

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平, 张炜铃, 潘能, 焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能, 侯振安, 陈卫平, 焦文涛, 彭驰, 刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能, 陈卫平, 焦文涛, 赵忠明, 侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹, 陈卫平, 王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明, 陈卫平, 焦文涛, 王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥, 陈卫平, 焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环, 陈卫平, 王效科, 任玉芬, 张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃, 陈卫平, 焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞, 张蕾, 权建农, 高扬, 黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽, 陈长虹, 黄海英, 王倩, 陈宜然, 黄成, 李莉, 张钢锋, 陈明华, 楼晟荣, 乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科, 王跃思, 吴方堃, 孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春, 陈卫平, 马春, 詹水芬, 焦文涛 (4167)
稻草烟中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚, 孙丽娜, 李久海, 徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远, 李金, 谭丕强, 楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜, 周菊珍, 孟颖, 达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平, 仝川, 何清华, 黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳, 陈书涛, 胡正华, 任景全, 沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜, 祁士华, 孙蓓, 黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里, 刘丽艳, 齐虹, 白杨, 沈吉敏, 陈忠林, 李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 吕金刚, 许世远, 潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成, 毕春娟, 陈振楼, 王璐, 许世远, 潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越, 刘征涛, 周俊丽, 高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳, 罗泽娇, 彭进进, 祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚, 郭观林, 南锋, 魏文侠, 李发生, 毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平, 张彩香, 赵旭, 向青清, 李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 周婕成, 韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟, 张洪, 单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文, 张雷, 郑丙辉, 曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋, 蒲焘, 何元庆, 王培震, 张建龙, 张宁宁, 辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪, 谷孝鸿, 曾庆飞, 毛志刚, 高华梅, 孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清, 彭谦, 赖泳红, 纪开燕, 韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍, 肖峰, 赵锦辉, 秦潼, 王东升, 冯金荣, 许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国, 毛雯, 马明, 张成, 王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银, 李小荣, 朱怡苹, 朱江鹏, 王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超, 赵倩, 封莉, 张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳, 李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊, 贾永刚, 付腾飞, 刘晓磊, 赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰, 王哲, 吴德意, 李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远, 邢雅娟, 郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振, 刘超翔, 李鹏宇, 董健, 刘琳, 朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松, 鲍韬, 陈天虎, 陈冬, 谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇, 叶杰旭, 李若愚, 陈胜, 孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元, 王毅力, 冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧, 单正军, 石利利, 郭敏, 许静, 孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银, 郑正, 常志州, 王海芹, 叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润, 农泽喜, 王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅, 张国宁, 张明慧, 邹兰, 魏玉霞, 任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑, 王铁宇, 吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	《环境科学》征稿简则(4166)
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	编辑征稿通知(4172)

世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染来源研究

王红丽¹, 陈长虹^{1*}, 黄海英¹, 王倩^{1,2}, 陈宜然¹, 黄成¹, 李莉¹, 张钢锋¹, 陈明华¹, 楼晟荣¹, 乔利平¹

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 华东理工大学资源与环境工程学院, 上海 200237)

摘要: 基于 VOCs 在线观测数据, 对世博会期间(2010 年 5 月 1 日~10 月 31 日)上海大气 VOCs 的排放进行了估算; 采用后向轨迹模型和聚类分析法, 研究了不同大气污染输送通道下上海市空气质量和观测站点 VOCs 的变化; 基于受体模型对上海市城区大气 VOCs 进行了污染来源解析. 结果表明, 世博会期间, 上海市每小时排放的 VOCs 导致大气中 VOCs 浓度的增加量为 $(5.98 \pm 3.18) \times 10^{-9}$, 该值比 2009 年同期低 1×10^{-9} 左右. 世博会期间, 上海大气主要受偏东方向气流的影响, 所占比例超过 40%; 其次是偏西风(25%); 偏南和偏北风共占约 20%. 受同一大气输送通道影响, 观测点 VOCs 浓度与上海 API 值呈正相关, $R^2 = 0.599$. 受西北方向大气输送通道影响, 本市空气质量最差, API 值在 70 左右; 其次是西南方向大气输送通道, API 值在 60 以上; 当本市大气受东面海洋上空输送气团的影响时, $API < 50$, 空气质量为优. 世博会期间, 与机动车有关的排放最大, 包括尾气和油气挥发, 对上海大气 VOCs 的贡献约 40%; 其次是生产工艺和燃煤等工业排放, 占 30%~40%; 溶剂涂料使用导致的排放约 20%; 夏季天然源排放的贡献在 6% 左右, 也不容忽视.

关键词: 挥发性有机物; 排放强度; 后向轨迹; 聚类分析; 来源解析

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4151-08

Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO

WANG Hong-li¹, CHEN Chang-hong¹, HUANG Hai-ying¹, WANG Qian^{1,2}, CHEN Yi-ran¹, HUANG Cheng¹, LI Li¹, ZHANG Gang-feng¹, CHEN Ming-hua¹, LOU Sheng-rong¹, QIAO Li-ping¹

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The emission strength of VOCs was estimated in the study, based on the volatile organic compounds (VOCs) measurement results. Air mass backward trajectories were computed and cluster analysis was done combining with the corresponding air pollution indexes and VOCs concentrations. Source apportionment of VOCs was studied using receptor model. According to this study, VOCs emission in Shanghai per hour resulted in the VOCs concentration increment of $(5.98 \pm 3.18) \times 10^{-9}$ during 2010 EXPO (from 1st May to 31st October in 2010), which was decreased by about 1×10^{-9} compared to that in the same period of 2009. Under the control of the air masses roughly from the east (40%), the API was lower than 50. Influenced by the air masses from the northwest, the air quality was the worst with the average API higher than 70. The air masses from the southwest also resulted in bad air quality, with API higher than 60. The air masses originated from the west accounted for 25%, followed by the south and north air mass (20%). The VOCs concentrations were positively related to API in the same air mass, $R^2 = 0.599$. During the 2010 EXPO, the emission related to vehicles including exhaust and gasoline evaporation contributed the largest amount of VOCs, approximately about ~40%, followed by industry including industrial processes and coal combustion (30%-40%), and solvent use and painting (20%). The biogenic emission was also considerable and accounted for 6% of VOCs in summer.

Key words: volatile organic compounds; emission strength; back trajectories; cluster analysis; source apportionment

挥发性有机物(VOCs)是大气光化学反应的主要参与者^[1]. 大气中主要氧化剂如臭氧(O₃)、过氧乙酰硝酸酯(PAN)、过氧化物以及 OH 自由基等的生成均与 VOCs 的光化学过程有着紧密联系^[2], 因此, VOCs 是大气氧化能力提高的源动力; VOCs 在提高大气氧化能力的同时, 自身也被氧化, 反应的中间产物往往更容易进入颗粒相, 是颗粒物中二次组

分的重要前体物^[3,4].

收稿日期: 2012-02-17; 修订日期: 2012-05-08

基金项目: 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室专项经费资助项目(11K05ESPCP); 环境保护公益性行业科研专项项目(201009001); 上海市科委资助项目(10231203802, 11231200500)

作者简介: 王红丽(1983~), 女, 工程师, 主要研究方向为大气化学, E-mail: wanghl@saes.sh.cn

* 通讯联系人, E-mail: chenhc@saes.sh.cn

VOCs 在大气光化学过程中的重要作用受到国内外学者的广泛重视,其中 VOCs 的源排放和污染源研究一直是该研究领域的重点之一.有关大气 VOCs 的排放研究目前主要集中在对排放量估算和排放特征研究等领域. Wei 等^[5]采用活动水平和排放因子法建立了我国 2005 年大气中非甲烷总烃及其相关化学组分的排放量; Cai 等^[6]研究了我国机动车包括 VOCs 在内的多种污染物从 1980 ~ 2005 年的排放情况^[6]; Zheng 等^[7,8]报道了珠三角地区大气 VOCs 排放及其臭氧生成潜势. Liu 等^[9]和 Yuan 等^[10]系统检测了我国机动车尾气、汽油蒸发、印刷涂料、工业和民用燃煤、生物质燃烧以及石油化工等行业排放 VOCs 的组成特征,初步确定了不同 VOCs 排放源的标识物以及标识特征^[11,12].

与源排放研究的方法不同,受体模型基于受体环境大气 VOCs 的浓度及组成等观测数据来解析大气 VOCs 的来源^[13]. 目前,国内外很多学者将受体模型用于区域和城市大气 VOCs 的污染源解析. Brown 等^[14]和 Buzuc 等^[15]采用受体模型对美国洛杉矶和休斯顿等地区的大气 VOCs 进行了来源解析; Liu 等^[16]和 Guo 等^[17]对我国珠三角地区和香港大气 VOCs 解析,发现机动车污染是该地区大气 VOCs 的重要来源; Song 等^[18]和 Wang 等^[19]研究了北京地区 2004 年以及 2008 年奥运前后大气 VOCs 污染来源,研究表明控制机动车是改善北京市环境空气质量最为有效的措施. 受体模型在大气 VOCs 来源解析中弥补了由于基础数据缺失导致 VOCs 排放不明的不足;同时受体模型解析结果可以用来与已有的排放清单数据相互印证,一定程度上降低了大气 VOCs 排放清单数据的不确定性.

上海是长三角地区经济最发达的城市之一,也是能源消耗和污染物排放比较集中的城市. 然而,关于大气 VOCs 排放的研究却报道不多. 国内陈长虹研究小组近年来先后对上海市部分典型 VOCs 污染源和排放的组成做了研究^[20~22],并采用源清单的方法通过测算长三角地区 2007 年大气中 VOCs 的排放量以及 VOCs 的化学组成,发现工业排放是该地区大气 VOCs 的最大来源,与机动车有关的排放贡献约为 12%^[23]. Cai 等^[24]和 Geng 等^[25]基于 VOCs 离线观测结果,采用受体模型解析 VOCs 来源的结果显示机动车对上海 VOCs 的贡献超过 40%,是最主要的排放源^[26]. 从上述研究结果可以看出,不同的研究方法对 VOCs 排放的研究结果差别较大,有关 VOCs 排放来源的研究还有很大不确定性.

2010 年上海世博会期间,上海对工业排放以及建筑施工等采取了较为严格的监管措施,二氧化硫、氮氧化物和可吸收颗粒物等大气污染物浓度均创近 10 年历史最好记录;环境空气质量优良天数达到 181 d,优良率为 98.4%,优级天数 94 d,均达到 2001 年以来同期最高值^[27];然而,有关世博会期间大气 VOCs 的研究却鲜有报道. 陈长虹等^[28]研究了世博会期间大气 VOCs 的污染水平及组成特征;本研究基于上海市城区大气 VOCs 在线观测结果,从光化学箱模式,大气物理输送以及来源解析等角度探讨了世博会期间上海城区大气 VOCs 来源和排放的问题. 研究内容具体包括 3 部分:① 基于箱模式的假设初步估算上海每小时排放的 VOCs 导致气团中 VOCs 浓度的增加量;② 采用后向轨迹聚类分析方法研究不同输送大气气团影响下上海空气质量和观测点 VOCs 的变化;③ 用正交矩阵因子分析法 (positive matrix factorization, PMF) 受体模型解析上海市城区大气 VOCs 的主要污染来源.

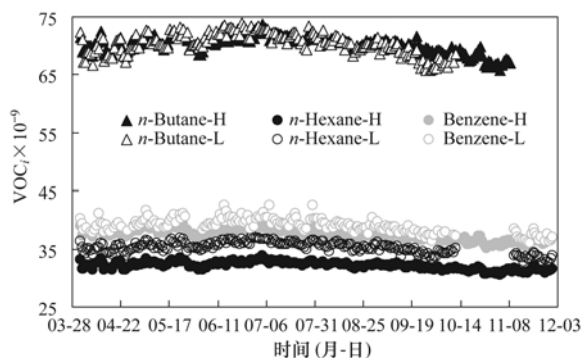
1 材料与方法

1.1 VOCs 采样分析

本研究观测时间为 2010 年 5 月 1 日 ~ 10 月 31 日 (世博会期间). VOCs 观测点于上海市徐汇区上海市环境科学研究院 (31.169°N, 121.431°E) 培训楼 5 楼楼顶,采样口距离地面约 15 m. 观测点以东 500 m 是交通干道沪闵高架桥,以南 150 m 是漕宝路,观测点周围主要是居民住宅区和商用写字楼,周围除机动车外无明显局地污染源. 该测点位于上海市市区的西南角,基本可代表上海市市区的污染状况^[29]. VOCs 采用在线气相色谱-氢离子火焰监测法 (GC-FID) 进行实时测定,时间分辨率为 30 min. 该系统包括 2 套独立的分析仪,分别用来测定低碳 (C2 ~ C6) VOCs 和高碳 (C6 ~ C12) VOCs,以及一套自动内部校准系统,仪器可同时检测 56 种 VOC 物种,观测期间仪器每天自动校准一次,具体方法详见文献^[29].

观测期间 VOCs 系统自动校准结果如图 1 所示,对于丁烷而言,11 月 9 日后由于校准渗透管中丁烷标准物质耗尽,数据缺省;对于己烷和苯,观测期间浓度基本稳定,观测后期略有降低,但仍在标准浓度的 $\pm 10\%$ 以内;对于同一校准渗透管,C6 ~ C12 的响应值比 C2 ~ C6 高 3% ~ 10%,属于系统误差. 观测期间仪器对校准渗透管的响应及偏差分别为:丁烷 (统计数据从 4 月 1 日 ~ 11 月 9 日),C2 ~ C6

$(70.3 \pm 1.5) \times 10^{-9}$, C6 ~ C12 $(70.4 \pm 1.9) \times 10^{-9}$; 己烷, C2 ~ C6 $(32.1 \pm 0.7) \times 10^{-9}$, C6 ~ C12 $(35.2 \pm 1.0) \times 10^{-9}$; 苯, C2 ~ C6 $(37.5 \pm 0.9) \times 10^{-9}$, C6 ~ C12 $(38.8 \pm 2.8) \times 10^{-9}$. 因此, 观测期间仪器响应稳定.



H: 代表 C6 ~ C12 仪分析结果; L: 代表 C2 ~ C6 仪分析结果; 10 月 12 日 ~ 11 月 9 日, C2 ~ C6 仪自动校准设置出错, 渗透管校准结果缺失; 11 月 9 日 ~ 11 月 30 日, “n-butane (丁烷)” 渗透管物质耗尽, 数据缺失

图 1 观测期间 VOCs 自动监测仪 3 个渗透管校准结果

Fig. 1 Calibration results of tubes during the measurement period

1.2 空气污染指数和气象数据来源

本研究所用的空气污染指数 (API) 取自国家环境保护部网站 (http://datacenter.mep.gov.cn/report/air_daily/air_dairy.jsp); 气象数据采用上海市虹桥机场数据 (<http://www.wunderground.com/history/airport>).

2 结果与分析

2.1 VOC 排放测算

在受体点测得的 VOCs 浓度是源排放的 VOCs 经大气物理输送和光化学消耗等因素共同作用的结果. 本研究以 VOCs 在线观测数据为基础, 综合考虑光化学消耗及大气物理输送, 对 2010 年 9 月上海市大气 VOCs 的实际排放进行估算, 并与 2009 年同期做了比较.

VOCs 排放估算主要基于箱模式的基本假设^[30], 综合考虑了 VOCs 排放强度、大气混合层高度、化学消耗以及水平传输等因素对大气中 VOCs 浓度的影响. 按大气化学反应模式的测算方法, 假定有一混合层高度为 h 的有限气团, 进入该气团的污染物瞬间达到混合均匀; VOCs 物种在白天的光化学消耗主要来源于 OH 反应^[31]; 污染物以恒定的速度 (U) 输入或输出气团; 气团的上风向污染物浓度水平可以忽略, 即输入量假设为零. 由此可以得

出, 气团中 VOCs 浓度的改变主要由源排放强度 E (单位时间 VOCs 的排放量)、VOCs 与 OH 反应消耗量、以及物理过程导致的水平输出量等因素所决定. 其具体数学表达式为:

$$\frac{d[X]}{dt} = \frac{E}{h} - k[OH][X] - \frac{U}{l}[X] \quad (1)$$

式中, $[X]$ 是气团中 X 物种的浓度; t 是时间; k 是 X 物种与 OH 的反应速率常数, 该常数引自文献^[2]; $[OH]$ 是气团中 OH 的浓度, 取为 5×10^6 个 $\cdot \text{cm}^{-3}$ ^[32]; l 是气团沿风速方向的距离.

把公式 (1) 变形, 即可得到源排放强度的计算公式 (2):

$$E = h \left(\frac{d[X]}{dt} + k[OH][X] + \frac{U}{l}[X] \right) \quad (2)$$

一般来讲, 大气中 $[OH]$ 在中午前后出现峰值, 日变化规律与 O_3 日变化规律类似, 峰值浓度时间附近, 浓度变化最小^[33], 因此, 为简化计算, 本研究计算的时间段取为每天的 12:00 ~ 15:00, 并假设该时间段内 OH 浓度基本不变. 此外, 本研究选取 9 月为研究月份, 期间上海地区受台风天气影响较多, 主导风向为东风或偏东风, 上风向为空气质量相对清洁的海面, 污染物浓度较低, 上风向污染物浓度可以忽略, 与模式假设条件最为符合. 风速 U 值为每天 12:00 ~ 15:00 的风速平均值, 根据上海市虹桥机场气象观测数据 U 取为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 上海东西方向距离 l 约 90 km. 计算过程中气团高度 h 不参与实际计算.

图 2 分别是 2010 年和 2009 年 9 月每天中午 12:00 ~ 15:00 观测点 VOCs 的排放强度与气团高度的比值, 即 E/h , 该参数物理意义为 VOCs 源排放强度变化导致气团中大气 VOCs 浓度的增加量. 由图 2 可见, 2010 年 9 月每天中午 VOCs 的 E/h 为 $(5.98 \pm 3.18) \times 10^{-9} \cdot \text{h}^{-1}$, 2009 年 9 月每天中午 VOCs 的 E/h 为 $(7.07 \pm 2.69) \times 10^{-9} \cdot \text{h}^{-1}$; 与 2009 年 9 月相比, 2010 年 9 月 E/h 降低了约 15%. 该时间段内 VOCs 的实际观测浓度分别为, $(16.04 \pm 7.00) \times 10^{-9}$ (2009 年 9 月), $(14.17 \pm 6.69) \times 10^{-9}$ (2010 年 9 月), 2010 年比 2009 年约降低了 12%.

世博会期间, 重点针对颗粒物污染聚焦锅炉烟尘、工地和道路扬尘、秸秆燃烧等环境问题, 强化了相关监管措施^[34]. 与此同时, 世博期间, 市政府发布了《关于对高污染车辆实施扩大限制通行范围的通告》^[34], 该措施对机动车冒黑烟现象起到了有效控制. 这些措施对降低颗粒物污染有明显效果, 与 2009 年同期相比, PM_{10} 平均浓度下降 18.1%;

环境空气质量优良率上升 2.7 个百分点^[27].

除上述上海市本地措施外,世博会期间加强长三角地区区域大气联防联控,对世博园区 300 km 半径范围内的电厂、钢铁企业、化工企业、建材企业、燃煤锅炉、炉窑设施以及餐饮企业实施全面综合整治,确保污染治理设施正常运转、大气污染物稳定达标排放^[34]. 这些措施在改善颗

粒物浓度的同时对其他主要大气污染物浓度水平的改善也有一定的附加作用. 与 2009 年同期相比, SO_2 平均浓度下降 25.0%; NO_2 平均浓度下降 10.9%^[27]. 可以推测本研究中 VOCs 浓度及排放的降低应该与 NO_2 等其他污染物浓度降低类似,主要得益于上述强化措施及其附加效应.

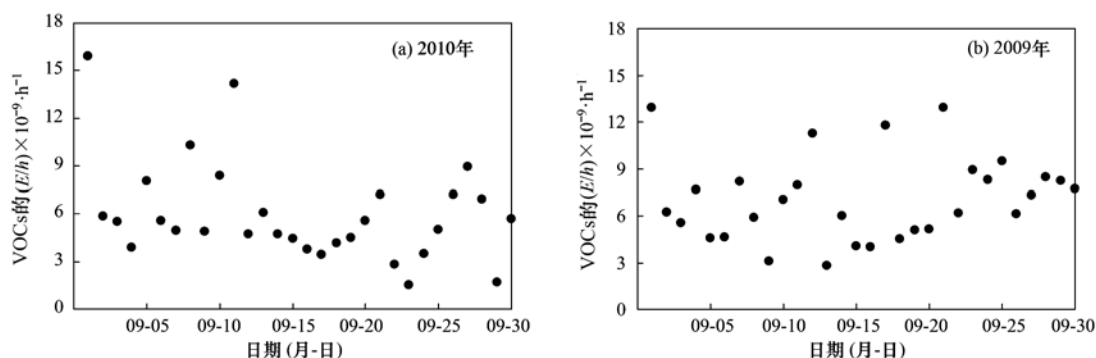


图 2 2010 年和 2009 年 9 月每天中午 12:00 ~ 15:00 观测点 VOCs 的 E/h 值

Fig. 2 The E/h values during 12:00 to 15:00 in September 2009 and 2010

2.2 大气污染输送通道分析

利用 NOAA 实验室开发的 HYSPLIT 后向轨迹模型和聚类方法,分析了不同气流轨迹下所对应的上海市 API 值以及本观测点 VOCs 浓度. 应用中尺度 MM5 气象模型模拟得到 2010 年 5 ~ 10 月的气象场,并选取 00:00、08:00、12:00、18:00 (世界时) 等 4 个时刻,利用美国 NOAA-HYSPLIT4 模型进行不同月份 48 h 的后向轨迹模拟,得到不同大气污染输送对上海大气的影响;通过欧式距离法对各月后向轨迹进行聚类分析,得到各个月份的主要大气输送通道及其所占的比例. 将不同时刻上海地区的 API 以及本观测点 VOCs 的浓度与输送通道聚类结果相匹配,统计得到不同大气输送通道下上海市的大气污染状况.

图 3 是利用聚类分析方法得到的每个月份的主要大气输送通道以及各输送通道影响下上海市 API 及本观测点的 VOCs 浓度. 总的来讲,经内陆输送进入上海的气团往往导致当地的 API 偏高,如 5 月和 6 月受西北大气输送通道影响(5 月: Cluster 4; 6 月: Cluster 3)上海 API 均超过 70,世博会期间该大气输送通道主导的天数约占 10% 左右;西南方向大气输送的影响也较容易导致上海 API 偏高,如 6 月的 Cluster 2, 7 月的 Cluster 1 以及 8 月的 Cluster 1, 在这些输送通道影响下,上海 API 均呈现较高值,所占比例为 15% 左右. 与受内地输送气团影响不同,

当本市大气受东面海洋上空输送气团的影响时,上海 API 均比较低,如 5 月的 Cluster 2, 6 月的 Cluster 1, 7 月的 Cluster 3, 8 月的 Cluster 2 以及 9 月的 Cluster 1 等,该类天气在世博会期间所占比例超过 40%,为最主要大气污染输送通道. 世博会期间还有少部分偏北和偏南方向的大气输送通道影响上海天气,受其影响本市空气质量界于偏西和偏东方向之间,总比例约为 20% 左右.

在同一大气输送通道影响下,本观测点 VOCs 浓度与上海 API 呈正相关, $R^2 = 0.599$. 上海世博会期间,上海市的 API 值除 9 月 13 日 (API 为 29) 和 10 月 24 日 (API 为 20) 这 2 d 受 NO_2 主导外,其他 182 d API 值均由 PM_{10} 颗粒物浓度决定,且不同污染物 API 分指数之间相关性高, R^2 均大于 0.55 ($n = 184$). 表明 PM_{10} 、 SO_2 以及 NO_2 等污染物浓度呈现类似变化趋势,说明在上海市大气污染源排放变化不大的前提下,API 值能在一定程度上反映大气的水平输送和垂直物理扩散条件. 分析 VOCs 和 API 的相关性,可以初步判断 VOCs 的来源. VOCs 和 API 相关性高,说明 VOCs 浓度的改变主要受大气物理条件影响; VOCs 和 API 变化不一致,表明观测点位 VOCs 浓度受上海市境内 VOCs 排放源影响明显.

例如 8 月输送通道 3 (Cluster 3), 即东南偏南输送通道,受该大气输送通道影响,上海空气质量较

好, 平均 API 为 (53 ± 15) , 与本月平均 API (51) 相当; 但本观测点 VOCs 平均浓度高达 35.1×10^{-9} , 超过 8 月 VOCs 平均浓度 $(24.6 \pm 17.3) \times 10^{-9}$ 的 42.7%。这是因为, 虽然该输送通道的气团来自海上, 且气团比较干净, 但是在气团途经浙江宁波、上海金山石化区等 VOCs 排放较重的区域时受当地大气污染, 进而使得本观测点大气 VOCs 浓度比较高; 从 VOCs 组分也可看出, 受该大气输送通道影响, 本观测点 VOCs 组成较其他通道有较大差别, 比较明显的变化是烷烃类物质的相对百分含量为 52%, 高于本月受其他通道影响下烷烃的相对百分含量。10

月受 Cluster 3 大气输送通道影响, VOCs 的组成显著区别于其他情况, 烷烃含量高达 68.7%, 高于本月平均值 51.8%; 相应的芳香烃含量为 13.4%, 低于本月平均值 28.2%; 从图 3 中可知, 10 月 Cluster 3 输送通道气团来源于海上, 从本市东南方向经金山石化区进入上海境内, 气团受石化区大气影响导致 VOCs 组分有所改变。此外, 观测点位于上海市境内, 因此所有外部气团进入上海后与本市境内气团混合, 共同影响观测点气团的性质, 这也是导致聚类结果中 API 值与观测点 VOCs 浓度变化不完全一致的重要原因。

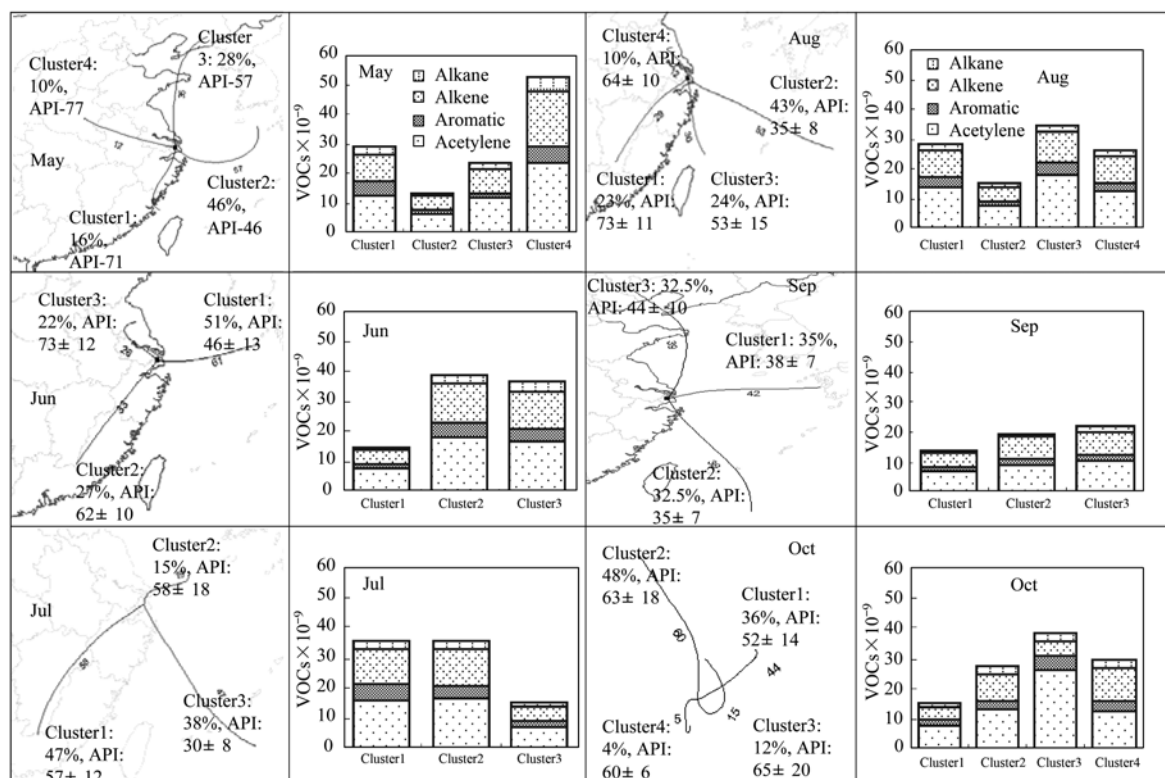


图 3 各月主要大气输送通道以及各输送通道下上海 API 及本观测点的 VOCs 浓度

Fig. 3 Monthly variation of air mass backward trajectories in Shanghai, and APIs and VOCs concentrations in different air mass

2.3 VOCs 来源解析

在对污染源组成和排放量不确定的情况下, 常用多元统计方法来识别污染源。PMF 是多元统计分析方法的一种, 其基本原理是把一些具有复杂关系的变量或样品归结为少数几个不相关的综合因子 (污染源), 样品中各 VOCs 组分的浓度可表示为几个污染源对其贡献的线性加和^[13]。本研究采用美国 EPA PMF 3.0 模型对 VOCs 进行来源解析。

考虑到污染源季节变化, 特别是气象条件对污染源排放的影响, 比如, 天然源的排放受温度影响较大, 在来源解析过程中依据异戊二烯浓度的季节变

化将研究时段分为两个时段, 它们分别是研究时段 I (6~9 月) 和研究时段 II (4~5 月和 10~11 月)。

PMF 是基于多元回归的一种统计分析方法, 因此需要样本量大, 而且变量间有一定的相关性。对于研究时段 I 选取了包括 SO_2 、 NO_x 以及 CO 在内的 36 个变量做分析, 样本量为 2 833 个; 对于研究时段 II 选取了包括 SO_2 、 NO_x 以及 CO 在内的 35 个变量做分析, 样本量为 2 882 个。

就 6~9 月 VOCs 的来源解析结果而言, 共解析出 6 个因子。第一个因子对乙炔、C2~C4 的烷烃以及苯贡献较多, 同时 CO 和 NO_x 含量很高, 可以确定

该因子以机动车尾气为主^[35]；第二个因子芳香烃类物质贡献显著,同时也含有一定量的 CO 和 NO_x 等机动车尾气特征物种,可以判断该因子主要来源于溶剂涂料使用同时混有机动车尾气等^[36]；第三个因子对于正己烷和苯有一定贡献,对其他 VOCs 物质贡献可以忽略,尤其是因子对 SO₂ 的贡献高达 80%,可以判断该因子为燃煤排放；第四个因子 C4~C6 类物质贡献显著,特别是对异戊烷贡献超过 50%,可以推测该因子主要来源于油气挥发^[37],同时因子对丁烯类物质有一定贡献,说明该因子中混有一定尾气排放；第五个因子是对庚烷等 C7~C8 类物质和苯贡献显著,可以判断该因子为工业排放^[9]；第六个因子对异戊二烯贡献超过 90%,异戊二烯是天然源排放的典型特征物质^[38],因此该因子为天然源排放. 不同来源贡献大小依次为机动车尾气 25.6%,工业排放 23.1%,涂料使用和尾气 20.1%,油气挥发 15.4%,燃煤 9.8%,以及天然源 5.9%,见图 4(a).

4~5 月和 10~11 月 VOCs 的来源共有 5 大类. 第一个因子对异戊烷和正戊烷等 C5 类烷烃物质贡献均超过 60%,可以判断该因子以油气挥发为主,同时因子对丙烯等也有贡献,所以该因子中混有机动车尾气；第二个因子是对苯、CO 和 NO_x 贡献明显,特别是对 SO₂ 贡献近 80%,因此可以判断该因子为燃煤排放；第三个因子 C2~C4 类物质贡献显著,对 CO 和 NO_x 的贡献也均超过 50%,可以确定该因子代表机动车尾气排放；第四个因子对庚烷和

3-甲基己烷等 C7 类烷烃贡献较大,可以判断该因子代表工业排放；第五个因子对芳香烃类物质贡献显著,可以认为该因子代表涂料和溶剂使用等. 按照源贡献从大到小依次为油气挥发和尾气 23.1%,涂料使用 22.5%,机动车尾气 21.5%,燃煤 20.1%,以及工业 12.7%,详见图 4(b).

总之,世博会期间,机动车尾气是上海市城区大气中 VOCs 的最大来源,从上述结果中可知,与机动车有关的排放包括尾气和油气挥发对 VOCs 的贡献在 40% 左右；其次工业排放包括生产工艺及燃煤等贡献 30%~40%；溶剂涂料使用的贡献在 20% 左右. 夏季天然源贡献在 6% 左右,但是天然源排放的异戊二烯化学反应活性很高,因此夏季来自天然源排放的 VOCs 贡献不容忽视.

本研究中有关机动车尾气相关贡献与 Cai 等^[24]的源解析结果接近；溶剂涂料贡献的结果低于文献[24]的结果,可能是由于涂料使用和印刷等工艺过程的 VOCs 排放有一定的相似性,在分辨两类源时不同的研究划分有所差异会导致研究结果不尽相同；燃煤等工业排放的贡献高于文献[24]的研究结果,略低于 Huang 等^[23]排放清单的结果. 总的来讲,本研究结果与文献[24]解析结果较为接近,与上海市 VOCs 排放清单^[23]相比差异较大. 比如,根据清单研究结果,机动车相关排放对上海 VOCs 的排放贡献为 12%,远低于本研究结果,其中一方面是由于本研究对象为城区；两个研究结果相差甚远,说明 VOCs 的来源不确定性还比较大.

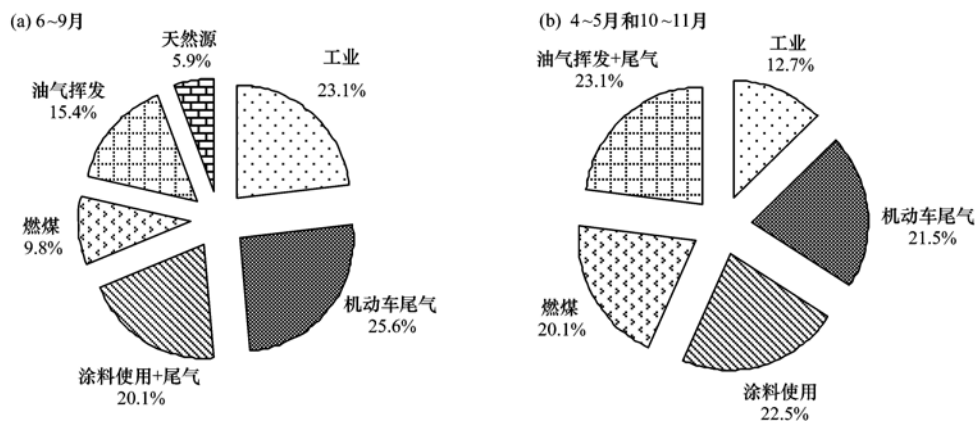


图4 本市城区大气 VOCs 来源解析结果

Fig. 4 VOCs source apportionment in urban Shanghai

3 结论

(1) 基于箱模式的假设,综合考虑了 VOCs 排放强度、大气混合层高度、光化学消耗以及物理传输

等因素对大气 VOCs 污染水平的影响,以 2010 年 9 月为研究对象估算了上海大气 VOCs 的排放水平,研究发现上海地区每小时排放的 VOCs 总量导致气团中 VOCs 浓度的增加量为 $(5.98 \pm 3.18) \times 10^{-9}$,

该值比 2009 年同期低 1×10^{-9} 左右。

(2) 采用 NOAA-HYSPLIT4 模型分析得出了世博会期间影响上海市空气质量的主要大气输送通道。研究发现, 世博会期间, 受西北方向大气输送通道影响, 上海空气质量最差, API 值在 70 左右; 其次是西南方向大气输送通道, API 值在 60 以上; 当上海大气受东面海洋上空输送气团的影响时, API 小于 50, 空气质量较好。世博会期间, 上海偏东方向大气输送通道占比超过 40%; 其次是偏西风(25%); 以及偏南和偏北, 共占约 20%。在同一大气输送通道影响下, 本观测点 VOCs 浓度与上海 API 值呈正相关, $R^2 = 0.599$ 。本观测点位于上海市境内, 所有进入上海的外界输送气团首先与当地气团混合, 然后再到达本观测点, 共同影响观测点气团中 VOCs 的浓度, 因此用后向轨迹模型对 VOCs 浓度的聚类结果与相应 API 值有一定的差异。

(3) 采用 PMF 对世博会期间城区大气 VOCs 进行来源解析, 共解析出 6 个因子, 其中与机动车有关的排放最大, 包括尾气和油气挥发, 对 VOCs 的贡献在 40% 左右; 其次是生产工艺和燃煤等工业排放为 30% ~ 40%; 溶剂涂料使用导致的排放约为 20%; 夏季天然源排放贡献在 6% 左右, 不容忽视。本研究得到的源解析结果与已有相关研究比较一致, 但有关机动车排放贡献等方面与大气 VOCs 排放清单差异较大, 说明有关大气 VOCs 的来源还存在较大的不确定性。

参考文献:

- [1] Seinfeld J H, Pandis S N. Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change [M]. New York: Wiley, 2006. 204-283.
- [2] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. Chemical Reviews, 2003, **103** (12): 4605-4638.
- [3] Beigin M H, Cass G R, Xu J, *et al.* Measurement of aerosol radiative, physical and chemical properties in Beijing during June, 1999 [J]. Journal of Geophysics Research, 2001, **106** (D16): 17969-17980.
- [4] Tsigaridis K, Kanakidou M. Secondary organic aerosol importance in the future atmosphere [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41** (22): 4682-4692.
- [5] Wei W, Wang S X, Chatani S, *et al.* Emission and speciation of non-methane volatile organic compounds from anthropogenic sources in China [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42** (20): 4976-4988.
- [6] Cai H, Xie S D. Estimation of vehicular emission inventories in China from 1980 to 2005 [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41** (39): 8963-8979.
- [7] 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 and Technology, 2009, **43** (22): 8580-8586.
- [8] Zheng J Y, Zhang L J, Che W W, *et al.* A highly resolved temporal and spatial air pollutant emission inventory for the Pearl River Delta region, China and its uncertainty assessment [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43** (32): 5112-5122.
- [9] 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.
- [10] Yuan B, Shao M, Lu S H, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds associated with solvent use in Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2010, **44** (15): 1919-1926.
- [11] 付琳琳, 邵敏, 刘源, 等. 机动车 VOCs 排放特征和排放因子的隧道测试研究 [J]. 环境科学学报, 2005, **25** (7): 879-885.
- [12] 王伯光, 张远航, 祝昌健, 等. 城市机动车排放因子隧道试验研究 [J]. 环境科学, 2001, **22** (2): 55-59.
- [13] Paatero P. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis [J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 1997, **37** (1): 23-35.
- [14] Brown S G, Frankel A, Hafner H R. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization [J]. Atmospheric Environment, 2006, **41**: 227-237.
- [15] Buzcu B, Fraser M P. Source identification and apportionment of volatile organic compounds in Houston, TX [J]. Atmospheric Environment, 2006, **40** (13): 2385-2400.
- [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] Guo H, So K L, Simpson I J, *et al.* C1-C8 volatile organic compounds in the atmosphere of Hong Kong: overview of atmospheric processing and source apportionment [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41** (17): 1456-1472.
- [18] Song Y, Shao M, Liu Y, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing [J]. Environmental Science and Technology, 2007, **41** (12): 4348-4353.
- [19] Wang B, Shao M, Lu S H, *et al.* Variation of ambient non-methane hydrocarbons in Beijing city in summer 2008 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10** (13): 5911-5923.
- [20] 贾记红, 黄成, 陈长虹, 等. 炼焦过程挥发性有机物排放特征及其大气化学反应活性 [J]. 环境科学学报, 2009, **29** (5): 905-912.
- [21] 鲁君, 王红丽, 陈长虹, 等. 上海市机动车尾气 VOCs 组成及其化学反应活性 [J]. 环境污染与防治, 2010, **32** (6): 19-26.
- [22] 乔月珍, 王红丽, 黄成, 等. 机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性 [J]. 环境科学, 2012, **33** (4): 50-58.
- [23] Huang C, Chen C H, Li L, *et al.* Emission inventory of anthropogenic air pollutants and VOC species in the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and

- Physics, 2011, **11**(9): 4105-4120.
- [24] 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.
- [25] Geng F H, Cai C J, Tie X X, *et al.* Analysis of VOC emissions using PCA/APCS receptor model at city of Shanghai, China[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2009, **62**(3): 229-247.
- [26] 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.
- [27] 上海市环境保护局. 上海市环境质量报告书(2006~2010年度)[R]. 上海: 上海市环境保护局, 2011. 12-14.
- [28] 陈长虹, 苏雷燕, 王红丽, 等. 上海市城区 VOCs 的年变化特征及其关键活性组分[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 367-376.
- [29] 王红丽, 陈长虹, 黄成, 等. 上海市城区春节和“五一”节日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.
- [30] Saito S, Nagao I, Kanzawa H. Characteristics of ambient C₂-C₁₁ non-methane hydrocarbons in metropolitan Nagoya, Japan [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(29): 4384-4395.
- [31] Shiu C J, Liu S C, Chang C C, *et al.* Photochemical production of ozone and control strategy for Southern Taiwan [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(40): 9324-9340.
- [32] Martinez M, Harder H, Kovacs T A, *et al.* OH and HO₂ concentrations, sources, and loss rates during the Southern Oxidants Study in Nashville, Tennessee, summer 1999 [J]. Journal of Geophysics Research, 2003, **108**(D19): 4617, doi: 10.1029/2003JD003551.
- [33] Kanaya Y, Cao R Q, Akimoto H, *et al.* Urban photochemistry in central Tokyo: 1. Observed and modeled OH and HO₂ radical concentrations during the winter and summer of 2004[J]. Journal of Geophysics Research, 2007, **112**(D21): D21312, doi: 10.1029/2007JD008670.
- [34] 上海人民出版社. 上海环境年鉴[R]. 上海: 上海人民出版社, 2011. 10-11.
- [35] 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.
- [36] Brocco D, Fratarcangeli R, Lepore L, *et al.* Determination of aromatic hydrocarbons in urban air of Rome [J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(4): 557-566.
- [37] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [38] Guenther A, Karl T, Harley P, *et al.* Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature) [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, **6**(11): 3181-3210.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《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)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 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 (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