

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第11期

Vol.37 No.11

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

承德市大气污染源排放清单及典型行业对 PM<sub>2.5</sub> 的影响 ..... 陈国磊,周颖,程水源,杨孝文,王晓琦(4069)

浙江省木制品行业挥发性有机物排放特征及排放系数 ..... 姚轶,王浙明,何志桥,徐志荣,顾震宇(4080)

山西省人为源 VOCs 排放清单及其对臭氧生成贡献 ..... 闫雨龙,彭林(4086)

某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 高松,崔虎雄,伏晴艳,高爽,田新愿,方方,衣学文(4094)

加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用 ..... 黄玉虎,常耀卿,任碧琪,秦建平,胡玮,刘明宇(4103)

北京市生活垃圾填埋场氨排放特征研究 ..... 崔彤,李金香,杨妍研,程刚(4110)

西安市人为源大气氨排放清单及特征 ..... 苏航,闫东杰,黄学敏,宋文斌,王惠琴,宋雪娟(4117)

佛山市冬夏季非甲烷烃污染特征研究 ..... 周雪明,项萍,段菁春,贺克斌,马永亮,邓思欣,司徒淑婷,谭吉华(4124)

天津市道路环境大气颗粒物水溶性无机离子分析 ..... 赵梦雪,吴琳,方小珍,杨志文,李凤华,毛洪钧(4133)

戴云山国家级自然保护区大气氮沉降特点 ..... 袁磊,李文周,陈文伟,张金波,蔡祖聪(4142)

青岛近海冬季大气生物气溶胶中微生物活性研究 ..... 孟祥斌,李孟哲,李鸿涛,高冬梅,祁建华(4147)

玉米秸秆烟尘中正构脂肪酸的分子与碳同位素组成 ..... 刘刚,孙丽娜,徐慧,李久海,李中平,李立武(4156)

极低风速条件下水-气界面甲烷气体传输速率分析 ..... 张成,吕新彪,龙丽,张军伟,穆晓辉,李迎春,王圣瑞,张文丽,肖尚斌(4162)

典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征:基于沿岸生态系统分析 ..... 陈雪霜,江韬,卢松,白薇扬,张成,王定勇,魏世强(4168)

西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析 ..... 陈诗文,袁旭音,金晶,李正阳,许海燕(4179)

周村水库主库区热分层初期氮素降低的驱动因子分析 ..... 张春华,黄廷林,方开凯,周石磊,夏超(4187)

太湖湖泛易发区沉积物中有机磷形态分布特征 ..... 董丹萍,章婷曦,张丁予,王巧云,李德芳,王国祥(4194)

多重扰动对湖泊内源磷迁移转化的影响 ..... 蔡顺智,李大鹏,王忍,刘焱见,徐垚,于胜楠,黄勇(4203)

丹江口库区覆膜耕作土壤氮素淋失随夏玉米生长期的变化 ..... 王伟,于兴修,汉强,刘航,徐苗苗,任瑞,张家鹏(4212)

营养盐恢复对氮磷饥饿铜绿微囊藻生长的影响 ..... 岳冬梅,李洁,肖琳(4220)

氯灭活地下水源中3种优势真菌的效能与机制 ..... 文刚,朱红,黄廷林,赵建超,任崑,徐向前(4228)

净水工艺对饮用水中微生物多重耐药性的影响与分析 ..... 马晓琳,陆洋,王钰,侯誉,白晓慧(4235)

单过硫酸氢钾复合粉在饮用水消毒过程中的副产物生成特性及遗传毒性变化 ..... 敖秀玮,李豪杰,刘文君,余京儒(4241)

三维有序介孔 Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 非均相活化单过硫酸氢钾降解罗丹明 B ..... 冯善方,邓思萍,杜嘉雯,马晓雁,卢遇安,高乃云,邓靖(4247)

调控絮体形态强化电絮凝减缓膜污染 ..... 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4255)

初始 pH 值对序批式 CANON 工艺脱氮效果和 N<sub>2</sub>O 释放的影响 ..... 付昆明,王会芳,苏雪莹,周厚田(4261)

3DBER-S-Fe 同步脱氮除磷及去除邻苯二甲酸酯的工艺特性 ..... 张娅,郝瑞霞,徐鹏程,徐忠强(4268)

基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制 ..... 范军辉,郝瑞霞,李萌,朱晚霞,万京京(4275)

基于 ABR-MBR 组合工艺优化反硝化除磷性能的研究 ..... 程朝阳,赵诗惠,吕亮,吴鹏,沈耀良(4282)

中温变化对 PN-ANAMMOX 联合工艺脱氮效果的影响 ..... 袁砚,朱亮(4289)

生物活性炭对不同 C/N 比废水同步硝化反硝化脱氮效果的影响 ..... 崔延瑞,邱鑫,张庆荣,王琦,吴青,孙剑辉(4296)

ANAMMOX 菌利用零价铁还原硝酸盐脱氮研究 ..... 周健,完颜德卿,黄勇,刘忻,袁怡,李祥,姚鹏程,杨朋兵,薛鹏程(4302)

间歇曝气 SBR 与传统 SBR 处理养猪沼液的比较研究 ..... 董宝刚,宋小燕,刘锐,川岸朋树,张永明,陈吕军(4309)

应用解蛋白菌生物预水解剩余污泥 ..... 何晶晶,王颖,胡洁,吕凡,邵立明(4317)

应用环境多介质逸度模型研究废旧电器拆解区多溴联苯醚的迁移及归趋 ..... 薛南冬,陈宣宇,杨兵,秦普丰,龙雨(4326)

南宁市多环境介质中多环芳烃分布特征 ..... 苗迎,孔祥胜(4333)

杭州城区室内灰尘中多溴联苯醚的含量及人体暴露水平 ..... 金漫彤,滕丹丹,郑艳霞,胡张璇,沈学优,金赞芳(4341)

应用线性自由能关系估算药用活性化合物的生物碳质-水吸附系数 ..... 王佳怡,毕二平(4349)

表流湿地细菌群落结构特征 ..... 魏佳明,崔丽娟,李伟,雷茵茹,于菁菁,秦鹏,穆泳林,梁钊瑞(4357)

城市污水中硝化菌群落结构与性能分析 ..... 于莉芳,杜倩倩,傅学焘,张茹,李文江,彭党聪(4366)

DNA 和 cDNA 水平对比研究施肥对稻田土壤细菌多样性的影响 ..... 王聪,吴讷,侯海军,汤亚芳,沈健林,秦红灵(4372)

培养条件下双酚 A 对稻田土壤微生物群落特征的影响 ..... 刘畅,黄雅丹,张莹,靳振江,梁月明,宋昂,王腾,郭佳怡,李强(4380)

1 株兼具好、厌氧汞甲基化能力细菌的分离鉴定 ..... 陶兰兰,向玉萍,王定勇,黄曼琳,申鸿(4389)

北京地区菜田土壤抗生素抗性基因的分布特征 ..... 张兰河,王佳佳,哈雪姣,邱孟超,高敏,仇天雷,王旭明(4395)

梅花鹿养殖场抗生素抗性基因分布特征 ..... 黄福义,安新丽,陈青林,任红云,苏建强(4402)

几种高硅质矿物细颗粒的 A549 细胞毒性对比 ..... 霍婷婷,董发勤,邓建军,张青碧,贺小春,孙东平(4410)

添加复合吸附剂对土壤吸附非和 Cr(VI) 的影响 ..... 李文斌,孟昭福,吴琼,许绍娥,刘泽(4419)

生物炭对西北黄土吸附壬基酚的影响 ..... 张振国,蒋煜峰,慕仲锋,孙航,周琦,展惠英(4428)

集雨种植下不同沟垄比对土壤呼吸的影响及其对水热因子的响应 ..... 王昌江,施成晓,冯帆,陈婷,张磊,吕晓康,王伟,廖允成(4437)

秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响 ..... 黄容,高明,万毅林,田冬,陶睿,王芳丽(4446)

《环境科学》征稿简则(4161) 《环境科学》征订启事(4365) 信息(4123,4132,4409)

# 加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用

黄玉虎<sup>1,2</sup>, 常耀卿<sup>2</sup>, 任碧琪<sup>2\*</sup>, 秦建平<sup>2</sup>, 胡玮<sup>2</sup>, 刘明宇<sup>3</sup>

(1. 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072; 2. 北京市环境保护科学研究院, 国家城市环境污染控制工程技术研究中心, 北京 100037; 3. 北京市机动车排放管理中心, 北京 100176)

**摘要:** 加油站 VOCs 排放是北京市 VOCs 的主要来源之一, 中国、美国环保署、欧洲环境署加油环节的未控制排放因子(UEF)分别是加州空气资源委员会(CARB)加油 UEF( $1\ 008\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )的 2.16、1.31 和 1.00 倍, 中国 20 年来汽油标准发生了变化, 急需开展加油 VOCs 排放因子本地化研究. 本研究对比发现欧盟加油排放因子测试方法比 CARB 简单易操作, 借鉴欧盟方法加工了加油 VOCs 排放因子测试装置, 并在北京市某加油站的美国加油油气回收系统(Stage II)开展加油 VOCs 排放因子测试. 结果表明: ①针对试验油箱, 秋冬季加油油气回收效率分别是气液比(A/L)的 0.93 和 0.83 倍, 夏季加油排放因子大于冬季, 且回收效率小于冬季; ②针对社会车辆, A/L=0 时秋冬季加油 UEF 分别为  $(525 \pm 42)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $(963 \pm 174)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 分别是 CARB 加油 UEF 的 0.52 倍和 0.95 倍, 秋冬季在 A/L 为 1.05~1.07 时的排放因子平均值分别为  $(55 \pm 30)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $(112 \pm 108)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; ③选取无油气回收时社会车辆加油 UEF 作为北京市秋冬季加油 UEF, 结合试验油箱建立的秋冬季排放因子与 A/L 的线性方程, 计算有油气回收时不同 A/L 的排放因子.

**关键词:** 加油站; 汽油加油; VOCs; 油气回收; 排放因子

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)11-4103-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201605016

## Study and Application of Test Method for VOCs Emission Factor of Refueling in Service Station

HUANG Yu-hu<sup>1,2</sup>, CHANG Yao-qing<sup>2</sup>, REN Bi-qi<sup>2\*</sup>, QIN Jian-ping<sup>2</sup>, HU Wei<sup>2</sup>, LIU Ming-yu<sup>3</sup>

(1. School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection, National Engineering Research Center of Urban Environmental Pollution Control, Beijing 100037, China; 3. Beijing Vehicle Emission Management Centre, Beijing 100176, China)

**Abstract:** VOCs emission of service station is one of the main sources of VOCs in Beijing. Uncontrolled emission factor (UEF) of refueling in China, US EPA, EEA respectively is 2.16, 1.31 and 1.00 times of CARB UEF ( $1\ 008\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ). China's gasoline standards have changed in the last 20 years, and there is an urgent need to carry out the localization of gasoline refueling VOCs emission factor research. This paper compared test methods for refueling emission factors of European Union (EU) and California Air Resources Board (CARB) and found that the EU method was simpler and easier to operate than the CARB method, so we processed refueling VOCs emission factors test device in reference to EU test methods and chose a set of United States Stage II vapor recovery system in Beijing service stations to carry out studies on VOCs emission factors. The results showed that: ① For the fuel test tank, refueling vapor recovery efficiencies were 0.93 and 0.83 times of air to liquid volume ratio (A/L) of Stage II respectively in winter and summer. Refueling emission factor in summer was greater than that in winter, and its recovery efficiency was lower than that in winter. ② For the social vehicles, winter and summer refueling UEF respectively was  $(525 \pm 42)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $(963 \pm 174)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , at the same time was 0.52 and 0.95 times of CARB refueling UEF ( $1\ 008\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) in A/L=0. The average value of emission factors respectively was  $(55 \pm 30)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  and  $(112 \pm 108)\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  in A/L 1.05-1.07 in winter and summer. ③ Refueling UEF without vapor recovery of social vehicles was chosen as the localized summer and winter refueling UEF in Beijing, we could calculate the emission factor of vapor recovery in different A/L combining with the linear equation of the fuel test tank.

**Key words:** service station; gasoline refueling; VOCs; vapor recovery; emission factor

美国南加州环保署 1975 年认为造成空气 O<sub>3</sub> 浓度超标的挥发性有机物(VOCs)有很大一部分来自当时没有采取措施的加油站和配送系统. 对北京(2008 年前)<sup>[1-4]</sup>、上海(2010~2011 年)<sup>[5,6]</sup>和天津(2010 年)<sup>[7]</sup>这 3 个城市的 VOCs 源解析结果做算术平均, 得出汽车尾气和汽油挥发对 VOCs 的贡献率分别为  $(40.2\% \pm 16.9\%)$  和  $(19.7\% \pm 7.5\%)$ . 为准确估算加油站 VOCs 排放清单, 美国

环保署(US EPA)、欧洲环境署(EEA)、加州空气资源委员会(CARB)和中国等国家及地区都开展了

收稿日期: 2016-05-03; 修订日期: 2016-06-12

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC17B01, 2014BAC23B02); 国家环境保护公益性行业科研专项(201409021); 北京市环境保护科学研究院科技基金项目(2014-B-03)

作者简介: 黄玉虎(1978~), 男, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: huangyuhu@sina.com

\* 通讯联系人, E-mail: renbiqi89@sina.com

加油站 VOCs 排放因子研究<sup>[8~10]</sup>. 黄玉虎等<sup>[11]</sup>比较了国内外加油 VOCs 的未控制排放因子(UEF), 排放因子单位( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )指每转移 1L 汽油排放 VOCs 的质量(mg), 中国、US EPA、EEA 的加油站总 UEF 分别是 CARB 总 UEF ( $2\ 103\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的 1.78、1.38 和 0.85 倍, 其中加油环节 UEF 分别是 CARB 的 UEF ( $1\ 008\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 的 2.16、1.31 和 1.00 倍.

1991 年 US EPA 将美国各州汽油饱和蒸气压(RVP)、汽油温度和油箱油罐温差等参数代入加油排放因子模型, 得出各州加油 UEF 范围为( $1\ 150\sim 1\ 740$ ) $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 最大值是最小值的 1.5 倍, 冬季和夏季 UEF 分别为  $1\ 576\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1\ 169\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[12]</sup>. CARB 研究加油 UEF 时发现汽油 RVP 对 UEF 有显著影响, 加州新配方汽油 RVP 由 1992 年之前的 62.1 kPa 降至 1996 年的 48.3 kPa, 加油 UEF 由  $1\ 199\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  降至  $912\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[13]</sup>. 按照 RVP 和 UEF 的关系曲线, 推算出北京(RVP = 65 kPa)和全国(RVP = 74 kPa)汽油的加油 UEF 分别为  $1\ 267\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1\ 412\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而 GB 11085-89《散装液态石油产品损耗》指出加油 UEF 为  $2\ 175\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ <sup>[14]</sup>. 国内外加油站排放因子差异较大, 20 年来中国汽油标准发生了变化, 但是国内没有再开展加油站 VOCs 排放因子本地化研究<sup>[15~17]</sup>, 普遍重视加油站油气回收技术研究<sup>[18,19]</sup>, 在编制城市 VOCs 排放清单时也没有研究国内外加油站 VOCs 排放因子适用性, 导致 VOCs 排放清单存在较大不确定性<sup>[20,21]</sup>. 中国急需开展加油站加油 VOCs 排放因子本地化测试, 本研究对比分析了 CARB 和欧盟排放因子测试方法, 设计加油 VOCs 排放因子测试装置, 在北京市某加油站的美国加油油气回收系统(Stage II)开展加油 VOCs 排放因子测试方法研究与应用, 以期为提高加油站 VOCs 排放清单计算精度提供技术支撑.

## 1 材料与方法

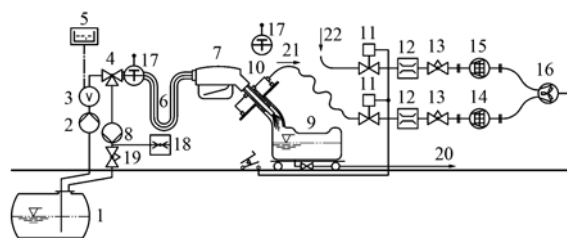
### 1.1 CARB 测试方法

CARB 指出 Stage II 系统加油过程包括 4 个 VOCs 排放点: ①加油枪与车辆油箱接口处, ②油罐排气管压力/真空阀(P/V 阀), ③油气后处理装置(VRU), ④与压力有关的无组织排放. CARB 通过测试 4 个点排放的 VOCs 和加油枪油气回收管线回收的 VOCs, 计算 Stage II 系统的 VOCs 排放因子和回收效率<sup>[22]</sup>. 其中, 排放点①、②和③的 VOCs 浓度采用氢火焰离子化检测仪(FID)测试, 排放点④

采用压力监测结果计算<sup>[23]</sup>, 加油枪回收管线 VOCs 浓度采用非色散红外气体分析仪(NDIR)测试. 将 FID 放在非防爆区, 在排放点和 FID 之间连接 Teflon 采样管和阻火器.

### 1.2 欧盟测试方法

欧洲标准化委员会以德国工程师协会(VDI)文件<sup>[24]</sup>为基础, 制定了欧盟法规《EN16321-1: 2013 油气回收系统效率评估型式认证的测试方法》<sup>[25]</sup>, 提出加油站 Stage II 系统 VOCs 排放因子和回收效率测试方法, 该方法需要测试基础排放量和剩余排放量, 基础排放量和剩余排放量分别指加油过程中关闭(或没有)和开启 Stage II 系统时, 向大气环境排放的 VOCs 质量平均值. 图 1 是欧盟加油 VOCs 排放因子测试装置(测试装置)工艺原理, 测试装置借助真空泵和专用收集罩等部件在油箱加油管处抽吸加油排放的 VOCs, 并使用活性炭吸附 VOCs 进行称重.



加油机部分: 1. 汽油埋地油罐; 2. 加油泵; 3. 燃油体积表; 4. 气液分离阀; 5. 燃油体积显示器; 6. 加油管及接头; 7. 加油枪; 8. 油气回收泵; 测试装置部分: 9. 试验油箱; 10. 油气收集罩; 11. 两个同步的工作阀; 12. 气体流量计; 13. 气体流量调节阀; 14. 油气吸附炭罐; 15. 空气吸附炭罐; 16. 真空泵; 17. 温度计; 18. 背压测量器; 19. 背压控制阀; 20. 返回油罐; 21. 油气; 22. 空气入口

图 1 加油 VOCs 排放因子测试装置工艺原理

Fig. 1 Schematic of refueling VOCs emission factor test device

### 1.3 测试装置设计与加工

欧盟油气回收法规不要求加油站油罐系统保持密闭<sup>[26]</sup>, 认为加油站排气管 P/V 阀排放可以忽略, 因此在研究加油排放因子时只测试汽车油箱口排放, 欧盟加油 VOCs 排放因子测试方法比 CARB 简单易操作. 此外, 欧盟和 CARB 测试方法的油气收集罩不同, 欧盟测试方法要求收集罩与试验油箱的模拟车身密合, 但是社会车辆车身弧度不同, 因此其只适合测试试验油箱; 而 CARB 收集罩无法与试验油箱车身密合, 测试结果比欧盟收集罩偏低 5%, 但是其可以深入社会车辆油箱门以内, 非常适合测试社会车辆加油排放. 本研究按照欧盟法规《EN16321-1: 2013》加工了 1 台加油 VOCs 排放因

子测试装置,并取得了防爆合格证(证书编号: CNEx11.2906),防爆标志为 Ex de mb II A T3 Gb. 测试装置工作原理为“油气收集+活性炭吸附+天平称重”,其中,①“油气收集”指通过油气收集罩和油气收集管将加油时从油箱口无组织排放的油气 100% 收集变成有组织排放,便于吸附炭罐吸附,并要求收集罩的抽气作用既不加速汽油挥发,也不影响加油枪的油气回收;②“活性炭吸附”指将前端收集来的 VOCs 吸附到油气吸附炭罐中,同时空气吸附炭罐采用相同的抽气量吸附加油站环境空气中的油气和水汽;③“天平称重”指采用电子天平对炭罐工作前后的质量进行称重,计算油气吸附炭罐相对空气吸附炭罐增重的绝对增重,根据加油量计算加油 VOCs 排放因子,用防爆风机对炭罐进行脱附处理. 电子天平安装在加油站非防爆区,且要防止风和振动对天平读数的影响.

#### 1.4 加油排放因子测试方案

在北京市某加油站的美国 Stage II 系统开展冬季夏季加油 VOCs 排放因子本地化测试. 欧盟和 CARB 测试加油 VOCs 排放因子都要求有足够的汽油车样本数,其中,欧盟《EN16321-1: 2013》要求测试 8 类汽车油箱, CARB 要求测试 50~200 辆符合车辆矩阵要求的社会车辆<sup>[27]</sup>. GB 20952-2007《加油站大气污染物排放标准》规定气液比(A/L)达标范围为 1.00~1.20<sup>[28]</sup>,本研究按照国标采用今日易华 IW-HJZH-I 油气回收三项测试仪检测 A/L<sup>[29]</sup>. 本研究首先选取 1 种密闭合格的雪佛兰汽车油箱,采用测试装置和欧盟收集罩测试 Stage II 系统 A/L 在 0~1.20 范围内的加油排放因子,分析 A/L 对排放因子的影响;其次选取 50 辆社会车辆,采用测试装置和 CARB 收集罩测试 A/L=0 和 A/L≈1.10 时的加油排放因子.

## 2 结果与讨论

### 2.1 测试装置工作参数

采用试验油箱对测试装置的工作参数进行研究和测定. ①按照 GB/T 20449-2006《活性炭丁烷工作容量测试方法》测试活性炭的油气工作容量<sup>[30]</sup>,筛选工作容量大的活性炭,油气工作容量指单位质量活性炭对油气的饱和吸附量和在规定条件下脱附后仍保留在活性炭上的油气量之差;②测试吸附炭罐穿透时的油气吸附量;③测试确定测试装置的最佳抽气量. 相关仪器包括:采用美国华瑞 PGM7300 型 PID(光离子化) VOCs 检测仪(量程  $5\ 000 \times 10^{-6}$ ,精

度  $0.1 \times 10^{-6}$ )检测油气收集罩外侧 HC 浓度,采用龙腾 ES30K-1 电子精密天平(量程 30 kg,精度 0.1 g)称量炭罐.

#### 2.1.1 活性炭的油气工作容量

《EN16321-1: 2013》要求测试装置中吸附炭罐的油气最大吸附量是油气累计增重的 10 倍,因此筛选油气工作容量大的活性炭作为测试装置专用活性炭,可以减小吸附炭罐的体积和重量. 选取了国内的球形和圆柱形活性炭各 1 种进行测试,直径分别为(3~4) mm 和 1.8 mm,图 2 是 2 种活性炭对油气的吸附和脱附曲线. 由吸附曲线可知 FJ 和 NJ 活性炭的油气饱和吸附率分别为 66.8% 和 48.0%,饱和吸附量(以油气/活性炭计)分别为  $0.67 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.48 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ;由脱附曲线可知 FJ 和 NJ 活性炭的油气脱附率分别为 61.6% 和 54.9%,二者的油气工作容量(以油气/活性炭计)分别为  $0.41 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $0.26 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,本研究选取 FJ 活性炭作为测试装置专用活性炭.

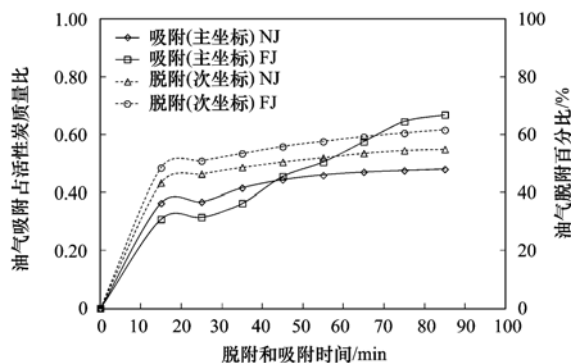


图 2 活性炭的油气吸附和脱附曲线

Fig. 2 Vapor adsorption and desorption curves of activated carbon

#### 2.1.2 吸附炭罐油气穿透试验

在不同相对湿度(10%~60%)的环境空气条件下,启动测试装置使吸附炭罐抽吸空气 2 min,吸附炭罐增重为  $-0.1 \sim 1.0 \text{ g}$ ,以 40 L 汽油加油量计算,引起排放因子绝对误差为  $-2.5 \sim 25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ,因此,增加空气吸附炭罐对消除相对湿度引起的排放因子测试误差非常必要.

在测试装置的炭罐内安装 1 800 g 活性炭,已知 FJ 活性炭的油气工作容量为  $0.41 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ ,可知炭罐可以吸附 730 g 油气. 根据《EN16321-1: 2013》的设计理论可以认为炭罐累计增重小于 73 g 时,炭罐可以实现零穿透. 本研究在环境温度为 5℃ 时对吸附炭罐的油气穿透性能进行试验,试验过程如下:①启动测试装置,给试验油箱加 40 L 汽油之后称量吸附炭罐,计算油气吸附炭罐相对空气吸附炭罐增



重的绝对增重；②连接测试装置，启动测试装置只抽吸空气 2 min，称量吸附炭罐，计算油气吸附炭罐绝对增重的损失量；③重复步骤①和②，直到发现损失量  $\geq 1.0$  g。图 3 是吸附炭罐油气穿透试验曲线，当炭罐累计绝对增重达到 35 g 和 70 g 时，抽吸空气后损失量分别为 0.1 g 和 0.5 g，以 40 L 加油量计算排放因子绝对误差分别为  $-2.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $-12.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，可以将排放因子测试值相对误差控制在 5% 以内。当测试 A/L = 1.10 的加油排放因子，允许炭罐累计绝对增重 35 g 左右；当测试 A/L = 0 的排放因子，允许炭罐累计绝对增重 70 g 左右，符合《EN16321-1: 2013》的设计值。

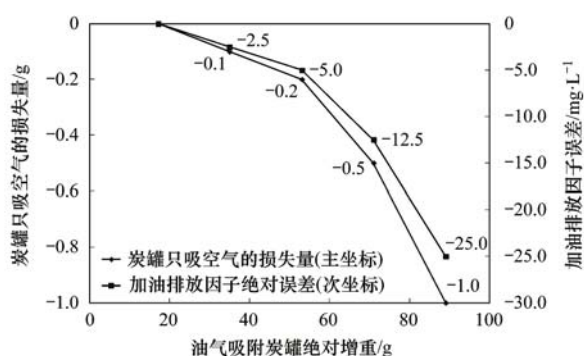


图 3 吸附炭罐油气零穿透曲线

Fig. 3 Vapor zero breakthrough curves of adsorption canister

### 2.1.3 测试装置的最佳抽气量

CARB 采用 PID 检测测试装置工作时收集罩外侧 HC 浓度，当 HC 浓度  $\leq 2 \times 10^{-6}$  时，可以认为测试装置达到最佳抽气量<sup>[22]</sup>。本研究依据测试装置抽气量与排放因子的关系确定最佳抽气量，以高档加油速率  $38 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  为例，假设抽气量为  $95 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  时对应的油气收集率为 100%，抽气量为 80、65、50 和  $35 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  时对应的收集率分别为 99%、95%、91% 和 70%，而且在抽气量小于  $80 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  测试 A/L = 0 的排放因子时，收集罩外侧 HC 浓度都  $\geq 200 \times 10^{-6}$ ，最终确定测试装置测试 A/L 为 0 和  $\geq 1.10$  的排放因子对应的最佳抽气量分别为加油速率的 2 倍和 1 倍，测试其他 A/L 排放因子时，测试装置的最佳抽气量按内插法取值。

## 2.2 典型 Stage II 系统加油排放因子

### 2.2.1 试验油箱加油排放因子

按照《EN16321-1: 2013》规定的程序测试试验油箱加油排放因子，测试程序如下：①将试验油箱内汽油清除至油箱容量的 10% 以下；②向油箱加油，至少加到油箱容量的 90% 以上；③将油箱内汽油清除至油箱容量的  $(20 \pm 5)\%$ ；④关闭油箱加油

口，让油箱静置  $(20 \pm 5) \text{ min}$ ；⑤向油箱加油，测量基础（或剩余）排放量，加至油箱容量的  $(80 \pm 5)\%$ ，加油速度应为  $(38.0 \pm 1.0) \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  加油结束后延迟 2 s 关闭测试装置，确保完全吸附残留在收集罩和炭罐之间软管内的油气。每种 A/L 和对应加油排放因子分别检测 3 次，求平均值。冬夏季试验油箱测试时环境温度分别为  $6^\circ\text{C}$  和  $28^\circ\text{C}$ 。冬季测试了 A/L 为 0.00、0.76、0.92、1.01 和 1.10 时的排放因子，夏季测试了 A/L 为 0.00、0.77、0.93、1.07 和 1.21 时的排放因子。

图 4 是试验油箱在不同 A/L 时的加油排放因子，当 A/L = 0 时，冬夏季加油排放因子分别为  $449 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $1051 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，夏季是冬季的 2.3 倍，加油排放因子随 A/L 增加而减小，油气回收效率随 A/L 增加而增加。将加油油气回收效率对 A/L 做线性回归，冬夏季的线性方程分别为  $y = 0.93x$  和  $y = 0.83x$ ，线性方程属于不收敛的函数，因此不适用于 A/L > 1.00 的情况，二项式回收方程的回收效率也没有收敛至 100%。代入 A/L = 1.00，得出冬夏季试验油箱的加油回收效率分别为 93% 和 83%，冬夏季排放因子分别为  $31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $179 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，夏季是冬季的 5.7 倍。综上所述，夏季加油排放因子大于冬季，回收效率小于冬季。

利用试验油箱测试夏季 A/L = 1.07 时加油枪集气罩对加油油气回收效率的影响，A/L = 0 时，加油排放因子为  $1051 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，A/L = 1.07 时，集气罩可以将排放因子由  $123 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  降低至  $101 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，集气罩可以将油气回收效率由 88% 提高至 90%，可以提高 2%。

### 2.2.2 社会车辆加油排放因子

冬夏季社会车辆测试时环境温度分别为  $5^\circ\text{C}$  和  $28^\circ\text{C}$ 。夏季测试了 50 辆社会车辆在 A/L 为 1.07 和 0 时的加油排放因子，冬季测试了 50 辆社会车辆在 A/L 为 1.05 和 0 时的加油排放因子，冬夏季有无油气回收时的加油排放因子见图 5。可以看出，冬夏季加油排放因子差异较大，同一季节排放因子差异也较大，对 A/L = 0 时的加油排放因子求平均值，得到冬夏季的加油排放因子分别为  $(525 \pm 42) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $(963 \pm 174) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ，夏季是冬季的 1.8 倍，分别是 CARB 加油排放因子  $(1008 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1})$ <sup>[10]</sup> 的 0.52 和 0.95 倍，对该加油站的汽油 RVP 进行检测，发现汽油冬夏季 RVP 无明显差异，分别为  $49.9 \text{ kPa}$  和  $49.0 \text{ kPa}$ ，而 CARB 第二阶段新配方汽油冬夏季 RVP 分别  $\leq 56 \text{ kPa}$  和  $48 \text{ kPa}$ ，CARB 冬季加油排放

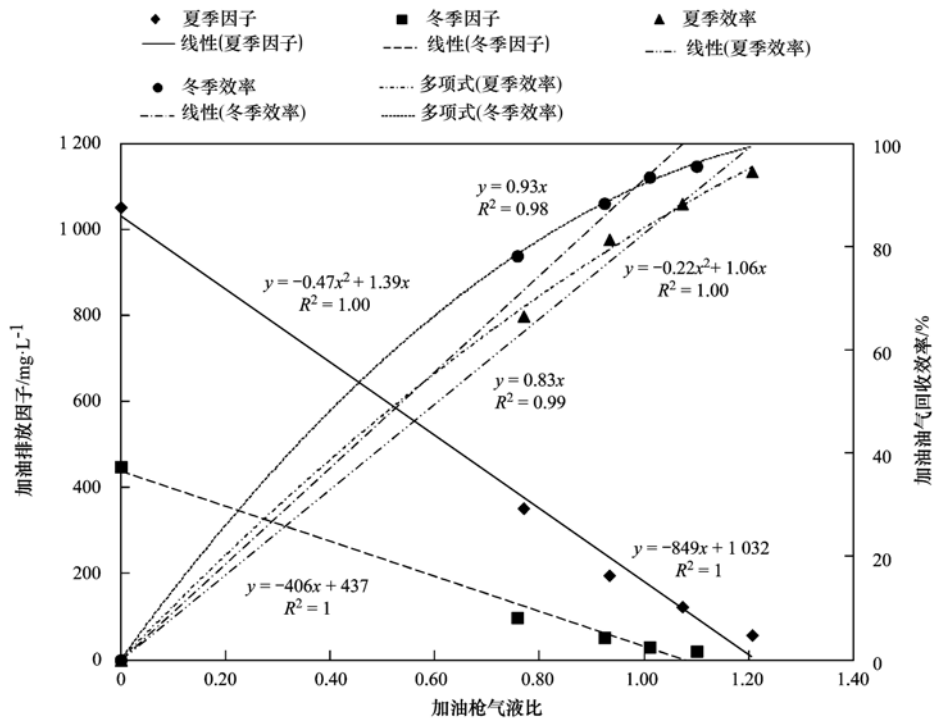


图 4 试验油箱在不同 A/L 时的加油排放因子

Fig. 4 Refueling emission factors of the test fuel tank at different A/L

因子略大于夏季。

北京冬夏季在 A/L 为 1.05 ~ 1.07 的排放因子平均值分别为  $(55 \pm 30) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(112 \pm 108) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 夏季是冬季的 2.0 倍。以 A/L = 0 的排放因子平均值为基准, 得出冬夏季在 A/L 为 1.05 ~ 1.07 时加油回收效率分别为  $(89.5 \pm 5.8) \%$  和  $(88.3 \pm 11.2) \%$ 。虽然夏季 A/L 略高于冬季, 但是夏季加油回收效率仍然低于冬季, 这与试验油箱的测试结果一致。

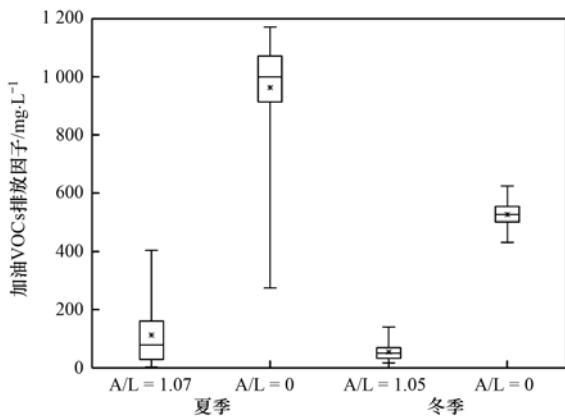


图 5 冬夏季有无油气回收时的加油排放因子

Fig. 5 Refueling emission factor with and without vapor recovery in summer and winter

试验油箱和社会车辆加油排放因子存在差异, 主要原因是试验油箱和社会车辆油箱之间存在温

差。建议选取无油气回收时社会车辆加油 UEF 作为北京市本地化 UEF, 结合试验油箱建立的冬夏季排放因子与 A/L 的线性方程, 计算有油气回收时不同 A/L 的排放因子, 利用北京市加油站汽油销售量和油气回收监管数据, 计算全市加油站加油 VOCs 排放清单。1996 ~ 1999 年 CARB 在加油站测试了 OPW、Healy 和 Hasstech 等 6 种品牌 Stage II 系统的夏季汽油加油 UEF<sup>[13]</sup>, 发现不同系统的 UEF 存在一定差异, 测试结果为  $(912 \pm 127) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 建议对北京市各种在用品牌的 Stage II 系统进行本地化测试, 进一步完善北京市排放因子。

### 3 结论

(1) 加工了加油 VOCs 排放因子测试装置, 并测定其工作参数, 当吸附炭罐的油气最大吸附量为油气累计增重的 10 倍, 可以将排放因子测试值相对误差控制在 5% 以内, 测试装置测试 A/L = 0 和  $\geq 1.10$  的排放因子对应的最佳抽气量分别为加速速率的 2 倍和 1 倍。

(2) 在北京市开展加油 VOCs 排放因子测试, 试验油箱测试结果表明, 冬夏季加油油气回收效率与 A/L 的线性方程分别为  $y = 0.93x$  和  $y = 0.83x$ , 夏季加油排放因子大于冬季, 但是回收效率小于冬季。A/L = 1.07 时加油枪集气罩可以将加油油气回收效

率提高 2%。

(3) 社会车辆测试结果表明, A/L = 0 时冬夏季加油 UEF 分别为  $(525 \pm 42) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(963 \pm 174) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 分别是 CARB 加油 UEF ( $1008 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 的 0.52 和 0.95 倍。冬夏季在 A/L 为 1.05 ~ 1.07 时的排放因子平均值分别为  $(55 \pm 30) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(112 \pm 108) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 对应的回收效率分别为  $(89.5 \pm 5.8) \%$  和  $(88.3 \pm 11.2) \%$ 。选取无油气回收时社会车辆加油 UEF 作为北京市冬夏季加油 UEF, 结合试验油箱建立的冬夏季排放因子与 A/L 的线性方程, 计算有油气回收时不同 A/L 的排放因子。

#### 参考文献:

- [1] 陆思华, 白郁华, 张广山, 等. 大气中挥发性有机化合物 (VOCs) 的人为来源研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(5): 757-763.  
Lu S H, Bai Y H, Zhang G S, *et al.* Source apportionment of anthropogenic emissions of volatile organic compounds[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, 26(5): 757-763.
- [2] Song Y, Shao M, Liu Y, *et al.* Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(12): 4348-4353.
- [3] Duan J C, Tan J H, Yang L, *et al.* Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds (VOCs) during ozone episode in Beijing [J]. Atmospheric Research, 2008, 88(1): 25-35.
- [4] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3560-3565.  
Zhou Y M, Hao Z P, Wang H L. Pollution and source of atmospheric volatile organic compounds in urban-rural juncture belt area in Beijing[J]. Environmental Science, 2011, 32(12): 3560-3565.
- [5] 王红丽, 陈长虹, 黄海英, 等. 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[J]. 环境科学, 2012, 33(12): 4151-4158.  
Wang H L, Chen C H, Huang H Y, *et al.* Emission strength and source apportionment of volatile organic compounds in Shanghai during 2010 EXPO[J]. Environmental Science, 2012, 33(12): 4151-4158.
- [6] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气 VOCs 对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究[J]. 环境科学, 2013, 34(2): 424-433.  
Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China[J]. Environmental Science, 2013, 34(2): 424-433.
- [7] 韩萌, 卢学强, 冉靓, 等. 天津市城区夏季 VOCs 来源解析[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(10): 76-80.  
Han M, Lu X Q, Ran L, *et al.* Source apportionment of volatile organic compounds in urban Tianjin in the summer [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 34(10): 76-80.
- [8] US EPA. Emission factor documentation for AP-42, Section 5.2 transportation and marketing of petroleum liquids [R]. Washington, DC: US EPA, 2008.
- [9] European Environmental Agency. EMEP/EEA Emission inventory guidebook, 1. B. 2. a. v Distribution of oil products [R]. Copenhagen, Denmark: European Environmental Agency, 2013.
- [10] California Air Resources Board. Revised emission factors for gasoline marketing operations at California gasoline dispensing facilities[R]. California, Sacramento, CA: CARB, 2013.
- [11] 黄玉虎, 常耀卿, 任碧琪, 等. 北京市 1990—2030 年加油站汽油 VOCs 排放清单[J]. 环境科学研究, 2016, 29(7): 945-951.  
Huang Y H, Chang Y Q, Ren B Q, *et al.* Gasoline VOCs emission inventory of service station from 1990 to 2030 in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(7): 945-951.
- [12] US EPA. Technical guidance-Stage II vapor recovery systems for control of vehicle refueling emissions at gasoline dispensing facilities, Volume I: Chapters, EPA-4503-91-022a [R]. Washington, DC: US EPA, 1991.
- [13] California Air Resources Board. Uncontrolled vapor emission factor at gasoline dispensing facilities (draft) [R]. California, Sacramento, CA: CARB, 2000.
- [14] GB 11085-1989 散装液态石油产品损耗[S].
- [15] 史小春, 钱华, 戴海夏, 等. 上海加油站各环节油气排放情况[J]. 三峡环境与生态, 2011, 33(6): 51-56.  
Shi X C, Qian H, Dai H X, *et al.* Gasoline vapor emissions in the various aspects section of gasoline filling stations in Shanghai [J]. Environment and Ecology in the Three Gorges, 2011, 33(6): 51-56.
- [16] Yang X F, Liu H, Cui H Y, *et al.* Vehicular volatile organic compounds losses due to refueling and diurnal process in China: 2010-2050[J]. Journal of Environmental Sciences, 2015, 33: 88-96.
- [17] 沈旻嘉, 郝吉明, 王丽涛. 中国加油站 VOC 排放污染现状及控制[J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1473-1478.  
Shen M J, Hao J M, Wang L T. VOC emission situation and control measures of gas station in China [J]. Environmental Science, 2006, 27(8): 1473-1478.
- [18] 朱玲, 陈家庆, 张宝生, 等. 膜分离法处理加油站油气的研究[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3704-3709.  
Zhu L, Chen J Q, Zhang B S, *et al.* Experimental research of oil vapor pollution control for gas station with membrane separation technology[J]. Environmental Science, 2011, 32(12): 3704-3709.
- [19] 陈家庆, 张男, 王金惠, 等. 机动车加油过程中气液两相流动特性的 CFD 数值模拟[J]. 环境科学, 2011, 32(12): 3710-3716.  
Chen J Q, Zhang N, Wang J H, *et al.* CFD numerical simulation onto the gas-liquid two-phase flow behavior during vehicle refueling process[J]. Environmental Science, 2011, 32(12): 3710-3716.
- [20] 韩丽, 王幸锐, 何敏, 等. 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[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4535-4542.  
Han L, Wang X R, He M, *et al.* Inventory and environmental impact of VOCs emission from the typical anthropogenic sources



- in Sichuan province [J]. *Environmental Science*, 2013, **34** (12): 4535-4542.
- [21] 杨柳林, 曾武涛, 张永波, 等. 珠江三角洲大气排放源清单与时空分配模型建立[J]. *中国环境科学*, 2015, **35** (12): 3521-3534.
- Yang L L, Zeng W T, Zhang Y B, *et al.* Establishment of emission inventory and spatial-temporal allocation model for air pollutant sources in the Pearl River Delta region [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35** (12): 3521-3534.
- [22] California Air Resources Board. TP- 201. 2 Efficiency and emission factor for phase II systems [R]. California, Sacramento, CA: CARB, 2012.
- [23] California Air Resources Board. TP- 201. 2F pressure-related fugitive emissions [R]. California, Sacramento, CA: CARB, 2003.
- [24] Verein Deutscher Ingenieure. Measurement and test methods for the assessment of vapour recovery systems at filling stations system test of active vapour recovery systems[S]. Dusseldorf, Germany: VDI, 2005.
- [25] European Committee for Standardization. BS EN 16321-1-2013 Petrol vapour recovery during refuelling of motor vehicles at service stations, Part 1: Test methods for the type approval efficiency assessment of petrol vapour recovery systems [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2013.
- [26] The European Parliament and of the Council. Directive 2009/126/EC On Stage II petrol vapour recovery during refuelling of motor vehicles at service stations [S]. Brussels, Belgium: European Union, 2009.
- [27] GB 20952-2007 加油站大气污染物排放标准[S].
- [28] California Air Resources Board. TP-201. 2A Determination of vehicle matrix for phase II systems[R]. California, Sacramento, CA: CARB, 2012.
- [29] 黄玉虎, 秦建平, 任碧琪, 等. 加油站气液比检测方法及其影响[J]. *环境工程学报*, 2014, **8** (6): 2633-2638.
- Huang Y H, Qin J P, Ren B Q, *et al.* Test method of air to liquid volume ratio and its influence in service station [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, **8** (6): 2633-2638.
- [30] GB/T 20449-2006 活性炭丁烷工作容量测试方法[S].

## CONTENTS

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

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

## 环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年11月15日 第37卷 第11期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 11 Nov. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行