

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

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

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄蕙,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌铜复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
铜-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和铜、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859)	
《环境科学》征订启事(3952)	
信息(3644, 3688, 3768)	

贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响

谭丕强, 仲益梅, 郑源飞, 楼狄明, 胡志远

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 为研究 CDPF(催化型颗粒捕集器)贵金属和助剂负载量对柴油公交车颗粒排放特性的影响,对一台满足国Ⅲ排放法规的柴油公交车进行改造,加装 4 种不同后处理装置,并进行道路实车排放试验。结果表明,CDPF 贵金属负载量越高,排气颗粒数量浓度越低,在中高车速下尤为明显($60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速下贵金属负载量增加 $5 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$,颗粒排放总数降低 70.8%)。贵金属负载量对排放颗粒物中核态颗粒的影响大于聚集态颗粒。在保证对排气颗粒的净化效果的前提下,在 CDPF 中添加适量镧系助剂,可使贵金属和助剂负载量大幅降低。不同后处理方案对加速工况不敏感,净化效果差异较小,但减速工况,各方案对颗粒的净化效果差异较大。

关键词: 颗粒排放; 柴油机; 催化型颗粒捕集器(CDPF); 贵金属; 助剂; 负载量

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3628-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201701055

Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus

TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, LOU Di-ming, HU Zhi-yuan

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

Abstract: This study investigates the influence of noble metal capacity and promoter capacity in diesel oxidation catalysts (DOC) and catalyzed diesel particulate filters (CDPF) on particulate matter (PM) emissions. Four types of exhaust aftertreatments were applied to a diesel bus engine that meets the national III emissions regulations. On-board tests were conducted respectively. PM emissions from the engine were strongly influenced by noble metal capacity in DOC and CDPF, especially at high speeds (the total number of particles increased by 70.8% when the noble metal capacity decreased by $5 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ at $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$). The higher the noble metal capacity was, the lower the PM emissions became, especially for PM in nuclei mode. The lanthanide material contributed to reducing PM emissions significantly. The content of precious metals could be reduced by 25% with proper lanthanide material, while the treatment effect of exhaust particles was guaranteed. In summary, aftertreatments are not sensitive to accelerating conditions, but the purification efficiency is obviously different under decontamination conditions.

Key words: particulate matter emissions; diesel engine; catalyzed diesel particulate filters (CDPF); noble metal; promoter; capacity

柴油机由于热效率高,动力性好而得到广泛的应用,但是柴油机颗粒排放问题较为严重^[1,2],柴油机排出的颗粒物悬浮在空气中,对大气环境造成污染^[3,4]。研究表明,柴油机排放颗粒物会对人体健康造成威胁,容易引起呼吸道疾病^[5~7]。柴油机加装排气后处理装置是解决这一问题的重要手段^[8,9]。其中,柴油机氧化催化器 DOC (diesel oxidation catalyst) 和催化型颗粒捕集器 CDPF (catalyzed diesel particulate filter) 后处理技术^[10]是当今研究热点。

CDPF 是在颗粒捕集器 DPF^[11] (diesel particulate filter) 载体内部涂覆催化剂,使其能够降低 soot 催化氧化燃烧的温度,实现颗粒物捕集器的被动再生过程^[12]。有研究表明^[13],柴油机安装 DOC + CDPF 后,排气颗粒总数量下降明显,其中 60

~200nm 粒径范围的颗粒数量浓度降幅更为显著。燃料硫含量、空燃比、燃油喷射压力和发动机转速都会影响安装 DOC + CDPF 的柴油机的颗粒数量粒径分布^[14~16]。除此以外,后处理催化剂涂层的配方也是影响后处理装置催化净化效率的重要因素^[17,18]。文献^[19]发现,CDPF 催化剂配方中贵金属负载量较高时,颗粒净化效果较好;催化剂配方中钼元素含量较高对核态颗粒物的净化效果较明显。杨春生等^[20]的研究表明,氧化铈和氧化镧催化作用机制主要是提高活性涂层的催化活性,自动调节空气燃料比和助催化作用,并能提高载体的热稳

收稿日期: 2017-01-08; 修订日期: 2017-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(5096062); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2012AA111717)

作者简介: 谭丕强(1974~),男,博士,教授,主要研究方向为汽车排放控制和清洁燃料, E-mail: tpq2000@163.com

定性和机械强度等性能. 其中影响氧化铈和氧化镧催化性能的因素主要为共助作用、添加方法以及 ZrO_2 、 CuO 、 AgO 等其他氧化物的协同作用. Vernikovskaya 等^[21]建立了使用不同催化剂($\text{CeO}_2/\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Pt-CeO}_2/\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe-Mn-K-O}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$)的 CDPF 中尾气颗粒与氧化物反应的化学反应动力学模型. Mizutani 等^[22]研究出一种以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为催化剂的 CDPF,这种 CDPF 对颗粒的氧化效果比传统的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为催化剂的 CDPF 好,甚至在其热力学老化之后也是如此.

目前国内对不同配方(贵金属及助剂)CDPF 的研究一般都是基于柴油机台架或整车转鼓试验^[23,24],对于实际道路的车载试验研究较少. 催化剂配方对其颗粒净化效果和催化剂成本有很大影响,因此研究 CDPF 中贵金属负载量对发动机颗粒排放的影响很有必要. 为此,本文对一台满足国Ⅲ排放标准的柴油公交车进行改造,研究了加装 4 种不同 DOC + CDPF 后处理装置的柴油公交车的颗粒数量及粒径分布规律.

1 材料与方法

1.1 试验车辆及测试设备

试验选用一台满足国Ⅲ标准的柴油公交车对其进行改造并进行相关研究,试验用燃料为国Ⅴ纯柴油. 表 1 为公交车的具体参数.

试验采用的便携式排放测试系统(portable emission measurement system, PEMS)由 TSI EEPS-3090 颗粒物粒径谱仪、GPS 车速仪、排气流量计等组成,试验系统示意如图 1 所示,用后处理装置取代原来的消音器. 其中颗粒排放测试设备 TSIEEPS-

表 1 试验用公交车基本参数

Table 1 Specifications of the test bus	
项目	参数
车型	申沃 SWB6100V5
发动机	道依茨 D7E240
排量/L	7.1
功率/kW	177(2 300 r·min ⁻¹)
转矩/N·m·	920(1 200 ~ 1 700 r·min ⁻¹)
总载荷/kg	500
整备质量/kg	11 000
最高车速/km·h ⁻¹	85

3090 颗粒物粒径谱仪可快速测量颗粒物数量粒径分布,可测量瞬态工况下排气颗粒物的动力学行为. 仪器颗粒直径检测范围为 5.6 ~ 560 nm,每秒内提供 10 个粒径分布图谱.

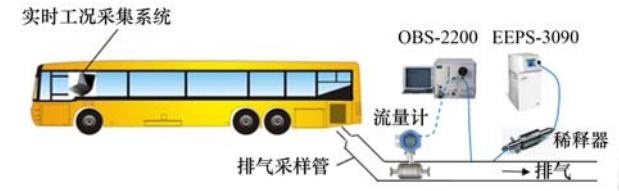


图 1 便携式排放测试系统 (PEMS) 示意

Fig. 1 Schematic of the portable emission measurement system

1.2 试验后处理装置

试验选用了 4 种 DOC + CDPF 后处理方案,分别为方案 A、方案 B、方案 C、方案 D. DOC 长度有两种,方案 A 和 B 为 80 mm,方案 C 和 D 为 100 mm. CDPF 的内径为 285.8 mm,长度为 304.8 mm,载体材料为堇青石,催化剂组分为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$,贵金属比例 Pt: Pd: Rh 为 10: 2: 1,CDPF 有 4 种不同贵金属和助剂负载量,方案参数如表 2 所示,对比参数如图 2 所示.

表 2 试验用 CDPF 后处理方案参数

Table 2 Specifications of CDPF				
方案	A	B	C	D
负载量/ $\text{g}\cdot\text{ft}^{-3}$	25	20	15	10
助剂成分	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{La}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Ce}_2\text{O}_3 + \text{La}_2\text{O}_3$
助剂负载量/ $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$	20	20	15	15

1.3 试验方案

试验载荷为 4 名试验操作人员和驾驶员总质量为 300 kg,所有试验设备总质量为 200 kg,总载荷为 500 kg. 试验选取如图 2 所示的试验路线,该路线车辆较少,路面状况良好,对试验干扰较少. 为保证试验方案的可靠性,每次试验均在同一条路线上进行,驾驶员也为同一人,测试加装不同 CDPF 装置对车辆的颗粒的影响.

(1)稳态试验 选取国帆路与淞沪路交汇处至何家湾路与国权北路交汇处一段为稳态试验路段,总长约 2.6 km,红绿灯 3 处,最长一段无灯距离为 890 m. 为消除驾驶员操作随机性因素,每组重复进行 3 次,每次试验要求车速稳定在 0、10、15、20、25、30、40、50、60 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$,每次稳定时间约 1 min,试验结果取平均值.

(2)瞬态试验 选取淞沪路、国帆路、江湾城



图 2 公交车试验路线

Fig. 2 Test route of the bus

路、殷行路组成环形路线,总长约 4 km. 瞬态试验时,公交车按试验路线运行一圈.

2 结果与讨论

2.1 道路实测颗粒数量排放

图 3 为公交车实际道路运行时,随机选取一段公交车排气流量和行驶车速随时间的变化关系. 可以看出,公交车排气流量与车速有很好的的一致性和跟随性,表明车速直接影响排气流量. 对道路运行而言,公交车排气流量直接影响其单位里程的颗粒排放量. 因此,车速和颗粒排放量之间存在潜在相关性.

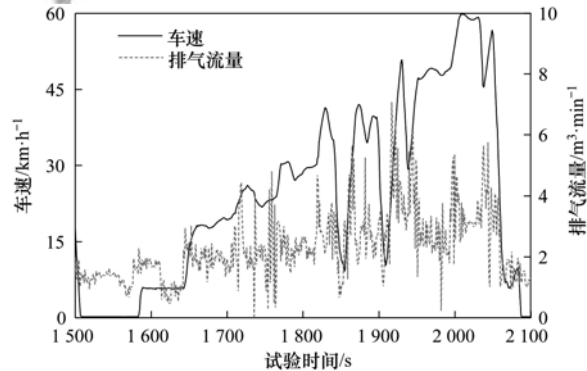


图 3 车速和排气流量相关性

Fig. 3 Relationship of speed and exhaust flow of the bus

图 4 为公交车加装方案 A 后处理装置的颗粒数量道路实测瞬态排放. 从中可以看出公交车瞬态颗粒排放和车速的变化有很好的的一致性和跟随性.

2.2 稳态工况下排气颗粒数量及粒径分布特性

为更直观地研究不同后处理下颗粒总数与车速

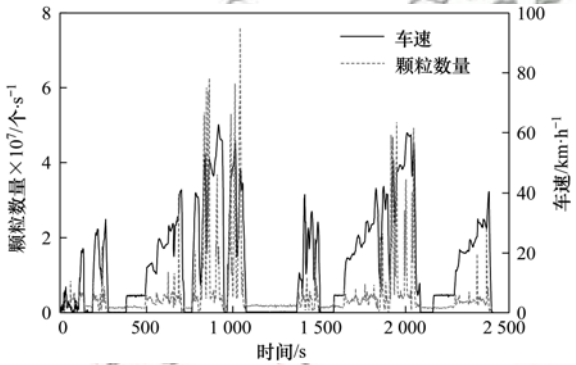


图 4 车速和颗粒数量相关性

Fig. 4 Relationship of speed of the bus and particle numbers

的关系,试验筛选与选车速的误差不超过 $2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,加速度绝对值不超过 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 的数据点,计算不同车速下公交车使用不同后处理方案的排气颗粒总数量, None 表示原车排放,结果如图 5 所示. 从中可见,随着车速的增加,尾气中颗粒排放数量逐渐增加. 车速的增加经常表现为发动机转速的上升,增加了单位时间内发动机做功循环的次数,喷油次数增加,单位时间内的喷油量增加;此外,车速增加,有时也表现为发动机的转矩增加,从而需要增大单个循环的喷油量,也增加了单位时间的喷油量^[25],所以随着车速的增加,尾气中颗粒数量排放逐渐增加.

和原车排放相比,4 种方案均能够在不同车速下降低颗粒排放的总数量,净化效果优劣依次为:方案 A、方案 C、方案 B、方案 D. 方案 A 和方案 B,方案 C 和方案 D 除贵金属负载量降低 $5 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$ 外,其他参数均相同,可见贵金属负载量越大,净化效果越

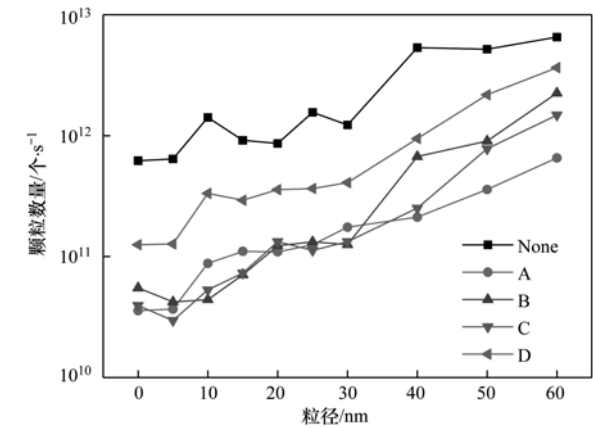


图5 不同车速下颗粒排放总数量

Fig. 5 Total particle number under different speeds

好,颗粒总数量越少,在中高转速尤为明显(60 km·h⁻¹下贵金属负载量增加 5 g·ft⁻³,颗粒排放总数降低 70.8%)。贵金属负载量的增加,催化剂上的活性位增加,使得催化效率提高。

方案 C 和方案 B 相比,方案 C 的贵金属负载量和助剂的负载量分别降低 5 g·ft⁻³ 和 5 g·L⁻¹,但是其对颗粒的净化效果却高于方案 B,这是由于镧系作为贵金属的助催化剂,能够在高温下保持贵金属 Pt 和 Rh 的高分散,以及阻止 γ -Al₂O₃ 的相变而保持高的比表面积,并且 La 能在很大程度上阻止 Rh 和 γ -Al₂O₃ 之间的相互作用从而增强催化剂的活性。结果表明,镧系助剂能够大幅提高后处理系统的净化效果,为降低后处理装置成本提供思路。

为研究不同车速下不同后处理方案的颗粒排放的粒径分布情况,将加速度绝对值小于 0.1 m·s⁻² 的数据点看做稳态工况,将公交车行驶速度分为怠速(0 km·h⁻¹)、低速区域(0~20 km·h⁻¹)、中速区域(20~40 km·h⁻¹)、高速区域(大于 40 km·h⁻¹),将颗粒粒径范围在 30 nm 以内的划分为核态颗粒,粒径大于 30 nm 的划分为聚集态颗粒^[26]。

图 6 为怠速工况原车和 4 种处理方案下颗粒数量粒径分布。从中可以看出,怠速工况下,原车、方案 A、方案 B、方案 C 和方案 D 的排气颗粒数量的粒径分布均呈现较为明显的双峰对数分布。

方案 A 贵金属负载量最大,其净化效率最高,与原车排放相比,降低了 95.8% 的核态颗粒和 88.72% 的聚集态颗粒。虽然贵金属负载量减少,但由于镧系助剂的加入,方案 C、D 对核态颗粒数量浓度净化效率并没有降低,分别为 92.17% 和 95.33%。方案 C 的 CDPF 中贵金属负载量比方案 D 高,所以其被动再生性能较好,对聚集态颗粒的捕集

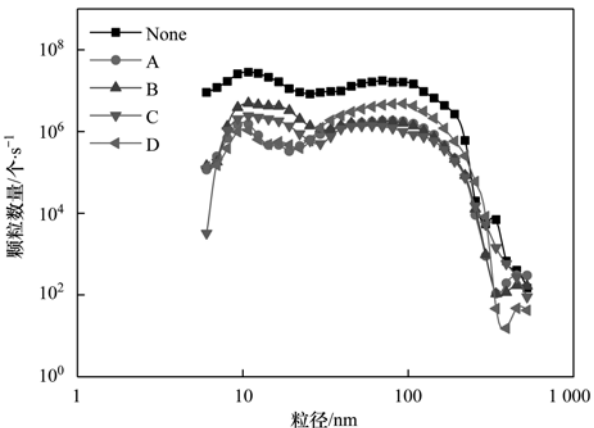


图6 怠速工况下颗粒数量粒径分布

Fig. 6 Particle size distribution under idling condition

效果较好。怠速工况,4 种后处理方案对核态颗粒和聚集态颗粒的净化效率如表 3 所示。

图 7 为低速稳态工况下,原车和 4 种后处理方案下颗粒数量粒径分布,均呈现明显的双峰粒径分布,峰值区间 10 nm 和 100 nm 附近。

表3 怠速工况下4种方案净化效率/%

Table 3 Efficiency of five different aftertreatments under idling speed/%

项目	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
核态颗粒净化效率	95.83	83.85	92.17	95.33
聚集态颗粒净化效率	88.72	89.21	91.89	73.24

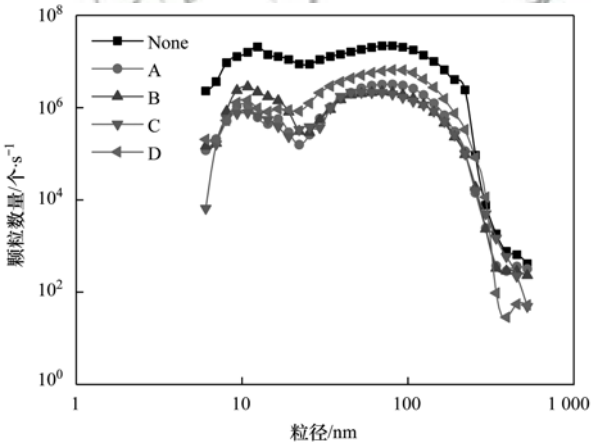


图7 低速工况颗粒数量粒径分布

Fig. 7 Particle size distribution at low speeds

由图 7 和表 4 可以看出,低速稳态工况下,方案 A、C 对核态颗粒数量浓度的净化效率较高,而方案 B、C 对聚集态净化效率较高,综合而言,方案 C 净化效果最好。方案 C 镧系助剂的加入,能够提高贵金属催化剂的活性,从而降低 CDPF 主动再生的温度,提高后处理装置的净化效率。与怠速工况相比,低速工况下聚集态颗粒峰值区域向粒

径较小的方向移动,低速工况相对怠速工况,缸内燃烧状态改善,大颗粒碳烟减少,积聚态颗粒数量排放减少.

表 4 低速工况下 4 种方案净化效率/%
Table 4 Efficiency of five different aftertreatments under low speed/%

项目	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
核态颗粒净化效率	95.46	89.62	96.03	91.26
聚集态颗粒净化效率	86.75	90.50	90.48	71.90

图 8 为中速稳态工况下原车和 4 种后处理方案下颗粒数量粒径分布. 由图 6~8 可以看出,相比怠速和低速工况,中速工况下聚集态颗粒峰值向粒径较小的方向移动,核态颗粒峰值没有明显改变. 由表 5 可以看出,中速工况下,方案 A 和方案 C 对颗粒物净化效果较好,方案 C 比方案 A 降低了 10 g 的贵金属量和 5 g 的助剂负载量,但由于矾基的加入,方案 C 的净化效果减弱较小.

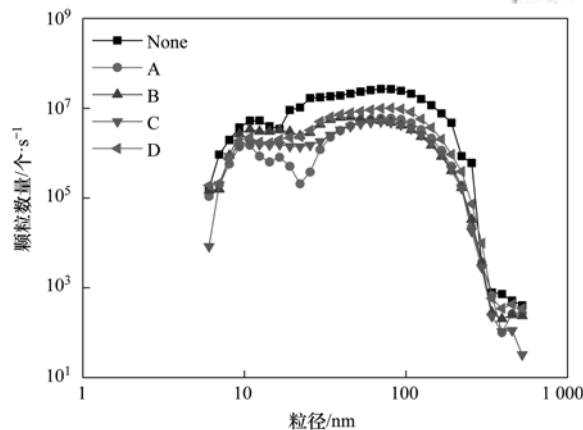


图 8 中速工况颗粒数量粒径分布
Fig. 8 Particle size distribution at moderate speeds

表 5 中速工况下 4 种方案净化效率/%
Table 5 Efficiency of five different aftertreatments under middle speed/%

项目	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
核态颗粒净化效率	89.39	62.83	80.95	70.02
聚集态颗粒净化效率	79.23	79.58	82.59	63.47

图 9 是高速稳态工况下原车和 4 种后处理方案下颗粒数量粒径分布,表 6 为高速工况下 4 种方案净化效率. 从中可见,高速稳态工况下 4 种后处理方案的颗粒数量粒径分布均呈现单峰值形态,这是由于聚集态颗粒峰值随着转速的升高,缸内燃烧温度升高,有利于大颗粒的氧化与分解,颗粒数量浓度峰值向粒径较小的方向移动.

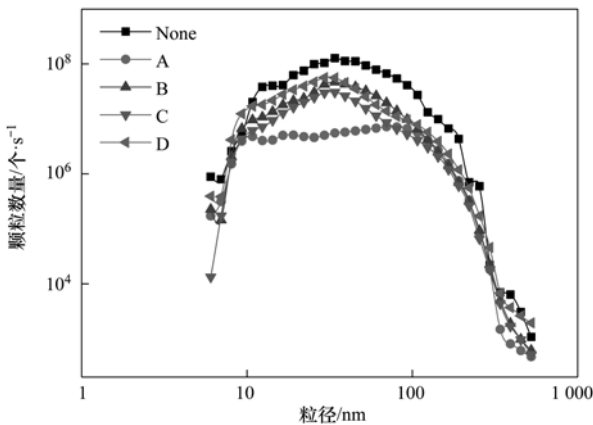


图 9 高速工况颗粒数量粒径分布
Fig. 9 Particle size distribution at high speeds

表 6 高速工况下 4 种方案净化效率/%
Table 6 Efficiency of five different aftertreatments at high speeds/%

项目	方案 A	方案 B	方案 C	方案 D
核态颗粒净化效率	91.17	63.45	72.98	43.08
聚集态颗粒净化效率	89.12	69.32	84.33	73.41

2.3 瞬态工况下排气颗粒数量及粒径分布

2.3.1 全道路颗粒排放

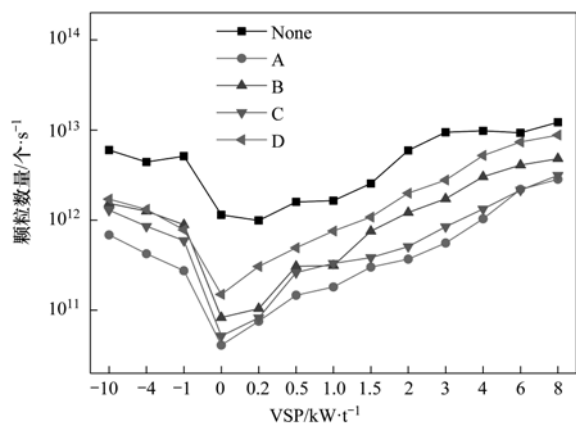
为了比较原车和 4 种方案对全道路颗粒排放的影响,按照不同车辆比功率(vehicle specific power, VSP)区间将采样点分类并取平均,车辆比功率是由美国的 José 提出的,综合考虑了速度、坡度和加速度等对发动机排放的影响,与车辆油耗及污染物排放具有较好的一致性,能很好地反映与污染物排放之间的关系^[27,28],其计算公式如下所示.

$$VSP = v[1.1a + 9.81\arctan(\sin g) + 0.132] + 0.000302v^3$$

式中,VSP 为比功率, $\text{kW}\cdot\text{t}^{-1}$; v 为车速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; a 为加速度, $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$; g 为道路坡度.

按照不同 VSP 区间的颗粒排放数量作出曲线,如图 10 所示.

可见,颗粒数量随 VSP 变化呈“V”型分布. VSP 绝对值越大,颗粒排放数量越大. $VSP = 0 \text{ kW}\cdot\text{t}^{-1}$ 时,公交车几乎匀速运行,发动机负荷最小,喷油量减小,所以颗粒数量最小; $VSP > 0 \text{ kW}\cdot\text{t}^{-1}$ 时,公交车加速运行,单位时间内喷油量急剧增加,空燃比降低,促进了颗粒物的生成,导致颗粒排放增加; $VSP < 0 \text{ kW}\cdot\text{t}^{-1}$ 时,公交车减速运行,大多数情况下,公交车司机踩下刹车时离合器处于结合状态,发动机负荷增大,单位时间内喷油量增加,空燃比下降,导致颗粒排放增加. 因此研究瞬态工况柴油公交车的颗粒排放很有必要.



VSP 不同取值分别代表区间为 ($\text{kW} \cdot \text{t}^{-1}$): $-10(-20, -6.5)$ 、 $-4(-6.5, -1.5)$ 、 $-1(-1.5, -0.05)$ 、 $0(-0.05, 0.05)$ 、 $0.2(0.05, 0.35)$ 、 $0.5(0.35, 0.75)$ 、 $1(0.75, 1.25)$ 、 $1.5(1.25, 1.75)$ 、 $2(1.75, 2.5)$ 、 $3(2.5, 3.5)$ 、 $4(3.5, 5)$ 、 $6(5, 7)$ 、 $8(7, 20)$

图 10 颗粒数量和 VSP 关系

Fig. 10 Particle number and VSP

从全道路颗粒排放对比 4 种后处理方案, 对颗粒处理的效果由好到坏依次为: 方案 A、方案 C、方案 B、方案 D, 与稳态结果相一致。

2.3.2 加速工况颗粒排放

图 11 为 VSP 在区间 ($7 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}, 20 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 范围内的平均颗粒数量粒径分布。加速工况下 4 种后处理方案的排气颗粒数量的粒径分布均呈现单峰对数分布, 峰值均出现在 $30 \sim 40 \text{ nm}$ 范围内。4 种方案对颗粒的净化效果差异较小, 方案 B 对核态颗粒催化效果最佳, 贵金属、助剂负载量以及 DOC 长度的耦合效果最佳。

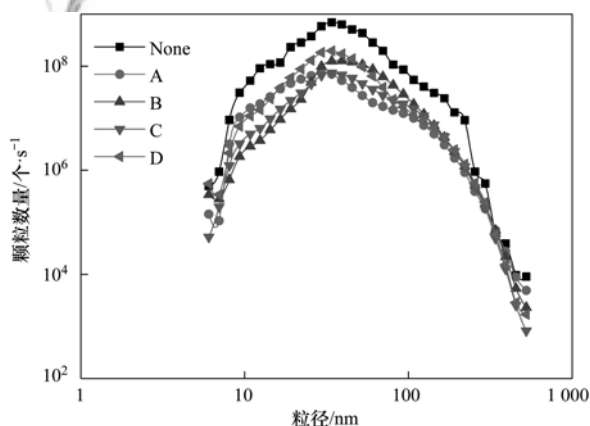


图 11 加速工况颗粒数量粒径分布

Fig. 11 Particle number size distribution under acceleration conditions

2.3.3 减速工况颗粒排放

图 12 为 VSP 在区间 ($-20 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}, -6.5 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 范围内的平均颗粒数量的粒径分布。VSP

在区间 ($-20 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}, -6.5 \text{ kW} \cdot \text{t}^{-1}$) 范围内的排气颗粒数量的粒径分布均呈现单峰非对称分布。4 种排放方案的颗粒数量峰值差别较大, 分别为: 方案 A (11 nm)、方案 B (30 nm)、方案 C (19 nm) 和方案 D (16.5 nm)。

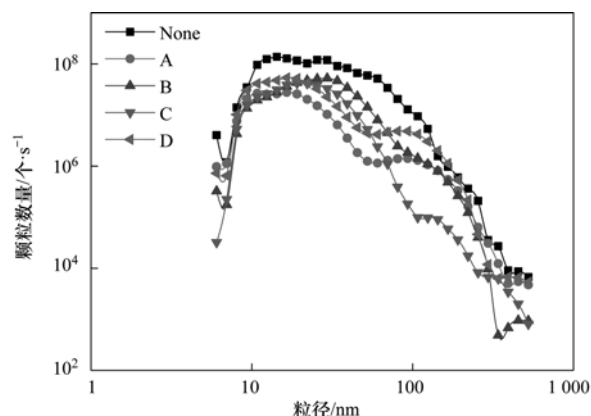


图 12 减速工况颗粒数量粒径分布

Fig. 12 Particle number size distribution under deceleration conditions

由图 11 和 12 可以看出, 加速工况粒径峰值较减速工况峰值更靠近粒径较大的范围。后处理方案对加速工况不敏感, 净化效果差异较小, 但减速工况, 各方案对颗粒的净化效果差异较大。综合而言, 方案 A 和方案 C 都具有很好的净化效果。

3 结论

(1) 公交车颗粒排放数量和车速有很好的一致性和跟随性。随着车速的增加, 尾气中颗粒数量浓度逐渐增加。

(2) CDPF 贵金属负载量对排气颗粒数量影响显著。贵金属负载量越高, 排气颗粒数量越少, 在中高车速尤为明显 ($60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 车速下贵金属负载量增加 $5 \text{ g} \cdot \text{ft}^{-3}$, 颗粒排放总数降低 70.8%) ; 贵金属负载量对排放颗粒物中核态颗粒的影响大于聚集态颗粒。

(3) 助剂组分对颗粒净化效果也有影响。保证对排气颗粒净化效果的前提下, 在助剂中添加适量的钨系助剂, 能够增强催化剂的活性, 从而大幅降低贵金属和助剂负载量, 降低催化器成本。

(4) 不同后处理方案对加速工况不敏感, 净化效果差异较小, 但减速工况, 各方案对颗粒的净化效果差异较大。

参考文献:

- [1] Li X L, Xu Z, Guan C, *et al.* Effect of injection timing on particle size distribution from a diesel engine[J]. Fuel, 2014, 134: 189-195.
- [2] Bermúdez V, Luján J M, Piqueras P, *et al.* Pollutants emission

- and particle behavior in a pre-turbo aftertreatment light-duty diesel engine[J]. *Energy*, 2014, **66**: 509-522.
- [3] Zheng M, Cass G R, Schauer J J, *et al.* Source apportionment of PM_{2.5} in the southeastern United States using solvent-extractable organic compounds as tracers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(11): 2361-2371.
- [4] 王幸锐, 陆炳, 何敏, 等. 机动车排放颗粒物理化特征及健康影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(12M): 236-242.
Wang X R, Lu B, He M, *et al.* Physical and chemical composition of particulate matter emissions from motor vehicle and their human health effects[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(12M): 236-242.
- [5] Sydbom A, Blomberg A, Parnia S, *et al.* Health effects of diesel exhaust emissions[J]. *European Respiratory Journal*, 2001, **17**(4): 733-746.
- [6] Kobayashi S, Hasegawa S, Takahashi K, *et al.* Emission characteristics of ultrafine particles in diesel exhaust gases and their behavior in roadside atmosphere[J]. *Eurozoru Kenkyu*, 2006, **21**(4): 305-311.
- [7] 杨维, 赵文吉, 宫兆宁, 等. 北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 237-243.
Yang W, Zhao W G, Gong Z N, *et al.* Spatial distribution of inhalable particulate and association with respiratory disease in Beijing City[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(1): 237-243.
- [8] Herner J D, Hu S H, Robertson W H, *et al.* Effect of advanced aftertreatment for PM and NO_x reduction on heavy-duty diesel engine ultrafine particle emissions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(6): 2413-2419.
- [9] York A P E, Watling T C, Ahmadijad M, *et al.* Modeling the emissions control performance of a catalyzed diesel particulate filter (CDPF) system for light duty diesel applications[J]. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 2009, **2**(1): 578-589.
- [10] 帅石金, 唐韬, 赵彦光, 等. 柴油车排放法规及后处理技术的现状与展望[J]. *汽车安全与节能学报*, 2012, **3**(3): 200-217.
Shuai S J, Tang T, Zhao Y G, *et al.* State of the art and outlook of diesel emission regulations and aftertreatment technologies[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2012, **3**(3): 200-217.
- [11] 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.
- [12] 杨士超. 柴油机 CPF 捕集及主被动再生性能的数值模拟研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [13] 谭丕强, 张晓锋, 胡志远, 等. DOC + CDPF 对生物柴油燃烧颗粒排放特性的影响[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 2978-2984.
Tan P Q, Zhang X F, Hu Z Y, *et al.* Effects of DOC + CDPF on particulate emission from a diesel engine with biodiesel fuel[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 2978-2984.
- [14] 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.
- [15] 李新令, 黄震, 王嘉松, 等. 汽油机排气颗粒粒径分布特征试验研究[J]. *环境化学*, 2008, **27**(1): 64-68.
Li X L, Huang Z, Wang J S, *et al.* Measurements of particle size distribution from a gasoline engine[J]. *Environmental Chemistry*, 2008, **27**(1): 64-68.
- [16] 薛惠文. 柴油机颗粒物捕集器设计与仿真分析[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.
- [17] Boll W, Bonifer M, Kiemel R, 等. 小型四冲程发动机适用的催化剂配方的开发[J]. *国外内燃机*, 2015, **47**(2): 32-37.
- [18] Liu S, Wu X D, Weng D, *et al.* Ceria-based catalysts for soot oxidation: a review[J]. *Journal of Rare Earths*, 2015, **33**(6): 567-590.
- [19] 方奕栋, 楼狄明, 谭丕强, 等. 催化型颗粒捕集器配方对柴油机颗粒排放特性的影响[J]. *内燃机工程*, 2016, **37**(5): 56-60.
Fang Y D, Lou D M, Tan P Q, *et al.* Effects of CDPF catalyst composition on particulate emission characteristic of diesel engine[J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2016, **37**(5): 56-60.
- [20] 杨春生, 陈建华. 氧化铈和氧化镧在汽车尾气净化催化剂中的应用[J]. *中国稀土学报*, 2003, **21**(2): 129-132.
Yang C S, Chen J H. Application of Ceria and Lanthana in catalyst for cleansing exhaust gas of car[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003, **21**(2): 129-132.
- [21] Vernikovskaya N V, Pavlova T L, Mokrinskii V V, *et al.* Soot particulates abatement in diesel engine exhaust by catalytic oxidation followed their trapping in filters[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, **269**: 416-424.
- [22] Mizutani K, Takizawa K, Shimokawa H, *et al.* A novel α -Al₂O₃ diesel particulate filter with alkali metal-based catalyst for diesel soot oxidation[J]. *Topics in Catalysis*, 2013, **56**(1-8): 473-476.
- [23] 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.
- [24] 楼狄明, 万鹏, 谭丕强, 等. DOC + CDPF 配方对柴油公交车颗粒物排放特性影响[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(11): 3280-3286.
Lou D M, Wan P, Tan P Q, *et al.* Effects of formulations of DOC + CDPF on characteristics of particle emission from a diesel bus[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(11): 3280-3286.
- [25] 谭丕强, 李洁, 胡志远, 等. 柴油公交车燃用不同替代燃料的排放特性[J]. *交通运输工程学报*, 2013, **13**(4): 63-69.
Tan P Q, Li J, Hu Z Y, *et al.* Emission characteristics of diesel bus burning different alternative fuels[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2013, **13**(4): 63-69.
- [26] Tan P Q, Hu Z Y, Lou D M, *et al.* Particle number and size distribution from a diesel engine with jatropha biodiesel fuel[R]. SAE Technical Paper 2009-01-2726, 2009.
- [27] José L J P. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing[D]. Cambridge, US: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [28] Jiménez J L, McClintock P, McRae G J. Vehicle specific power: a useful parameter for remote sensing and emission studies[A]. 9th CRC On-Road Vehicle Emission Workshop[C]. San Diego, 1999.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3451)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)