

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第32卷 第12期

Vol.32 No.12

2011

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(3461)

我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究 王海林,张国宁,聂磊,王宇飞,郝郑平(3462)

我国 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策探讨 陈颖,李丽娜,杨常青,郝郑平,孙汉坤,李瑶(3469)

工业固定源 VOCs 治理技术分析评估 栾志强,郝郑平,王喜芹(3476)

工业挥发性有机物排放控制的有效途径研究 江梅,张国宁,魏玉霞,邹兰,张明慧(3487)

台湾地区 VOCs 污染控制法规、政策和标准 栾志强,王喜芹,郑雅楠,刘平(3491)

国外固定源 VOCs 排放控制法规与标准研究 张国宁,郝郑平,江梅,王海林(3501)

挥发性有机物税收政策对我国经济的影响分析 刘昌新,王宇飞,王海林,郝郑平,王铮(3509)

民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征 李兴华,王书肖,郝吉明(3515)

北京及周边地区大气羰基化合物的时空分布特征初探 王琴,邵敏,魏强,陈文泰,陆思华,赵越(3522)

北京市 BTEX 的污染现状及变化规律分析 孙杰,王跃思,吴方莛(3531)

上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析 崔虎雄,吴迺名,高松,段玉森,王东方,张懿华,伏晴艳(3537)

长沙大气中 VOCs 研究 刘全,王跃思,吴方莛,孙杰(3543)

佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征 马永亮,谭吉华,贺克斌,程远,杨复沫,余永昌,谭赞华,王洁文(3549)

深圳市显著排放 VOCs 的园林植物调查与分析
..... 黄爱葵,李楠,Alex Guenther,Jim Greenberg,Brad Baker,Michael Graessli,白建辉(3555)

北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析 周裕敏,郝郑平,王海林(3560)

北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评价 周裕敏,郝郑平,王海林(3566)

城市污水处理厂恶臭挥发性羰基化合物的排放特征 周咪,王伯光,赵德骏,张春林,古颖纲(3571)

城市污水处理厂挥发性卤代有机物的排放特征及影响因素研究 何洁,王伯光,刘舒乐,赵德骏,唐小东,邹宇(3577)

城市污水处理厂恶臭挥发性有机物的感官定量评价研究 刘舒乐,王伯光,何洁,唐小东,赵德骏,郭薇(3582)

植物释放挥发性有机物(BVOC)向二次有机气溶胶(SOA)转化机制研究 李莹莹,李想,陈建民(3588)

NO₃ 自由基与 3 种环醚的大气化学反应动力学研究 盖艳波,葛茂发,王炜罡(3593)

3-甲基-3-丁烯基-1-醇与硫酸/过氧化氢混合溶液的吸收反应研究 王天鹤,刘泽,葛茂发,王炜罡(3599)

水中挥发性有机物的分析方法综评 许秀艳,朱擎,谭丽,梁宵,张颖,滕恩江(3606)

新型动态针捕集阱技术分析大气中低浓度的 VOCs 李想,陈建民(3613)

大气中总挥发性有机硫化物检测方法的研究 王艳君,郑晓玲,何鹰,张栋,王保栋(3617)

全自动阵列离子迁移谱仪连续监测挥发性有机化合物
..... 周庆华,仓怀文,鞠帮玉,李林,杜永斋,陈创,侯可勇,李京华,王卫国,李海洋(3623)

膜进样-单光子电离/化学电离-质谱仪在线检测水中 VOCs
..... 花磊,吴庆浩,侯可勇,崔华鹏,陈平,赵无垠,谢园园,李海洋(3628)

工业园区 TVOC 和恶臭的电子鼻检测技术研究 田秀英,蔡强,叶朝霞,郭威,卢岩文,张永明(3635)

电子鼻检测污染土壤中挥发性氯代烃的适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,蔡强,陈吕军,张永明(3641)

工业管道中丙烯酸酯类物质的监测与分析 吴彬,张红燕,陆林光(3647)

硅改性制备疏水性沸石分子筛蜂窝体 王喜芹,李凯,魏冰,栾志强(3653)

氧化锰八面体分子筛的合成及其对苯催化氧化性能 李东艳,刘海弟,陈运法(3657)

蜂窝状活性炭对 VOCs 的吸-脱附性能研究 韩忠娟,罗福坤,李泽清(3662)

混合气体直接吸附分离回收过程研究 王红玉,羌宁,胡瑕(3667)

生物滴滤降解氯苯废气的实验研究 周卿伟,朱润晔,胡俊,张丽丽,陈建孟(3673)

复合吸收技术净化复杂工业有机废气 陈定盛,岑超平,唐志雄,方平,陈志航(3680)

烘房 VOCs 废气治理技术路线探析 李泽清,罗福坤(3685)

Co₃O₄ 纳米棒的制备及其对气相甲苯的催化氧化 闫清云,李新勇,肇启东,曲振平(3689)

Si 掺杂 TiO₂ 纳米管阵列制备、表征及其光催化氧化降解室内典型 VOCs 邹学军,李新勇,曲振平,王疆疆(3694)

基于现场试验的石油类污染物自然衰减能力研究 贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(3699)

膜分离法处理加油站油气研究 朱玲,陈家庆,张宝生,王建宏(3704)

机动车加油过程中气液两相流动特性的 CFD 数值模拟 陈家庆,张男,王金惠,朱玲,尚超(3710)

《环境科学》第 32 卷(2011 年)总目录 (3717)

《环境科学》征稿简则(3679) 《环境科学》征订启事(3684) 信息(3554, 3616, 3622, 3672)

上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析

崔虎雄, 吴迺名, 高松, 段玉森, 王东方, 张懿华, 伏晴艳

(上海市环境监测中心, 上海 200030)

摘要: 利用在线气相色谱-氢火焰离子化 (GC-FID) 监测系统对上海市城区典型污染前、污染中和污染后的 55 种挥发性有机物 (VOCs) 进行了自动连续监测, 分析了各个阶段 VOCs ($C_2 \sim C_{12}$) 体积分数、物种变化特征. 结果表明上海市城区典型污染前 VOCs 平均体积分数为 27×10^{-9} ; 污染中 VOCs 体积分数迅速增加, 比污染前高 3 倍, 达到 87×10^{-9} ; 具体以烷烃最高 (35.2×10^{-9})、芳香烃次之 (30.0×10^{-9})、烯烃最低 (21.6×10^{-9}); 用最大臭氧生成潜势量 (Φ_{OFP}) 对不同污染阶段污染 VOCs 大气活性进行了评估, 结果表明不同污染阶段 VOCs 的 Φ_{OFP} 均呈现污染前 < 污染后 < 污染中的变化特征. 污染前期的 Φ_{OFP} 依次是芳香烃 (53.0%) > 烯烃 (36.1%) > 烷烃 (11.7%); 污染中期的 Φ_{OFP} 依次是芳香烃 (54.7%) > 烯烃 (36.7%) > 烷烃 (9.8%); 污染后期 Φ_{OFP} 则依次是烯烃 (52.7%) > 芳香烃 (36.0%) > 烷烃 (13.2%). 具体关键活性物种主要包括甲苯、间、对二甲苯、1, 3-丁二烯、乙烯、丙烯等芳香烃和烯烃物种, 具体以烯烃 $C_2 \sim C_4$ 为主, 芳香烃 $C_6 \sim C_8$ 为主. 不同污染阶段 O_3 与 Φ_{OFP} 之间存在典型的非线性负相关关系, 并且 Φ_{OFP} 转化为 O_3 的量均小于 20%, 说明臭氧浓度仍有很大上升空间; 这对定量评估大气中 VOCs 对臭氧的影响具有重要意义.

关键词: 典型污染; 挥发性有机物; 最大臭氧生成潜势量; 增量反应性

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)12-3537-06

Characteristics of Ambient VOCs and Their Role in O_3 Formation: A Typical Air Pollution Episode in Shanghai Urban Area

CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, GAO Song, DUAN Yu-sen, WANG Dong-fang, ZHANG Yi-hua, FU Qing-yan

(Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200030, China)

Abstract: The concentration, speciation and chemical reactivity of ambient volatile organic compounds (VOCs) in Shanghai city were analyzed and measured by using online gas chromatography with flame ionization detection systems (GC-FID) during a typical air pollution episode (from Oct. 30th to Nov. 2nd, 2010) and 55 kinds of VOCs were detected. The results show that averaged concentrations of VOCs was 27×10^{-9} before the episode, and then dramatically increased by 3 times (87×10^{-9}) in the episode than the former, the main components were alkanes (35.2×10^{-9}), aromatics (30.0×10^{-9}), alkenes (21.6×10^{-9}). Furthermore, the maximum ozone formation potential (Φ_{OFP}) is analyzed and showed that Φ_{OFP} (in the episode) > Φ_{OFP} (after the episode) > Φ_{OFP} (before the episode). Before the episode, the percent of Φ_{OFP} for aromatics 53.0%, alkenes 36.1% and alkanes 11.7%; in the episode, the percent of Φ_{OFP} for aromatics 54.7%, alkenes 36.7% and alkanes 9.8%; after the episode, the percent of Φ_{OFP} for alkenes 52.7%, aromatics 36.0% and alkanes 13.2%. Alkenes ($C_2 \sim C_4$) and aromatics ($C_6 \sim C_8$) are the main components for the ozone formation, namely toluene, *m,p*-xylene, 1, 3-butadiene, propene, ethene et al. In addition, the relationship is negative and nonlinear between the O_3 and Φ_{OFP} . And efficiencies of Φ_{OFP} formed into O_3 are below 20.0% in different stage of episode. This is very important and meaningful for the quantitative evaluate the influence of VOCs towards O_3 .

Key words: typical air pollution; volatile organic compounds; maximum ozone formation potential; maximum incremental reactivity

对流层中的臭氧是大气是否发生光化学烟雾的标志性产物, 它主要是由一次排放的氮氧化物和碳氢化合物等, 在高温、低风的气象条件下受太阳辐射的作用, 在大气中发生一系列复杂化学反应而产生的. 大气中挥发性有机物 (VOCs) 是参与光化学污染的重要物种, 目前城市中挥发性有机物污染问题已十分突出, 不仅组分越来越复杂, 而且浓度呈现大幅上升的趋势. 随着上海经济规模的快速发展, 工业种类繁多, 类型复杂, 加之机动车数量的迅速增加, 使得上海空气污染从由单一的污染向光化学污染等复合污染转变, 臭氧、沙尘和酸雨等多种污染相互交

织, 使得上海的空气污染越来越复杂化、严重化、高频率化等. 因此, 研究各种污染事件中污染物的含量、变化特征、污染成因等, 对于污染变化规律以及控制具有重要意义. 已有研究报道了北京^[1-6]、天津^[7]、济南^[8,9]、杭州^[10]、上海^[11-15]、珠江三角洲^[16-18]、广州^[19]和香港^[20]臭氧及前体物污染变化特征; 文献^[21-23]对上海城区臭氧及其前体物 VOCs 变化特征进行了研究. 王红丽等^[24]在 2010 年

收稿日期: 2011-06-23; 修订日期: 2011-08-11

基金项目: 环保部公益性科研专项计划课题项目 (2010467001)

作者简介: 崔虎雄 (1986 ~), 男, 硕士, 主要研究方向为环境空气中挥发性有机物监测、分析等, E-mail: cuihx@semc.gov.cn

对上海市城区春节和“五一”期间大气挥发性有机物的组成特征进行了研究. 目前, 上海很多相关研究往往集中于长期臭氧污染特征^[11,12,15,21,23]、节假日和周末臭氧及其前体物变化特征^[13,24]等, 而对上海市典型空气污染条件下的臭氧及其前体物变化特征的研究相对缺乏.

本研究主要对上海城区典型污染发生前、中和后臭氧及其前体物 VOCs 浓度变化特征进行分析, 考察不同污染阶段最大臭氧生成潜势量的变化, 以建立不同污染阶段最大臭氧生成潜势量与生成臭氧浓度的关系, 可用于定量评估前体物对臭氧生成的影响.

1 方法与质量控制

1.1 测量方法

VOCs 采用自动在线气相色谱-氢火焰离子化 (Gas Chromatography-Flame Ionization Detector, GC-FID) 监测系统实时监测, 时间分辨率为 30 min, 由荷兰 Synspec 公司生产的 GC955 系列监测系统, 具体包括 GC955-811 和 611 两套独立的分析系统, 分别测量低碳 ($C_2 \sim C_6$) VOCs 和高碳 ($C_6 \sim C_{12}$) VOCs, 检测器均为氢火焰离子化检测器 (FID), 可检测 55 种 VOC, 具体种类详见美国 EPA 规定的 PAMS 监测项目中的监测物种. $C_2 \sim C_{12}$ 的采样位于浦东中心城区, 采样位置距地面约 20 m, 站点周边主要为住宅区和商业区, 是典型的城区监测点. 除此之外, 还有 O_3 、 NO_x 、CO、风速风向等监测仪.

1.2 质量控制

为了确保监测数据的准确性, 监测前用美国环保署认可的臭氧前体物标准光化学气体进行仪器校准. 标准气体为美国 Restek 34400/Ozone Precursor Mixture/PAMS, 含有 55 种浓度 (体积分数) 为 $1 \times$

10^{-6} 的气体组分. 监测前后利用标准气体采用 5 点标准法对仪器进行校准和校核, 校准时相关系数均在 0.998 以上; 此外, 还定期对仪器进行单点校准和峰窗漂移校准.

2 结果与分析

根据上海市环境保护局 (<http://www.sepb.gov.cn/>) 每日发布空气质量日报显示: 上海市 10 月 30 日空气质量为优 (空气污染指数 API < 50), 10 月 31 日空气质量为良 (空气污染指数 $50 < API < 100$), 11 月 1 日空气质量为轻度污染 (可吸入颗粒物和二氧化氮 API 均超过 100), 11 月 2 日空气质量为轻度污染 (只有可吸入颗粒物污染). 本研究选取时间从 10 月 30 日 ~ 11 月 2 日, 具体分污染前 (10 月 30 日 00:00 至 10 月 31 日 16:00)、污染中 (10 月 31 日 17:00 至 11 月 2 日 02:00) 和污染后 (11 月 2 日 03:00 至 11 月 2 日 23:00) 不同阶段对 VOCs 的变化特征、最大臭氧生成潜势量以及与臭氧生成浓度的关系等方面进行分析.

2.1 臭氧及其前体物的变化和组成特征

图 1 显示了观测期间风向、风速、UV 辐射和气温的时间变化序列图. 由图 1 可知, 观测期间以东北和西北风风向为主导, 风速较低 ($< 2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). 污染前期主要以东北风为主, UV 辐射最大值为 $22 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; 污染中期主要以西北风为主, UV 辐射最大值为 $21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$; 污染后期主要以西北和东北风交替为主, UV 辐射有一定程度的降低, 最大值为 $13 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. 温度变化呈现出典型秋季气候特点, 在 $10 \sim 20^\circ\text{C}$ 之间. 由上可知: 整个污染期间, 尽管风速较小, 有利于污染物聚集, 但由于秋季典型光照强度以及气温不利于光化学反应的进行, 从而使得前体物以及臭氧的生成受到一定程度限制.

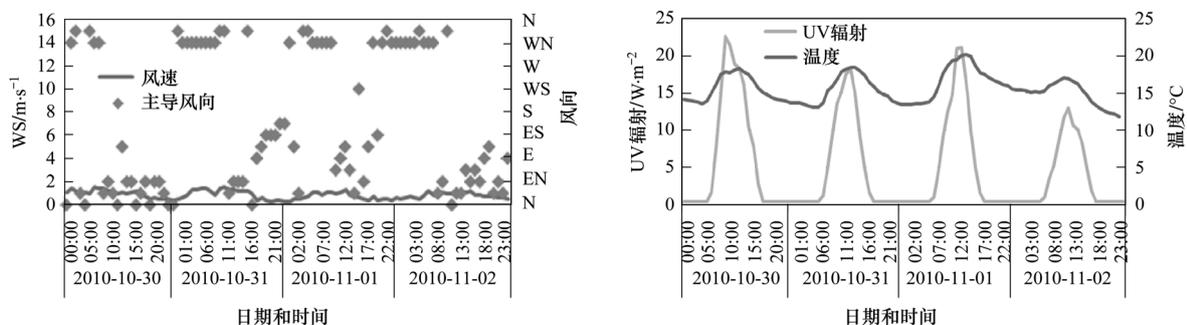


图 1 观测期间观测点风向、风速、UV 辐射和气温的时间变化

Fig. 1 Time series of wind speed, wind direction, UV radiation and temperature observed at Pudong from October 30th to November 2nd, 2010

图 2 是观测期间本次污染前、中和后观测点 O_3 、VOCs、NO 和 NO_2 时间序列图。由图 2 可见,整个观测期间,臭氧前体物 VOCs、NO、 NO_2 的变化基本一致,与 O_3 变化呈现较好的反相关关系;具体来讲,污染前期浓度均较低,污染中期浓度迅速增加,污染后期又逐渐减小;对于 VOCs,污染前期其体积分数远远低于 100×10^{-9} (即 $107 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);污染中期其小时瞬时体积分数高达 223×10^{-9} (即 $300 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$);污染后期其体积分数降低到 $50 \times 10^{-9} \sim 100 \times 10^{-9}$ 之间 ($< 107 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)。国内相关研究^[10]指出城市清洁区域 $C_2 \sim C_{12}$ 浓度在 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 附近,交通干道最高值达到约 $190 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;由此可知,污染前期 VOCs 浓度接近于城市清洁背景值,污染中期 VOCs 浓度远远高于其交通干道的浓度值。而对于臭氧,污染前期,其小时浓度最大值已经达到 $0.176 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,进入污染中期臭氧小时浓度最大值仅为 $0.175 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 基本与污染前期最大值相等,污染后期 O_3 小时浓度最大值仅 $0.100 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由上可知,污染中期臭氧前体物 VOCs、NO 浓度的大幅增加对生成臭氧浓度的产生较大影响,即臭氧浓度并未随前体物浓度增加而增加,这可能由于受辐

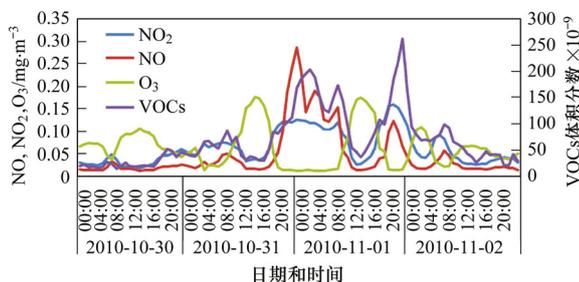
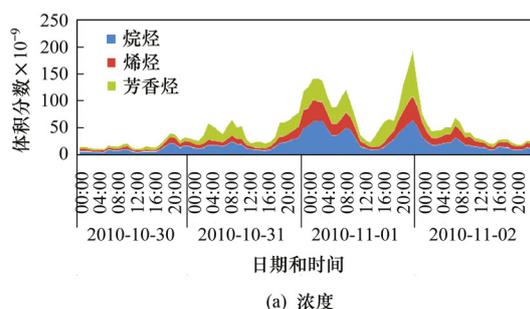


图 2 观测期间上海市城区观测点 VOCs、 O_3 、NO 和 NO_2 的时间序列图

Fig. 2 Time series of VOCs, O_3 , NO and NO_2 observed at Pudong from October 30th to November 2nd, 2010



射、温度等条件的限制,使得大量的臭氧前体物无法得到充分光化学反应,从而使得生成的臭氧受限。

图 3 显示了观测期间挥发性有机物 (VOCs) 中烷烃、烯烃和芳香烃的时间序列和百分比变化。由图 3 所示,不同污染阶段, VOCs 体积分数和组分比均存在一定的差异。在污染前期: VOCs 最大小时体积分数为 71.7×10^{-9} , 平均体积分数为 27.2×10^{-9} , VOCs 各组分体积分数水平依次为烷烃 11.9×10^{-9} (43.7%)、芳香烃 9.3×10^{-9} (34.3%)、烯烃 6.0×10^{-9} (22.0%); 污染中期: VOCs 最大小时体积分数为 223×10^{-9} , 平均体积分数为 86.8×10^{-9} , VOCs 各组分体积分数水平依次为烷烃 35.2×10^{-9} (40.5%)、芳香烃 30.0×10^{-9} (34.6%)、烯烃 21.6×10^{-9} (24.9%)。污染后期: VOCs 最大小时体积分数为 86.1×10^{-9} , 平均体积分数为 34.8×10^{-9} , VOCs 各组分体积分数水平依次为烷烃 16.1×10^{-9} (46.5%)、烯烃 11.2×10^{-9} (32.3%)、芳香烃 7.4×10^{-9} (21.2%)。由上可知,污染前期和污染中期 VOCs 各组分体积分数均以烷烃 > 芳香烃 > 烯烃,前者 VOCs 各组分体积分数水平几乎均是后者的 1/3,这说明污染前和污染中 VOCs 来源基本一致,均是由于人类外出活动使用机动车排放所造成,只是由于世博会闭幕大型活动加剧了这一排放以及外加不利于扩散气象条件而造成。而污染后期 VOCs 各组分体积分数则以烷烃 > 烯烃 > 芳香烃,这可能与污染后 UV 辐射强度仅是污染前和污染中的 60%,气温也低于污染前和污染中 $1 \sim 2^\circ\text{C}$,从而限制了更为活泼的烯烃类物种参与光化学反应的速度和强度。

观测期间不同污染阶段百分含量 (体积分数) 最丰富物种见图 4。由图 4 可知,不同污染阶段百分含量最丰富的物种基本一致,污染前期依次是甲苯 14.3%,丙烷 10.2%,乙烯 9.8%,1,3-丁二烯

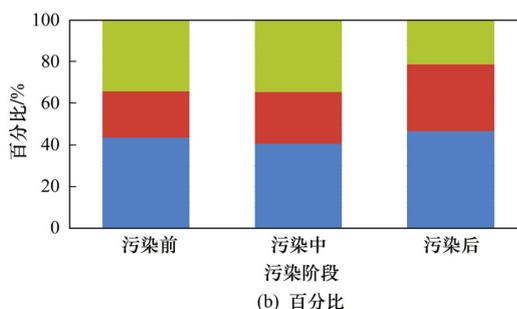
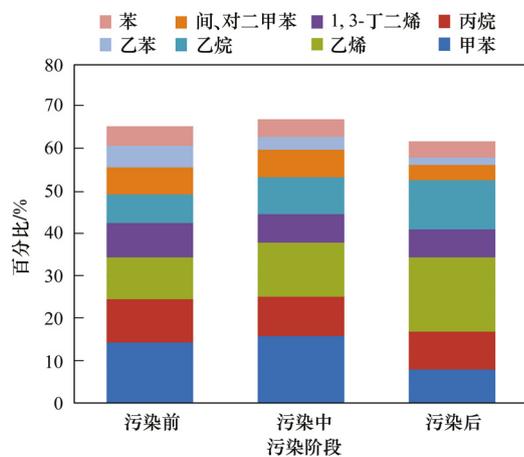


图 3 观测期间烷烃、烯烃和芳香烃浓度水平及百分比

Fig. 3 Time series and percentage of alkanes, alkenes and aromatics observed at Pudong from October 30th to November 2nd, 2010

8.3%,乙烷6.5%,间、对-二甲苯6.4%,乙苯5.3%和苯4.6%,累积占测量总VOCs的66%;污染中期依次是甲苯15.8%,乙烯13.0%,丙烷9.2%,乙烷8.7%,1,3-丁二烯6.6%,间、对二甲苯6.6%,苯4.1%和乙苯3.0%,累积占测量总VOCs的67%;污染后期依次是乙烯17.4%,乙烷11.6%,丙烷9.0%,甲苯7.8%,1,3-丁二烯6.8%,间、对二甲苯3.5%,苯3.8%和乙苯1.8%,累积占测量总VOCs的62%。由此可见,上海城区典型污染前、中和后大气的优势物种主要是 $C_2 \sim C_4$ 的烷烃和烯烃类, $C_6 \sim C_8$ 的芳香烃类等VOCs,这与国内其他研究的结论基本一致^[10,24,25]。



其中不包括乙炔和异丁烯

图4 观测期间上海市城区观测点含量丰富VOCs物种百分比

Fig. 4 Percentage of main components of VOCs observed at Pudong from October 30th to November 2nd, 2010

2.2 臭氧生成潜势分析

挥发性有机化合物在光氧化反应中会随着物种的不同,反应速率也不同,对臭氧生成的影响也不同。在 $C_2 \sim C_{12}$ 物种中,烯烃、芳香烃和长链烷烃等与 $\cdot OH$ 的反应速率大,容易参与光化学反应,从而促使臭氧的生成。本研究主要利用最大增量反应性(max incremental reactivities, MIR)分析评估各组分对臭氧生成的贡献,具体如下。

$C_2 \sim C_{12}$ 对臭氧生成的贡献用下面的公式来进行计算(1):

$$\Phi_{\text{OFP}} = \xi_{\text{MIR}} \times \rho(C_2 \sim C_{12}) \quad (1)$$

式中, Φ_{OFP} 为最大臭氧生成潜势量; ξ_{MIR} 为最大增量反应性; $\rho(C_2 \sim C_{12})$ 为各个组分的质量浓度。

如果组分*i*的 Φ_{OFP} 值大,说明该组分对臭氧生成潜势大,反之则小。 Φ_{OFP} 除以 $\rho(C_2 \sim C_{12})$ 可以得

到平均增量反应性(ξ_{MIR})。

不同污染阶段VOCs和其组分的最大臭氧生成潜势量变化(Φ_{OFP})和平均增量反应性(ξ_{MIR})见表1。由表1可见,不同污染阶段VOCs的 Φ_{OFP} 和 ξ_{MIR} 均有较大差异,并且 Φ_{OFP} 和 ξ_{MIR} 均呈现出污染前<污染后<污染中的变化特征;污染中期 $\Phi_{\text{OFP}} = 1134.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 为污染前期 $\Phi_{\text{OFP}} = 347.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的3.26倍,为污染后期 $\Phi_{\text{OFP}} = 387.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的2.93倍;对于 ξ_{MIR} ,污染前期($\xi_{\text{MIR}} = 4.05$)、中期($\xi_{\text{MIR}} = 4.32$)和后期($\xi_{\text{MIR}} = 4.18$)的差异较小。由以上分析可知,不同污染阶段对大气中VOCs最大臭氧生成潜势量影响较大,但对VOCs的平均增量反应活性影响有限;这说明不同污染阶段VOCs排放源基本一致,只是由于排放强度和气象条件的影响会造成污染的聚集,从而使得大气中VOCs最大臭氧生成潜势量在不同污染阶段存在较大的差异。对于VOCs各组分的 Φ_{OFP} 和 ξ_{MIR} 也随着不同的污染阶段而存在差异;污染前期和污染中期的 Φ_{OFP} 均以芳香烃>烯烃>烷烃;污染后期 Φ_{OFP} 则烯烃>芳香烃>烷烃。具体对于烷烃,污染中期 Φ_{OFP} 分别是污染前期和污染后期的2.7倍和2.2倍;对于烯烃,污染中期 Φ_{OFP} 分别是污染前期和污染后期的3.3倍和2.0倍;对于芳香烃,污染中期 Φ_{OFP} 分别是污染前期和污染后期的3.4倍和4.4倍;烷烃、烯烃和芳香烃在不同污染阶段的平均增量反应性(ξ_{MIR})也呈现较小的差异。VOCs各组分的平均增量反应活性相差较小,也进一步说明了污染源来源基本一致,各组分对最大臭氧生成潜势量的贡献也应一致。污染后期烯烃和芳香烃的最大臭氧生成潜势量的变化主要由于污染后期UV辐射强度的减弱和温度的降低造成大量活性烯烃不能快速的由潜势量转化为实际臭氧生成量。总之,影响本市这次典型污染的VOCs在不同污染阶段来源基本一致,并且影响VOCs平均增量反应活性的主要是芳香烃和烯烃。相关研究也指出北京^[5]、杭州^[10]等城市的烯烃、芳香烃对臭氧生成的贡献最大。

表1 污染不同阶段的最大臭氧生成潜势量¹⁾

污染阶段	烷烃		烯烃		芳香烃		VOCs	
	Φ_{OFP}	ξ_{MIR}	Φ_{OFP}	ξ_{MIR}	Φ_{OFP}	ξ_{MIR}	Φ_{OFP}	ξ_{MIR}
污染前	40.8	1.2	125.4	11.13	184.3	4.55	347.7	4.05
污染中	110.8	1.18	416.0	10.7	620.5	4.77	1134.6	4.32
污染后	51.1	1.21	203.9	10.63	139.3	4.33	387.1	4.18

1) Φ_{OFP} 的单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

VOCs 中主要关键活性组分的最大臭氧生成潜势量 (Φ_{OFF}) 及其百分比见表 2. 由表 2 可见, 与体积分数大为不同的是, VOCs 物种对 Φ_{OFF} 贡献最大的主要是烯烃和芳香烃. 该 7 种主要活性物种的 Φ_{OFF} 占总测量 VOCs 的 73.2%、70.4% 和 62.8%; 污染前期、中期和后期的最重要的物种是甲苯、间、对二甲苯和 1, 3-丁二烯, 占总 VOCs 的 46.1% ~ 56.6%, 此 7 种关键 VOCs 中, 均是烯烃和芳香烃, 并且烯烃主要以 $C_2 \sim C_4$ 为主, 芳香烃则以 $C_6 \sim C_8$ 为主. 虽然不同污染阶段, 均以芳香烃的 Φ_{OFF} 所占的比例最大, 但不同污染阶段又有所不同, 依次是: Φ_{OFF} (污染中期) 48.5%, Φ_{OFF} (污染前期) 47.9%, Φ_{OFF} (污染后期) 31.4%. 总的来讲, 上海城区大气 VOCs 在此次不同污染阶段对臭氧生成贡献最大的关键活性物种是甲苯、间、对二甲苯和 1, 3-丁二烯、丙烯、乙烯等.

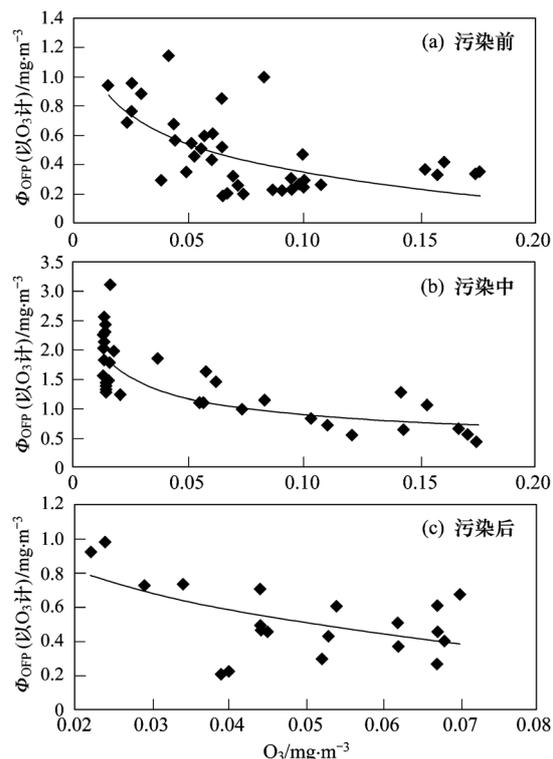
表 2 各组分最大臭氧生成潜势量变化¹⁾

Table 2 Variation of max ozone formation potentials for VOCs components

物种	污染前		污染中		污染后	
	Φ_{OFF}	% ²⁾	Φ_{OFF}	%	Φ_{OFF}	%
甲苯	64.6	18.6	232.0	20.4	49.3	12.7
间、对二甲苯	65.0	18.7	217.4	19.2	49.7	12.8
1, 3-丁二烯	69	19.3	179.5	15.8	79.7	20.6
邻二甲苯	15.6	4.5	62.9	5.5	12.8	3.3
丙烯	14.1	4.1	45.7	4.0	29.3	7.6
乙苯	21.1	6.1	39.0	3.4	9.9	2.6
乙烯	5.0	1.4	21.8	1.9	12.5	3.2

1) 其中不包括异丁烯和乙炔; 2) 表示各个物种 Φ_{OFF} 占总测量 VOCs 的 Φ_{OFF} 的百分比

此外, 对此次不同污染阶段的最大臭氧生成潜势量 (Φ_{OFF}) 与 O_3 生成浓度之间的关系也进行了分析 (图 5). 由图 5 可知, 污染前期、中期和后期 O_3 与 Φ_{OFF} 之间的关系存在较大差异: 污染前期和后期 Φ_{OFF} (以 O_3 计, 下同) 在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下, O_3 浓度随着 Φ_{OFF} 的逐渐减少而逐渐增大, 两者呈现典型的非线性负相关关系; 污染中期的 Φ_{OFF} 在大于和小于 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 与臭氧的关系呈现明显不同的规律: 当 $\Phi_{\text{OFF}} > 1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, O_3 浓度并没有随着 Φ_{OFF} 快速下降而呈现任何变化. 这主要由于污染期间 Φ_{OFF} 高潜势量主要发生在夜间, 夜间高 Φ_{OFF} 对臭氧生成没有贡献. 从 Φ_{OFF} 对臭氧生成的影响来看, 污染前期 12.5% 的 Φ_{OFF} 转化为 O_3 , 污染中期 20.0% 的 Φ_{OFF} 转化为 O_3 , 污染后期 17.5% 的 Φ_{OFF} 转化为 O_3 ;

图 5 观测期间不同污染阶段 Φ_{OFF} 与 O_3 浓度的关系Fig. 5 Relationship between Φ_{OFF} and O_3 observed at Pudong from October 30th to November 2st, 2010

这说明上海城区大气中臭氧生成潜势量仍有很大空间可以转化为更多的 O_3 .

3 结论

(1) 上海市城区 VOCs 平均体积分数呈现污染前期较低, 污染中期迅速增加, 污染后期又逐渐减小的变化特征. 污染中期 VOCs 平均体积分数为 115×10^{-9} , 是污染前期 35×10^{-9} 的 3.28 倍. VOCs 各组分的百分组成: 污染前期为烷烃 43.7%、芳香烃 34.3%、烯烃 22.0%; 污染中期为烷烃 40.5%、芳香烃 34.6%、烯烃 24.9%; 污染后期为 46.5%、烯烃 32.3%、芳香烃 21.2%. 污染后期 UV 辐射强度和温度的降低是导致烯烃比例上升的主要原因.

(2) 不同污染阶段 VOCs 的最大臭氧生成潜势量 (Φ_{OFF}) 和平均增量反应性 (ξ_{MIR}) 均呈现污染前 < 污染中 < 污染后的变化特征. Φ_{OFF} (污染中期) = $1134.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 为 Φ_{OFF} (污染前期) = $347.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 3.26 倍, 为 Φ_{OFF} (污染后期) = $387.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 的 2.93 倍; 对于 ξ_{MIR} (以 O_3 计), 污染前期 ξ_{MIR} 为 $4.05 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 、中期 ξ_{MIR} 为 $4.32 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和后期 ξ_{MIR} 为 $4.18 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 此外, 污染前期的 Φ_{OFF} 均以芳香烃

(53.0%) > 烯烃(36.1%) > 烷烃(11.7%); 污染中期的 Φ_{OFP} 均以芳香烃(54.7%) > 烯烃(36.7%) > 烷烃(9.8%); 污染后期 Φ_{OFP} 则烯烃(52.7%) > 芳香烃(36.0%) > 烷烃(13.2%)。具体关键活性物种主要包括甲苯、间、对二甲苯、1,3-丁二烯、乙烯、丙烯等,不同污染阶段分别占总 VOCs Φ_{OFP} 的 73.2%、70.4% 和 62.8%。影响本市这次典型污染的 VOCs 在不同污染阶段来源基本一致,主要由于机动车尾气排放导致,并且影响 VOCs 平均增量反应活性的主要是芳香烃和烯烃,烯烃主要以 $\text{C}_2 \sim \text{C}_4$ 为主,芳香烃则以 $\text{C}_6 \sim \text{C}_8$ 为主。

(3) 污染前期、中期和后期 O_3 与 Φ_{OFP} 之间存在典型的非线性相关关系。 Φ_{OFP} 在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 以下, O_3 浓度随着 Φ_{OFP} 的逐渐减少而逐渐增大,两者呈现典型的负相关关系; $\Phi_{\text{OFP}} > 1.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,由于污染期间 Φ_{OFP} 高潜势量主要发生在夜间,使得高 Φ_{OFP} 的迅速减少对 O_3 浓度没有任何影响。此外,污染前期 12.5% 的 Φ_{OFP} 转化为 O_3 ,污染中期 20.0% 的 Φ_{OFP} 转化为 O_3 ,污染后期 17.5% 的 Φ_{OFP} 转化为 O_3 ; 这说明上海城区大气中臭氧生成潜势量仍有很大空间可以转化为更多的 O_3 。

参考文献:

- [1] 马志强,王跃思,张小玲,等. 北京城区与下游地区臭氧对比研究[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 924-929.
- [2] 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.
- [3] 葛宝珠,徐晓斌,林伟立,等. 上甸子本底站臭氧生成效率的观测研究[J]. 环境科学, 2010, **31**(7):1444-1450.
- [4] 刘玉彻,徐敬,王淑凤,等. 影响北京夏季 O_3 污染的 O_3 前体物浓度及天气条件分析[J]. 气象与环境学报, 2006, **22**(6): 34-37.
- [5] 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 I): 123-130.
- [6] 张靖,邵敏,苏芳. 北京市大气中挥发性有机物的组成特征[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(5): 1-5.
- [7] 刘彩霞,冯银厂,孙韧. 天津市臭氧污染现状与污染特征分析[J]. 中国环境监测, 2008, **24**(3):52-56.
- [8] 殷永泉,单文坡,纪霞,等. 济南大气臭氧浓度变化规律[J]. 环境科学, 2006, **27**(11):2299-2302.
- [9] 殷永泉,李昌梅,马桂霞,等. 城市臭氧浓度分布特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(6):16-20.
- [10] 洪盛茂,焦荔,何曦,等. 杭州典型区域 C2-C12 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.
- [11] 黄志新. 上海市郊春季臭氧及其前体物观测研究[J]. 环境科学与技术, 2011, **34**(5):87-89.
- [12] 张爱东,王晓燕,修光利. 上海市中心城区低空大气臭氧污染特征和变化状况[J]. 环境科学与管理, 2006, **31**(6):21-26.
- [13] 唐文苑,赵春生,耿福海,等. 上海地区臭氧周末效应研究[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2009, **39**(1):99-105.
- [14] Liang R, Zhao C S, Geng F H, *et al.* Ozone photochemical production in urban Shanghai, China: Analysis based on ground level observations[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, **114**, D15301, doi:10.1029/2008JD010752.
- [15] Xu J L, Zhu Y X, Li J L. Seasonal cycles of surface ozone and NO_x in Shanghai[J]. Journal of Applied Meteorology, 1997, **36**(10): 1424-1429.
- [16] 邓雪娇,王新明,赵春生,等. 珠江三角洲典型过程 VOCs 的平均浓度与化学反应活性[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(9): 1153-1161.
- [17] 陆克定,张远航,苏杭,等. 珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J]. 中国科学 B 辑:化学, 2010, **40**(4): 407-420.
- [18] 王伯光,张远航,邵敏. 珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征[J]. 环境科学, 2004, **25**(增刊):7-15.
- [19] 陈洪伟,李攻科,李核,等. 广州地区大气中挥发性有机物的污染状况[J]. 环境化学, 2003, **22**(1):89-92.
- [20] Zhang J, Wang T, Chameides W L, *et al.* Source characteristics of volatile organic compounds during high ozone episodes in Hong Kong, Southern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2008, **8**(3):8847-8879.
- [21] Geng F H, Tie X X, Xu J M, *et al.* Characterizations of ozone, NO_x , and VOCs measured in Shanghai, China[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(29):6873-6883.
- [22] Geng F H, Zhao C S, Tang X, *et al.* Analysis of ozone and VOCs measured in Shanghai: A case study [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(5):989-1001.
- [23] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics of ambient volatile organic compounds (VOCs) measured in Shanghai, China[J]. Sensors, 2010, **10**(8): 7843-7862.
- [24] 王红丽,陈长虹,黄成,等. 上海市城区春节和“五一”节期间大气挥发性有机物的组成特征[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(9):1749-1757.
- [25] Scheff P A, Wadden R A. Receptor modeling of volatile organic compounds. 1. Emission inventory and validation [J]. Environmental Science and Technology, 1993, **27**(4):617-625.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping(3461)
Study on Control and Management for Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) in China	
.....	WANG Hai-lin, ZHANG Guo-ning, NEI Lei, <i>et al.</i> (3462)
Countermeasures for Priority Control of Toxic VOC Pollution	CHEN Ying, LI Li-na, YANG Chang-qing, <i>et al.</i> (3469)
Evaluation of Treatment Technology of Volatile Organic Compounds for Fixed Industrial Resources	LUAN Zhi-qiang, HAO Zheng-ping, WANG Xi-qin(3476)
Emission Control Way of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, WEI Yu-xia, <i>et al.</i> (3487)
Regulations and Policies for Control of Volatile Organic Compounds and the Emission Standards in Taiwan	
.....	LUAN Zhi-qiang, WANG Xi-qin, ZHENG Ya-nan, <i>et al.</i> (3491)
Study on Foreign Regulations and Standards of Stationary Sources VOCs Emission Control	ZHANG Guo-ning, HAO Zheng-ping, JIANG Mei, <i>et al.</i> (3501)
VOCs Tax Policy on China's Economy Development	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, WANG Hai-lin, <i>et al.</i> (3509)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emitted from Biofuel Combustion in China	LI Xing-hua, WANG Shu-xiao, HAO Ji-ming(3515)
Spatial and Temporal Variations of Ambient Carbonyl Compounds in Beijing and Its Surrounding Areas	
.....	WANG Qin, SHAO Min, WEI Qiang, <i>et al.</i> (3522)
Analysis on Status Pollution and Variation of BTEX in Beijing	SUN Jie, WANG Yue-si, WU Fang-kun(3531)
Characteristics of Ambient VOCs and Their Role in O ₃ Formation; A Typical Air Pollution Episode in Shanghai Urban Area	
.....	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, GAO Song, <i>et al.</i> (3537)
Observation and Study on Atmospheric VOCs in Changsha City	LIU Quan, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (3543)
Characteristics of Volatile Organic Compounds During Haze Episode in Foshan City	
.....	MA Yong-liang, TAN Ji-hua, HE Ke-bin, <i>et al.</i> (3549)
Investigation on Emission Properties of Biogenic VOCs of Landscape Plants in Shenzhen	
.....	HUANG Ai-kui, LI Nan, Alex Guenther, <i>et al.</i> (3555)
Pollution and Source of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area in Beijing	
.....	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3560)
Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3566)
Source Emission Characteristics of Malodorous Volatile Organic Carbonyls from a Municipal Sewage Treatment Plant	
.....	ZHOU Mi, WANG Bo-guang, ZHAO De-jun, <i>et al.</i> (3571)
Source Emission Characteristics and Impact Factors of Volatile Halogenated Organic Compounds from Wastewater Treatment Plant	
.....	HE Jie, WANG Bo-guang, LIU Shu-le, <i>et al.</i> (3577)
Quantification Assessment of the Relationship Between Chemical and Olfactory Concentrations for Malodorous Volatile Organic Compounds	
.....	LIU Shu-le, WANG Bo-guang, HE Jie, <i>et al.</i> (3582)
Study on Transformation Mechanism of SOA from Biogenic VOC Under UV-B Condition	LI Ying-ying, LI Xiang, CHEN Jian-min(3588)
Kinetic Studies on the Gas-phase Reactions of NO ₃ Radicals with Three Cyclic Ethers	GAI Yan-bo, GE Mao-fa, WANG Wei-gang(3593)
Uptake of 3-methyl-3-buten-1-ol into Aqueous Mixed Solution of Sulfuric Acid and Hydrogen Peroxide	WANG Tian-he, LIU Ze, GE Mao-fa, <i>et al.</i> (3599)
An Overview on Analytical Method of Volatile Organic Compounds in Water	XU Xiu-yan, ZHU Qing, TAN Li, <i>et al.</i> (3606)
Determination of Low Concentration VOCs in Air by a Newly Designed Needle Trap Device	LI Xiang, CHEN Jian-min (3613)
Research on Determination of Total Volatile Organic Sulfur Compounds in the Atmosphere	
.....	WANG Yan-jun, ZHENG Xiao-ling, HE Ying, <i>et al.</i> (3617)
Automatic Continuous Monitoring of Volatile Organic Compounds Using Ion Mobility Spectrometer Array	
.....	ZHOU Qing-hua, CANG Huai-wen, JU Bang-yu, <i>et al.</i> (3623)
Development of a Membrane Inlet-Single Photon Ionization/Chemical Ionization-Mass Spectrometer for Online Analysis of VOCs in Water	
.....	HUA Lei, WU Qing-hao, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (3628)
Detection of TVOC and Odor in Industrial Park Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, YE Zhao-xia, <i>et al.</i> (3635)
Applicability of an Electronic Nose for Detection of Volatile Chlorinated Hydrocarbons in Soil	
.....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (3641)
Test and Analysis of Acrylic Acid Ester in Industry Pipelines	WU Bin, ZHANG Hong-yan, LU Lin-guang(3647)
Preparation of Honeycombed Monolithic Zeolite and Hydrophobic Modification with SiCl ₄	WANG Xi-qin, LI Kai, WEI Bing, <i>et al.</i> (3653)
Synthesis of Manganese Oxide Octahedral Molecular Sieve and Their Application in Catalytic Oxidation of Benzene	LI Dong-yan, LIU Hai-di, CHEN Yun-fa(3657)
Adsorption-Desorption Performance of Honeycomb-Shaped Activated Carbon	HAN Zhong-juan, LUO Fu-kun, LI Ze-qing(3662)
Process of Adsorption and Separating Recovery Solvents from Vapor Mixture Directly	WANG Hong-yu, QIANG Ning, HU Xia(3667)
BTF Performance Treating a Chlorobenzene-Contaminated Gas Stream	ZHOU Qing-wei, ZHU Run-ye, HU Jun, <i>et al.</i> (3673)
Purification of Complicated Industrial Organic Waste Gas by Complex Absorption	CHEN Ding-sheng, CEN Chao-ping, TANG Zhi-xiong, <i>et al.</i> (3680)
Analysis of the Treatment Technology Pathway of VOCs Released from Oven	LI Ze-qing, LUO Fu-kun(3685)
Fabrication of Co ₃ O ₄ Nanorods and Its Catalytic Oxidation of Gaseous Toluene	YAN Qing-yun, LI Xin-yong, ZHAO Qi-dong, <i>et al.</i> (3689)
Preparation, Characterization of Si Doped TiO ₂ Nanotubes and Its Application in Photocatalytic Oxidation of VOCs	
.....	ZOU Xue-jun, LI Xin-yong, QU Zhen-ping, <i>et al.</i> (3694)
Research of the Natural Attenuation Capacity of Oil Pollutants Based on <i>in-situ</i> Experiment	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (3699)
Experimental Research of Oil Vapor Pollution Control for Gas Station with Membrane Separation Technology	
.....	ZHU Ling, CHEN Jia-qing, ZHANG Bao-sheng, <i>et al.</i> (3704)
CFD Numerical Simulation onto the Gas-Liquid Two-Phase Flow Behavior During Vehicle Refueling Process	
.....	CHEN Jia-qing, ZHANG Nan, WANG Jin-hui, <i>et al.</i> (3710)

《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)

2011年12月15日 32卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Founded in 1976)

Vol. 32 No. 12 Dec. 15, 2011

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) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection 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 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, 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 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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 (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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行