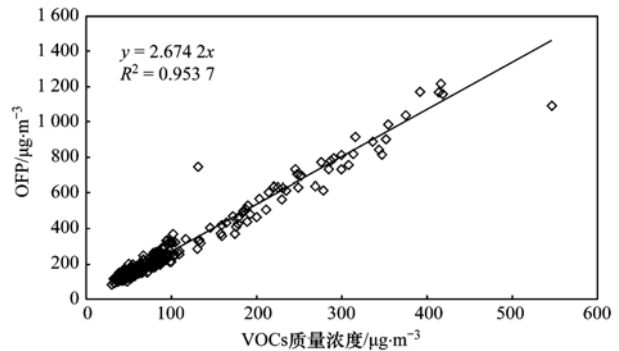


图 4 观测期间研究区环境空气中 VOCs 质量浓度日均值与 OFP 的关系

Fig. 4 Relationship of the mass concentrations of VOCs with OFP in the ambient air of the study area

与甲苯的 MIR ( $2.70 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ) 大小相当,说明广州市中心城区环境空气中 VOCs 具有较强的化学反应活性。这一研究结果低于 2006 年京津地区<sup>[24]</sup> 大气中非甲烷烃的平均最大增量反应活性。

## 2.4 健康风险评价

在检测出的 31 种 VOCs 物质中有 8 种化合物包含在 U. S. EPA 公布的有毒有害空气污染物名单中 (<http://www.epa.gov/ttn/atw/188polls.html>),其主要成分是芳香烃化合物。上述 8 种化合物分别为己烷、1,3-丁二烯、苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯、间二甲苯和对二甲苯,其中 1,3-丁二烯和苯是国际癌症研究机构(IARC)认定的人类一类致癌物质。在分析了 VOCs 的浓度水平与变化特征的基础上,利用 U. S. EPA 的健康风险评价模型,以 U. S. EPA 综合风险信息数据库(IRIS)数据库中已有剂量-效应关系数据的己烷、1,3-丁二烯和 BTEX (苯、甲苯、乙苯、二甲苯简称)等物种为研究对象,评价了其对该研究区居民(成人)产生的健康风险。值得注意的是,致癌物 1,3-丁二烯和苯也会产生非致癌风险,需要对其非致癌风险进行评价。根据各物种的参考剂量(RfC)和单位致癌风险(IUR)等参数,计算得到的非致癌和致癌风险值见表 3。从中可以看出,各物种的暴露浓度(EC)在  $0.49 \sim 19.76 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  之间,非致癌风险危害商值(HQ)在  $3.95\text{E}-03 \sim 2.45\text{E}-01$  之间,总危害商值之和为  $5.43\text{E}-01$ ;1,3-丁二烯和苯的非致癌危害商值比其他污染物较高,是环境空气中危害较大的污染物。1,3-丁二烯和苯的终生致癌风险值(risk)分别为  $1.47\text{E}-05$ 、 $5.34\text{E}-05$ 。目前我国还没有健康风险评价标准,U. S. EPA 指出当污染物的危害商值小于 1 时,污染物不会对人体健康造成明显伤害;一

表 3 己烷、1,3-丁二烯与 BTEX 日平均暴露量和健康风险评价值<sup>1)</sup>

| Table 3 EC, HQ and RISK of hexane, 1,3-butadiene and BTEX |       |                        |          |          |          |
|-----------------------------------------------------------|-------|------------------------|----------|----------|----------|
| 物种                                                        | EC    | RfC/mg·m <sup>-3</sup> | IUR      | HQ       | RISK     |
| 己烷                                                        | 4.95  | 0.7                    | —        | 7.07E-03 | —        |
| 1,3-丁二烯                                                   | 0.49  | 0.002                  | 3.0E-05  | 2.45E-01 | 1.47E-05 |
| 苯                                                         | 6.84  | 0.03                   | 7.80E-06 | 2.28E-01 | 5.34E-05 |
| 甲苯                                                        | 19.76 | 5                      | —        | 3.95E-03 | —        |
| 乙苯                                                        | 4.26  | 1.0                    | —        | 4.26E-03 | —        |
| 间/对二甲苯                                                    | 3.06  | 0.1                    | —        | 3.06E-02 | —        |
| 邻二甲苯                                                      | 2.42  | 0.1                    | —        | 2.42E-02 | —        |
| Σ HQ <sub>i</sub>                                         |       |                        |          | 5.43E-01 | 6.81E-05 |

1) 本研究健康风险评估中 RfC、IUR 采用 US EPA 综合风险信息系统(integrated risk information system,IRIS)推荐值 <http://www.epa.gov/iris>;  
“—”表示文章中无相关数据

般成人可接受的致癌风险为 1E-06. 通过比较得知,己烷、1,3-丁二烯和 BTEX 的危害指数(HI)小于 1,说明其对人体的非致癌风险不大;1,3-丁二烯和苯的致癌风险超过了 1E-06,说明其对人体健康具有明显的影响,长期暴露易对暴露人群健康造成危害,存在潜在的致癌风险.

目前,我国还没有建立完善的健康风险评价与管理体系,针对环境空气中 VOCs 的暴露及健康风险评价的研究相对较少,并且主要针对苯系物. 为了进一步分析我国城市环境空气中 VOCs 的健康风险状况,归纳了近年来我国主要城市环境空

气中苯系物的健康风险评价的研究结果(见表 4). 在所列举的研究中,环境空气中 BTEX 各物种的危害商值在 4.55E-05~1.58E-01 范围,危害指数(HI)小于 1,非致癌风险值在安全范围之内;并且苯的危害商值比其他苯系物的危害商值较大. 苯的致癌风险(南京除外)均大于 1E-06,表明我国部分城市环境空气中的苯存在较大的致癌风险. 因此,为改善环境空气质量和保护居民健康,我国有必要尽快启动苯的大气环境质量基准研究工作,并制定城市环境空气中苯的质量浓度标准.

表 4 本研究苯系物健康风险评价结果与国内其它城市研究结果对比

Table 4 Comparison of the results of health risk assessment of benzene series compounds among this study and the results of related studies in China

| 地点 | 苯        |          | 甲苯       | 乙苯       | 间/对二甲苯   | 邻二甲苯     | 文献   |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------|
|    | Risk     | HQ       | HQ       | HQ       | HQ       | HQ       |      |
| 广州 | 5.34E-05 | 2.28E-01 | 3.95E-03 | 4.26E-03 | 3.06E-02 | 2.42E-02 | 本研究  |
| 北京 | 2.21E-05 | 1.58E-01 | —        | 1.69E-02 | 7.76E-03 |          | [25] |
| 北京 | 4.19E-05 | 1.57E-01 | 2.39E-02 | 3.29E-03 | 8.06E-03 | 3.53E-03 | [26] |
| 天津 | 2.18E-05 | —        | —        | —        | —        | —        | [27] |
| 杭州 | 9.43E-06 | 9.43E-02 | 2.30E-02 | 2.0E-03  | 5.61E-02 |          | [28] |
| 南京 | 1E-07    | —        | —        | —        | —        |          | [29] |

1) “—”表示文章中无相关数据

3 结论

(1) 观测期间研究区环境空气中 VOCs 平均质量浓度为 114.51 μg·m<sup>-3</sup>, 范围为 29.42~546.06 μg·m<sup>-3</sup>, 烷烃和芳香烃是含量最丰富的组分, 质量浓度分别为 59.97 μg·m<sup>-3</sup>和 39.24 μg·m<sup>-3</sup>, 二者在 31 种 VOCs 中所占比例分别为 52.4%、34.3%.

(2) 观测期间研究区环境空气中 31 种 VOCs 浓度之和及烷烃、烯烃、芳香烃这 3 类化合物的各组分浓度之和都呈现出早晚高, 中午低的日变化特征.

(3) 机动车尾气是观测期间研究区环境空气中

VOCs 的主要来源, 同时汽油蒸气、液态石油的挥发以及涂料和溶剂的挥发也是重要来源.

(4) 观测期间研究区 VOCs 气团的最大臭氧增量反应活性为 2.67 g·g<sup>-1</sup>, 平均反应活性较强; 对臭氧生成潜势贡献最大的是芳香烃和烯烃, 贡献率分别为 42.5%、38.6%; VOCs 的关键活性组分是甲苯、反-2-丁烯、间/对二甲苯、正丁烷、1,3,5-三甲苯等; 机动车尾气排放、汽油蒸发是导致观测期间研究区环境空气中臭氧形成的重要 VOCs 排放源.

(5) 己烷、1,3-丁二烯和 BTEX 对人体的非致



癌危害商值在  $3.95E-03 \sim 2.45E-01$  之间,对暴露人群不存在非致癌风险;1,3-丁二烯、苯的致癌风险值分别为  $1.47E-05$ 、 $5.34E-05$ ,对暴露人群存在潜在的致癌风险。

(6)通过比较我国部分城市环境空气中苯系物的健康风险评价研究结果发现,我国城市环境空气中苯对暴露人群存在着较大的致癌风险,因此,我国有必要采取措施严格控制环境空气中苯的污染,尽早研究并制定大气中苯的环境基准和浓度标准。

致谢:感谢广州市环境监测中心站相关研究人员与中国环境科学研究院陈义珍研究员在本研究观测中所给予的大力支持!

#### 参考文献:

- [1] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 1994, **44**: 881-899.
- [2] 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.
- [3] 张远航,邵可声,唐孝炎,等.中国城市光化学烟雾污染研究[J].北京大学学报(自然科学版),1998, **34**(2-3): 392-400.
- [4] Smith M T, Zhang L P, Mchale C M, *et al.* Benzene, the exposome and future investigations of leukemia etiology [J]. Chemico-Biological Interactions, 2011, **192**(1-2): 155-159.
- [5] Khan H A. Benzene's toxicity: a consolidated short review of human and animal studies [J]. Human & Experimental Toxicology, 2007, **26**(9): 677-685.
- [6] 刘雅婷,彭跃,白志鹏,等.沈阳市大气挥发性有机物(VOCs)污染特征[J].环境科学,2011, **32**(9): 2777-2785.
- [7] 刘泽常,张帆,侯鲁健,等.济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究[J].环境科学,2012, **33**(10): 3656-3661.
- [8] 邹宁,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.
- [9] 朱少锋,黄晓峰,何凌燕,等.深圳大气 VOCs 浓度的变化特征与化学反应活性[J].中国环境科学,2012, **32**(12): 2140-2148.
- [10] 张爱东,郭明明,修光利.上海市交通干道空气中苯系物冬季污染特征初探[J].中国环境监测,2006, **22**(2): 52-55.
- [11] 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.
- [12] 孙杰,王跃思,吴方堃,等.唐山市和北京市夏秋季节大气 VOCs 组成及浓度变化[J].环境科学,2010, **31**(7): 1438-1443.
- [13] Yuan B, Chen W T, Shao M, *et al.* Measurements of ambient hydrocarbons and carbonyls in the Pearl River Delta (PRD), China [J]. Atmospheric Research, 2012, **116**: 93-104.
- [14] 郝守进,崔九思.环境中挥发性有机化合物对人体健康影响的研究进展[J].医学研究通讯,2000, **29**(2): 20-23.
- [15] GB 3095—2012,环境空气质量标准[S]. 2012.
- [16] 陆思华,白郁华,张广山,等.机动车排放及汽油中 VOCs 成分谱特征的研究[J].北京大学学报(自然科学版),2003, **39**(4): 507-512.
- [17] 赵静,白郁华,王志辉,等.我国植物 VOCs 排放速率的研究[J].中国环境科学,2004, **24**(6): 654-657.
- [18] 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.
- [19] 空气和废气监测分析方法指南(上册)[M].北京:中国环境科学出版社,2006. 211.
- [20] 吴方堃,王跃思,安俊琳,等.北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J].环境科学,2010, **31**(1): 10-16.
- [21] Barletta B, Meinardi S, Sherwood R F, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [22] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. Chemical Reviews, 2003, **103**(12): 4605-4638.
- [23] 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**(增刊1): 123-130.
- [24] 张俊刚,王跃思,王珊,等.京津地区大气中非甲烷烃“NMHCs”质量浓度水平和反应活性研究[J].环境科学研究,2008, **21**(5): 158-162.
- [25] 周裕敏,郝郑平,王海林.北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评价[J].环境科学,2011, **32**(12): 3566-3570.
- [26] Zhang Y J, Mu Y J, Liu J F, *et al.* Levels, sources and health risks of carbonyls and BTEX in the ambient air of Beijing, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, **24**(1): 124-130.
- [27] Zhou J, You Y, Bai Z P, *et al.* Health risk assessment of personal inhalation exposure to volatile organic compounds in Tianjin, China [J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(3): 452-459.
- [28] 张平.杭州市空气中苯系物的污染特征、来源及健康风险[D].杭州:浙江大学,2007.
- [29] 胡冠九,穆肃,张祥志,等.空气中挥发性有机物污染状况及健康风险评价[J].环境监控与预警,2010, **2**(1): 5-7, 43.

## CONTENTS

|                                                                                                                                           |                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Preface .....                                                                                                                             | HAO Zheng-ping (4503)                                            |
| Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in Nanjing Northern Suburb, China .....                            | AN Jun-lin, ZHU Bin, LI Yong-yu (4504)                           |
| Pollution Characterization of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Tianjin Downtown .....                                         | ZHAI Zeng-xiu, ZOU Ke-hua, LI Wei-fang, <i>et al.</i> (4513)     |
| Source Apportionment of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing in Summer .....                                                            | YANG Hui, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i> (4519)             |
| Estimation of the Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol in Shanghai in Spring .....                                  | CUI Hu-xiong (4529)                                              |
| Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from the Typical Anthropogenic Sources in Sichuan Province .....                      | HAN Li, WANG Xing-rui, HE Min, <i>et al.</i> (4535)              |
| Study on Volatile Organic Compounds Emission of Straw Combustion and Management Countermeasure in Wuhan City .....                        | HUANG Bi-jie (4543)                                              |
| Spatial Distribution Characteristics of NMHCs During Winter Haze in Beijing .....                                                         | DUAN Jing-chun, PENG Yan-chun, TAN Ji-hua, <i>et al.</i> (4552)  |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric VOCs in the Downtown Area of Guangzhou, China .....                   | LI Lei, LI Hong, WANG Xue-zhong, <i>et al.</i> (4558)            |
| Health Risk Assessment of VOCs from a Furniture Mall in Tianjin .....                                                                     | ZHANG Yin, WANG Xiu-yan, GAO Shuang (4565)                       |
| Characterization of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Recycled Waste Polymethyl Methacrylate (PMMA) Industry .....          | WANG Zhe-ming, XU Zhi-rong, YE Hong-yu, <i>et al.</i> (4571)     |
| Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds (VOCs) in Pesticide Factory .....          | TAN Bing, WANG Tie-yu, PANG Bo, <i>et al.</i> (4577)             |
| Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission from Electronic Products Processing and Manufacturing Factory .....         | CUI Ru, MA Yong-liang (4585)                                     |
| Emission Characteristics and Safety Evaluation of Volatile Organic Compounds in Manufacturing Processes of Automotive Coatings .....      | ZENG Pei-yuan, LI Jian-jun, LIAO Dong-qi, <i>et al.</i> (4592)   |
| Index Assessment of Airborne VOCs Pollution in Automobile for Transporting Passengers .....                                               | CHEN Xiao-kai, CHENG He-ming, LUO Hui-long (4599)                |
| Study on the Chemical Compositions of VOCs Emitted by Cooking Oils Based on GC-MS .....                                                   | HE Wan-qing, NIE Lei, TIAN Gang, <i>et al.</i> (4605)            |
| Health-based Risk Assessment in the Excavating Process of VOCs Contaminated Site .....                                                    | FANG Zeng-qiang, GAN Ping, YANG Le, <i>et al.</i> (4612)         |
| Characteristics of Gaseous Pollutants Distribution During Remedial Excavation at a Volatile Organic Compound Contaminated Site .....      | GAN Ping, YANG Yue-wei, FANG Zheng-qiang, <i>et al.</i> (4619)   |
| Factors Affecting Benzene Diffusion from Contaminated Soils to the Atmosphere and Flux Characteristics .....                              | DU Ping, WANG Shi-jie, ZHAO Huan-huan, <i>et al.</i> (4627)      |
| Effects of Soil Compositions on Sorption and Desorption Behavior of Tetrachloroethylene in Soil .....                                     | HU Lin, QIU Zhao-fu, HE Long, <i>et al.</i> (4635)               |
| Occurrence and Distribution of Volatile Organic Compounds in Conventional and Advanced Drinking Water Treatment Processes .....           | CHEN Xi-chao, LUO Qian, CHEN Hu, <i>et al.</i> (4642)            |
| Characteristics and Evaluation of Volatile Organic Compounds Discharge in Typical Enterprise Wastewater in Hangzhou City .....            | CHEN Feng, XU Jian-fen, TANG Fang-liang, <i>et al.</i> (4649)    |
| Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds from Wastewater Treatment System of Vitamin C Production .....                    | GUO Bin, LÜ Guo-li, REN Ai-ling, <i>et al.</i> (4654)            |
| Performance Evaluation of Three Novel Biotrickling Packings .....                                                                         | MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4661)        |
| Performance of Trace Ozone-augmented Biological Trickling Filter in Toluene Degradation .....                                             | ZHANG Chao, ZHAO Meng-sheng, ZHANG Li-li, <i>et al.</i> (4669)   |
| Removal Characteristics of DCM by Biotrickling Filter and Biofilter .....                                                                 | PAN Wei-long, YU Jian-ming, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (4675) |
| Removal of Toluene from Waste Gas by Honeycomb Adsorption Rotor with Modified 13X Molecular Sieves .....                                  | WANG Jia-de, ZHENG Liang-wei, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (4684)   |
| Treatment of Organic Waste Gas by Adsorption Rotor .....                                                                                  | ZHU Run-ye, ZHENG Liang-wei, MAO Yu-bo, <i>et al.</i> (4689)     |
| Study on Adsorption Properties of Organic Vapor on Activated Carbons .....                                                                | CAI Dao-fei, HUANG Wei-qiu, WANG Dan-li, <i>et al.</i> (4694)    |
| Degradation of Styrene by Coupling Ultraviolet and Biofiltration .....                                                                    | SHA Hao-lei, YANG Guo-jing, XIA Jing-fen (4701)                  |
| Adsorption Characteristics of Acetone and Butanone onto Honeycomb ZSM-5 Molecular Sieve .....                                             | DU Juan, LUAN Zhi-qiang, XIE Qiang, <i>et al.</i> (4706)         |
| Analysis of the Distribution of VOCs Concentration Field with Oil Static Breathing Loss in Internal Floating Roof Tank .....              | WU Hong-zhang, HUANG Wei-qiu, YANG Guang, <i>et al.</i> (4712)   |
| Study on the Quantitative Estimation Method for VOCs Emission from Petrochemical Storage Tanks Based on Tanks 4.0.9d Model .....          | LI Jing, WANG Min-yan, ZHANG Jian, <i>et al.</i> (4718)          |
| Oxidation Behavior and Kinetics of Representative VOCs Emitted from Petrochemical Industry over CuCeO <sub>x</sub> Composite Oxides ..... | CHEN Chang-wei, YU Yan-ke, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> (4724)  |
| Direct Photolysis of Methylamine Gas by KrBr <sup>*</sup> Excilamp .....                                                                  | ZHAO Jie, LIU Yu-hai, WEI Lian-mei, <i>et al.</i> (4734)         |
| Study on the Relationship Between Odor Intensity and Components Concentrations of Odor Mixture .....                                      | YAN Lu-chun, LIU Jie-min, FU Hui-ting, <i>et al.</i> (4743)      |
| Study on Key Technical Problems in the Development of Volatile Organic Pollutants Emission Standards .....                                | JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, REN Chun, <i>et al.</i> (4747)        |
| Establishment and Improvement of Emission Control Standard System of Volatile Organic Compounds in Industry .....                         | JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZOU Lan, <i>et al.</i> (4751)         |
| Characteristics and Countermeasures of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China .....                                          | WANG Tie-yu, LI Qi-feng, LÜ Yong-long (4756)                     |
| Status and Needs Research for On-Line Monitoring of VOCs Emissions from Stationary Sources .....                                          | WANG Qiang, ZHOU Gang, ZHONG Qi, <i>et al.</i> (4764)            |
| Evaluation of Treatment Technology of Odor Pollution Source in Petrochemical Industry .....                                               | MU Gui-qin, SUI Li-hua, GUO Ya-feng, <i>et al.</i> (4771)        |
| Research Advances on Volatile Organic Compounds Emission Inventory of Plants .....                                                        | XIE Jun-fei, LI Yan-ming (4779)                                  |
| Study of VOCs Emission Prediction and Control Based on Dynamic CGE .....                                                                  | LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (4787) |

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

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 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 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)

2013年12月15日 34卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 12 Dec. 15, 2013

|         |                                                                                                                                                                     |                  |    |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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     | 欧阳自远                                                                                                                                                                | Editor-in -Chief |    | OUYANG Zi-yuan                                                                                                                                                                                                          |
| 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   | 中国国际图书贸易总公司<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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行