

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM _{2.5} 成因分析及效果评估	吕喆, 魏巍, 周颖, 程水源, 王晓琦	(1)
长三角地区重点源减排对PM _{2.5} 浓度的影响	于燕, 王泽华, 崔雪东, 陈锋, 徐宏辉	(11)
上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析	戴海夏, 安静宇, 李莉, 黄成, 严茹莎, 朱书慧, 马英歌, 宋伟民, 阚海东	(24)
京津冀及周边地区PM _{2.5} 时空变化特征遥感监测分析	陈辉, 厉青, 李莹, 张连华, 毛慧琴, 周伟, 刘伟汉	(33)
MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性	王海林, 刘琼, 陈勇航, 孙冉, 李霞, 张华, 魏刚, 胡俊, 刘统强	(44)
气象因素对香港地区臭氧污染的影响	赵伟, 高博, 刘明, 卢清, 马社霞, 孙家仁, 陈来国, 范绍佳	(55)
天津夏季边界层低层大气中PAN和O ₃ 的输送特征分析	姚青, 马志强, 林伟立, 刘敬乐, 王晓佳, 蔡子颖, 韩素芹	(67)
成都冬季PM _{2.5} 化学组分污染特征及来源解析	吴明, 吴丹, 夏俊荣, 赵天良, 杨清健	(76)
郑州市冬季PM _{2.5} 传输路径和潜在源分析	段时光, 姜楠, 杨留明, 张瑞芹	(86)
常州春季PM _{2.5} 中WSOC和WSN的污染特征与来源解析	李清, 黄雯倩, 马帅帅, 黄红缨, 叶招莲, 陈敏东	(94)
天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子	孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷, 毛洪钧	(104)
机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征	梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 王向丽, 梅丛蔚, 肖政臻	(114)
超低排放路线下燃煤烟气可凝颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性	杨柳, 张斌, 王康慧, 麻丁仁, 盛重义	(121)
超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性	阮仁晖, 谭厚章, 段钰锋, 杜勇乐, 刘鹤欣, 萧嘉繁, 杨富鑫, 张朋	(126)
北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放	张立坤, 李令军, 姜磊, 赵文慧, 鹿海峰, 王新辉, 邱昀	(135)
SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除	任美慧, 樊芸, 王胜, 许亮, 张宁, 张雪萍, 陈吉平, 张海军	(143)
古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义	桂娟, 李宗省, 冯起, 卫伟, 李永格, 吕越敏, 袁瑞丰, 张百娟	(149)
夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征	程琼, 庄婉娥, 王辉, 陈苇, 杨丽阳	(157)
亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析	朱爱菊, 孙东耀, 谭季, 黄佳芳, 罗敏	(164)
基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源	周石磊, 张艺冉, 黄廷林, 刘艳芳, 张磊, 李贵霞, 岳琳, 罗晓	(172)
分层型水源水库溶解性有机物性质及其膜污染特性	李凯, 王晓东, 黄廷林, 李舒, 刘双	(185)
重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO ₂ 交换通量及其影响因素	罗佳宸, 倪茂飞, 李思悦	(192)
基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用	李渊, 李云梅, 郭宇龙, 张运林, 张毅博, 胡耀躲, 夏忠	(200)
巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征	李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌, 王莉	(211)
特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例	丁瑶, 欧阳莉莉, 石清, 高平川, 赖承钺, 陈舒平, 贾滨洋, 姚刚	(219)
黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量	李琦路, 程相会, 赵祯, 郭萌然, 袁梦, 华夏, 方祥光, 孙红文	(228)
重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源	苗迎, 孔祥胜, 李成展	(239)
沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价	张士超, 姚宏, 向鑫鑫, 刘殷佐, 刘明丽, 鲁根涛, 于晓华	(248)
多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险	付璐婧, 李一兵, 乔梦, 赵旭	(256)
原水性质对新型含Ca ²⁺ 复合混凝剂混凝过程的影响	曲江东, 徐慧, 徐建坤, 段晋明, 门彬, 王东升	(263)
水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用	李聪鹤, 车潇炜, 白莹, 石晓勇, 苏荣国	(273)
MoS ₂ /BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能	张亮, 赵朝成, 高先瑶, 闫青云, 王帅军, 董培, 侯亚璐	(281)
纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星	倪永炯, 程永清, 徐梦苑, 邱春根, 马晓雁, 李军, 邓靖	(293)
不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能	张翔凌, 邓礼楚, 方晨佳, 雷雨, 何春艳, 高晨光, 赵双杰, 向洋	(300)
单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能	邢明超, 谢强, 陈守慧, 吴德意	(310)
新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化	唐立朋, 魏群山, 吕强, 张弛, 刘亚男, 柳建设	(318)
不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应	胡佳萍, 曾翠平, 骆海萍, 刘广立, 张仁铎, 卢耀斌	(327)
碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响	崔有为, 金常林, 王好韩, 李晶	(336)
进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响	甄建园, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 都叶奇, 袁梦飞, 杜世明	(343)
不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响	王晓霞, 甄建园, 赵骥, 于德爽, 都叶奇, 杜世明, 袁梦飞, 张帆	(352)
后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷	巩秀珍, 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 王钧, 毕春雪, 都叶奇	(360)
缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行	李冬, 郭跃洲, 劳会妹, 曹美忠, 张杰	(369)
低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式	李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰	(376)
不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性	严俊霞, 孙琦, 李君剑, 李洪建	(383)
轮作方式对冬水田温室气体排放的影响	冯夕, 江长胜, 彭小乐, 李彦沛, 郝庆菊	(392)
紫色土N ₂ O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应	黄容, 高明, 王莹燕, 黎嘉成, 徐国鑫, 罗梅, 徐畅	(401)
岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征	张双双, 靳振江, 贾远航, 李强	(412)
丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析	孙峰, 田伟, 张菲, 陈彦, 任学敏, 庞发虎, 李玉英, 姚伦广, 陈兆进	(421)
硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化	贾欠欠, 李伟, 王亚男, 段晋明, 刘玉灿	(430)
铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估	王洋洋, 李方方, 王笑阳, 杨志辉, 韩科, 阮心玲	(437)
新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响	杨伟光, 王美娥, 陈卫平	(445)
九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价	林承奇, 黄华斌, 胡恭任, 于瑞莲, 郝春莉, 林颖	(453)
草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征	许议元, 何天容	(461)
Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响	郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 李厚恩, 徐铁兵, 周小勇, 叶勇, 于豹	(470)
不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响	王起凡, 郭伟, 常青, 潘亮, 周昕南, 杨亮, 李娥	(480)
广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析	王俊能, 赵学敏, 胡国成, 钟松雄, 姚玲爱, 马千里, 许振成	(488)
6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响	邹亚丹, 徐擎擎, 张智, 李富云, 李锋民	(496)
一种负载功能微生物的营养缓释填料的制备及性能评价	冯克, 徐丹华, 成卓韦, 於建明, 陈建孟	(504)
《环境科学》征订启事(113)		
《环境科学》征稿简则(238)		
信息(93, 262, 342)		

天津隧道机动车 VOCs 污染特征与排放因子

孙露娜, 刘妍, 赵静波, 孙世达, 宋从波, 张静, 李悦宁, 林应超, 王婷*, 毛洪钧*

(南开大学环境科学与工程学院, 城市交通污染防治研究中心, 天津 300071)

摘要: 应用隧道测试方法在天津市五经路隧道于工作日和非工作日对机动车挥发性有机物(VOCs)污染特征及排放因子(EFs)进行研究, 采用3.2 L真空采样罐采集隧道内气体样品, 应用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)对罐内VOCs组分进行分析, 得到99种组分的定量结果. 对VOCs浓度水平与变化特征、EFs进行了分析, 计算隧道内VOCs的臭氧生成潜势(OFPs)和二次有机气溶胶生成潜势(SOAFPs), 并与已发表的研究数据进行了对比. 结果表明, 隧道入口VOCs平均浓度为 $(190.85 \pm 51.15) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 中点平均浓度为 $(257.44 \pm 62.02) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$. 隧道总排放因子为 $(45.12 \pm 10.97) \text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$, 烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和含氧VOCs(OVOCs)的EFs分别为 (22.79 ± 7.15) 、 (5.04 ± 1.20) 、 (0.78 ± 0.34) 、 (9.86 ± 2.81) 、 (0.26 ± 0.17) 和 $(6.25 \pm 2.27) \text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$, 与2009年测试结果相比下降明显. 其中, 异戊烷、甲苯、乙烯、甲基叔丁基醚(MTBE)和乙烷是机动车排放VOCs中排放因子较高的组分; 甲基叔丁基醚/苯(MTBE/B)、甲基叔丁基醚/甲苯(MTBE/T)比值分别为1.07和0.77, 说明蒸发排放对机动车排放VOCs的贡献不可忽视. 隧道内VOCs的OFPs和SOAFPs分别为 $(145.50 \pm 37.85) \text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ 和 $(43.87 \pm 12.75) \text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$, 较2009年天津测试结果分别降低94.23%和90.88%, OFPs和SOAFPs的锐减与排放标准加严和油品升级密切相关.

关键词: 挥发性有机物(VOCs); 隧道测试; 二次有机气溶胶(SOA); 排放因子(EFs); 臭氧生成潜势(OFPs)

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0104-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.201804187

Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel

SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, SUN Shi-da, SONG Cong-bo, ZHANG Jing, LI Yue-ning, LIN Ying-chao, WANG Ting*, MAO Hong-jun*

(Urban Transport Emission Control Research Centre, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The pollution characteristics and emission factors (EFs) of the volatile organic compounds (VOCs) of vehicles were investigated using the tunnel test method on weekdays and weekends in the Wujinglu Tunnel in Tianjin, China. Gas samples in the tunnel were collected with 3.2 L stainless steel canisters and 99 VOCs species were analyzed by gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The concentration levels, variation characteristics, and EFs of the VOCs were analyzed. The ozone formation potentials (OFPs) and secondary organic aerosol formation potentials (SOAFPs) of the VOCs in the tunnel were calculated. Moreover, a comparison of the study results with current literature was conducted. The total concentrations of VOCs at the inlet and midpoint are $(190.85 \pm 51.15) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and $(257.44 \pm 62.02) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, respectively. The total EFs are $(45.12 \pm 10.97) \text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{veh})^{-1}$ and the EFs for alkanes, alkenes, alkynes, aromatics, halocarbons, and oxygenated volatile organic compounds (OVOCs) are (22.79 ± 7.15) , (5.04 ± 1.20) , (0.78 ± 0.34) , (9.86 ± 2.81) , (0.26 ± 0.17) , and $(6.25 \pm 2.27) \text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{veh})^{-1}$, respectively. They are notably smaller than the values obtained in a previous test in 2009. Isopentane, toluene, ethylene, methyl tert-butyl ether (MTBE), and ethane were the top five species among the VOC EFs. The ratios of methyl tert-butyl ether/benzene (MTBE/B) and methyl tert-butyl ether/toluene (MTBE/T) are 1.07 and 0.77, respectively. This implies that the contribution of evaporative emissions from vehicles to VOCs emissions cannot be ignored. The OFPs and SOAFPs in the tunnel are (145.50 ± 37.85) and $(43.87 \pm 12.75) \text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{veh})^{-1}$, respectively. Compared with the test in 2009, the OFPs and SOAFPs are 94.23% and 90.88% smaller, respectively. The sharp decrease of the OFPs and SOAFPs is closely related to stricter emission standards and the upgrade of oil products.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); tunnel test; secondary organic aerosol (SOA); emission factors (EFs); ozone formation potentials (OFPs)

挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)是二次有机气溶胶(secondary organic aerosol, SOA)和臭氧(O_3)的重要前体物, 具有“三致效应”, VOCs污染控制迫在眉睫^[1~3]. VOCs来源分为自然源和人为源, 在全球范围内自然源的VOCs贡献率为人为源的10倍^[4], 但是在人口或工业密

收稿日期: 2018-04-23; 修订日期: 2018-07-11

基金项目: 天津市科技支撑重点项目(16YFZCSF00410); 中央高校基本科研业务费专项

作者简介: 孙露娜(1992~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为城市机动车VOCs污染与防治, E-mail: sln@mail.nankai.edu.cn

* 通信作者, E-mail: wangting@nankai.edu.cn; hongjun_mao@hotmail.com

集区域, 人为源 VOCs 的贡献占主导地位^[5,6]. 其中, 机动车是 VOCs 人为源的重要组成部分, Brown 等^[7]的研究表明机动车排放的 VOCs 可占人为源的 35%, Zhao 等^[8]利用排放清单对京津冀地区机动车 VOCs 排放量进行估算, 发现机动车排放占人为源排放总量的 55%. Han 等^[6]的研究发现天津市机动车排放对城区和郊区的人为源 VOCs 贡献分别为 60% 和 42%. 因此, 有必要对城市环境中机动车排放 VOCs 的污染水平进行评估, 并计算其臭氧生成潜势 (ozone formation potentials, OFPs) 和二次有机气溶胶生成潜势 (secondary organic aerosol formation potentials, SOAFPs).

我国机动车保有量已从 1980 年的 180 万辆上升至 2016 年的 2.95 亿辆^[9], 平均年增长率超过 15%. 天津市 2016 年机动车保有量为 272.53 万辆, 居全国城市机动车保有量第 7 位^[10]. Zhao 等^[8]估算了 2003 年天津市人为源 VOCs 总排放量为 22.4 万 t, 其中机动车对 VOCs 的贡献超过 50%, 约为 12.32 万 t. 为控制机动车污染对大气环境造成的影响, 我国近年来采取了众多措施: 如控制机动车保有量、提高机动车排放标准等. 自 2001 年施行的国 I 标准到 2014 年的国 IV 标准, 再到 2017 全面推行国 V 标准, 机动车的车队构成和排放特征不断变化. 因此, 及时更新本地机动车排放因子 (emission factors, EFs) 有助于正确评估机动车的 VOCs 排放量, 可为国家政策的制定提供建议和理论依据.

机动车排放因子测试方法主要包括底盘测功机法、实际道路测试法、遥感测试法和隧道测试法等, 隧道测试法将相对密闭的隧道环境看作机动车污染物扩散的容器, 因其在实际道路展开测试、测试对象为机动车车队, 且具有车速、车流稳定等优点, 能反映机动车实际道路行驶下的污染排放情况, 因此成为研究机动车排放因子的常用手段之一^[11~20]. 王玮等^[19]测得北京谭裕沟隧道 3 个时间段的 62 种 VOCs 的排放因子, 排放因子范围为 $4.77 \sim 8.96 \text{ g} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$; Cui 等^[18]对比香港隧道 2003 年和 2015 年的测试研究, 并评估减排政策对 VOCs 排放因子和 OFPs 的影响; Zhang 等^[16]对广州珠江隧道 2004 年和 2014 年 VOCs 的排放因子进行了对比, 并研究了排放政策对 OFPs 和 SOAFPs 削减的影响; 于艳等^[20]测得 2009 年天津海河隧道具有 SOAFPs 的 22 种 VOCs 组分的排放因子, 并估算了机动车排放对天津市 SOAFPs 的贡献. 但是, 自国 V 排放标准实施以来, 尚未有关于天津市机动车 VOCs 排放因子的相关报道.

因此, 本研究于 2017 年 8 月对天津市五经路隧道进行为期 4 d 的监测, 分析隧道内 VOCs 污染状况, 利用车流量信息对 VOCs 的排放因子进行计算, 估算 VOCs 的 OFPs 和 SOAFPs, 并与已有研究进行对比, 旨在了解我国全面实施国 V 新标准以来, 天津市机动车 VOCs 污染特征, 评估机动车排放政策对 VOCs 排放的影响.

1 材料与方法

1.1 采样地点与时间

天津市五经路隧道位于天津市中心城区, 连接南北道路主干道, 隧道分为由南向北和由北向南两个行驶方向. 本研究选择由南向北行驶方向进行监测, 全长约 1 200 m, 单向 3 车道通行, 限速 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 车流平稳, 测试期间平均车速为 $(35.16 \pm 1.28) \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 车流量 $(14\,866 \pm 900) \text{ 辆} \cdot \text{d}^{-1}$, 测试期间隧道内人工通风设施一直处于关闭状态. 隧道净高约 4.5 m, 宽 12 m, 路侧隔离带宽 0.8 m, 高 0.5 m. 因隧道出口受上坡坡度和内灌风影响较大, 采样点设在距隧道入口 30 m 处和距出口 550 m 的中点处, 仪器放置于同侧路边, 采样高度为人体呼吸带, 距离地面约 1.5 m, 如图 1 所示. 采样时间为 2017 年的 8 月 10~11 日、8 月 19~20 日, 共 4 d, 包括了工作日和非工作日. 采样周期为 24 h, 涵盖了交通高峰期和非高峰期, 可以较完整地反映五经路隧道各交通状况下 VOCs 的排放情况.

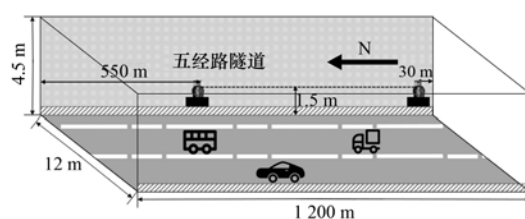


图 1 隧道采样点位示意

Fig. 1 Sampling site in the tunnel

1.2 样品采集与分析

利用时间分辨率为 1 min 的 Vaisala WXT520 气象变送器 (Helsinki, 芬兰) 监测隧道内的实时气象数据, 具体包括温度、相对湿度、风速、风向和大气压; 利用超声波气体流量计 (Flowsic-200 MAIHAK, 德国) 连续监测由车队和主风引起的隧道实际体积流量, 时间分辨率为 1 min; 隧道内车流量和车速数据由路测激光分型交通调查仪 (AxleLight RLU11, 中国) 获取; 隧道内通行车辆的排放标准、车型等数据由车牌识别系统取得. 测试期间隧道入口、中点及周边环境的气象参数如表 1 所示.

VOCs 样品使用不锈钢真空采样罐 (Entech, 美国) 采集. 采样罐体积为 3.2 L, 预先抽成真空, 每天分 7 个时段 (00:00 ~ 03:00、06:00 ~ 09:00、09:00 ~ 12:00、12:00 ~ 15:00、15:00 ~ 18:00、18:00 ~ 21:00、21:00 ~ 24:00) 进行, 采样时间为 180 min, 隧道入口和中点共采集 28 组、合计 56 个

样品. 以 EPA TO-15 和 PAMS 作为标气, 采集样品通过冷阱浓缩预处理后分两通道进入 GC-FID (Gas Chromatography-Flame Ionization Detector) 和 GC-MS (Gas Chromatography-Mass Selective detector) 进行分析, 共检测 99 种目标组分, 详细测试分析方法参见文献[21].

表 1 测试期间隧道入口、中点及周边环境的气象参数

Table 1 Meteorological factors in the inlet, midpoint, and ambient air of the tunnel during the test

地点	温度/°C	相对湿度/%	气压/kPa	风速/m·s ⁻¹
入口	29.10 ± 2.18	67.18 ± 9.18	100.19 ± 0.92	1.48 ± 0.43
中点	29.97 ± 0.99	65.57 ± 6.93	100.56 ± 0.34	0.83 ± 0.23
环境	27.51 ± 2.71	71.60 ± 9.62	100.25 ± 0.38	1.49 ± 0.55

1.3 机动车 VOCs 排放因子计算

将隧道看作一个理想的圆柱状活塞, 一段时间内隧道进出口污染物浓度差与通风量的乘积等于该段时间隧道内机动车污染物排放总量. 基于以上原理, 利用式(1)计算隧道内 VOCs 的平均排放因子:

$$EF_s = \frac{(c_{mid} - c_{in}) \times A \times v \times t}{N \times L} \quad (1)$$

式中, EF_s 为平均排放因子, $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$; c_{mid} 和 c_{in} 分别代表隧道中点和入口的 VOCs 浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; A 为隧道截面积, m^2 ; v 为平行于隧道的风速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为采样时间, s ; N 为采样时间内通过隧道的机动车总数, 辆; L 为隧道入口采样点到中点采样点的距离, km .

1.4 O_3 和 SOA 生成潜势计算

为评价 VOCs 的排放因子变化对二次污染物如 O_3 和 SOA 的影响, 利用最大增量反应活性系数 (Maximum Incremental Reactivity coefficient, MIR) 和 SOA 产率法^[22] 分析 OFPs 和 SOAFPs^[15], 计算公式如式(2)、(3)所示:

$$\text{OFPs} = \sum_i EF_i \times \text{MIR}_i \quad (2)$$

式中, OFPs 为所有 VOCs 组分的总臭氧生成潜势, $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$; MIR_i 为 VOCs 组分 i 的最大增量反应活性系数.

$$\text{SOAFPs} = \sum_i EF_i \times Y_i \quad (3)$$

式中, SOAFPs 为所有 VOCs 组分的总二次有机气溶胶生成潜势, $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$; Y_i 为 VOCs 组分 i 的 SOA 产率系数.

1.5 质量控制与统计分析

不锈钢真空采样罐内壁经抛光和硅烷化处理, 采样前利用 Entech 3100 自动清罐仪清洗 3 个循环, 抽真空 ($<300 \text{ Pa}$) 备用. 采集隧道空气样品后的不锈钢罐需避光保存并在 36 h 内完成测试. 样品分析采用内标法和外标法定量, 利用混合标准样品建立

5 个浓度梯度的标准曲线, 并将中间一个浓度与标准样品理论浓度值对比, 各样品标准曲线的相关度 (R^2) 有 85 种组分在 0.999 ~ 1.000 之间, 7 种组分在 0.990 ~ 0.999 之间, 各目标样品的相对标准偏差均小于 15%. 为保证测试结果的准确性和精密度, 对每批样品设置实验室空白和采样空白, 同时定期对仪器进行单点校准和峰窗漂移校准.

2 结果与讨论

2.1 隧道内 VOCs 污染浓度特征分析

五经路隧道入口和中点空气样品中均检测 99 种组分, 其中包含 29 种烷烃、11 种烯烃、1 种炔烃、16 种芳香烃、28 种卤代烃和 14 种含氧 VOCs (oxygenated volatile organic compounds, OVOCs). 隧道入口和中点总 VOCs 浓度分别为 $(190.85 \pm 51.15) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $(257.44 \pm 62.02) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 隧道中点处 VOCs 浓度明显高于隧道入口 VOCs 浓度, 这主要是隧道内通风不良、污染物积聚造成的. 张启钧等^[23] 总结了近年来关于国内隧道进出口的 VOCs 浓度的相关报道, 如表 2 所示, 北京、台湾和广州隧道浓度远高于本测试结果; 五经路隧道进口、中点浓度均高于南京隧道, 这可能与隧道内部本底浓度值较高有关. 隧道入口 VOCs 浓度较高的 5 种组分依次为: 异戊烷 $[(15.39 \pm 8.32) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、丙烷 $[(11.69 \pm 5.21) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、乙烷 $[(10.52 \pm 2.94) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、正丁烷 $[(10.13 \pm 4.86) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和苯 $[(7.52 \pm 2.31) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$; 中点浓度较高的组分为异戊烷 $[(24.26 \pm 8.23) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、甲苯 $[(13.07 \pm 3.20) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、乙烷 $[(12.60 \pm 2.98) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 、正丁烷 $[(11.02 \pm 5.48) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$ 和苯 $[(10.86 \pm 4.32) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}]$, 5 种较高组分总和分别占总浓度的 28.95% 和 27.89%. 可以看出甲苯和异戊烷中点处排放显著增高, 结合机动车污染排放特征, 即小型客车异戊

烷、乙烷和甲苯等排放较高^[16]，而根据车牌识别系统数据，测试期间五经路隧道通行车辆中小型客车占比达 95.96%，因此以上几种物质成为隧道内 VOCs 的优势组分。

图 2 为工作日分类 VOCs 净浓度(中点浓度-入口浓度)与车速、车流量随时间的变化状况。测试期间，由于隧道限速的原因，隧道内车速分布在 33.60~37.53 m·s⁻¹，车速相对平稳，不同时段内变化不大。隧道中车流量呈“M”型分布，且晚高峰(15:00~18:00)车流量大于早高峰(06:00~

09:00)。VOCs 浓度最高点出现在 09:00~12:00，该时段隧道内车流量相对较高。凌晨 00:00~03:00 车流量虽然很少，但 VOCs 相对浓度较高，与其他时段相比，该时段内 OVOCs 占比明显增大。受天津限行政策影响，夜间重型货车车流量增多，而其他测试时段，隧道内几乎无重型货车通过，根据 Dong 等^[24]的研究，重型货车的 OVOCs 排放量显著高于轻型车，这些原因共同导致了 OVOCs 占比的升高。非工作日总车流量较工作日降低 7.30%~14.09%，但变化特征与工作日类似，故不再赘述。

表 2 不同隧道研究的 VOCs 浓度对比/μg·m⁻³

Table 2 Comparison of the concentrations of VOCs with that of other studies/μg·m ⁻³				
位置	北京隧道 ^[19] (2000 年)	台湾隧道 ^[13] (2005 年)	广州隧道 ^[14] (2005 年)	南京隧道 ^[23] (2015 年)
入口	992	263	955.2	87.28
出口	6171	574	2216.2	225.63

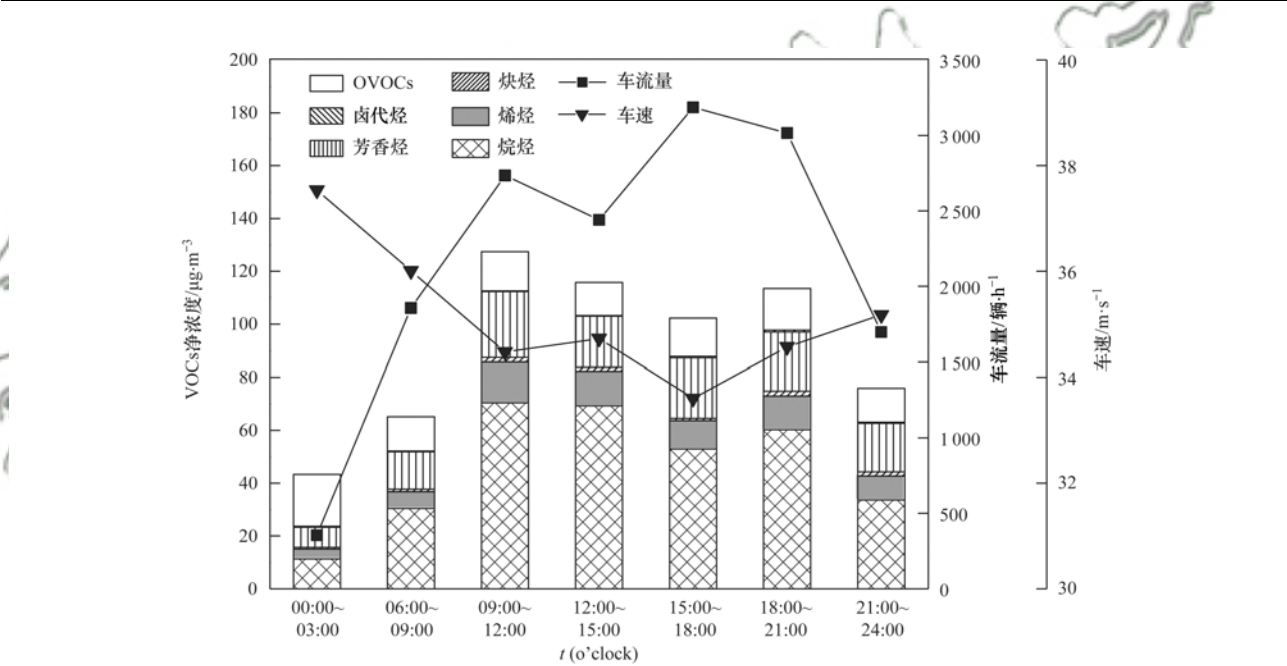


图 2 工作日不同时段分类 VOCs 净浓度与车速、车流量变化

Fig. 2 Net concentration of sorted VOCs, speed, and traffic flow at different time intervals on weekdays

2.2 隧道 VOCs 排放因子计算

近年来国内 VOCs 的平均排放因子汇总如表 3 所示。本测试共测得 77 种 VOCs 组分的排放因子(扣除排放因子小于等于 0 的物质)，总排放因子为 (45.12 ± 10.97) mg·(km·辆)⁻¹。与 2009 年天津^[19][146.36 mg·(km·辆)⁻¹]的 22 种物质的测试结果相比，2017 年此 22 种组分的总排放因子为 11.35 mg·(km·辆)⁻¹，排放因子大幅降低，降幅达到 92.24%，这主要是由于机动车排放标准提高和油品升级造成的^[25]。

对比已有研究^[12,14,16~18,20]中相对应 VOCs 组分的排放因子，本研究得到的排放因子同样处于较低水平。将隧道中 VOCs 的排放因子进行分类，则烷

烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和 OVOCs 的排放因子分别为(22.79 ± 7.15)、(5.04 ± 1.20)、(0.78 ± 0.34)、(9.86 ± 2.81)、(0.26 ± 0.17)和(6.25 ± 2.27) mg·(km·辆)⁻¹，占比分别为 (50.50 ± 15.85)%、(11.18 ± 2.67)%、(1.73 ± 0.74)%、(21.86 ± 6.23)%、(0.57 ± 0.38)% 和 (13.85 ± 5.02)%。图 3 对比了已有研究中分类 VOCs 的组分构成，总体而言，除 2000 年台湾^[13]的研究中芳香烃占比(40.00%)超过烷烃(33.65%)之外，其他研究中烷烃均为隧道中含量最丰富的组分，占比达 44.01%~76.30%；除 2004 年广州^[14]测试结果烯烃比例略高于芳香烃外，芳香烃占比仅次于烷烃；烯烃与炔烃占比分别在 9.48%~27.81% 和

表 3 不同隧道测试的 VOCs 排放因子汇总/ $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ Table 3 EFs for individual VOCs from different tunnel studies/ $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{veh})^{-1}$

项目	台湾 ^[13] (2000 年)	广州 ^[14] (2004 年)	天津 ^[20] (2009 年)	广州 ^[16] (2014 年)	南京 ^[17] (2015 年)	香港 ^[18] (2015 年)	天津 (2017 年)
乙烷	4.27 ± 0.96	4.90 ± 0.80	—	9.00 ± 0.51	52.47 ± 6.72	1.00 ± 0.80	2.14 ± 0.99
丙烷	2.40 ± 0.77	15.20 ± 16.90	—	184.00 ± 10.71	11.8 ± 3.48	4.80 ± 2.40	0.37 ± 0.22
异丁烷	4.57 ± 0.94	5.10 ± 2.40	—	31.00 ± 1.53	4.09 ± 1.64	7.30 ± 4.50	0.70 ± 0.48
正丁烷	6.56 ± 1.96	10.30 ± 5.10	—	53.00 ± 3.06	4.34 ± 0.13	10.20 ± 5.90	1.96 ± 1.01
异戊烷	12.5 ± 4.09	41.50 ± 7.00	—	17.00 ± 1.53	17.82 ± 11.97	2.50 ± 1.70	6.80 ± 2.36
正戊烷	9.52 ± 3.05	14.10 ± 2.30	—	7.00 ± 0.51	4.89 ± 3.59	1.30 ± 1.80	2.33 ± 0.92
2,2-二甲基丁烷	1.32 ± 0.25	1.10 ± 0.20	—	0.80 ± 0.05	0.36 ± 0.23	0.10 ± 0.10	0.19 ± 0.07
2,3-二甲基丁烷	1.33 ± 0.69	4.00 ± 0.70	—	1.50 ± 0.10	5.63 ± 2.71	0.30 ± 0.50	0.41 ± 0.16
烷烃 2-甲基戊烷	5.27 ± 1.72	20.50 ± 3.40	—	5.70 ± 0.41	4.60 ± 2.69	0.60 ± 0.40	1.66 ± 0.62
环戊烷	0.89 ± 0.21	4.20 ± 1.40	—	0.80 ± 0.05	0.33 ± 0.14	0.20 ± 0.90	0.26 ± 0.11
3-甲基戊烷	6.39 ± 1.53	13.20 ± 2.20	—	3.60 ± 0.26	2.03 ± 1.10	0.30 ± 0.20	1.44 ± 0.56
正己烷	4.18 ± 1.56	8.10 ± 1.50	—	2.30 ± 0.26	1.70 ± 1.35	1.20 ± 1.50	0.92 ± 0.30
2,4-二甲基戊烷	0.44 ± 0.07	1.40 ± 0.20	—	3.00 ± 0.15	0.23 ± 0.10	0.10 ± 0.10	0.15 ± 0.04
甲基环戊烷	2.64 ± 0.93	—	—	0.60 ± 0.05	1.18 ± 0.60	0.20 ± 0.20	0.61 ± 0.19
2-甲基己烷	—	7.30 ± 1.20	—	0.60 ± 0.05	1.20 ± 0.56	0.20 ± 0.10	0.39 ± 0.14
环己烷	0.98 ± 0.13	1.10 ± 0.20	—	2.40 ± 0.15	0.07 ± 0.05	0.20 ± 0.20	0.29 ± 0.18
2,3-二甲基己烷	1.33 ± 0.69	1.90 ± 0.40	—	0.90 ± 0.05	0.86 ± 0.55	0.10 ± 0.10	0.21 ± 0.06
3-甲基己烷	2.94 ± 0.43	7.40 ± 1.10	—	2.50 ± 0.15	0.33 ± 0.17	0.30 ± 0.20	0.57 ± 0.16
2,2,4-三甲基戊烷	0.29 ± 0.18	—	—	1.60 ± 0.10	0.33 ± 0.17	0.60 ± 0.40	0.68 ± 0.12
正庚烷	1.46 ± 0.24	4.70 ± 0.70	3.84	1.90 ± 0.10	0.85 ± 0.42	0.20 ± 0.20	0.42 ± 0.13
甲基环己烷	0.94 ± 0.18	3.40 ± 0.50	2.81	1.10 ± 0.05	0.45 ± 0.25	0.20 ± 0.20	0.29 ± 0.09
2,3,4-三甲基戊烷	—	0.00 ± 0.00	—	0.60 ± 0.05	0.16 ± 0.08	0.20 ± 0.20	0.39 ± 0.11
2-甲基庚烷	1.05 ± 0.29	3.50 ± 0.60	2.88	0.90 ± 0.05	0.79 ± 0.32	0.10 ± 0.10	0.21 ± 0.06
3-甲基庚烷	1.02 ± 0.33	4.30 ± 0.80	2.65	0.90 ± 0.05	0.38 ± 0.18	0.10 ± 0.10	0.18 ± 0.05
辛烷	1.31 ± 0.29	3.20 ± 0.80	2.15	0.80 ± 0.05	0.59 ± 0.29	0.10 ± 0.20	0.19 ± 0.06
正壬烷	0.54 ± 0.13	2.70 ± 0.30	14.79	0.60 ± 0.05	0.10 ± 0.07	0.60 ± 0.70	0.07 ± 0.02
正癸烷	—	2.10 ± 0.60	1.69	0.80 ± 0.05	0.05 ± 0.04	1.00 ± 1.40	0.08 ± 0.04
正十一烷	—	2.20 ± 0.50	0.89	1.80 ± 0.15	—	—	0.05 ± 0.03
正十二烷	—	3.10 ± 0.90	—	1.90 ± 0.20	—	—	0.15 ± 0.08
烯烃 乙烯	26.23 ± 4.89	52.90 ± 7.40	—	16.00 ± 0.51	10.17 ± 1.05	4.20 ± 2.00	2.66 ± 0.55
丙烯	—	22.60 ± 3.40	—	9.70 ± 0.46	6.79 ± 1.55	1.90 ± 0.90	1.07 ± 0.26
1-丁烯	8.27 ± 1.55	17.70 ± 6.30	—	2.80 ± 0.15	0.79 ± 0.13	1.20 ± 1.10	0.21 ± 0.07
1,3-丁二烯	2.56 ± 0.38	7.80 ± 1.70	—	0.70 ± 0.20	0.11 ± 0.08	0.20 ± 0.30	0.18 ± 0.07
反-2-丁烯	1.61 ± 0.38	8.50 ± 1.90	—	1.90 ± 0.15	0.90 ± 0.36	0.20 ± 0.10	0.24 ± 0.11
烯烃 顺-2-丁烯	1.84 ± 0.46	4.80 ± 1.00	—	1.30 ± 0.10	0.49 ± 0.14	0.10 ± 0.10	0.19 ± 0.07
1-戊烯	1.61 ± 0.38	4.60 ± 0.70	—	0.80 ± 0.05	0.23 ± 0.01	0.20 ± 0.10	0.10 ± 0.04
反-2-戊烯	2.76 ± 0.77	8.50 ± 1.90	—	1.50 ± 0.15	0.90 ± 0.36	0.20 ± 0.10	0.26 ± 0.10
异戊二烯	—	—	—	—	—	0.20 ± 0.20	0.08 ± 0.04
顺-2-戊烯	1.59 ± 0.43	4.80 ± 1.00	—	0.80 ± 0.05	0.39 ± 0.20	0.10 ± 0.10	0.10 ± 0.04
1-己烯	—	4.50 ± 1.00	—	0.50 ± 0.05	0.30 ± 0.14	0.10 ± 0.10	0.08 ± 0.03
炔烃 乙炔	11.56 ± 3.02	10.00 ± 6.20	—	7.00 ± 0.51	5.06 ± 1.51	1.50 ± 1.00	0.78 ± 0.34
苯	12.21 ± 3.26	18.70 ± 2.60	15.55	4.60 ± 0.26	3.68 ± 1.40	1.40 ± 0.90	2.13 ± 0.53
甲苯	29.02 ± 16.02	31.70 ± 5.50	21.75	11.00 ± 1.02	9.36 ± 5.27	5.80 ± 5.20	3.50 ± 1.07
乙苯	5.88 ± 1.55	8.60 ± 3.00	5.97	2.90 ± 0.20	1.32 ± 0.83	1.10 ± 1.90	0.70 ± 0.25
间/对-二甲苯	8.95 ± 2.38	25.30 ± 5.40	21.06	9.00 ± 0.51	4.47 ± 1.66	1.70 ± 4.20	1.49 ± 0.49
邻-二甲苯	7.88 ± 2.14	8.90 ± 1.40	7.00	3.80 ± 0.26	1.69 ± 0.80	0.30 ± 0.50	0.50 ± 0.22
苯乙烯	4.81 ± 1.33	1.80 ± 0.50	—	1.10 ± 0.20	0.44 ± 0.19	1.00 ± 2.30	0.09 ± 0.04
异丙苯	—	0.50 ± 0.10	0.43	0.40 ± 0.05	0.12 ± 0.07	0.20 ± 0.40	0.05 ± 0.02
芳香烃 正丙苯	1.68 ± 0.6	1.80 ± 0.30	1.43	1.60 ± 0.10	0.33 ± 0.11	0.20 ± 0.20	0.11 ± 0.04
3-乙基甲苯	—	7.00 ± 1.40	8.25	3.90 ± 0.46	1.41 ± 0.55	0.50 ± 0.70	0.32 ± 0.12
4-乙基甲苯	—	3.10 ± 0.70	8.56	3.10 ± 0.20	0.56 ± 0.20	0.30 ± 0.50	0.16 ± 0.06
1,3,5-三甲苯	2.31 ± 0.38	3.10 ± 0.80	—	3.60 ± 0.20	0.35 ± 0.10	0.20 ± 0.20	0.14 ± 0.05
2-乙基甲苯	1.09 ± 0.44	—	2.48	2.50 ± 0.15	0.54 ± 0.19	0.20 ± 0.20	0.13 ± 0.05
1,2,4-三甲苯	14.28 ± 2.94	11.20 ± 3.90	12.15	7.70 ± 0.46	2.42 ± 0.93	0.90 ± 1.00	0.51 ± 0.20
1,2,3-三甲苯	—	2.70 ± 0.80	3.41	4.30 ± 0.26	0.55 ± 0.18	0.20 ± 0.20	0.13 ± 0.04
1,3-二乙苯	—	4.90 ± 0.80	2.75	0.90 ± 0.05	0.05 ± 0.01	0.00 ± 0.10	0.03 ± 0.02
1,4-二乙苯	—	15.20 ± 16.90	3.87	2.60 ± 0.15	0.33 ± 0.01	0.10 ± 0.10	0.09 ± 0.05

续表 1

项目	台湾 ^[13] (2000 年)	广州 ^[14] (2004 年)	天津 ^[20] (2009 年)	广州 ^[16] (2014 年)	南京 ^[17] (2015 年)	香港 ^[18] (2015 年)	天津 (2017 年)
卤代烃	氟里龙 11	—	—	—	1.22 ±0.90	—	0.00 ±0.00
	氯甲烷	—	—	—	0.39 ±0.29	—	0.03 ±0.03
	二氯甲烷	—	—	—	3.76 ±2.96	—	0.12 ±0.07
	氯仿	—	—	—	0.39 ±0.29	—	0.02 ±0.01
	1,2-二氯丙烷	—	—	—	—	—	0.13 ±0.11
	1,1,2-三氯乙烷	—	—	—	0.19 ±0.11	—	0.00 ±0.00
	1,4-二氯苯	—	—	—	—	—	0.01 ±0.00
	溴甲烷	—	—	—	—	—	0.00 ±0.00
OVOCs	乙醛	—	—	—	—	—	0.81 ±0.60
	丙烯醛	—	—	—	—	—	0.11 ±0.04
	丙醛	—	—	—	—	—	0.73 ±0.32
	2-甲基丙烯醛	—	—	—	—	—	0.09 ±0.15
	正丁醛	—	—	—	0.05 ±0.04	—	0.30 ±0.27
	正己醛	—	—	—	—	—	0.43 ±0.36
	丙酮	—	—	—	—	—	1.83 ±2.06
	甲基乙烯基酮	—	—	—	0.14 ±0.14	—	0.16 ±0.09
	甲基乙基酮	—	—	—	—	—	0.32 ±0.24
	2-戊酮	—	—	—	—	—	0.02 ±0.02
	3-戊酮	—	—	—	—	—	0.02 ±0.01
	甲基叔丁基醚	—	—	—	1.58 ±0.28	—	2.58 ±1.20
乙腈	—	—	—	0.11 ±0.11	—	0.05 ±0.03	
烷烃	74.14	190.50	31.70	338.60 ±16.84	117.63	34.00	22.79 ±7.15
烯烃	46.47	136.70	—	36.00 ±1.53	21.07	8.60	5.04 ±1.20
炔烃	11.56	10.00	—	7.00 ±0.51	5.06	1.50	0.78 ±0.34
芳香烃	88.11	124.40	114.66	63.00 ±3.57	27.62	14.10	9.81 ±2.81
氯代烃	—	—	—	—	6.19	—	0.26 ±0.17
OVOCs	—	—	—	—	1.88	—	6.25 ±2.27
总 VOCs	240.28	491.60 ±120.00	146.36	449.00 ±20.00	160.79 ±65.94	58.80 ±50.70	45.12 ±10.97

1) “—”代表文献未报道组分

0 ~ 5.25% 左右。从相关研究的时间顺序来看，台湾^[13]的隧道测试开展于 2000 年，其他研究与其相比，对 OFPs 和 SOAFPs 贡献较大的烯烃和芳香烃占比呈下降趋势，这表明，逐年加严的排放标准对机动车排放的 VOCs 控制效果显著。2004 年广州^[14]的隧道测试中，与其他隧道测试结果相比，烯烃占比最高，达 27.81%。近 5 年开展的隧道测试中，烷烃占比显著升高。广州 2014 年^[16]的研究中，烷烃占比最高，占总排放因子的 76.30%，与广州液化石油气(liquefied petroleum gas, LPG)汽车普遍应用的情况相一致。2015 年南京^[17]的测试中，烷烃占比略低于广州。2015 年香港^[18]的各组分占比与本研究基本一致，烷烃和烯烃占总排放因子的 70% 以上，这可能与当时香港实行欧 V 标准与天津市现阶段情况类似有关。

表 4 为近 5 年来不同隧道测试的排放因子优势组分汇总，2015 年香港^[18]排放因子前 5 位分别为乙烯、甲苯、正丁烷、丙烷和异戊烷，同年南京^[17]排放因子前 5 位为乙烷、异戊烷、丙烷、乙烯和甲苯，本研究中排放因子前 5 位分别为异戊烷、甲苯、

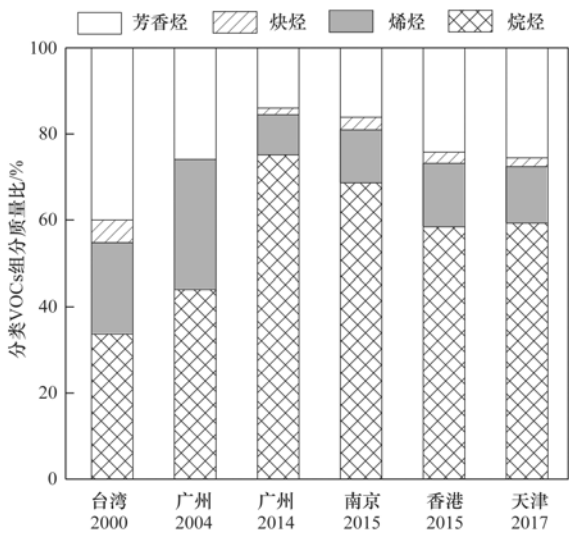


图 3 不同隧道测试的分类 VOCs 组分对比

Fig. 3 Compositions of sorted VOCs based on different tunnel tests

乙烯、甲基叔丁基醚 (methyl tert-butyl ether, MTBE) 和乙烷，5 种物质占总排放因子的 (39.12 ± 3.57) %，异戊烷、甲苯和乙烯均在前 5 位，与南京^[16]、香港^[17]的结论较为一致。葛卫华等^[26]的研究显示，小型客车中乙烷、异戊烷、乙烯、甲苯等

排放因子较高,这也与本研究的结果一致. 2014 年广州^[16]的优势组分主要为烷烃类,其中丙烷、正丁烷、异丁烷排放因子最高,分别为(184.00 ±

10.71)、(53.00 ± 3.06)和(31.00 ± 1.53) $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$,而这3种物质与LPG汽车排放紧密相关^[27],与广州LPG汽车普遍应用情况相符.

表4 不同隧道测试的VOCs前5位排放因子与百分比汇总/ $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$

Table 4 Top 5 EFs and percentages for individual VOCs from different tunnel studies/ $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{veh})^{-1}$

广州 ^[16] (2014 年)			南京 ^[17] (2015 年)			香港 ^[18] (2015 年)			天津(2017 年)		
名称	排放因子	百分比	名称	排放因子	百分比	名称	排放因子	百分比	名称	排放因子	百分比
丙烷	184.00 ± 10.71	40.98	乙烷	52.47 ± 6.72	32.63	乙烯	12.60 ± 4.30	21.43	异戊烷	6.80 ± 2.36	15.07
正丁烷	53.00 ± 3.06	11.80	异戊烷	17.82 ± 11.97	11.08	甲苯	12.10 ± 3.90	20.58	甲苯	3.49 ± 1.06	7.73
异丁烷	31.00 ± 1.53	6.90	丙烷	11.80 ± 3.48	7.34	正丁烷	8.70 ± 3.10	14.80	乙烯	2.66 ± 0.55	5.90
异戊烷	17.00 ± 1.53	3.79	乙烯	10.17 ± 1.05	6.33	丙烷	5.70 ± 2.50	9.69	MTBE	2.57 ± 1.20	5.70
乙烷	16.00 ± 1.51	3.56	甲苯	9.36 ± 5.27	5.82	异戊烷	5.60 ± 2.10	9.52	乙烷	2.13 ± 0.99	4.72
总计	301.00	67.04	总计	101.62	63.20	总计	44.70	76.02	总计	17.65	39.12

五经路隧道5种含量较高的物质都是汽油车排放的标志性组分^[18]. 异戊烷含量最高,而异戊烷是汽油车蒸发排放的代表组分^[28,29],这表明隧道内车队构成主要为汽油车,与车牌识别系统获得的数据(汽油车占比为93.67%)相一致. 值得一提的是,MTBE作为汽油的氧化添加剂用于提高辛烷值并减少车辆的CO排放,因其不完全燃烧可以存在于汽油蒸气和汽油车尾气中,可以作为汽油车排放的标记. 本研究中,MTBE的排放因子占总排放因子的(5.73 ± 1.53)%,远高于南京^[16]测试结果(0.98%). Zhang等^[30]测得汽油加油排放的甲基叔丁基醚/苯(MTBE/B)和甲基叔丁基醚/甲苯(MTBE/T)的比值分别为4.1~6.6和0.7~3.3,远高于Schauer等^[31]测得的机动车尾气比率的结果(分别为0.5和0.1),并得出MTBE/B、MTBE/T比值较高可能是区分汽油车蒸发排放和尾气排放的指标的结论. Yao等^[32]利用车载法测得北京2011~2013年汽车尾气MTBE/B、MTBE/T比值分别为0.41和0.21,南京2015年隧道测试获得的比值分别为0.38和0.17^[16],五经路隧道MTBE/B、MTBE/T的比值分别为1.07和0.77,MTBE/B、MTBE/T比值的增大,表明随着机动车排放标准的加严,蒸发排放对VOCs的贡献愈发不可忽视.

2.3 隧道内VOCs的臭氧生成潜势和二次有机气溶胶生成潜势

利用MIR系数法和SOA产率法分别计算OFPs和SOAFPs,结果如表5所示. MIR系数采用Carter^[33]的测试结果,本测试中OFPs共分析了74种组分,包含烷烃29种、烯烃11种、炔烃1种、芳香烃16种、卤代烃5种、OVOCs 12种;SOA产率系数大部分采用Grosjean等^[34,35]的测试结果,苯的产率系数采用吕子峰等^[36]的估算结果,本研究共计算了24种组分的SOAFPs,包含11种烷烃、13

种芳香烃. 五经路隧道内VOCs的OFPs和SOAFPs分别为(145.50 ± 37.85) $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ 和(43.87 ± 12.75) $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$.

由表4可以看出,与我国其他地区的研究相比,本研究OFPs分别低于台湾^[13]、2004年广州^[14]、2014年广州^[16]、南京^[17]、香港^[18]的85.42%、93.37%、85.5%、68.22%和22.38%,与2009年天津^[20]研究结果相比,降低了93.12%(只比较22种2009年测出的组分). 其中,烯烃和芳香烃对O₃生成贡献最大,这与已有研究结果^[14,16~20]一致. 图4列出了五经路隧道机动车排放VOCs前20的OFP和相关EF,乙烯、间/对-二甲苯、甲苯、丙烯和异戊烷对五经路隧道O₃生成贡献最大的组分,占总OFPs的70%以上,乙烯的OFP最大,占总OFPs的16.21%,其EF占总排放因子的5.89%.

五经路隧道SOAFPs与其他城市相比,分别低于台湾^[13]、2004年广州^[14]、2014年广州^[16]、南京^[17]、香港^[18]的87.23%、91.41%、82.77%、63.13%和29.73%,芳香烃对SOA生成贡献占总SOAFPs的95.42%,其中甲苯、间/对-二甲苯、苯对SOA生成贡献最大. 对比2009年天津^[20]的测试结果,SOAFPs从481.12 $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ 降至43.87 $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$,降幅达90.88%,尤其是芳香烃对SOA的贡献削减了90.31%,这与芳香烃尤其是甲苯、间/对-二甲苯、苯的大幅下降有关.

如前文所述,OFPs和SOAFPs骤减与VOCs的组分及浓度变化有关,尤其是烯烃和芳香烃的变化. 对于OFPs来说,烯烃MIR系数很高,有研究表明,将燃油中烯烃含量从20%降为5%,可以明显降低O₃生成能力^[37],国V标准的汽油中烯烃含量降低14%,尽管在本研究VOCs构成中下降不明显,但烯烃排放因子相较我国其他城市的报

道^[12, 14, 16~18, 20]降低 41.40% ~ 96.31%。芳香烃对 2009 年的 $114.66 \text{ mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ 降至 $(9.81 \pm 2.81) \text{ mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ 。OFPs 和 SOAFPs 均有较大影响，其排放因子自

表 5 不同隧道测试的臭氧生成潜势和二次有机气溶胶生成潜势汇总¹⁾/ $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$

Table 5 OFPs and SOAFPs for individual VOCs from different tunnel studies/ $\text{mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{veh})^{-1}$

项目	台湾 ^[13] (2000 年)	广州 ^[14] (2004 年)	天津 ^[20] (2009 年)	广州 ^[16] (2014 年)	南京 ^[17] (2015 年)	香港 ^[18] (2015 年)	天津 (2017 年)
OFPs	烷烃	90.95	230.18	27.11	258.33	86.35	27.25 ± 9.51
	烯烃	442.67	1 304.48	—	367.15	214.76	51.65 ± 12.52
	炔烃	10.98	9.50	—	6.65	4.81	0.74 ± 0.32
	芳香烃	453.34	651.87	663.57	404.05	148.99	47.71 ± 16.75
	卤代烃	—	—	—	0.18	—	0.05 ± 0.04
	OVOcs	—	—	—	2.74	—	18.10 ± 7.35
	总计	997.95	2 196.03	690.68	1 036.18	457.83	145.50 ± 37.85
SOAFPs	烷烃	5.16	46.51	38.50	17.24	2.35	2.01 ± 0.67
	芳香烃	338.40	464.42	442.62	237.36	116.64	41.86 ± 12.28
	总计	343.56	510.93	481.12	254.60	118.99	43.87 ± 12.75

1) “—”代表文献未报道组分，天津 2009 年 OFPs 仅为其报道的 22 种组分的计算结果

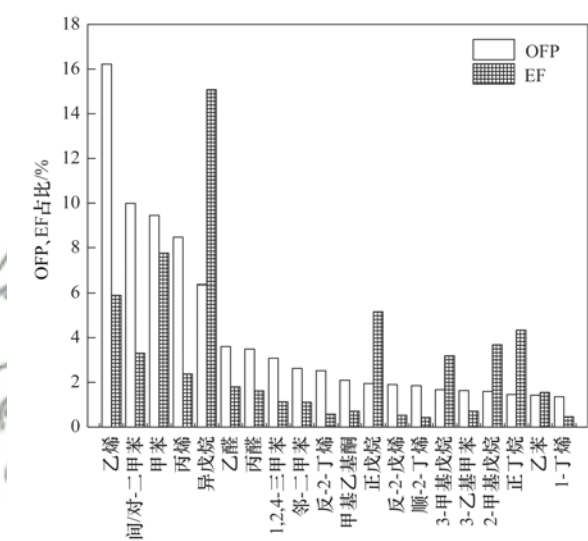


图 4 五经路隧道机动车排放 VOCs 前 20 组分的 OFP 和相关 EF

Fig. 4 OFP of the top 20 VOCs and its EF from vehicles emissions measured in the Wujinglu tunnel

3 结论

(1)测试期间，隧道入口 VOCs 浓度为 $(190.85 \pm 51.15) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，中点处的 VOCs 浓度为 $(257.44 \pm 62.02) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，浓度较高的组分为异戊烷、甲苯、乙烷、正丁烷和苯；比较不同时段内交通流与 VOCs 变化，交通流峰值发生在 15:00 ~ 18:00，VOCs 浓度峰值发生在 09:00 ~ 12:00。00:00 ~ 03:00时段 OVOcs 比例明显高于其他时段，这与天津市的限行政策下，该时段重型货车车流量增大有关。

(2)五经路隧道总排放因子为 $(45.12 \pm 10.97) \text{ mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ ，烷烃、烯烃、炔烃、芳香烃、卤代烃和 OVOcs 的排放因子分别为 (22.79 ± 7.15) 、 (5.04 ± 1.20) 、 (0.78 ± 0.34) 、 (9.86 ± 2.81) 、

(0.26 ± 0.17) 和 $(6.25 \pm 2.27) \text{ mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ ，排放因子较 2009 年下降明显。异戊烷、甲苯、乙烯、MTBE 和乙烷是机动车排放的 VOCs 中排放因子较高的组分，主要为小型客车的贡献。此外，MTBE/B、MTBE/T 比值分别为 1.07 和 0.77，说明蒸发排放对机动车排放 VOCs 的贡献不可忽视。

(3)五经路隧道的 OFPs 和 SOAFPs 分别为 $(145.50 \pm 37.85) \text{ mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ 和 $(43.87 \pm 12.75) \text{ mg} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$ ，烯烃和芳香烃对两者贡献最大，排放标准提高和油品升级降低了污染物排放量，排放因子降低，OFPs 和 SOAFPs 较 2009 年分别降低 94.23% 和 90.88%，削减效果显著。

参考文献：

[1] 王铁宇, 李奇峰, 吕永龙. 我国 VOCs 的排放特征及控制对策研究[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4756-4763.
Wang T Y, Li Q F, Lü Y L. Characteristics and countermeasures of volatile organic compounds (VOCs) emission in China[J]. Environmental science, 2013, 34(12): 4756-4763.
[2] 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.
[3] Wang H L, Jing S A, Lou S R, et al. Volatile organic compounds (VOCs) source profiles of on-road vehicle emissions in China[J]. Science of the Total Environment, 2017, 607-608: 253-261.
[4] Guenther A, Hewitt C N, Erickson D, et al. A global model of natural volatile organic compound emissions[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1995, 100(D5): 8873-8892.
[5] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds[J]. Chemical Reviews, 2003, 103(12): 4605-4638.
[6] Han M, Lu X Q, Zhao C S, et al. Characterization and source apportionment of volatile organic compounds in urban and suburban Tianjin, China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2015, 32(3): 439-444.

- [7] Brown S G, Frankel A, Hafner H R. Source apportionment of VOCs in the Los Angeles area using positive matrix factorization [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(2): 223-237.
- [8] Zhao B, Wang P, Ma J Z, *et al.* A high-resolution emission inventory of primary pollutants for the Huabei region, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(1): 481-501.
- [9] 中华人民共和国环境保护部. 中国机动车环境管理年报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017.
- [10] 公安部交通管理局. 2016 年全国机动车和驾驶人保持快速增长 新登记汽车 2752 万辆 新增驾驶人 3314 万人[DB/OL]. http://www.sohu.com/a/123961699_341502, 2017-01-10.
- [11] Franco V, Kousoulidou M, Muntean M, *et al.* Road vehicle emission factors development: a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **70**: 84-97.
- [12] Hwa M Y, Hsieh C C, Wu T C, *et al.* Real-world vehicle emissions and VOCs profile in the Taipei tunnel located at Taiwan Taipei area [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(12): 1993-2002.
- [13] Chiang H L, Hwu C S, Chen S Y, *et al.* Emission factors and characteristics of criteria pollutants and volatile organic compounds (VOCs) in a freeway tunnel study[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, **381**(1-3): 200-211.
- [14] 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.
- Fu L, Shao M, Liu Y, *et al.* Tunnel experimental study on the emission factors of volatile organic compounds (VOCs) from vehicles[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(7): 879-885.
- [15] 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.
- Wang B G, Zhang Y H, Zhu C J, *et al.* A study on city motor vehicle emission factors by tunnel test [J]. *Environmental Science*, 2001, **22**(2): 55-59.
- [16] Zhang Y L, Yang W Q, Simpson I, *et al.* Decadal changes in emissions of volatile organic compounds (VOCs) from on-road vehicles with intensified automobile pollution control: Case study in a busy urban tunnel in south China [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 806-819.
- [17] Zhang Q J, Wu L, Fang X Z, *et al.* Emission factors of volatile organic compounds (VOCs) based on the detailed vehicle classification in a tunnel study [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **624**: 878-886.
- [18] Cui L, Wang X L, Ho K F, *et al.* Decrease of VOC emissions from vehicular emissions in Hong Kong from 2003 to 2015: results from a tunnel study [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **177**: 64-74.
- [19] 王玮, 梁宝生, 曾凡刚, 等. 谭裕沟隧道 VOCs 污染特征和排放因子研究[J]. *环境科学研究*, 2001, **14**(4): 9-12.
- Wang W, Liang B S, Zeng F G, *et al.* Study on pollution characteristics and emission factors of volatile organic compounds (VOCs) in Tanyugou highway tunnel [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2001, **14**(4): 9-12.
- [20] 于艳, 王秀艳, 杨文. 天津市机动车二次有机气溶胶生成潜力的估算[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(2): 381-386.
- Yu Y, Wang X Y, Yang W. Estimate of vehicles generation of secondary organic aerosols of Tianjin[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 381-386.
- [21] 王伯光, 邵敏, 张远航, 等. 机动车排放中挥发性有机污染物的组成及其特征研究[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(6): 75-80.
- Wang B G, Shao M, Zhang Y H, *et al.* A study of volatile organic compounds and its emission factors from city vehicles [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, **19**(6): 75-80.
- [22] 林旭, 朱彬, 安俊琳, 等. 南京北郊 VOCs 对臭氧和二次有机气溶胶潜在贡献的研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 976-986.
- Lin X, Zhu B, An J L, *et al.* Potential contribution of secondary organic aerosols and ozone of VOCs in the Northern Suburb of Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 976-986.
- [23] 张启钧, 吴琳, 刘明月, 等. 南京市机动车排放 VOCs 的污染特征与健康风险评价[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(10): 3118-3125.
- Zhang Q J, Wu L, Liu M Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs from vehicle exhaust in Nanjing, China[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 3118-3125.
- [24] Dong D, Shao M, Li Y, *et al.* Carbonyl emissions from heavy-duty diesel vehicle exhaust in China and the contribution to ozone formation potential [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, **26**(1): 122-128.
- [25] 陈天增, 葛艳丽, 刘永春, 等. 我国机动车排放 VOCs 及其大气环境影响[J]. *环境科学*, 2018, **39**(2): 478-492.
- Chen T Z, Ge Y L, Liu Y C, *et al.* VOCs emission from motor vehicles in China and its impact on the atmospheric environment [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 478-492.
- [26] 葛卫华, 金陶胜. 香港小汽车和出租车非甲烷碳氢排放特性研究[J]. *资源节约与环保*, 2015, (1): 74-75.
- [27] Tang J H, Chan L Y, Chan C Y, *et al.* Implications of changing urban and rural emissions on non-methane hydrocarbons in the Pearl River Delta region of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(16): 3780-3794.
- [28] Liu H, Man H Y, Tschantz M, *et al.* VOC from vehicular evaporation emissions: status and control strategy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(24): 14424-14431.
- [29] Yue T T, Yue X, Chai F H, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) from the evaporative emissions of modern passenger cars [J]. *Atmospheric Environment*, 2017, **151**: 62-69.
- [30] Zhang Y L, Wang X M, Zhang Z, *et al.* Species profiles and normalized reactivity of volatile organic compounds from gasoline evaporation in China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **79**: 110-118.
- [31] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C₁-C₃₂ organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [32] Yao Z L, Shen X B, Ye Y, *et al.* On-road emission characteristics of VOCs from diesel trucks in Beijing, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **103**: 87-93.
- [33] Carter W P L. Updated maximum incremental reactivity scale and hydrocarbon bin reactivities for regulatory applications [R]. California: California Air Resources Board, 2009.
- [34] Grosjean D, Seinfeld J H. Parameterization of the formation potential of secondary organic aerosols [J]. *Atmospheric Environment*, 1989, **23**(8): 1733-1747.
- [35] Grosjean D. In situ organic aerosol formation during a smog

- episode; estimated production and chemical functionality [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1992, 26 (6): 953-963.
- [36] 吕子峰, 郝吉明, 段菁春, 等. 北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 969-975.
- Lü Z F, Hao J M, Duan J C, *et al.* Estimate of the formation potential of secondary organic aerosol in Beijing summertime[J]. Environmental Science, 2009, 30(4): 969-975.
- [37] 郭和军. 汽油品质对车辆尾气排放影响研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.

欢迎订阅 2019 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA):Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA):Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS):Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2019 年全年 12 期。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjlx@rcees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)