

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第6期

Vol.37 No.6

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

双级虚拟撞击采样器应用于固定污染源 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 排放测量	蒋靖坤, 邓建国, 李振, 马子珍, 周伟, 张强, 段雷, 郝吉明 (2003)
黄山夏季气溶胶吸湿性及与化学组分闭合	陈卉, 杨素英, 李艳伟, 银燕, 张泽锋, 于兴娜, 康娜, 严殊祺, 夏航 (2008)
沈阳大气气溶胶中水溶性无机离子的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王璐, 徐慧 (2017)
南京夏秋季节大气干沉降水溶性离子特征及来源分析	秦阳, 朱彬, 邹嘉南, 庞博 (2025)
太原市大气颗粒物粒径和水溶性离子分布特征	曹润芳, 闫雨龙, 郭利利, 郭文帝, 何秋生, 王新明 (2034)
2014 年北京市城区臭氧超标日浓度特征及与气象条件的关系	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 王欣, 邹宁, 陈晨, 孟凡 (2041)
机动车尾气烟尘中烷烃和有机酸的组成	袁佳雯, 刘刚, 李久海, 徐慧 (2052)
DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响	楼狄明, 贺南, 谭丕强, 胡志远 (2059)
紫外辐照改性生物炭对 VOCs 的动态吸附	李桥, 雍毅, 丁文川, 侯江, 高屿涛, 曾晓岚 (2065)
三峡库区内陆腹地典型水库型湖泊中 DOM 吸收光谱特征	江韬, 卢松, 王齐磊, 白薇扬, 张成, 王定勇, 梁俭 (2073)
三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征	王齐磊, 江韬, 赵铮, 梁俭, 木志坚, 魏世强, 陈雪霜 (2082)
高分辨率降水氧氮同位素变化及洞穴水响应: 以河南鸡冠洞为例	孙喆, 杨琰, 张萍, 刘肖, 梁沙, 张娜, 聂旭东, 梁胜利, 李建仓, 凌新有, 张志钦 (2093)
不同雨强条件下河流水质对流域土地利用类型与格局空间响应	季香, 刘红玉, 李玉凤, 皋鹏飞, 孙一鸣, 李玉玲 (2101)
丹江口水库沉积物重金属背景值的确定及潜在生态风险评估	赵丽, 王雯雯, 姜霞, 王书航, 李佳璐, 陈俊伊 (2113)
滴水湖及其环湖水系沉积物、土壤中多氯联苯的空间分布特征及风险评价	王薛平, 黄星, 毕春娟, 贾晋璞, 郭雪, 陈振楼 (2121)
粤桂水源地有机氯农药的污染特征及生态风险	阳宇翔, 刘昕宇, 詹志薇, 解启来, 汤嘉骏, 欧阳培毓, 陈镇新, 徐晨 (2131)
鄱阳湖浮游植物叶绿素 a 及营养盐浓度对水位波动的响应	刘霞, 刘宝贵, 陈宇炜, 高俊峰 (2141)
周期性的温度扰动对藻类群落结构演替的影响	贡丹丹, 刘德富, 张佳磊, 杨正健, 朱晓明, 谭纤茹 (2149)
溴酸盐对普通小球藻的生长以及生理特性的影响	王执伟, 刘冬梅, 张文娟, 崔福义 (2158)
微囊藻水华对水体中氮转化及微生物的影响	李洁, 张思凡, 肖琳 (2164)
城市污染河道沉积物碳氮赋存对有机质分解的影响	唐千, 刘波, 王文林, 邢鹏, 袁婧雯, 嵇玮, 沈晓宇, 季家乐 (2171)
两亲性共聚物共混 PVDF 超滤膜的界面性质与抗蛋白质污染的研究	孟晓荣, 鲁冰雪, 付东会, 辛晓强, 唐卫婷 (2179)
巯基改性海泡石吸附水中的 Hg(II)	谢婧如, 陈本寿, 张进忠, 刘江 (2187)
改性芦苇生物炭对水中低浓度磷的吸附特征	唐登勇, 黄越, 胥瑞晨, 胡洁丽, 张聪 (2195)
UiO-66 对废水中二氯苯氧乙酸的吸附特性	任天昊, 杨智临, 郭琳, 陈海, 杨琦 (2202)
对硝基苯酚在高炉水淬渣上的吸附机制及表面形研究	王哲, 黄国和, 安春江, 陈莉荣, 张思思 (2211)
高岭石、针铁矿及其二元体对胡敏酸的吸附特性	牛鹏举, 魏世勇, 方敦, 但悠梦 (2220)
硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响	周彦卿, 郝瑞霞, 王珍, 朱晓霞, 万京京 (2229)
单质硫颗粒尺寸及反应器类型对硫自养反硝化反应器启动的影响	马航, 朱强, 朱亮, 李祥, 黄勇, 魏凡凯, 杨朋兵 (2235)
钛盐混凝剂调对活性污泥絮体理化性质的影响作用机制	王彩霞, 张伟军, 王东升, 王庆飞, 喻德忠 (2243)
城市污水管网中产甲烷菌的分布特性规律	孙光溪, 金鹏康, 宋吉娜, 王先宝, 杨柯瑶 (2252)
低 DO 下 AGS-SBR 处理低 COD/N 生活污水长期运行特征及种群分析	信欣, 管蕾, 姚艺朵, 羊依金, 郭俊元, 程庆峰 (2259)
微丝菌 (<i>Microthrix parvicella</i>) 原位荧光杂交 (FISH) 定量过程的条件优化	王润芳, 张红, 王琴, 王娟, 顾剑, 齐嵘, 杨敏 (2266)
基于高通量测序解析碳化温度对麻杆电极微生物群落影响	吴义诚, 贺光华, 郑越, 陈水亮, 王泽杰, 赵峰 (2271)
1 株高效去除氨氮的红假单胞菌的分离鉴定及特性	黄雪娇, 杨冲, 倪九派, 李振刚 (2276)
长期保护性耕作制度下紫色土剖面无机磷变化特征	韩晓飞, 高明, 谢德体, 王子芳 (2284)
有机物料对两种紫色土氮素矿化的影响	张名豪, 卢吉文, 赵秀兰 (2291)
生物质炭和秸秆配合施用对土壤有机碳转化的影响	张婷, 王旭东, 逢萌雯, 刘恩新, 白如霞, 黎妮, 王钰莹 (2298)
多元统计与铅同位素示踪解析旱地垂直剖面土壤中重金属来源	孙境蔚, 胡恭任, 于瑞莲, 苏光明, 王晓明 (2304)
苏南某镇土壤重金属污染的景观格局特征	陈昕, 潘剑君, 王文勇, 李炳亚 (2313)
河南洛阳市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	刘亚纳, 朱书法, 魏学锋, 苗娟, 周鸣, 关凤杰 (2322)
杭州蔬菜基地重金属污染及风险评价	龚丹丹, 朱维琴, 顾燕青, 李淑英, 加那提·吐尼克 (2329)
土壤溶解性有机质荧光特征及其与铜的络合能力	田雨, 王学东, 陈潇霖, 华珞 (2338)
添加稳定剂对尾矿土中砷形态及转换机制的影响	陈志良, 赵述华, 钟松雄, 桑燕鸿, 蒋晓璐, 戴玉, 王欣 (2345)
应用 SHIME 模型研究肠道微生物对土壤中镉、铬、镍生物可给性的影响	尹乃毅, 都慧丽, 张震南, 蔡晓琳, 李泽蛟, 孙国新, 崔岩山 (2353)
不同基因型杨树的光合特征与臭氧剂量的响应关系	辛月, 高峰, 冯兆忠 (2359)
芘胁迫对 5 种羊茅属植物根系分泌的几类低分子量有机物的影响	潘声旺, 袁馨, 刘灿, 李亚阗, 杨婷, 唐海云, 黄方玉 (2368)
维管束植物樟树和马尾松叶组织氮、硫含量指示贵阳地区大气氮、硫沉降的空间变化	徐宇, 肖化云, 郑能建, 张忠义, 瞿玲露, 赵晶晶 (2376)
苏北潮滩温室气体排放的时空变化及影响因素	许鑫王豪, 邹欣庆, 刘晶茹 (2383)
g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ 复合物的制备及可见光催化降解 MO	张志贝, 李小明, 陈飞, 杨麒, 钟宇, 徐秋翔, 杨伟强, 李志军, 陈寻峰, 谢伟强 (2393)
海南省淘汰落后产能政策的污染物协同减排效应评价	耿静, 任丙南, 吕永龙, 王铁宇 (2401)
《环境科学》征订启事 (2130) 《环境科学》征稿简则 (2251) 信息 (2178, 2344)	

DOC/CCRT 老化对柴油公交车气态物排放特性的影响

楼狄明, 贺南*, 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, 研究新鲜及老化氧化型催化器(DOC)、氧化型催化器耦合催化型颗粒捕集器(DOC + CDPF, CCRT)对在用国Ⅲ柴油公交车进行中国典型城市公交车循环 CCBC 时一氧化碳(CO)、总碳氢化合物(THC)、一氧化氮(NO)、二氧化氮(NO₂)和氮氧化物(NO_x)、二氧化碳(CO₂)等气态物排放特性的影响。结果表明: 采用新鲜及老化 DOC/CCRT, 均可以降低 CO、THC、NO 排放, 增加 NO₂ 排放, NO_x 及 CO₂ 排放基本不变; 在怠速、加速、减速及匀速这 4 种工况下, 新鲜 DOC 比老化 DOC 对 CO、THC 氧化效率好, 新鲜 CCRT 比老化 CCRT 对 THC 氧化效率好, 但老化 CCRT 对 CO 氧化效率更好, 新鲜 DOC/CCRT 比老化 DOC/CCRT 对 NO 减少幅度高, 对 NO₂ 增加幅度高, 但对 NO_x 排放总量基本无影响。

关键词: 柴油机; 氧化型催化器; 催化型连续再生颗粒捕集器; 老化; 气态排放物

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)06-2059-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.06.008

Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus

LOU Di-ming, HE Nan*, TAN Pi-qiang, HU Zhi-yuan

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

Abstract: Based on heavy chassis dynamometer, an experimental study was conducted in diesel bus with China Stage III, which investigated the effects of gaseous emission characteristics under CCBC driving cycle, such as carbon monoxide (CO), total hydrocarbons (THC), nitric oxide (NO), nitrogen dioxide (NO₂), nitrogen oxides (NO_x) and carbon dioxide (CO₂) with the fresh/aged oxidized catalyst (DOC) and oxidation catalysts coupled catalyzed particulate trap (DOC + CDPF, referred CCRT). The results showed that using fresh and aged DOC/CCRT, the diesel bus could reduce CO, THC and NO emissions, meanwhile increase NO₂ emissions, but NO_x and CO₂ emissions remained basically unchanged. In idle speed, acceleration, deceleration and constant speed of working conditions, the diesel bus using the fresh DOC had better oxidation efficiency of the CO and THC emissions than the bus using the aged DOC. The diesel bus using the fresh CCRT had higher oxidation efficiency of THC emissions, but lower oxidation efficiency of CO emissions than the bus using the aged CCRT. The diesel bus using the fresh DOC/CCRT had a higher rate of NO emissions reductions and NO₂ emissions increments than the bus using the aged DOC/CCRT, but it did not basically affect the NO_x emissions.

Key words: diesel engine; diesel oxidation catalyst (DOC); catalyzed continuously regeneration trap (CCRT); aged; gaseous emission

柴油发动机燃油经济性好及热效率高等特点, 使其成为中、重型汽车的主要动力^[1,2]。但相对而言, 柴油机的排放物, 如 NO_x 及颗粒物排放等, 也都高于汽油机。这些排放物对环境 and 人类健康都有着不可忽视的危害^[3~5]。为满足更为严格的排放法规, 单纯地依靠机内净化技术已很难达到, 必须与机外净化技术相结合^[6~8]。

目前应用于柴油机来解决颗粒物排放问题一般为氧化催化器(diesel oxidation catalyst, DOC)或催化型颗粒捕集器(catalyzed diesel particulate filter, CDPF), 以及两者耦合结合的催化型连续再生颗粒捕集器(catalyzed continuously regeneration trap, CCRT)等技术方案^[9~11]。国内外对这些后处理方案都进行了相关研究。Schaefer 等^[12]对 DOC-DPF-SCR 和 DOC-SCR-DPF 两种构型方案的 NO 转化效

率及 DPF 被动再生效果进行了试验对比。Liu 等^[13]研究表明 CCRT 可以大幅降低 HC 及 CO 的排放, 并且对颗粒数量浓度粒径分布峰值、核态和聚集态颗粒数量浓度有显著的降低效果。Herreros 等^[14]发现在催化器中加入氢气有利于 CO 和 HC 的氧化, 同时可以降低催化器的起燃温度, 同时研究表明低温环境下, 增加 NO₂ 的生成速率及 CO 和 HC 的氧化速率有利于 DOC 后 DPF 的被动再生^[15,16]。楼狄明等^[17]研究了采用 DOC + CDPF 后处理技术公交车实际道路颗粒物的排放特性。张俊等^[18]利用台架试验研究了

收稿日期: 2015-12-14; 修订日期: 2016-01-23

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(14DZ1202702)

作者简介: 楼狄明(1963~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为汽车发动机现代设计技术、发动机代用燃料与排放控制技术、柴油混合动力技术等, E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: henan1434436@126.com

DOC-CDPF-SCR-ASC(氨氧化催化器)和 DOC-SCR-CDPF 两种后处理系统构型方案在世界统一瞬态循环 WHTC、世界统一稳态循环 WHSC、欧洲瞬态循环 ETC 及欧洲稳态循环 ESC 等循环下 NO_x、颗粒物净化效果及 CDPF 被动再生效果. 刘洋等^[19]研究表明 DOC + PDC + SCR 组合后处理系统可使两种污染物 PM 和 NO_x 排放满足国V要求.

催化剂高温失活、催化剂中毒、结焦与堵塞及汽车振动等都会引起 DOC 老化,而高温烧熔、热应力损坏、不可燃物堵塞及汽车振动等是 DPF 老化的重要原因,即温度及化学中毒、机械损害均对 DOC/CCRT 的老化有着重要的影响^[20~24]. 目前国内对柴油机催化转化器的老化研究侧重对老化规范评价体系的建立^[20,23,24],但有关新鲜老化 DOC/CCRT 对公交车排放影响研究仍为空白.

本文以满足国Ⅲ排放的在用柴油公交车为试验样车,在重型底盘测功机上研究该车采用新鲜老化 DOC/CCRT 后处理装置各一套,在 CCBC 循环的 CO、THC、NO、NO₂ 及 NO_x 等常规气态物的排放特性,以期对 DOC 及 CCRT 的应用及保养提供技术优化方案.

1 材料与方法

1.1 试验设备

试验在一辆满足国Ⅲ排放,发动机排量为 7.1 L 的柴油公交车上进行,其基本参数见表 1. 试验燃料为纯柴油,其含硫量质量分数为 0.002 2%,符合标准 SH/T 0689-2000,为低硫柴油.

表 1 试验用公交车基本参数

Table 1 Specifications of test bus

项目	参数
排量/L	7.1
功率/kW·(r·min) ⁻¹	177/2 300
转矩/N·m·(r·min) ⁻¹	920/1 200~1 700
整备质量/kg	10 100
长/宽/高/mm	10 499/2 500/3 150

试验装置包括 MAHA-AIP 重型底盘测功机,美国 Sensor 公司生产的 SEMTECH-D/G 气体污染物系统,Pitot 管流量计等辅助设备. 重型车底盘测功机试验根据特定的驾驶循环,在特定的环境下对公交车进行排放性能试验,具有试验结果稳定性、一致性和代表性好的特点,可同时避免发动机台架试验和车辆实际道路试验结果代表不强的缺点. 美国 Sensor 公司 SEMTECH-D/G 气体污染物系统是用来

测量在实际道路条件下柴油车和汽油车的真实尾气排放和车速、油耗等相关参数的车载测试设备. 此设备包括 CO、CO₂、O₂ 的分析仪 NDIR, NO、NO₂ 分析仪 NDUV 及 THC 分析仪 FID,其量程分别为 8%、18%、25%, 3 000 × 10⁻⁶、500 × 10⁻⁶、3 000 × 10⁻⁶. Pitot 管式流量计量程为 0~20 m³·min⁻¹,流量精度 ±1.5%.

1.2 试验用后处理装置

本研究中将使用时间 1 a,里程约 50 000 km 的 DOC/CCRT 定义为老化 DOC/CCRT. 新鲜 DOC/CCRT 指未经使用的 DOC/CCRT.

为了分析老化 DOC 及 CCRT 对气态物的排放影响,分别选用新鲜老化 DOC/CCRT 后处理装置各一套进行试验,其中 DOC 及 CDPF 基本参数如表 2 所示.

表 2 试验用 DOC 和 CDPF 基本参数

Table 2 Basic parameters of DOC and CDPF

项目	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
贵金属种类	Pt/Pd/Rh	Pt/Pd/Rh
贵金属负载量	55 g·ft ⁻³ , 10:1:0	35 g·ft ⁻³ , 10:2:1
涂层	γ-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ + TiO ₂

1.3 试验方案

该车在 MAHA-AIP 重型底盘测功机上,采用美国 Sensor 公司生产的 SEMTECH-D/G 气体污染物系统及其他辅助设施,对车辆尾气进行直采,将排气采样管通过 Pitot 管流量计直接连接到测量装置上,实时测量车辆排放的浓度和排气流量,从而得到气态物排放量^[25].

试验循环采用 GB/T 19754-2005 推荐的中国典型城市公交车循环(CCBC). CCBC 循环是根据中国三大城市(北京、上海和广州)公交车实际道路运行工况而建立的城市公交循环,其由怠速、低速、匀速、中速和高速等 14 个工况构成,运行时间 1 314 s,平均车速 15.68 km. 为消除驾驶员操作随机性因素,试验时循环重复进行 5 次.

本研究采用 4 种柴油排气后处理装置试验方案,分别简称为新鲜 DOC、老化 DOC、新鲜 CCRT 及老化 CCRT. 将柴油车无后处理装置的状态称为原车,如表 3 所示.

表 3 后处理装置方案

后处理装置	名称
无	原车
新鲜 DOC	新鲜氧化催化器
老化 DOC	老化氧化催化器
新鲜 CCRT	新鲜催化型连续再生颗粒捕集器
老化 CCRT	老化催化型连续再生颗粒捕集器

2 结果与分析

2.1 气态物排放因子

车辆各排放污染物基于行驶里程的排放因子为某循环下的该污染物的排放总量与该循环的总行驶里程之比. 表 4 为 CCBC 循环下柴油公交车在不同后处理方案下的气态物排放因子.

表 4 不同后处理装置 CCBC 循环气态物排放因子/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$

不同装置	原车	新鲜 DOC	老化 DOC	新鲜 CCRT	老化 CCRT
CO	1. 486	1. 007	1. 376	0. 968	0. 291
THC	0. 233	0. 173	0. 203	0. 031	0. 146
NO	14. 735	14. 097	14. 390	13. 714	13. 952
NO ₂	0. 592	0. 837	0. 723	1. 129	0. 961
NO _x	15. 327	14. 933	15. 113	14. 843	14. 912
CO ₂	696. 219	674. 712	683. 741	647. 945	659. 313

综合分析, 相较原车, 安装 4 种后处理装置后 CO、THC 排放均有降低; 对于氮氧化物排放, NO 减少, NO₂ 增多, NO_x 排放因子基本保持不变; CO₂ 排放基本不变. 其中, 对新鲜/老化 DOC 与新鲜/老化 CCRT 各自对比来说, 新鲜 DOC/CCRT 对 THC、NO、NO_x 及 CO₂ 降低幅度要明显大于老化 DOC/CCRT, 同时对 NO₂ 的增加幅度也比老化 DOC/CCRT 大. 但老化 CCRT 对 CO 的降低幅度要优于新鲜 CCRT. 可见, DOC 及 CCRT 的老化对气态物排放有一定的影响.

2.2 不同工况下气态物排放

因车辆气态物排放与车辆行驶工况息息相关, CCBC 循环工况特征参数如表 5 所示, 为了更好地了解气态物排放特性, 有必要分析试验柴油公交车在一个 CCBC 循环中怠速 ($v=0$ 且 $-0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\leq a\leq 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)、加速 ($a>0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)、减速 ($a<0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) 和匀速 ($v\neq 0$ 且 $-0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}\leq a\leq 0.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) 这 4 个工况下的气态物排放总量情况.

表 5 CCBC 循环工况特征参数

工况	各工况比例/%
怠速	29
加速	34
减速	25. 6
匀速	11. 4

2.2.1 CO 排放

图 1 为柴油公交车采用不同后处理装置, 在不

同工况下的 CO 排放量. 其中均标明最大的标准误差线. 可以看出, 在不同工况下, 4 种方案的后处理装置均可以不同程度地降低排放中 CO 浓度. 这是因为 DOC 中催化剂能降低排放物中 CO 的化学反应活化能, 从而使其能在较低的温度下与氧气发生氧化反应. 在加速工况下其 CO 排放较高, 是因为加速阶段喷油量增大, 空燃比减小, 这样单位时间内循环次数增多, 此时燃烧状况恶化, 从而其 CO 排放增加. 新鲜 DOC 与老化 DOC 相比可知, 不同工况下新鲜 DOC 比老化 DOC 对 CO 的氧化效率更好, 其中新鲜 DOC 对 CO 的氧化效率为 12. 3% ~ 26. 0%, 老化 DOC 对 CO 的氧化效率为 3. 1% ~ 6. 1%. 新鲜 CCRT 与老化 CCRT 相比可知, 不同工况下, 老化 CCRT 比新鲜 CCRT 对 CO 的氧化效率更好些, 其中新鲜 CCRT 对 CO 的氧化效率为 27. 9% ~ 44. 4%, 而老化 CCRT 对 CO 的氧化效率为 80. 6% ~ 86. 8%.

老化 DOC 与新鲜 DOC 相比, CO 的转化效率降低, 原因可能为 DOC 长期处于高温下工作出现热老化现象, 从而导致 CO 起燃温度升高^[21], 对 CO 的氧化效率降低. 老化 CCRT 与新鲜 CCRT 相比, CO 的转化效率明显升高, 可能原因有两个: 一是在温度未达到 CO 转化所必需温度时, 老化 DOC 中 CO 可充当还原剂, 将 NO₂ 还原为 NO, 这样排气中的 CO 减少^[26]; 二是老化 CCRT 在使用过程中会发生再生现象, 而再生时温度可能高达 650℃^[27], 此时的高温促进了贵金属在载体表面的再分散^[28], 同时也会

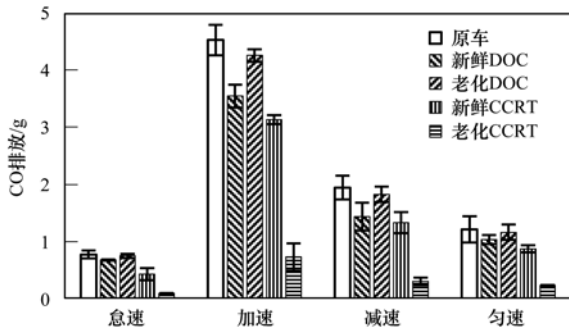


图1 不同工况下 CO 排放量

Fig. 1 CO emissions under different working conditions

增加表面活性氧的浓度,由于 CO 较 NO 和 THC 有更好的竞争吸附能力,增加的活性氧促进了 CO 的氧化,使得老化 CCRT 较 CO 具有更好的氧化活性和选择性,CO 的转化效率升高。

2.2.2 THC 排放

图2为柴油公交车采用不同后处理装置,在不同工况下的 THC 排放量。可以看出,在不同工况下,4种方案的后处理装置均可以不同程度地降低排放中 THC 浓度。这是因为 DOC 中催化剂作用下,较低温度下便可使 THC 与氧气反应转化为 CO_2 和 H_2O 。新鲜 DOC 与老化 DOC 相比知,不同工况下新鲜 DOC 比老化 DOC 对 THC 的氧化效率更好,其中新鲜 DOC 对 THC 的氧化效率为 21.8% ~ 30.1%,老化 DOC 对 THC 的氧化效率为 10.1% ~ 15.8%。新鲜 CCRT 与老化 CCRT 相比知,不同工况下,新鲜 CCRT 比老化 CCRT 对 THC 的氧化效率更好些,其中新鲜 CCRT 对 THC 的氧化效率为 77.9% ~ 80.3%,而老化 CCRT 对 THC 的氧化效率为 33.1% ~ 40.5%。

由图2可知,老化 DOC/CCRT 对 THC 氧化效率均较新鲜 DOC/CCRT 低。因 DOC 中催化剂作用是使得排气中 THC 减少的主要原因,而老化的 DOC 对 THC 的催化效率降低^[21],可能是因为催化剂比表面积损失,引起催化结构的坍塌和贵金属的包埋,从而降低了贵金属的催化性能。其中,CCRT 老化效果更为显著。在 DOC 后耦合 CDPF 提高 THC 的氧化效率,是因为 DOC 的氧化反应提高排气温度,从而提高了后端 CDPF 催化剂对 THC 的氧化活性。而排气温度的提高,会使得 DOC 及 CDPF 长期处于高温下工作,从而影响其对 THC 的转化效率,故而排放增加明显。

2.2.3 NO、NO₂ 和 NO_x 排放

柴油机排气中 NO 占 NO_x 含量的 90% 以上。图

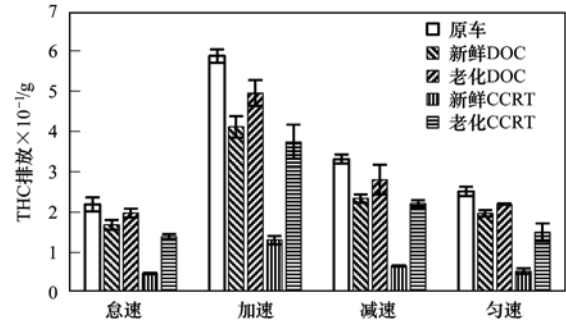


图2 不同工况下 THC 排放量

Fig. 2 THC emissions under different working conditions

3和图4为柴油公交车采用不同后处理装置,在不同工况下的 NO 和 NO₂ 排放量。

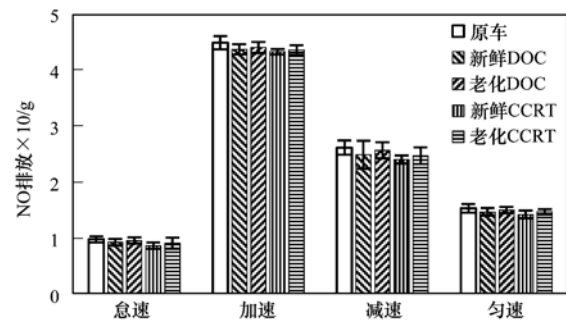
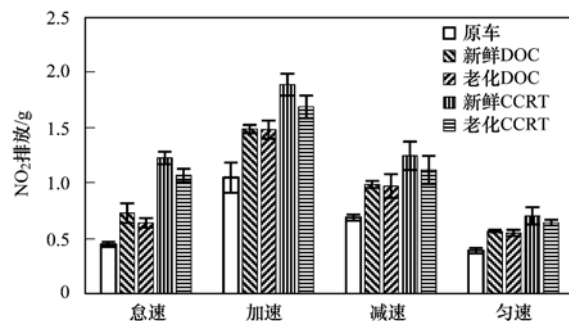


图3 不同工况下 NO 排放量

Fig. 3 NO emissions under different working conditions

图4 不同工况下 NO₂ 排放量Fig. 4 NO₂ emissions under different working conditions

由图3可以看出,在不同工况下,4种方案的后处理装置均可以不同程度地降低排放中 NO 浓度。柴油机排放中的 CO、THC 和 NO 在催化剂的活性位上存在竞争吸附关系,其中 NO 具有最低的氧化性^[9],在柴油机排气中 CO 和 THC 被消耗后,可被氧化成 NO₂。新鲜 DOC 与老化 DOC 相比知,不同工况下新鲜 DOC 比老化 DOC 对 NO 降低幅度明显,其中新鲜 DOC 对 NO 相比原车降低幅度为 2.6% ~ 5.1%,老化 DOC 对 NO 相比原车降低幅度为 1.7% ~ 2.2%。新鲜 CCRT 与老化 CCRT 相比知,不同工况下新鲜 CCRT 比老化 CCRT 对 NO 的转化效率更

好些,其中新鲜 CCRT 对 NO 相比原车降低幅度为 3.5% ~ 11.6%,而老化 CCRT 对 NO 相比原车降低幅度为 2.9% ~ 7.1%。

由图 4 可以看出,在不同工况下,4 种方案的后处理装置均可以不同程度地增加排放中 NO₂ 浓度。NO 的氧化作用生成的 NO₂,一部分以硝酸盐形式储存起来,另一部分则被释放到尾气中,进而造成 NO₂ 浓度增加。新鲜 DOC 与老化 DOC 相比知,不同工况下新鲜 DOC 作用后其 NO₂ 增加较多,其中新鲜 DOC 对 NO₂ 相比原车增加幅度为 41.8% ~ 61.8%,老化 DOC 对 NO₂ 相比原车增加幅度为 40.5% ~ 42.7%。新鲜 CCRT 与老化 CCRT 相比知,不同工况下新鲜 CCRT 作用后其 NO₂ 增加较多,其中在加速、减速及匀速工况下新鲜 CCRT 对 NO₂ 相比原车增加幅度约 80%,老化 CCRT 对 NO₂ 相比原车增加幅度约 60%,怠速工况下新鲜 CCRT 装置下对 NO₂ 相比原车增加幅度约 173%,老化 CCRT 装置下对 NO₂ 相比原车增加幅度约 137%。

新鲜 DOC 与老化 DOC、新鲜 CCRT 与老化 CCRT 均减少 NO 排放且增加 NO₂ 排放,但老化 DOC/CCRT 对其转化效率均少于新鲜 DOC/CCRT,可能原因有两个:一为老化 DOC/CCRT 中催化剂活性降低,不能为 NO 的氧化提供相应的氧化活性位;二为 DOC 老化后在还原剂 CO 或 THC 存在时会将 NO₂ 优先还原为 NO^[26]。

图 5 为柴油公交车采用不同后处理装置,在不同工况下的 NO_x 排放量。可见,不同工况下 4 种后处理装置下都会不同程度地降低 NO_x 排放,新鲜 DOC 对 NO_x 减少约 2.5%,而老化 DOC 对 NO_x 减少不足 1%,新鲜 CCRT 对 NO_x 减少为 1.6% ~ 5.7%,而老化 CCRT 对 NO_x 减少 0.8% ~ 3.7%。从以上数据可见,虽可降低 NO_x 排放,但降低幅度均较小,其降低的数值与 NO₂、NO 负净增量一致,其影响的是 NO/NO₂ 排放比例。

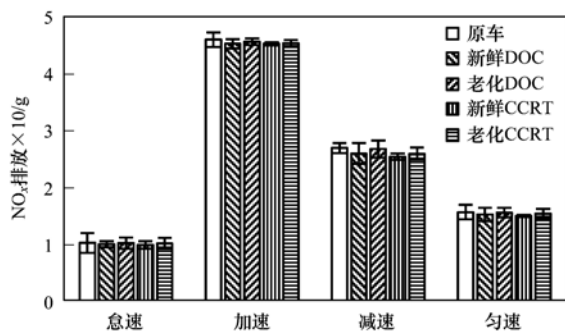


图 5 不同工况下 NO_x 排放量

Fig. 5 NO_x emissions under different working conditions

3 结论

(1) 柴油公交车采用不同后处理装置,在 CCBC 循环下的气态物单位里程排放因子相较原车,4 种后处理装置对 CO、THC 排放均有降低;对于氮氧化物排放,NO 减少,NO₂ 增多,NO_x 排放因子基本保持不变;CO₂ 排放稍有降低。其中,除老化 CCRT 对 CO 排放明显少于新鲜 CCRT 之外,新鲜 DOC/CCRT 装置对气态物排放影响均比老化 DOC/CCRT 装置的影响大。

(2) 柴油公交车采用不同后处理装置,在 CCBC 循环下不同工况下的 CO 和 THC 气态物排放:对于 CO 排放,新鲜 DOC 对其氧化效率明显优于老化 DOC;而老化 CCRT 对 CO 氧化效率为明显优于新鲜 CCRT。对于 THC 排放,新鲜 DOC/CCRT 比老化 DOC/CCRT 氧化效率高。

(3) 柴油公交车采用不同后处理装置,在 CCBC 循环下不同工况下的 NO_x 气态物排放:对于 NO_x 排放,4 种后处理装置对 NO_x 排放总量基本无影响,但会影响 NO/NO₂ 比例,新鲜 DOC/CCRT 比老化 DOC/CCRT 对 NO 减少幅度高,对 NO₂ 增加幅度高。

参考文献:

- [1] 赵航,王务林. 车用柴油机后处理技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
- [2] 王尚学,舒涌,任贵峰,等. 先进重车发动机关键技术发展分析[J]. 小型内燃机与摩托车, 2014, 43(1): 88-93.
- [3] Marmur A, Park S K, Mulholland J A, et al. Source apportionment of PM_{2.5} in the southeastern United States using: receptor and emissions-based models: Conceptual differences and implications for time-series health studies [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(14): 2533-2551.
- [4] Vouitsis E, Ntziachristos L, Pistikopoulos P, et al. An investigation on the physical, chemical and ecotoxicological characteristics of particulate matter emitted from light-duty vehicles[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(8-9): 2320-2327.
- [5] 李莉,安静宇,严茹莎. 基于细颗粒物来源追踪技术的 2013 年 12 月上海市严重污染过程中 PM_{2.5} 的源贡献分析[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3543-3553.
- [6] Kim H, Sung Y, Jung K, et al. Size distributions and number concentrations of particles from the DOC and CDPF [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2008, 22(9): 1793-1799.
- [7] 楼狄明,严嵘,胡志远,等. 基于 DOC + CDPF + SCR 技术的国 V 排放重型柴油机气态物排放特性研究[J]. 大气污染防治, 2014, 32(10): 79-84.

- [8] 楼狄明, 温雅, 谭丕强, 等. 连续再生颗粒捕集器对柴油机颗粒排放的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, **42**(8): 1238-1244.
- [9] 冯谦, 楼狄明, 计维斌, 等. DOC/DOC + CDPF 对重型柴油机气态物排放特性的影响研究[J]. 内燃机工程, 2014, **35**(4): 1-6.
- [10] 冯谦, 楼狄明, 谭丕强, 等. 催化型 DPF 对车用柴油机气态污染物的影响研究[J]. 燃料化学学报, 2014, **42**(12): 1513-1521.
- [11] Beatrice C, Iorio S D, Guido C, *et al.* Detailed characterization of particulate emission of an automotive catalyzed DPF using actual regeneration strategies [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, **39**: 45-53.
- [12] Schaefer M, Hofmann L, Girot P, *et al.* Investigation of NO_x- and PM-reduction by a combination of SCR-catalyst and diesel particulate filter for heavy-duty diesel engine [J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2009, **2**(1): 386-398.
- [13] Liu Z H, Shah A N, Ge Y S, *et al.* Effects of continuously regenerating diesel particulate filters on regulated emissions and number size distribution of particles emitted from a diesel engine [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(5): 798-807.
- [14] Herreros J M, Gill S S, Lefort I, *et al.* Enhancing the low temperature oxidation performance over a Pt and a Pt-Pd diesel oxidation catalyst [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2014, **147**: 835-841.
- [15] Azis M M, Auvray X, Olsson L, *et al.* Evaluation of H₂ effect on NO oxidation over a diesel oxidation catalyst [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, **179**: 542-550.
- [16] Auvray X, Olsson L. Stability and activity of Pd-, Pt- and Pd-Pt catalysts supported on alumina for NO oxidation [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, **168-169**: 342-352.
- [17] 楼狄明, 钱思莅, 冯谦, 等. 基于 DOC + CDPF 后处理技术的公交车实际道路颗粒物排放特性[J]. 环境工程, 2013, **31**(增刊): 348-353.
- [18] 张俊, 唐韬, 曹东晓, 等. 重型柴油机欧 VI 后处理系统构型方案试验研究[J/OL]. 内燃机工程, <http://www.cnki.net/kcms/detail/31.1255.TK.20150421.1131.006.html>.
- [19] 刘洋, 孙亮, 白书战, 等. DOC/POC/SCR 组合后处理技术在非电控柴油机排放上的应用研究[J]. 内燃机工程, 2015, **36**(1): 18-22.
- [20] 黄君. 车用催化转化器台架快速老化规范研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [21] 张德满. DOC 辅助 DPF 再生方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [22] 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.
- [23] 何喜朝. 柴油机氧化催化转化器的研制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2005.
- [24] 刘向民. 车用柴油机氧化催化器快速老化试验方法的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [25] 楼狄明, 房亮, 胡志远, 等. 柴油乘用车燃用丁醇燃料道路工况气态物排放特性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, **41**(9): 1423-1428.
- [26] Katare S R, Patterson J E, Laing P M, *et al.* Aged DOC is a net consumer of NO₂: analyses of vehicle, engine-dynamometer and reactor data[R]. SAE Technical Paper 2007-01-3984, 2007.
- [27] 韦雄, 冒晓建, 祝轲卿, 等. 基于机内技术的 DPF 再生控制策略研究[J]. 农业机械学报, 2013, **44**(11): 1-5, 11.
- [28] 方瑞梅, 何胜楠, 崔亚娟, 等. (CeO₂-ZrO₂-Al₂O₃)-(La₂O₃-Al₂O₃)复合氧化物负载的 Pd 密偶催化剂: 载体焙烧温度的影响[J]. 催化学报, 2012, **33**(6): 1014-1019.

CONTENTS

Application of a Two-stage Virtual Impactor in Measuring of PM ₁₀ and PM _{2.5} Emissions from Stationary Sources	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2003)
Hygroscopic Properties and Closure of Aerosol Chemical Composition in Mt. Huang in Summer	CHEN Hui, YANG Su-ying, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (2008)
Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Shenyang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Lu, <i>et al.</i> (2017)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Ions in Dry Deposition in the Summer and Autumn of Nanjing	QIN Yang, ZHU Bin, ZOU Jia-nan, <i>et al.</i> (2025)
Distribution Characteristics of Water-soluble Ions in Size-segregated Particulate Matters in Taiyuan	CAO Run-fang, YAN Yu-long, GUO Li-li, <i>et al.</i> (2034)
Characteristics of Ozone over Standard and Its Relationships with Meteorological Conditions in Beijing City in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (2041)
Chemical Composition of Alkanes and Organic Acids in Vehicle Exhaust	YUAN Jia-wen, LIU Gang, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (2052)
Effect of DOC/CCRT Aging on Gaseous Emission Characteristics of an In-used Diesel Engine Bus	LOU Di-ming, HE Nan, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (2059)
Studies of Dynamic Adsorption Behavior of VOCs on Biochar Modified by Ultraviolet Irradiation	LI Qiao, YONG Yi, DING Wen-chuan, <i>et al.</i> (2065)
Absorption Spectral Characteristic Dynamics of Dissolved Organic Matter (DOM) from a Typical Reservoir Lake in Inland of Three Gorges Reservoir Areas: Implications for Hg Species in Waters	JIANG Tao, LU Song, WANG Qi-lei, <i>et al.</i> (2073)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Waters of Typical Agricultural Watershed of Three Gorges Reservoir Areas	WANG Qi-lei, JIANG Tao, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2082)
High-resolution Variations of Oxygen and Hydrogen Isotopes of Precipitation and Feedback from Cave Water: An Example of Jiguan Cave, Henan	SUN Zhe, YANG Yan, ZHANG Ping, <i>et al.</i> (2093)
Spatial Response of River Water Quality to Watershed Land Use Type and Pattern Under Different Rainfall Intensities	JI Xiang, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2101)
Determination of Background Value and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Danjiangkou Reservoir	ZHAO Li, WANG Wen-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (2113)
Spatial Distribution Characteristics and Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) in Sediments and Soils from the Dishui Lake and Its River System	WANG Xue-ping, HUANG Xing, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (2121)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Water Source Areas of Guangdong and Guangxi	YANG Yu-xiang, LIU Xin-yu, ZHAN Zhi-wei, <i>et al.</i> (2131)
Responses of Nutrients and Chlorophyll a to Water Level Fluctuations in Poyang Lake	LIU Xia, LIU Bao-gui, CHEN Yu-wei, <i>et al.</i> (2141)
Influence of Periodic Temperature Disturbance on the Succession of Algal Community Structure	GONG Dan-dan, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (2149)
Effects of Bromate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella vulgaris</i>	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (2158)
Effect of Water Bloom on the Nitrogen Transformation and the Relevant Bacteria	LI Jie, ZHANG Si-fan, XIAO Lin (2164)
Effect of Carbon and Nitrogen Forms on Decomposition of Organic Matter in Sediments from Urban Polluted River	TANG Qian, LIU Bo, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (2171)
Interfacial Property of Amphiphilic Copolymer Blending PVDF UF Membrane and Protein Anti-fouling	MENG Xiao-rong, LU Bing-xue, FU Dong-hui, <i>et al.</i> (2179)
Adsorption of Hg(II) in Water by Sulfhydryl-Modified Sepiolite	XIE Jing-ru, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2187)
Adsorption Behavior of Low Concentration Phosphorus from Water onto Modified Reed Biochar	TANG Deng-yong, HUANG Yue, XU Rui-chen, HU Jie-li, <i>et al.</i> (2195)
Adsorption Characteristics of 2,4-D on UiO-66 from Wastewater	REN Tian-hao, YANG Zhi-lin, GUO Lin, <i>et al.</i> (2202)
Mechanism and Surface Fractal Characteristics for the Adsorption of <i>p</i> -nitrophenol on Water-quenched Blast Furnace Slag	WANG Zhe, HUANG Guo-he, AN Chun-jiang, <i>et al.</i> (2211)
Adsorption Characteristics for Humic Acid by Binary Systems Containing Kaolinite and Goethite	NIU Peng-ju, WEI Shi-yong, FANG Dun, <i>et al.</i> (2220)
Effects of Sulfur/sponge Iron Ratio for Deep Denitrification and Phosphorus Removal of Reclaimed Water	ZHOU Yan-qing, HAO Rui-xia, WANG Zhen, <i>et al.</i> (2229)
Effect of Element Sulfur Particle Size and Type of the Reactor on Start-up of Sulfur-based Autotrophic Denitrification Reactor	MA Hang, ZHU Qiang, ZHU Liang, <i>et al.</i> (2235)
Influencing Mechanism of Titanium Salt Coagulant Chemical Conditioning on the Physical and Chemical Properties of Activated Sludge Flocs	WANG Cai-xia, ZHANG Wei-jun, WANG Dong-sheng, <i>et al.</i> (2243)
Distribution Characteristics of Methanogens in Urban Sewer System	SUN Guang-xi, JIN Peng-kang, SONG Ji-na, <i>et al.</i> (2252)
Long-term Performance and Bacterial Community Composition Analysis of AGS-SBR Treating the Low COD/N Sewage at Low DO Concentration Condition	XIN Xin, GUAN Lei, YAO Yi-duo, <i>et al.</i> (2259)
Optimization for <i>Microthrix parvicella</i> Quantitative Processing of Fluorescence <i>in situ</i> Hybridization (FISH)	WANG Run-fang, ZHANG Hong, WANG Qin, <i>et al.</i> (2266)
Influence of Carbonization Temperature on Bacterial Community of the Biological Carbon Electrode Based on High-throughput Sequencing Technology	WU Yi-cheng, HE Guang-hua, ZHENG Yue, <i>et al.</i> (2271)
Isolation, Identification and Characteristics of a <i>Rhodospseudomonas</i> with High Ammonia-nitrogen Removal Efficiency	HUANG Xue-jiao, YANG Chong, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (2276)
Variation Characteristics of Inorganic Phosphorus in Purple Soil Profile Under Different Conservation Tillage Treatments	HAN Xiao-fei, GAO Ming, XIE De-ti, <i>et al.</i> (2284)
Effect of Different Organic Materials on Nitrogen Mineralization in Two Purple Soils	ZHANG Ming-hao, LU Ji-wen, ZHAO Xiu-lan (2291)
Impacts of Biochar and Straw Application on Soil Organic Carbon Transformation	ZHANG Ting, WANG Xu-dong, PANG Meng-wen, <i>et al.</i> (2298)
Tracing Sources of Heavy Metals in the Soil Profiles of Drylands by Multivariate Statistical Analysis and Lead Isotope	SUN Jing-wei, HU Gong-ren, YU Rui-lian, <i>et al.</i> (2304)
Landscape Patterns Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution in a Town of Southern Jiangsu	CHEN Xin, PAN Jian-jun, WANG Wen-yong, <i>et al.</i> (2313)
Assessment and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Soil of Different Functional Areas in Luoyang	LIU Ya-na, ZHU Shu-fa, WEI Xue-feng, <i>et al.</i> (2322)
Evaluation on Heavy Metal Pollution and Its Risk in Soils from Vegetable Bases of Hangzhou	GONG Meng-dan, ZHU Wei-qin, GU Yan-qing, <i>et al.</i> (2329)
Fluorescence Spectroscopic Characteristics and Cu ²⁺ -complexing Ability of Soil Dissolved Organic Matter	TIAN Yu, WANG Xue-dong, CHEN Xiao-lin, <i>et al.</i> (2338)
Effect of Stabilizer Addition on Soil Arsenic Speciation and Investigation of Its Mechanism	CHEN Zhi-liang, ZHAO Shu-hua, ZHONG Song-xiong, <i>et al.</i> (2345)
Effects of Human Gut Microbiota on Bioaccessibility of Soil Cd, Cr and Ni Using SHIME Model	YIN Nai-yi, DU Hui-li, ZHANG Zhen-nan, <i>et al.</i> (2353)
Photosynthetic Characteristics and Ozone Dose-response Relationships for Different Genotypes of Poplar	XIN Yue, GAO Feng, FENG Zhao-zhong (2359)
Effects of Pyrene on Low Molecule Weight Organic Compounds in the Root Exudates of Five Species of <i>Festuca</i>	PAN Sheng-wang, YUAN Xin, LIU Can, <i>et al.</i> (2368)
N% and S% in Leaves of Vascular Plants <i>Cinnamomum camphora</i> and <i>Pinus massoniana</i> Lamb. for Indicating the Spatial Variation of Atmospheric Nitrogen and Sulfur Deposition	XU Yu, XIAO Hua-yun, ZHENG Neng-jian, <i>et al.</i> (2376)
Temporal and Spatial Dynamics of Greenhouse Gas Emissions and Its Controlling Factors in a Coastal Saline Wetland in North Jiangsu	XU Xin-wanghao, ZOU Xin-qing, LIU Jing-ru (2383)
Preparation of Visible-light-induced g-C ₃ N ₄ /Bi ₂ S ₃ Photocatalysts for the Efficient Degradation of Methyl Orange	ZHANG Zhi-bei, LI Xiao-ming, CHEN Fei, <i>et al.</i> (2393)
Estimation of Co-benefits from Pollution Emission Reduction by Eliminating Backward Production Capacities in Hainan Province	GENG Jing, REN Bing-nan, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (2401)

《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6月15日 第37卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 6 Jun. 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	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行