

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

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

南京工业区分夏季二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邹晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛,李如梅,彭林,端允,王海京,李颖慧,白慧玲,牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳,邓黄月,张杰,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓,程思超,方舟,李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙,付晶森,郭雪峰,柴建恬,张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅,张崇森,王晓昌,吉铮,周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星,林建伟,詹艳慧,张志斌,邢云青,姜博汇,储鸣 (1936)

树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖,李大鹏,于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军,古文,刘济宁,石利利,徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波,徐辉,冯修平,李方,田晴,马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同,于德爽,李津,吴国栋,王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言,赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟,毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐,坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响

张允华, 楼狄明*, 谭丕强, 胡志远

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 基于重型转毂试验平台对比研究国 III 重型柴油车加装催化型连续再生颗粒捕集器(DOC + CDPF)前后的气态物及颗粒物排放性能, 结果表明从市区循环、公路循环到高速循环, 原车的 CO、THC、CO₂ 及颗粒质量(PM)排放因子依次减小, NO_x 及颗粒数量(PN)排放因子依次增大, 颗粒数量浓度随粒径呈双峰分布并且以聚集态颗粒排放为主; 加装 DOC + CDPF 后, 各污染物排放因子均有所下降, 且下降趋势从市区循环、公路循环到高速循环依次增大, 从整个 C-WTVC 循环来看, CO 排放因子下降 70.36%, THC 排放因子下降 72.73%, CO₂ 排放因子下降 17.00%, NO_x 排放因子下降 7.76%, PM、PN 排放因子分别下降 93.77% 和 98.91%, 颗粒数量浓度随粒径仍呈双峰分布, 但排放以核模态颗粒为主, 并且聚集态峰值对应粒径减小。

关键词: 转毂; 重型柴油车; 催化型连续再生颗粒捕集器; 气态物; 颗粒物

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1828-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201610188

Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle

ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming*, TAN Pi-qiang, HU Zhi-yuan

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

Abstract: Based on the revolving drum test bench, an experimental study was conducted in heavy-duty diesel vehicle at China Stage III with and without DOC + CDPF to investigate the effects of DOC + CDPF on the gaseous and particle emission characteristics under C-WTVC driving cycle. The results showed that from city circulation conditions to high way circulation conditions to high-speed circulation conditions, the CO, THC, CO₂ and PM emission factors of the test vehicle without DOC + CDPF decreased while NO_x and PN emission factors increased, the particle number concentration showed two peaks versus the size of the particles and accumulated particles predominated. After the test vehicle was equipped with DOC + CDPF, the emissions factors decreased and the faster the circulation speed, the greater the decreasing amplitudes of the emissions factors. Throughout the C-WTVC, the decreasing amplitudes of CO, THC, CO₂, and NO_x emission factors were 70.36%, 72.73%, 17.00% and 7.76%, the PM and PN emission factors decreased by 93.77% and 98.91% respectively. The particle number concentration still had two peaks versus the size of the particles and the nuclear mode particles predominated. Besides, the size of the accumulated particles peak diminished.

Key words: revolving drum test bench; heavy-duty diesel vehicle; DOC + CDPF; gaseous emissions; particulate emissions

重型柴油车凭借其功率大、热效率高、可靠性好的特点在交通运输领域有着广泛的应用, 然而其排量大、污染重的特点却不容忽视, 排放污染物中的 CO、THC、NO_x、CO₂ 以及 PM 给人体健康和大气环境带来了极大的危害^[1~4]。因此, 对重型柴油车排放物的治理一直以来是许多学者和工程人员共同研究的课题。尽管重型柴油车先进技术不断向前发展, 但单纯的机内净化技术仍很难满足日益严格的排放法规要求, 因此, 需要借助更为有效的机外净化技术来实现重型柴油车的排放控制^[5]。近年来, 氧化型催化转化器(diesel oxidation catalytic converter, DOC)和催化型颗粒捕集器(catalyzed diesel particulate filter, CDPF)技术的日趋成熟正在为重型柴油车的尾气净化带来新的途径, 采用 DOC/CDPF 耦合技术开发的催化型连续再生颗粒捕集器可显著降低重型柴油车的排放水平^[6]。国内外

学者基于台架试验开展了大量关于 DOC + CDPF 对重型柴油机排放特性的影响的研究^[7~20], 但涉及重型转毂的 DOC + CDPF 整车排放性能研究却鲜见报道。

本文基于重型转毂试验平台, 采用中国重型商用车瞬态循环(C-WTVC)对一辆国 III 重型柴油车加装 DOC + CDPF 前后的气态物及颗粒物排放因子进行检测, 以此分析 DOC + CDPF 对该重型柴油车污染物的减排效果, 以期为 DOC + CDPF 在重型柴油车的推广应用提供有效借鉴。

收稿日期: 2016-10-25; 修订日期: 2016-12-02

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: 张允华(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为发动机排放与控制技术, E-mail: zhangyunhua313@163.com

* 通信作者, E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

1 材料与方法

1.1 试验装置及燃料

试验车辆为国 III 重型集卡车,其基本技术参数如表 1 所示. 试验过程基于 MAHA-AIP 公司的重型底盘测功机进行,排放测试系统如图 1 所示,采样系统由日本 HORIBA 公司的 OBS-2200 车载排放测试仪和美国 TSI 公司的 EEPS 3090 颗粒粒径谱仪组成,前者对尾气中的 CO、CO₂、THC 和 NO_x 进行检测和记录,后者对尾气中颗粒数量、颗粒质量以及粒径分布进行实时测量,粒径检测范围为 5.6 ~ 560 nm,同时配合使用 Dekati DI-1000 二级稀释器,二级为固定稀释比 8.23,一级稀释比需根据每次采样的环境压力和排气压力进行插值修正,两级总的理论稀释比为 64,实际稀释比根据排气压力的不同在 66

~69 范围内波动. 试验用后处理装置为 DOC 与 CDPF 耦合设备,其具体参数见表 2.

试验所用燃料为市售国 V 标准-10 号柴油,经采样化验,硫含量为 1.4 ng·L⁻¹.

表 1 试验车辆技术参数

项目	参数
车辆型号	SX4185TM351
排放标准	国 III
整备质量/kg	7 300
行驶里程/km	133 266
最大牵引质量/kg	31 500
发动机型号	潍柴 WP10.270
发动机排量/L	9.726
汽缸数	6
发动机额定功率/kW	199
发动机最大扭矩/N·m	1 100

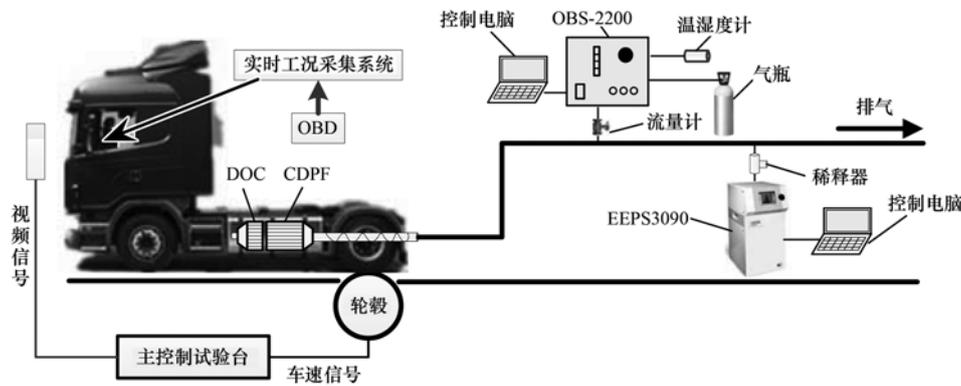


图 1 重型柴油车排放测试系统

Fig. 1 Test system of the emissions from the heavy-duty vehicle

表 2 DOC 与 CDPF 参数

Table 2 Specifications of DOC and CDPF

项目	参数	
	DOC	CDPF
载体直径/mm	340	330.2
载体长度/mm	100	304.8
孔密度/cpsi	400	200
壁厚/mm	0.06	0.35
孔隙率/%	/	55%
平均孔径/ μm	/	8 ~ 13
载体材料	FeCrAl	堇青石
催化剂组分	Pt/Pd/Rh	Pt/Pd/Rh
贵金属剂量/ $\text{g}\cdot\text{ft}^{-3}$	55	35
贵金属配比	10:1:0	10:2:1
助剂成分	Fe ₂ O ₃ + ZrO ₂ + ZSM ₅	Fe ₂ O ₃ + Ce ₂ O ₃
涂层	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O	Al ₂ O ₃ ·H ₂ O

1.2 试验方案

试验分别检测重型柴油车加装 DOC + CDPF 前后的气态物及颗粒物排放,所采用的循环为中国重型商用车瞬态循环(C-WTVC),该循环是基于世界

重型商用车瞬态循环(WTVC),并按照中国商用车特点调整了加速度形成的整车底盘测功机测试循环.为消除驾驶员操作随机性因素影响,试验时对 C-WTVC 循环重复进行 3 次取平均值,以此分析重型柴油车的排放特性.

2 结果与讨论

2.1 工况分析

图 2 所示为试验用 C-WTVC 循环,该循环共计 1 800 s,分为 3 个阶段,分别为市区循环工况(0 ~ 900 s)、公路循环工况(900 ~ 1 368 s)和高速循环工况(1 368 ~ 1 800 s).

可以看出,C-WTVC 循环工况覆盖范围更广,更能充分反映重型柴油车的运行特点.试验中,重型柴油车实际运行状态应尽量与 C-WTVC 循环一致,其速度偏差不应超过 $\pm 3 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,每次超过速度偏差的时间不应超过 2 s,累计不应超过 10 s.图 2 显

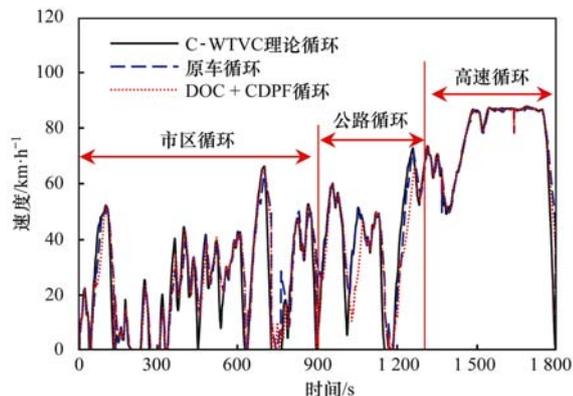


图2 试验循环

Fig. 2 Test cycle

示原车循环和 DOC + CDPF 循环与 C-WTVC 理论循环具有较好的一致性. 图3所示为各循环工况的平均速度, 其中市区循环的平均速度为 $22.92 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 公路循环的平均速度为 $43.75 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, 高速循环的平均速度为 $75.77 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$.

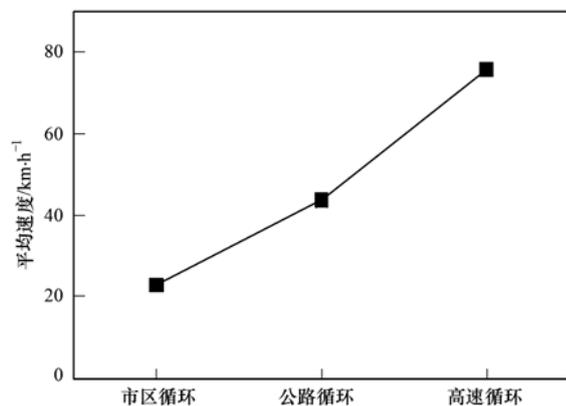


图3 各循环平均速度

Fig. 3 Average speed of each cycle

图4所示为各循环工况的排气温度范围. 其中, 试验车辆在市区循环工况下的排气温度范围为 $110.9 \sim 305.6^\circ\text{C}$, 平均排气温度为 201.5°C ; 公路循环工况下的排气温度范围为 $186.1 \sim 291.2^\circ\text{C}$, 平均排气温度为 222.3°C ; 高速循环工况下的排气温度范围为 $196.9 \sim 319.0^\circ\text{C}$, 平均排气温度为 269.9°C .

2.2 气态物排放分析

图5所示为不同循环下 CO 排放因子及使用 DOC + CDPF 后的对应减排率, 可以看出, 不同运行工况下, CO 的排放因子差异性较大, 其中, 市区循环的 CO 排放因子最大, 公路循环次之, 高速循环最小. 加装 DOC + CDPF 后, CO 排放因子显著下降, 并且降幅从市区循环、公路循环到高速循环依次增大, 分别为 53.36% 、 65.68% 、 80.49% . 从整个循环来看, DOC + CDPF 的使用可使 CO 排放因子下降

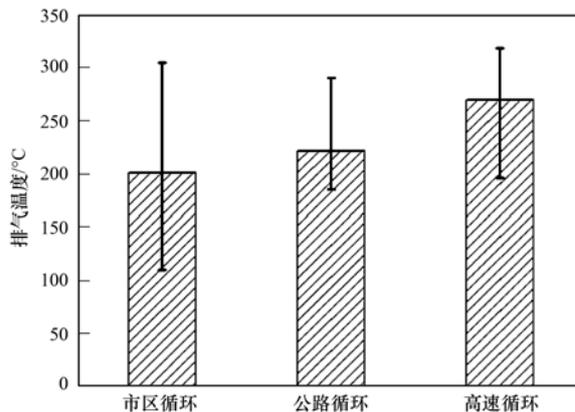


图4 各循环工况排气温度范围

Fig. 4 Exhaust temperature of each cycle

70.36% . 究其原因, 公路循环平均速度最低(如图3), 且发动机处于低负荷状态运行, 该阶段发动机工作温度低, 喷油速率慢, 喷雾质量差, 燃烧不完全, 因此, CO 排放因子较高, 而高速循环阶段, 发动机负荷率较大, 缸内温度高, 有利于燃料的充分燃烧, 加之单位时间行驶里程大, 所以, CO 排放因子最低. 而 DOC + CDPF 之所以能够显著降低 CO 排放因子是因为前端的 DOC 在贵金属铂 (Pt)、钯 (Pd) 的催化作用下能够对 CO 起到了很好的氧化作用, 另一方面, 涂敷了贵金属 Pt、Pd 的 CDPF 也具备了 CO 催化反应的活性位, 能够进一步起到氧化作用^[21], 而高速循环阶段, 排气温度高, 催化剂的活性最强, 对 CO 氧化更完全, 因此, CO 排放因子降幅最大.

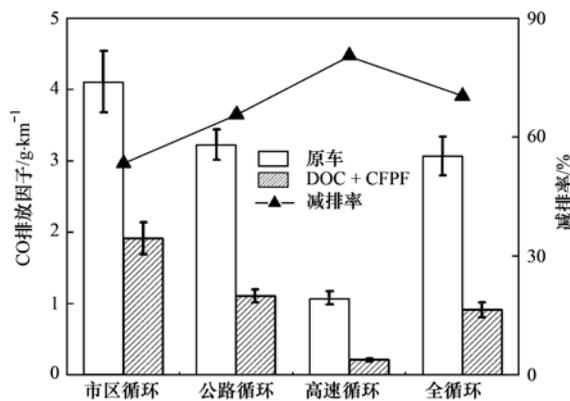


图5 CO 排放因子及减排率

Fig. 5 CO emission factor and its decreasing amplitude

图6所示为不同循环下 THC 排放因子及使用 DOC + CDPF 后的对应减排率. 可以看出, THC 排放因子从市区循环、公路循环到高速循环依次减小, 主要是因为市区循环发动机负荷低, 循环供油量减少, 空燃比增大, 混合气过稀且缸内局部温度过低, 造成燃烧恶化, THC 排放因子较高, 而公路循环和高速循环, 发动机负荷逐步增大, 缸内温度逐步升

高,燃料燃烧更为完全,THC 排放因子逐步降低. 加装 DOC + CDPF 后,THC 排放因子显著下降,并且降幅会因运行工况的不同有所差异,市区循环时 THC 排放因子下降 49.33%,公路循环时 THC 排放因子下降 70.95%,高速循环时 THC 排放因子下降 75.41%,从整个循环来看,DOC + CDPF 的使用可使 THC 排放因子下降 72.73%. 主要原因是 DOC 和 CDPF 均涂敷了贵金属 Pt、Pd,其中 Pt 对饱和碳氢化合物的氧化活性较高,Pd 对不饱和碳氢化合物的氧化活性较高,因此,在 Pt、Pd 催化作用下,THC 排放因子显著下降^[22],而从市区循环到公路循环,再到高速循环,发动机负荷逐步增大,排气温度逐步升高,Pt、Pd 的催化活性逐步增强,更多的 THC 被氧化成 CO₂ 和 H₂O,因此,THC 排放因子的降幅逐步增大.

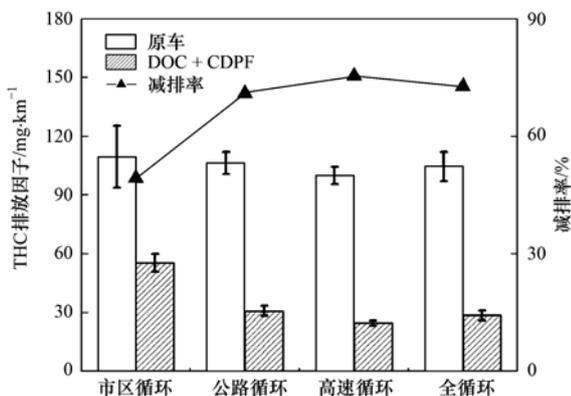


图 6 THC 排放因子及减排率

Fig. 6 THC emission factor and its decreasing amplitude

图 7 所示为不同循环下 CO₂ 排放因子及使用 DOC + CDPF 后的对应减排率. 可见,柴油车的 CO₂ 排放因子从市区循环、公路循环到高速循环依次降低,这主要与各阶段的车速相关,市区循环虽然负荷低、发动机喷油量少,但车速低,单位时间行驶里程少,造成 CO₂ 排放因子高,而高速循环阶段,虽然 CO₂ 排放率会因燃油喷射量增多而升高,但由于车速增大的幅度更大,反而导致单位里程内的 CO₂ 排放减少,即 CO₂ 排放因子下降. 加装 DOC + CDPF 后,CO₂ 排放因子有所下降,降幅在市区循环、公路循环和高速循环阶段分别为 8.26%、18.23%、22.71%,从整个循环来看,CO₂ 排放因子下降约 17.00%. 这可能是因为长时间的运行 (> 13 万 km) 使该重型柴油车的消音器积碳严重,从而引起排气背压的上升,而加装 DOC + CDPF 后,原有的消音器会被替换掉,从而使排气背压下降,在一定程度上会带来油耗的降低,CO₂ 排放因子随之降低.

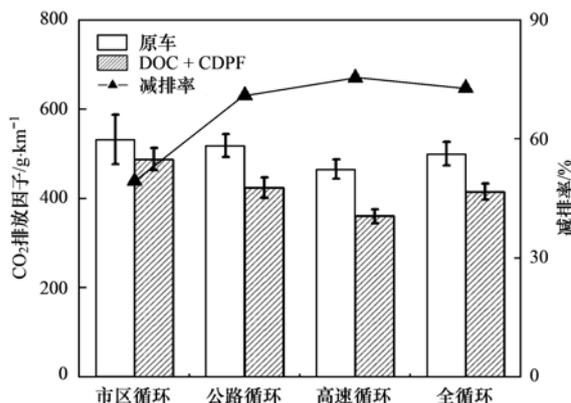
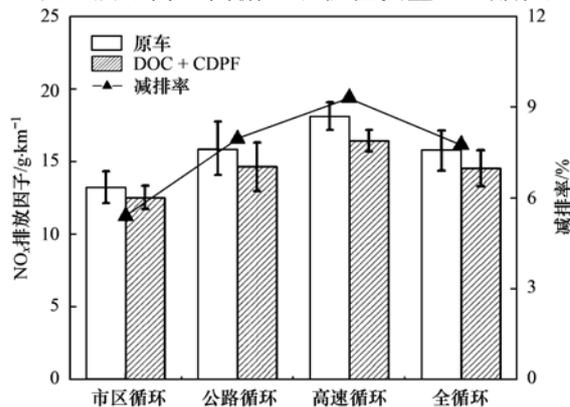
图 7 CO₂ 排放因子及减排率Fig. 7 CO₂ emission factor and its decreasing amplitude

图 8 所示为不同循环下 NO_x 排放因子及使用 DOC + CDPF 后的对应减排率,可以看出,从市区循环、公路循环到高速循环,NO_x 排放因子依次升高,主要是因为随着发动机负荷的增大,缸内工作温度不断升高,而高温会促进 NO_x 的生成. 加装 DOC + CDPF 后,NO_x 排放因子会有所下降,降幅在市区循环、公路循环、高速循环分别为 5.41%、7.96%、9.31%,从全循环来看,DOC + CDPF 的使用可使 NO_x 的排放因子减小 7.76%. 究其原因,柴油机 NO_x 排放主要以 NO 和 NO₂ 为主,其中,NO 占比超过 90%,而经过 DOC 后,NO 会被氧化使得 NO₂ 比例升高,NO₂ 流经 CDPF 时,在贵金属催化剂作用下分子键发生断裂,产生的 O 与 CDPF 捕集到的碳颗粒发生氧化反应生成 CO₂,而自身被还原^[23];另一方面,一部分 NO_x 被催化剂吸附并储存为硝酸盐或亚硝酸盐. 整体上会带来 NO_x 一定量的减少. 而随着车速和负荷的增大,发动机排气温度升高,以上作用会有所加强,NO_x 的降幅会有所增大.

2.3 颗粒物排放分析

图 9 所示为不同循环下颗粒质量 PM 排放因子

图 8 NO_x 排放因子及减排率Fig. 8 NO_x emission factor and its decreasing amplitude

及使用 DOC + CDPF 后对应减排率. 可以看出,从市区循环到公路循环再到高速循环,该重型柴油车的 PM 排放因子依次减小,加装 DOC + CDPF 后,PM 排放因子降幅依次增大,分别为 92.89%、93.95%、94.28%,从整个循环来看,PM 排放因子下降 93.77%. 主要是因为市区循环发动机处于低负荷工况较多,缸内温度和排气温度整体偏低,有利于挥发性物质的凝结,同时,低温条件限制了颗粒物的氧化过程,因此,PM 排放因子较大. 而随着循环速度的增大,发动机负荷增大,缸内温度升高,有利于颗粒物的氧化,较容易产生相对细小的颗粒,大颗粒排放较少,因此 PM 排放因子较小. 而 CDPF 壁流式结构能够高效捕集颗粒排放,并在 Pt、Pd 催化作用下对其进行氧化,且速度越大,排气温度越高,Pt、Pd 的催化活性越强^[24],对颗粒的氧化作用越显著,PM 排放因子降幅越大.

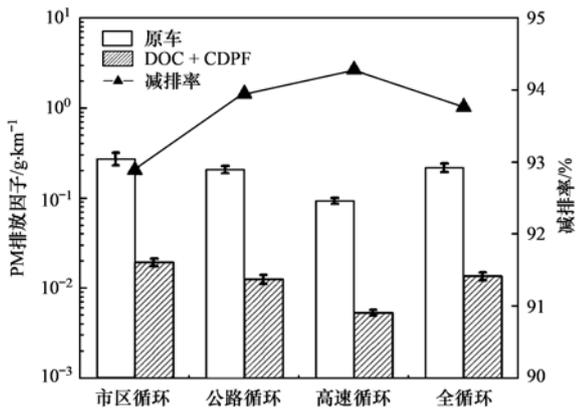


图 9 PM 排放因子及减排率

Fig. 9 PM emission factor and its decreasing amplitude

图 10 所示为不同循环下颗粒质量 PN 排放因子及使用 DOC + CDPF 后的对应减排率. 可以看出,从市区循环、公路循环再到高速循环,该重型柴油车的 PN 排放因子依次增大,主要是因为市区循环发动机低负荷工况较多,缸内温度低,燃烧恶化,聚集态颗粒排放增多,而随着循环速度的增大,缸内温度升高,燃烧状况明显改善,排放则以核模态颗粒为主,因此,PN 排放因子增大. 加装 DOC + CDPF 后,PN 排放因子显著下降,市区循环、公路循环及高速循环分别下降 98.42%、98.82%、99.00%,整个循环,PN 排放因子下降 98.91%,主要是因为前端的 DOC 氧化了颗粒物中的可溶性有机成分 (SOF),后端的 CDPF 进一步捕集并氧化排气中的颗粒物^[25],并且排气温度越高,对颗粒物的氧化作用越显著,PN 降幅越大.

图 11 所示为不同循环条件下颗粒数量浓度粒径

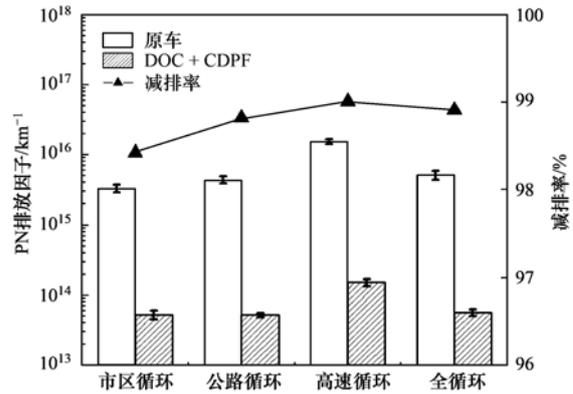


图 10 PN 排放因子及减排率

Fig. 10 PN emission factor and its decreasing amplitude

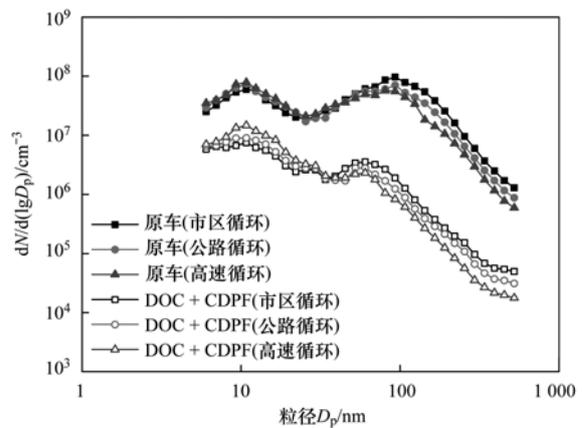


图 11 颗粒数量浓度粒径分布

Fig. 11 PN concentration distributions versus particle size

径分布,可以看出,原车的颗粒数量浓度随粒径呈双峰分布,分别为粒径在 10 nm 左右的核模态颗粒物峰值和粒径在 90 nm 左右的聚集态颗粒物峰值,并且聚集态峰值大于核模态峰值. 从核模态峰值来看,高速循环时最大,市区循环时最小,而从聚集态峰值来看,趋势正好相反,高速循环时最小,市区循环时最大. 主要是因为市区循环时发动机的平均工作温度低于公路循环和高速循环,而缸内温度越低,燃烧状况越差,排放中聚集态颗粒越多,核模态颗粒越少. 加装 DOC + CDPF 后,颗粒数量浓度随粒径仍呈双峰分布,分别是 10 nm 左右的核模态颗粒物峰值和 60 nm 左右的聚集态颗粒物峰值,并且聚集态颗粒物峰值显著下降,已低于核模态颗粒物峰值. 究其原因,主要是因为 CDPF 对聚集态颗粒物的捕集和氧化作用更为显著,另一方面,液体颗粒形成了一种非常重要的柴油机颗粒,造成柴油机的 PM 数量排放,如果液体颗粒 (包括硫酸盐和 SOF) 并不是在 CDPF 之前,而是在颗粒捕集器下游,甚至颗粒采样器附近形成,将使得 DPF 对这种纳米级颗粒和颗粒数量的降低功能降低. 而且这些碳烟颗粒将在采

样系统中冷凝成具有海绵吸附功能的物质,因此,CDPF 通常会由于上述颗粒物形成晶核而使得核模态颗粒数量多于聚集态颗粒数量。

3 结论

(1)从市区循环、公路循环到高速循环,该重型柴油车的 CO、THC、CO₂、PM 排放因子依次减小,NO_x 和 PN 排放因子依次增大。颗粒数量浓度随粒径呈双峰分布,分别是 10 nm 左右的核模态峰值和 90 nm 左右的聚集态峰值,并且聚集态峰值大于核模态峰值。

(2)加装 DOC + CDPF 后,该重型柴油车的气态物及颗粒物排放因子均有所减小,降幅从市区循环到公路循环再到高速循环依次增大。颗粒数量浓度随粒径仍呈双峰分布,但核模态峰值大于聚集态峰值,并且聚集态峰值对应粒径前移至 60 nm 附近。

(3)从整个 C-WTVC 循环来看,CO、THC、PM 以及 PN 排放因子显著下降,降幅分别达 70.36%、72.73%、93.77%、98.91%;CO₂ 和 NO_x 排放因子略有下降,降幅分别为 17.00% 和 7.76%。

参考文献:

- [1] 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.
Li L, An J Y, Yan R S. Source contribution analysis of the fine particles in shanghai during a heavy haze episode in December, 2013 based on the particulate matter source apportionment technology[J]. Environmental Science, 2015, **36**(10): 3543-3553.
- [2] 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.
- [3] 郭佳栋,葛蕴珊,谭建伟,等. 国IV公交车实际道路排放特征[J]. 环境科学研究, 2014, **27**(5): 477-483.
Guo J D, Ge Y S, Tan J W, *et al.* Real-world emission characteristics of china IV buses[J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27**(5): 477-483.
- [4] Kittelson D B, Watts W F, Johnson, J P, *et al.* On-road evaluation of two Diesel exhaust aftertreatment devices [J]. Journal of Aerosol Science, 2006, **37**(9): 1140-1151.
- [5] Bergmann M, Kirchner U, Vogt R, *et al.* On-road and laboratory investigation of low-level PM emissions of a modern diesel particulate filter equipped diesel passenger car[J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(11): 1908-1916.
- [6] 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.
Feng Q, Lou D M, Ji W B, *et al.* Effects of DOC and DOC + CDPF on gaseous emissions from a heavy-duty diesel engine[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, **35**(4): 1-6.
- [7] 郭林山,郭齐敏,孙平,等. DOC/POC 耦合对柴油机燃用欧III/欧IV柴油尾气排放的影响研究[J]. 现代车用动力, 2013, (2): 1-3, 44.
Guo L S, Wu Q M, Sun P, *et al.* Influence of integrated DOC and POC on exhaust emissions of diesel engine fuelled with euro-III/IV fuels [J]. Modern Vehicle Power, 2013, (2): 1-3, 44.
- [8] 方奕栋,楼狄明,胡志远,等. 连续再生颗粒捕集器对生物柴油发动机颗粒及 NO_x 排放的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, **49**(10): 1836-1841.
Fang Y D, Lou D M, Hu Z Y, *et al.* Effects of continuously regenerating particulate filter on PM and NO_x emission from bio-diesel engine [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, **49**(10): 1836-1841.
- [9] 葛蕴珊,赵伟,王军方,等. DOC 对柴油机排放特性影响的研究[J]. 北京理工大学学报, 2012, **32**(5): 460-464.
Ge Y S, Zhao W, Wang J F, *et al.* Effects of diesel oxidation catalyst on emission from diesel [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, **32**(5): 460-464.
- [10] 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. 31-36.
He X C. The research of diesel catalytic oxidation converter [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005. 31-36.
- [11] 楼狄明,林浩强,谭丕强,等. 氧化催化转化器对柴油机颗粒物排放特性的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, **43**(6): 888-893.
Lou D M, Lin H Q, Tan P Q, *et al.* Effects of diesel oxidation catalyst technology on characteristics of particle from a diesel engine [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, **43**(6): 888-893.
- [12] 马志豪,李磊,钞莹,等. 用 HRTEM 研究 DOC 和 DPF 对柴油机颗粒排放的影响[J]. 内燃机工程, 2014, **35**(2): 54-58.
Ma Z H, Li L, Chao Y, *et al.* Effects of DOC and DPF on particulate emissions of diesel engine using HRTEM [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2014, **35**(2): 54-58.
- [13] 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.
Feng Q, Lou D M, Tan P Q, *et al.* Effect of catalyzed diesel particulate filter on gaseous emissions from automobile diesel engine [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2014, **42**(12): 1513-1521.
- [14] Rothe D, Knauer M, Emmerling G, *et al.* Emissions during active regeneration of a diesel particulate filter on a heavy duty diesel engine: stationary tests [J]. Journal of Aerosol Science, 2015, **90**: 14-25
- [15] Beatrice C, Iorio S D, Guido C, *et al.* Detailed characterization of particulate emissions of an automotive catalyzed DPF using actual regeneration strategies [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, **39**: 45-53.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] Caroca J C, Millo F, Vezza D, *et al.* Detailed investigation on soot particle size distribution during DPF regeneration, using standard and bio-diesel fuels [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, **50**(5): 2650-2658.
- [21] Han M, Assanis D, Bohac S. Characterization of heat-up diesel oxidation catalysts through gas flow reactor and *in-situ* engine testing [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2008, **222**(9): 1705-1716.
- [22] 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.
- [23] Theis J R. An assessment of Pt and Pd model catalysts for low temperature NO_x adsorption [J]. *Catalysis Today*, 2016, **267**: 93-109.
- [24] 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.
- Lou D M, Wen Y, Tan P Q, *et al.* Effects of continuously regenerating diesel particulate filter on characteristics of particle size distribution from a diesel engine [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2014, **42**(8): 1238-1244.
- [25] 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. 214-237.
- Zhao H, Wang W L. *After-treatment technology for vehicle diesel* [M]. Beijing: Science and Technology of China Press, 2010. 214-237.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhe, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)