

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次(卷终)

京津冀区域 PM_{2.5} 污染相互输送特征 王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)

顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应 许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)

基于多源数据的 PM_{2.5} 浓度时空分布预测与制图 肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)

华东区域 PM_{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估 郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)

南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征 张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)

菏泽市 PM_{2.5} 碳组分季节变化特征 刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)

辽宁典型城市道路扬尘 PM₁₀ 中水溶性无机离子组分特征及来源解析 张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)

天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征 姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)

高原城市昆明公路隧道大气中 PM_{2.5} 理化特征分析 王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)

2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析 段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响 楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远 (4983)

ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响 董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)

我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量 程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)

新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征 杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)

三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价 卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)

三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征 程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)

太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程 李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)

典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例 连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征 马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)

基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法 熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)

北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险 陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)

深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征 凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)

供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析 刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)

低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化 李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)

臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨 刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)

碱化过一硫酸盐降解水中环丙沙星 葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)

MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯 王九妹, 关泽宇, 王金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)

常温下加装脱硫装置的 MCAnMBR 处理高硫酸盐有机废水试验 徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)

载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收 成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)

不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能 马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)

ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化 吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)

海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性 周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)

游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验 孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)

西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构 康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)

厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征 汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)

SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化 岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)

活性污泥中硝化螺菌 (*Nitrospira*) 的富集及其动力学参数 姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)

pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响 张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)

接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响 张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)

活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比 孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)

长期暴露下纳米 TiO₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响 李慧婷, 崔福义 (5229)

长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征 赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)

不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异 张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)

有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征 何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)

上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价 郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)

大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析 宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)

工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应 杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)

上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险 周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)

基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响 高子翔, 周航, 杨文毅, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)

水稻对气态单质汞的吸收与挥发 尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)

麦田 O₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算 赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)

缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果 侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)

生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N₂O 排放的影响 石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)

成都平原不同类型沟渠 CO₂、CH₄ 和 N₂O 排放通量特征及其影响因素 冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)

河流 CO₂ 与 CH₄ 排放研究进展 王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)

《环境科学》第 38 卷(2017 年)总目录 (5367)

《环境科学》征稿简则(4950) 《环境科学》征订启事(5031) 信息(4923, 5105, 5161)

不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响

楼狄明, 张子骏, 刘继跃, 谭丕强, 胡志远

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于重型底盘测功机, 利用质子转移反应质谱 (PTR-MS) 研究了柴油公交车在中国典型城市公交车循环 (CCBC) 下, 不同 CDPF 贵金属负载量对尾气中挥发性有机物 (VOCs) 组分排放特性的影响. 结果表明, 柴油公交车 VOCs 主要组分为含氧有机物 (OVOCs)、芳香烃和烯烃等, 且 OVOCs 占比达 50% 以上; 在贵金属成分、配比相同时, VOCs 减排率随 CDPF 贵金属负载量增加而增加; 贵金属负载量为 $15 \text{ g}\cdot\text{ft}^{-3}$ (A 型后处理装置)、 $25 \text{ g}\cdot\text{ft}^{-3}$ (B 型) 和 $35 \text{ g}\cdot\text{ft}^{-3}$ (C 型) 时, VOCs 总量的减排率依次为 36.2%、40.1% 和 41.4%. C 型后处理装置对烷烃全循环减排率高达 70.2%, 且对 OVOCs 的催化有微弱优势; 对于不饱和烃类, 3 种不同贵金属负载量的后处理装置均有一定催化效果, 但无明显差异; A 型对含氮有机物减排率可达 50.5%, 但减排率随贵金属负载量增加而降低. 采用 DOC + CDPF 后能较好地降低公交车 VOCs 排放量进而降低臭氧生成潜势 (OFP). 同时考虑不同方案减排效果与成本因素, 当加权系数分别为 0.8 和 0.2 时, B 型为最优方案.

关键词: 柴油机; VOCs; 氧化型催化器; 催化型颗粒捕集器; 贵金属负载量

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-4983-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201706059

Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus

LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, TAN Pi-qiang, HU Zhi-yuan

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on heavy chassis dynamometers, an experimental study was conducted in a diesel bus with proton transfer reaction mass spectrometry (PTR-MS). It investigated the effects of volatile organic compound (VOC) emission characteristics with three different diesel oxidation catalyst (DOC) + catalyzed diesel particulate filter (CDPF) after-treatments for a typical Chinese city bus driving cycle (CCBC). The results reveal that the major compounds from the diesel bus are OVOCs, aromatic hydrocarbons, alkenes, alkanes, nitrogenous organic compounds, and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH), and that the OVOCs account for more than 50% of the total VOCs. With the same precious metal composition and ratio of the proportion in the CDPF catalyst, the emissions of VOCs decrease with an increase in precious metal load. The emission reduction rates of the VOCs are 36.2%, 40.1%, and 41.4%, respectively, when the precious metal loads are $15 \text{ g}\cdot\text{ft}^{-3}$ (type A after-treatment device), $25 \text{ g}\cdot\text{ft}^{-3}$ (type B), and $35 \text{ g}\cdot\text{ft}^{-3}$ (type C). The average emission rates of alkanes for the three kinds of DOC + CDPF after-treatments are all over 59% for the entire CCBC cycle. The type C after-treatment device can reduce the alkane emissions by 70.2%, with a slight advantage for the OVOC reduction compared with type A and type B devices. For unsaturated hydrocarbons, including aromatic hydrocarbons, alkenes, and PAHs, the after-treatment devices have a catalytic effect, but there is no significant difference between them. The emissions of nitrogenous organic compounds are greatly decreased, by 50.5%, with the type A after-treatment, but the reduction rate decreases with an increase in precious metal load. In addition, OVOCs, aromatic hydrocarbons, and alkenes are the most important contributors to ozone formation. The adoption of DOC + CDPF reduces the emissions of VOCs and, therefore, the ozone formation potential. Taking into account the emission reduction rates and costs of the three different after-treatments and for weighting coefficients of 0.8 and 0.2, respectively, the type B after-treatment is the optimal solution.

Key words: diesel engine; VOCs; diesel oxidation catalyst (DOC); catalyzed diesel particulate filter (CDPF); precious metal loads

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是大气中形成光化学氧化剂的重要前体物, 在对流层臭氧和大气二次气溶胶生成中起着重要的作用, 且机动车排放的 VOCs 含有大量有毒有害物质, 对人体健康有严重危害^[1-4]. 机动车排放对城市环境空气 VOCs 的来源贡献率达到 35% ~ 60%^[5,6], 因此掌握机动车 VOCs 排放特征对复合型大气污染形成研究有重要意义. 国外在人为源对

区域 VOCs 贡献领域开展了大量的研究工作^[7-10]. 但国内关于机动车 VOCs 排放特征的研究相对较少^[1,11,12], 特别是针对机动车尾气 VOCs 在典型行驶工况下的成分谱测量则更少^[13], 在低速汽车

收稿日期: 2017-06-07; 修订日期: 2017-06-30

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目 (16DZ1206700)

作者简介: 楼狄明 (1963 ~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为发动机替代燃料与排放控制技术、柴油混合动力技术等, E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

VOCs 排放研究方面还处于空白^[14]。而公交车主要在市区低速运行,起停频繁,在机动车 VOCs 排放与控制研究中具有代表意义。为此,本文利用质子转移反应质谱(proton transfer reaction mass spectrometry, PTR-MS)在线 VOCs 分析仪,研究了在中国典型城市公交测试循环(china typical cities bus driving cycle, CCBC)下不同 DOC + CDPF 后处理装置对柴油公交车 VOCs 组分排放特性的影响。

1 材料与方 法

1.1 试验车辆及燃料

表 1 为柴油公交车的主要技术参数。试验燃料采用市售沪 V 柴油,其十六烷值为 50.8,密度(20℃)为 813.6 kg·m⁻³,凝点为 -22℃,硫的质量分数为 1.4 × 10⁻⁶。

表 1 公交车主要技术参数

Table 1 Specifications of the test bus

项目	参数
长/宽/高/mm	10 499 × 2 500 × 3 150
整备质量/满载质量/kg	10 100/16 000
发动机排量/L	7.1
额定功率/kW	177
最大扭矩/N·m	920
转速/r·min ⁻¹	1 200 ~ 1 700

1.2 试验后处理装置

试验共 4 种方案,分别为原车(无后处理)、DOC + CDPF1(A 型)、DOC + CDPF2(B 型)和 DOC + CDPF3(C 型),DOC 和 CDPF 串联而成。A 型、B 型和 C 型后处理装置 CDPF 贵金属负载量分别为 15、25 和 35 g·ft⁻³,其它参数均相同。表 2 为 DOC 及 CDPF 催化剂组分参数,载体参数见表 3。

表 2 DOC 及 CDPF 催化剂组分参数

Table 2 Catalyst parameters of the DOC and CDPF

催化剂组分	DOC	CDPF1	CDPF2	CDPF3
贵金属组分	Pt/Pd/Rh		Pt/Pd/Rh	
贵金属比例	10:1:0		10:2:1	
贵金属负载量/g·ft ⁻³	55	15	25	35
载体涂层	γ-Al ₂ O ₃		Al ₂ O ₃ + TiO ₂	

表 3 DOC 及 CDPF 载体参数

Table 3 Carrier parameters of the DOC and CDPF

载体参数	DOC	CDPF
载体孔密度/cpsi	400	200
载体过滤层壁厚/mm	0.06	0.35
载体孔隙率/%	/	55
载体平均孔径/mm	1.21	1.45
载体主要材料	FeCrAl	堇青石

1.3 试验测试系统

图 1 为 VOCs 测试系统的布置,测试系统主要由奥地利 IONICON 公司的 PTR-MS 在线 VOCs 分析仪和 MAHA-AIP 重型底盘测功机组成。PTR-MS 通过质谱扫描的核质比来区分子,克服了气相色谱-质谱测量费时、质谱复杂分析困难等缺点,但不能区分同分异构体。PTR-MS 能实时在线监测,输出多通道的 VOCs 分布特性,灵敏度为 ppt 数量级^[15],满足 CCBC 循环瞬态采样的测试要求。在重型底盘测功机上对车辆道路行驶阻力进行模拟,车速由重型底盘测功机测量。PTR-MS 分别采集测点 1(原机)以及不同 CDPF 后测点 2 处的 VOCs 组分。试验循环采用 GB/T19754-2005 推荐的中国典型城市公交车循环,循环运行时间为 1 314 s,平均车速为 16.16 km·h⁻¹。在试验时对每种后处理装置均重复 4 次 CCBC 循环,降低随机因素的干扰,保证试验结果的有效性。

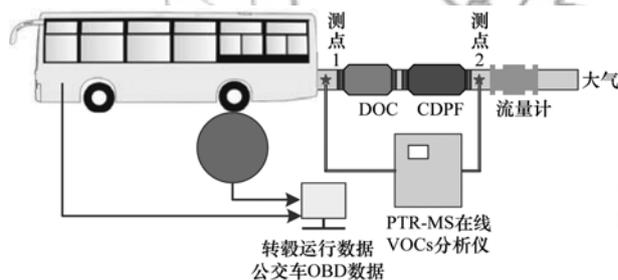


图 1 测试系统示意

Fig. 1 Schematic of the experimental system

通过底盘测功机系统对车辆行驶工况,包括速度、加速度等因素进行控制,如表 4 所示,将整个循环工况点划分为减速工况、怠速工况、低速工况、中速工况和高速工况。

表 4 工况划分

Table 4 Division of driving conditions

工况	速度/km·h ⁻¹	加速度/m·s ⁻²	排气平均温度/℃
减速	V ≥ 0	a < -0.1	154 ~ 163
怠速	0 ≤ V < 0.5	-0.1 ≤ a ≤ 0.1	132 ~ 157
低速	0 ≤ V < 20	a > -0.1	153 ~ 171
中速	20 ≤ V < 40	a > -0.1	162 ~ 188
高速	V ≥ 40	a > -0.1	180 ~ 244

2 结果与讨论

2.1 VOCs 源成分谱建立与分析

试验共测得 33 种 VOCs 成分,表 5 为 CCBC 循环下原车 VOCs 源成分谱。

原车 VOCs 排放浓度在 2.0 ~ 4.3 mg·m⁻³ 范

围, 单位里程排放量为 $29.42 \text{ mg}\cdot\text{km}^{-1}$, 主要组分类别是: 含氧有机物 (oxygenated volatile organic compounds, OVOCs)、芳香烃、烯烃、烷烃、含氮有机物、PAH 等, 排放量分别为 15.21、5.97、2.75、2.10、1.82、0.74 $\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$. VOCs 组分排放所占比例如图 2 所示.

表 5 CCBC 循环下原车 VOCs 源成分谱

Table 5 Test bus VOCs emissions profiles under CCBC cycle

序号	VOCs 成分谱	原车 VOCs 排放 $\times 10^{-3}/\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$	原车 VOCs 排放 $/\text{mg}\cdot\text{km}^{-1}$
1	苯	74.9 ~ 384.2	1.60
2	甲苯	52.0 ~ 171.7	0.83
3	C8 芳香烃	52.4 ~ 126.5	0.90
4	C9 芳香烃	85.4 ~ 167.9	1.42
5	C10 芳香烃	68.9 ~ 153.7	1.22
6	异戊二烯	166.3 ~ 588.9	2.75
7	$\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$	274.9 ~ 732.0	4.45
8	芴	15.1 ~ 44.8	0.30
9	菲	24.3 ~ 62.7	0.42
10	荧蒹	0.3 ~ 4.1	0.02
11	九烷	25.1 ~ 74.5	0.45
12	己烷	27.0 ~ 84.3	0.51
13	七烷	18.3 ~ 60.6	0.32
14	八烷	10.4 ~ 47.3	0.24
15	十烷	13.1 ~ 46.6	0.26
16	十一烷	6.8 ~ 28.2	0.16
17	十二烷	2.9 ~ 17.7	0.09
18	十三烷	1.2 ~ 7.0	0.05
19	十四烷	0.3 ~ 4.5	0.02
20	甲醛	44.6 ~ 97.3	0.65
21	甲醇	1.4 ~ 5.2	0.04
22	乙醛	338.7 ~ 667.6	5.16
23	丙酮	218.0 ~ 388.5	3.18
24	丙酮酸	61.4 ~ 123.4	0.93
25	甲基乙基酮	49.4 ~ 112.2	0.80
26	单萜	41.5 ~ 126.3	0.74
27	$\text{C}_2\text{H}_3\text{CN}$	0.2 ~ 62.6	0.10
28	CH_3NO_2	74.0 ~ 141.2	1.19
29	乙腈	6.8 ~ 36.5	0.16
30	硝酸甲酯	0.1 ~ 75.4	0.10
31	硝酸乙酯	3.7 ~ 56.1	0.12
32	C10 硝基酚	2.6 ~ 24.3	0.15
33	其他	3.1 ~ 14.5	0.09

其中, OVOCs 排放量超过 50%, 且 OVOCs 中以乙醛、 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$ 和丙酮为主, 分别占 OVOCs 总量的 33.9%、29.2% 和 20.9%. 这是因为在 CCBC 循环下, 柴油机普遍在低速、中低负荷下运行, 缸内混合气不均匀, 而柴油机富氧燃烧又使部分区域存在较多的过量空气, 因而该区域内含氧量过高, 温度降低, 燃油燃烧不充分, 燃料在该区域内易发生弱氧化过程, 产生大量含氧有机物.

苯排放量比其他芳香烃高出约 30%, 甲苯、C8

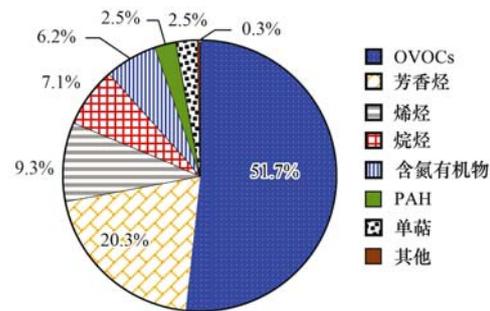


图 2 VOCs 组分占比

Fig. 2 Proportion of VOCs components

芳香烃、C9 芳香烃和 C10 芳香烃排放量大致相当. 芳香烃排放量较高是因为在 $1400 \sim 2000 \text{ K}$ 温度范围内是芳香烃大量生成区^[16], 包括苯、甲苯、二甲苯等的苯系物主要是碳氢化合物在不完全燃烧过程中生成的^[17].

柴油机在高负荷时绝大部分燃油为扩散燃烧, 造成在高温 ($2000 \sim 3000 \text{ K}$) 缺氧区域部分呈液滴状的燃油中的烃分子发生氧化和热裂解, 生成如乙烯、乙炔及其同系物等不饱和烃类, 而 CCBC 循环发动机工况主要集中在 $900 \sim 1100 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $200 \sim 500 \text{ N}\cdot\text{m}$ 范围内, 呈明显的低速、中低负荷特征^[18], 因而测得烯烃排放量少, 仅占 9.3%. 且有研究表明^[14], 随着发动机排量增加, 烯、炔烃组分占 VOCs 比例会逐渐减少, 而芳香烃和羰基化合物所占比例逐渐增加.

另外, 由于发动机功率、运行工况、燃油品质、后处理技术、车辆保养等因素对 VOCs 排放组成和质量浓度有很大影响^[19], 制定标准化 VOCs 成分谱仍存在困难.

2.2 烷烃

试验测得的烷烃包括己烷、七烷、八烷、九烷、十烷、十一烷、十二烷、十三烷、十四烷等. 图 3 为不同行驶工况下烷烃排放量. 从中可知, 各工况下 3 种后处理装置对于烷烃均有很好氧化效果, 排放明显降低, A 型、B 型、C 型后处理装置下测得烷烃排放量分别为 3.8×10^{-3} 、 2.9×10^{-3} 和 $2.8 \times 10^{-3} \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$, 相比于原车排放 $9.4 \times 10^{-3} \text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ 分别降低了 59.6%、69.1% 和 70.2%. 究其原因, DOC + CDPF 对烷烃的起燃温度低, 虽然发动机在低速条件下的排气温度相对较低, 但其对烷烃的转化效果仍十分显著. 中高速工况时, 随着车速增大, 发动机转速上升, 单位时间内循环次数增加, 发动机单个循环的燃油蒸发雾化和燃烧时间变短, 燃烧不充分, 因此其排放率上升. 但同时缸内温度

升高,排气温度增加,使 DOC + CDPF 催化剂活性提高从而转化效率增高,因此烷烃排放降幅更为显著,因而整个 CCBC 循环中烷烃排放量维持在 $2 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低排放水平. 另外,由于 Pt 对于饱和碳氢化合物有较高的催化活性,CDPF 中 Pt 占主要比例,因而在涂层、贵金属成分和配比相同的情况下,贵金属负载量越高,对烷烃减排效果越好,但贵金属负载量由 $25 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 增加至 $35 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 时,氧化率增加幅度较小.

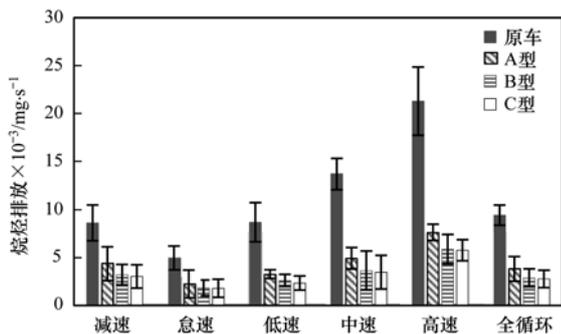


图 3 不同行驶工况下烷烃排放量

Fig. 3 Alkane emissions under different driving conditions

2.3 不饱和烃

试验车辆测得的不饱和烃类主要为芳香烃、PAHs 以及烯烃三类,测得芳香烃包括苯、甲苯、C8 芳香烃、C9 芳香烃、C10 芳香烃,PAH 包括茚、菲、蒽. 图 4 为柴油公交车不同行驶工况下芳香烃排放量,图 5 为不同行驶工况下 PAHs 排放量.

由图 4 可知,各工况下 3 种后处理装置均能不同程度地降低芳香烃浓度,这是由于 CDPF 中 Pd 的百分比较高,且含有一定的 Pt 和 Rh,有利于排气中芳香烃类的催化氧化. 不同工况下 A 型后处理装置对 VOCs 中芳香烃的氧化效率为 7.8% ~ 32.1%,而 B 型和 C 型的催化效果更好,氧化效率分别为 15.9% ~ 40.8% 和 17.1% ~ 42.1%;从整个循环的综合排放率看,氧化率依次为 21.7%、32.0% 和 32.7%,可见贵金属负载量由 A 型的 $15 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 增加至 B 型 $25 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 时,催化氧化效果有一定提升,随着贵金属负载量继续增加至 C 型 $35 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 时,其对芳香烃的催化效果与 B 型无明显差异.

由图 5 可知,在不同工况下 3 种 DOC + CDPF 均能减少 PAHs 的排放,且催化效果基本相同,全循环下原车、A 型、B 型和 C 型 PAHs 排放量分别为 3.3×10^{-3} 、 2.2×10^{-3} 、 2.3×10^{-3} 和 $2.2 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$,可见 3 种后处理装置对 PAHs 减排率均在

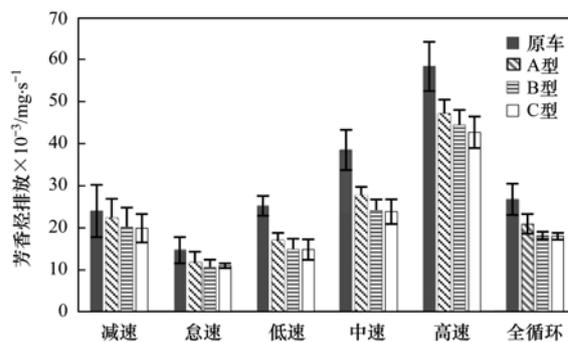


图 4 不同行驶工况下芳香烃排放量

Fig. 4 Aromatic hydrocarbon emissions under different driving conditions

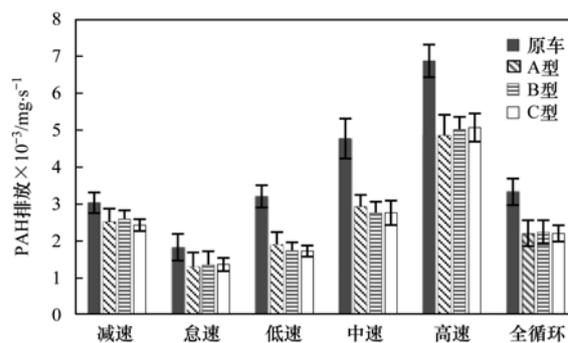


图 5 不同行驶工况下 PAHs 排放量

Fig. 5 PAHs emissions under different driving conditions

33% 左右. 主要原因可能在于 Pt 对饱和碳氢化合物有较高的催化活性,而 Pd 对不饱和碳氢化合物的活性较高^[20],而 3 种催化剂配方中 Pd 所占比例较小因而含量相差较小,C 型后处理装置因含 Pd 量稍高一些而在催化效果上有微弱优势.

试验测得烯烃中主要成分为异戊二烯,不同工况下其排放量如图 6 所示. 全循环下原车异戊二烯排放量为 $12.3 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$,A 型、B 型和 C 型分别为 6.6×10^{-3} 、 6.5×10^{-3} 和 $6.3 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$,对异戊二烯减排率依次为 46.8%、47.5% 和 48.6%,可见继续增加贵金属负载量不能明显提升对烯烃的氧化催化效果. 另外,由图 3 ~ 5 可以看出,不同工况下芳香烃、多环芳烃和烯烃等不饱和碳氢化合物的排放变化规律一致,增加贵金属负载量可以提高对不饱和 HC 催化效果,但效果不显著.

2.4 OVOCs

OVOCs 具有刺激性、免疫毒性,是环境大气的氧化潜势增加的重要因素^[21]. 试验测得的 OVOCs 包括甲醛、甲醇、乙醛、丙酮、丙酮酸、甲基乙基酮、 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$. 图 7 为不同行驶工况下 OVOCs 排放量. 考虑 CCBC 全循环下 OVOCs 平均排放,由高至

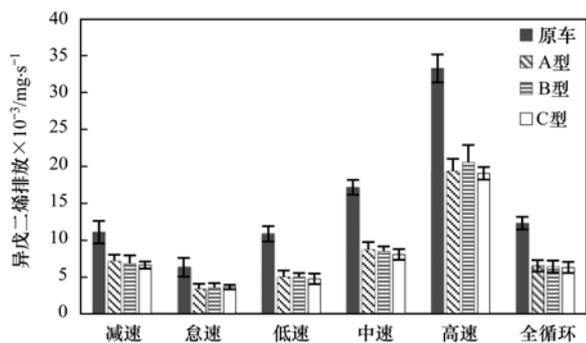


图 6 不同行驶工况下异戊二烯排放量

Fig. 6 Isoprene emissions under different driving conditions

低依次为原车、A型、B型和C型, 排放量分别为 68.5×10^{-3} 、 44.0×10^{-3} 、 42.2×10^{-3} 和 $40.9 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。采用 DOC + CDPF 后, OVOCs 排放明显低于原车的排放水平。与原车相比, A型、B型和C型的 OVOCs 降幅分别为 35.7%、38.3% 和 40.3%。可见增加 CDPF 贵金属负载量能提高对 OVOCs 的催化效果, 但催化氧化率的增加率由 7.3% ($15 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 增加至 $25 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 时) 减少为 5.2% ($25 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 增加至 $35 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 时)。

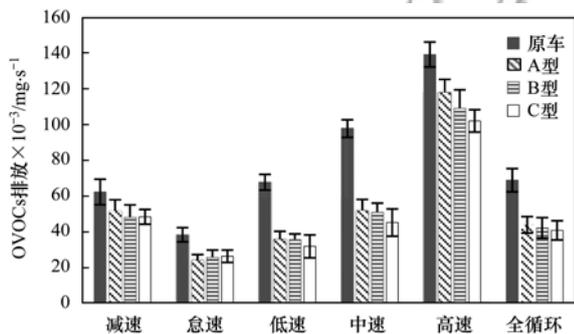


图 7 不同行驶工况下 OVOCs 排放量

Fig. 7 OVOCs emissions under different driving conditions

2.5 含氮有机物

试验测得的含氮有机物包括 CH_3NO_2 、乙腈、硝酸甲酯、硝酸乙酯、 $\text{C}_2\text{H}_3\text{CN}$ 、C10 硝基酚。图 8 为不同工况下含氮有机物排放量。

由图 8 可知, 各工况下 3 种后处理装置对于含氮有机物的排放均有明显降低作用。这可能与部分氮氧化物被催化剂吸附以及和 CDPF 捕集的炭烟发生氧化还原反应^[22-24]而减少了氮化物的生成有关。A型、B型、C型含氮有机物排放量相比于原排放分别降低 50.5%、45.1% 和 42.3%。可见含氮有机物的减排率随着贵金属负载量增加而降低, 这可能是因为 CDPF 催化剂内更高的贵金属负载量对 NO 有更好的氧化效果, 转化为 NO_2 转化率更高, 而 NO_2 一部分以硝酸盐形式储存起来, 另一部分则被

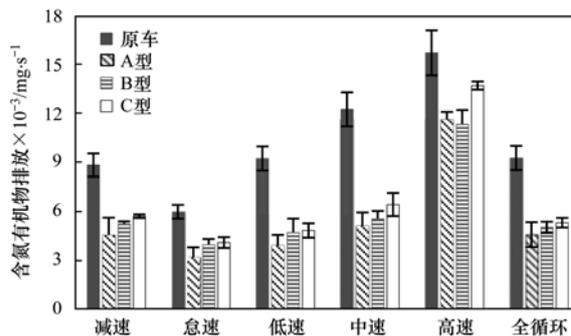


图 8 不同行驶工况下含氮有机物排放量

Fig. 8 Nitrogenous organic compound emissions under different driving conditions

释放到尾气中, 进而排放的氮化物也更多, 造成含氮有机物浓度增加。另外, DOC + CDPF 中的氧化催化剂促进了硝酸盐的生成^[25,26], 而储存的一部分硝酸盐和亚硝酸盐发生分解变成气相, 当高负荷、富燃的情况下更为明显^[27], 这与高速工况下含氮有机物的平均排放率上升是相符合的。

2.6 VOCs 各成分平均排放量

图 9 为全循环下 VOCs 各成分平均排放量。由图 9 可知, VOCs 中排放量前 10 的物种为乙醛、丙酮、 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$ 、异戊二烯、苯、C9 芳香烃、甲苯、C10 芳香烃、丙酮酸、C8 芳香烃等; 其中, 前三的乙醛、丙酮和 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$ 排放量之和约占 VOCs 排放总量一半。

A型、B型和C型后处理装置均能有效降低 VOCs 各成分的排放, 对己烷有最大减排率, 分别为 84.5%、88.7%、89.6%; 其次是甲基乙基酮, 减排率依次为 87.8%、84.8%、86.6%。但对于排放量前三的 VOCs 物种减排率不高: A型、B型、C型对乙醛减排率依次为 18.2%、16.7%、25.3%, 对丙酮的减排率分别为 13.5%、29.9%、23.3%, 对 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$ 减排率则为 62.9%、63.7% 和 64.1%。

原车、A型、B型和C型 VOCs 总量排放分别为 131.8×10^{-3} 、 84.1×10^{-3} 、 79.0×10^{-3} 和 $77.2 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$, 则 A型、B型和C型对 VOCs 总量平均减排率分别为 36.2%、40.1% 和 41.4%。由此可知, 3 种后处理装置对 VOCs 总量减排率不高, 且 A型、B型和C型对 VOCs 催化效果相差不大。

2.7 机动车尾气 VOCs 大气反应活性

VOCs 的大气反应活性指 VOCs 中的成分参与大气化学反应的能力, 本研究采用 VOCs 最大增量反应活性法 (maximum incremental reactivity, MIR) 来研究 VOCs 大气反应活性的大小^[28]。VOCs 最大增量反应活性计算的是单个 VOCs 物种的臭氧生成

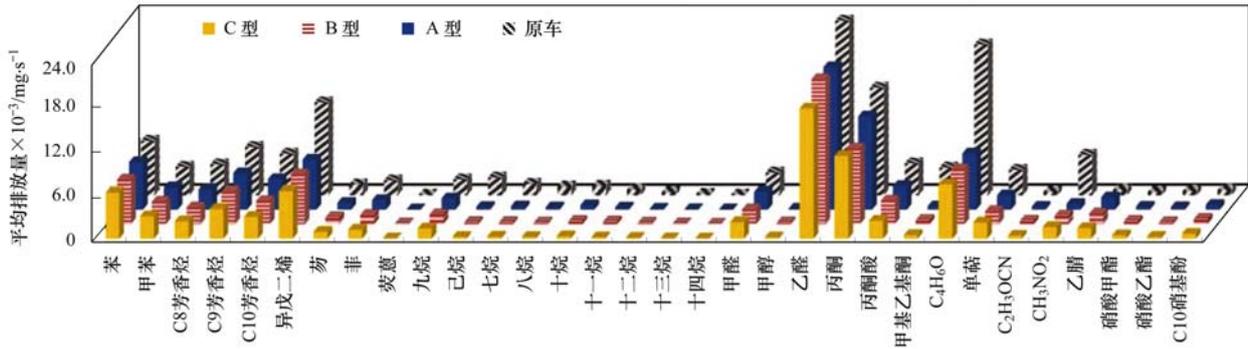


图9 VOCs各成分平均排放量

Fig. 9 Average emissions for the VOCs components

潜势(ozone formation potential, OFP), OFP 可用于评估 VOCs 在一定条件下对臭氧生成的贡献, MIR 的计算依据来自 Carter 的修正值^[29].

应用 MIR 计算方法, 柴油公交车 VOCs 臭氧生成潜势如图 10 所示, 其中, 同分异构体按较高者取值. 测得柴油公交车尾气 VOCs 中对 OFP 贡献最大的前 10 种成分有乙醛、异戊二烯、硝基甲烷、C9 芳香烃、C8 芳香烃、C₄H₆O、甲醛、甲苯、丙酮和 C10 芳香烃等.

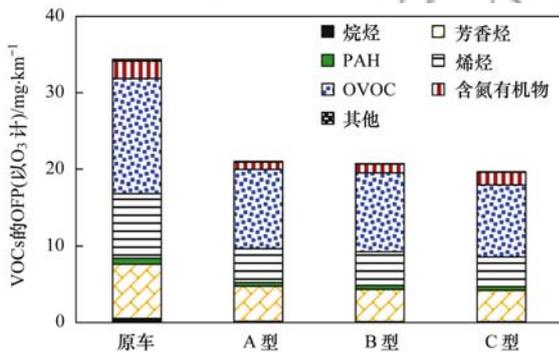


图 10 柴油公交车尾气 VOCs 的 OFP

Fig. 10 OFP of the VOCs from diesel bus exhaust

计算结果表明, 柴油公交车原车、A 型、B 型和 C 型 VOCs 的 OFP(以 O₃ 计,下同)依次为 34.4、21.0、20.7 和 19.6 mg·km⁻¹. 采用 DOC + CDPF 后能较好地降低 VOCs 的排放量进而降低 OFP, 但 3 种后处理装置对于 OFP 的改善效果无显著差异. 另外, OVOCs 对 OFP 贡献最大, 约占 43.6% ~ 49.7%, 其中乙醛对 OFP 的贡献达 29.0% ~ 36.8%, 是柴油公交车尾气 VOCs 成分中活性最高的物种. 烯烃、芳香烃和烷烃对 OFP 贡献则相对较小, 平均相对贡献则分别为 19.9% ~ 23.6%、19.6% ~ 22.0% 和 1.0% ~ 2.3%. 含氮有机物的 OFP 约在 0.96 ~ 2.27 mg·km⁻¹, 对大气化学反应活性贡献约占 4.6% ~ 7.2%. 虽然 VOCs 中烯烃所

占比例和烷烃相近, 但其对柴油车 VOCs 的 OFP 平均相对贡献远高于烷烃, 表明柴油车尾气中烯烃的大气反应活性高于烷烃.

2.8 方案选择

建立了综合考虑不同 DOC + CDPF 的减排效果与成本优化方程, 如下式:

$$Z_{aim} = \max \left(\xi_1 \sum_{i=1}^{10} \eta_i Z_i + \xi_2 Z_{11} \right) \quad (1)$$

式中, $Z_i (i=1, 2, \dots, 10)$ 表示对 OFP 贡献最大的前 10 种 VOCs 组分在相应的 DOC + CDPF 后处理装置下的减排率, 为根据第 i 种组分对 OFP 贡献大小计算出的加权系数, 如表 6 所示. Z_{11} 表示该 DOC + CDPF 成本无量纲化后的值, A 型、B 型、C 型的 Z_{11} 值分别取 -0.289、-0.333 和 -0.378, 成本变化时重新取值; ξ_1 、 ξ_2 分别表示对减排率与成本所采用的加权系数, 根据成本与减排率相对重视程度取值, 本文按成本与减排效果分别为 0.2 和 0.8 权重取值.

当成本与减排效果加权系数分别为 0.2 和 0.8 时, $Z_{(B型)} > Z_{(A型)} > Z_{(C型)}$, B 型为最优解.

表 6 VOCs 各组分减排率与加权系数

Table 6 Emission reduction rates and weighting

VOCs 组分	coefficients of the VOCs components			加权系数
	减排率 $Z_i/\%$			
	A 型	B 型	C 型	
乙醛	20.4	21.9	24.3	0.300
异戊二烯	45.2	46.4	47.0	0.265
CH ₃ NO ₂	89.3	83.0	72.1	0.115
C9 芳香烃	26.3	30.5	36.2	0.085
C8 芳香烃	38.6	45.0	43.0	0.065
C ₄ H ₆ O	63.2	65.4	67.1	0.050
甲醛	25.3	28.1	30.0	0.050
C10 芳香烃	31.2	46.0	48.2	0.025
甲苯	18.3	15.8	16.6	0.025
丙酮	13.7	17.3	19.1	0.020

3 结论

(1) 柴油公交车尾气 VOCs 主要组分为 OVOCs、芳香烃、烯烃等, 其中 OVOCs 占比超过 50%, 芳香烃约占 VOCs 总量 20%, 烯烃、烷烃、含氮有机物、PAHs 等组分占比均低于 10%。

(2) 各工况下, 3 种后处理装置烷烃循环减排率均在 59% 以上, C 型高达 70.2%; 全循环下烷烃维持在 $2 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3} \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$ 低排放水平; 不饱和 HC 排放变化规律一致, 3 种方案催化效果相近, 芳香烃、多环芳烃减排率均低于 35%, 烯烃减排率均在 47% 左右。

(3) C 型后处理对 OVOCs 的催化氧化有微弱优势, 但减排率仍较低, 仅为 40%; 3 种方案对含氮有机物的排放在各工况下均有明显降低作用, 但其减排率随 CDPF 贵金属负载量增加而降低。

(4) VOCs 减排率随 CDPF 贵金属负载量增加而增加; A 型、B 型和 C 型对 VOCs 总量的减排率分别为 36.2%、40.1% 和 41.4%; VOCs 中排放量前三的乙醛、丙酮和 $\text{C}_4\text{H}_6\text{O}$ 排放量之和约占 VOCs 排放总量一半, 但 3 种后处理装置对乙醛、丙酮减排率均低于 30%。

(5) 醛类、芳香烃和烯烃等对 OFP 贡献较大; 采用后处理装置能减少 VOCs 排放量进而降低 OFP, 但 3 种后处理装置效果无显著差异。

(6) 综合考虑不同 DOC + CDPF 的减排效果与成本因素, 当加权系数分别为 0.8 和 0.2 时, B 型为最优解。

参考文献:

- [1] Liu Y H, Liao W Y, Li L, *et al.* Vehicle emission trends in China's Guangdong province from 1994 to 2014[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **586**: 512-521.
- [2] Alves C A, Lopes D J, Calvo A I, *et al.* Emissions from light-duty diesel and gasoline in-use vehicles measured on chassis dynamometer test cycles[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(1): 99-116.
- [3] 王铁宇, 李奇锋, 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, Lv Y L. Characteristics and countermeasures of volatile organic compounds (VOCs) emission in China[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4756-4763.
- [4] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O_3 生成潜能的相关性分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 443-451.
Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, *et al.* Correlation analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 443-451.
- [5] 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.
- [6] 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 & Technology*, 2009, **43**(22): 8580-8586.
- [7] Kamal M S, Razzak S A, Hossain M M. Catalytic oxidation of volatile organic compounds (VOCs)-a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **140**: 117-134.
- [8] Pang Y B, Fuentes M, Rieger P. Trends in the emissions of volatile organic compounds (VOCs) from light-duty gasoline vehicles tested on chassis dynamometers in Southern California [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **83**: 127-135.
- [9] Pang Y B, Fuentes M, Rieger P. Trends in selected ambient volatile organic compound (VOC) concentrations and a comparison to mobile source emission trends in California's South Coast Air Basin [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **122**: 686-695.
- [10] Brito J, Wurm F, Yáñez-Serrano A M, *et al.* Vehicular emission ratios of VOCs in a megacity impacted by extensive ethanol use: results of ambient measurements in São Paulo, Brazil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(19): 11381-11387.
- [11] 姚森, 魏巍, 程水源, 等. 轻型汽油车 VOCs 排放特征及其大气反应活性[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(10): 2923-2929.
Yao S, Wei W, Cheng S Y, *et al.* Emission characteristics and chemical reactivity of volatile organic compounds from light-duty gasoline vehicles [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 2923-2929.
- [12] Hu N T, Tan J W, Wang X Y, *et al.* Volatile organic compound emissions from an engine fueled with an ethanol-biodiesel-diesel blend [J]. *Journal of the Energy Institute*, 2017, **90**(1): 101-109.
- [13] 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): 1071-1079.
Qiao Y Z, Wang H L, Huang C, *et al.* Source profile and chemical reactivity of volatile organic compounds from vehicle exhaust [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- [14] 叶宇. 基于车载测试的柴油车挥发性有机物排放特征研究 [D]. 北京: 北京工商大学, 2014. 1-48.
- [15] 詹雪芳, 段忆翔. 质子转移反应质谱用于痕量挥发性有机化合物的在线分析 [J]. *分析化学*, 2011, **39**(10): 1611-1618.
Zhan X F, Duan Y X. Proton transfer reaction-mass spectrometry for on-line analysis of trace volatile organic compounds [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2011, **39**(10): 1611-1618.
- [16] 赵伟, 舒歌群, 张伟, 等. 柴油机燃烧生成芳香烃、碳烟及 NO_x 的化学动力学研究 [J]. *内燃机工程*, 2012, **33**(5): 10-16.
Zhao W, Shu G Q, Zhang W, *et al.* Study on aromatic hydrocarbons, soot and NO_x formed in diesel engine combustion using detailed chemical kinetics [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2012, **33**(5): 10-16.

- [17] 董宏, 张仲荣, 刘立东, 等. 国3柴油机排气中挥发性有机物排放特性的研究[J]. 汽车工程, 2012, **34**(5): 433-438.
Dong H, Zhang Z R, Liu L D, *et al.* A study on the emission characteristics of volatile organic compounds from a state-III diesel engine[J]. Automotive Engineering, 2012, **34**(5): 433-438.
- [18] 胡志远, 谢亚飞, 谭丕强, 等. 在用国IV公交车燃用B5生物柴油的排放特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, **44**(4): 625-631.
Hu Z Y, Xie Y F, Tan P Q, *et al.* Emission characteristics of an in-use China four diesel bus fueled with B5[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2016, **44**(4): 625-631.
- [19] Chen C H, Huang C, Jing Q G, *et al.* On-road emission characteristics of heavy-duty diesel vehicles in Shanghai [J]. Atmospheric Environment, 2007, **41**(26): 5334-5344.
- [20] Khosravi M, Abedi A, Hayes R E, *et al.* Kinetic modelling of Pt and Pt; Pd diesel oxidation catalysts[J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2014, **154-155**: 16-26.
- [21] 孙延慧. 典型有机污染物在大气中的氧化机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2015. 1-41.
- [22] 楼狄明, 张允华, 谭丕强, 等. 基于DOC + CDPF技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性[J]. 环境科学, 2016, **37**(12): 4545-4551.
Lou D M, Zhang Y H, Tan P Q, *et al.* Emission characteristics of gaseous pollutants from city bus fueled with biodiesel based on DOC + CDPF technology in real road conditions [J]. Environmental Science, 2016, **37**(12): 4545-4551.
- [23] Harada K, Yamada H, Okamoto K, *et al.* Development of high performance catalyzed DPF with new soot burning mechanism [J]. Catalysis Surveys from Asia, 2010, **14**(3-4): 176-184.
- [24] Kolli T, Kanerva T, Huuhtanen M, *et al.* The activity of Pt/Al₂O₃ diesel oxidation catalyst after sulphur and calcium treatments[J]. Catalysis Today, 2010, **154**(3-4): 303-307.
- [25] 楼狄明, 贺南, 谭丕强, 等. DOC/CCRT老化对柴油公交车气态物排放特性的影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(6): 2059-2064.
Lou D M, He N, Tan P Q, *et al.* Effect of DOC/CCRT aging on gaseous emission characteristics of an in-used diesel engine bus [J]. Environmental Science, 2016, **37**(6): 2059-2064.
- [26] 楼狄明, 苏芝叶, 陶士康, 等. 催化型连续再生颗粒捕集器对柴油公交车尾气颗粒物影响的研究[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2016, **45**(3): 1-8.
Lou D M, Su Z Y, Tao S K, *et al.* Research on effects of continuously catalyst regeneration trap on diesel bus exhaust particulate[J]. Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique, 2016, **45**(3): 1-8.
- [27] 楼狄明, 刘影, 谭丕强, 等. DOC/DOC + CDPF对重型柴油车气态物排放的影响[J]. 汽车技术, 2016, (10): 22-26.
Lou D M, Liu Y, Tan P Q, *et al.* The influences of DOC and DOC + CDPF on gaseous emissions of heavy-duty diesel vehicle [J]. Automobile Technology, 2016, (10): 22-26.
- [28] 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.
- [29] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Air & Waste, 1994, **44**(7): 881-899.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)