

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第3期

Vol.39 No.3

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角典型站点冬季大气 $PM_{2.5}$ 中 OC、EC 污染特征	康晖, 朱彬, 王红磊, 施双双 (961)
南京北郊能见度变化中二次无机盐消光的重要作用	于超, 于兴娜, 赵天良, 张蕾, 马国煦, 王咏薇 (972)
常州夏冬季 $PM_{2.5}$ 中无机组分昼夜变化特征与来源解析	刘佳澍, 顾远, 马帅帅, 苏亚兰, 叶招莲 (980)
天津市春季道路降尘 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的元素特征	王士宝, 姬亚芹, 李树立, 张伟, 张蕾 (990)
北京、新乡夏季大气颗粒物中重金属的粒径分布及人体健康风险评价	张鑫, 赵小曼, 孟雪洁, 王小颖, 杨帅, 许晓鹏, 王书亭, 谷超, 王梦蕾, 任浩, 张子洋, 闫广轩, 曹治国, 王跃思 (997)
山西省武乡县城大气 $PM_{2.5}$ 痕量重金属的生态和健康风险分析	郭墨霞, 耿红, 张晋宏, 周欢, 彭妍, 翟帅莹, 李金磊, 陈雨杉 (1004)
隧道中机动车排放颗粒物及无机元素特征	李凤华, 张衍杰, 张静, 袁远, 吴琳, 毛洪钧 (1014)
河南省 2013 年大气氨排放清单建立及分布特征	王琛, 尹沙沙, 于世杰, 卫军华, 谷幸珂, 官密秘, 张瑞芹 (1023)
城市道路行道树池裸地扬尘排放特征	李贝贝, 秦建平, 祁丽荣, 杨涛, 曲松, 石爱军, 黄玉虎 (1031)
DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响	楼狄明, 耿小雨, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃 (1040)
南水北调中线工程总干渠河南段原水中消毒副产物前体物变化规律	黄飘逸, 徐斌, 郭东良 (1046)
广州市流溪河水体中 6 种内分泌干扰素时空分布特征与环境风险	樊静静, 王赛, 唐金鹏, 戴玉女, 王林, 龙胜兴, 何文祥, 刘帅磊, 王佳希, 杨扬 (1053)
西藏拉萨河流域河水主要离子化学特征及来源	张清华, 孙平安, 何师意, 文化, 刘明隆, 于爽 (1065)
太子河下游河流硝酸盐来源及其迁移转化过程	李艳利, 杨梓睿, 尹希杰, 孙伟 (1076)
海南岛北部海湾沉积物重金属来源、分布主控因素及生态风险评价	曾维特, 杨永鹏, 张东强, 刘兵, 张航飞, 吴多誉, 王晓林 (1085)
天津农田重金属污染特征分析及降雨沥浸影响	许萌萌, 刘爱凤, 师荣光, 蓝靖, 田永, 赵宗山 (1095)
太湖出入湖河道与湖体水质季节差异分析	查慧铭, 朱梦圆, 朱广伟, 杨周生, 许海, 沈睿杰, 钟春妮 (1102)
春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性	李欣, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 苏青青, 吕林鹏, 王雄, 黄亚男, 吴庆 (1113)
不同湖泊入湖河流沉积物可转化态氮的空间分布及其影响因素	周睿, 袁旭音, Marip Ja Bawk, 于辉辉, 章琪, 唐豆豆 (1122)
水文气象因素对东南山区水库硅藻异常增殖的影响	孙祥, 朱广伟, 笄文怡, 余茂蕾, 杨文斌, 朱梦圆, 许海, 国超旋, 余丽 (1129)
深水型水库热分层诱导水质及真菌种群结构垂向演替	商潘路, 陈胜男, 黄廷林, 张海涵, 康鹏亮, 王跃, 钊珍芳, 刘彤彤 (1141)
太湖竺山湾春季浮游细菌群落结构及影响因素	薛银刚, 刘菲, 孙萌, 江晓栋, 耿金菊, 滕加泉, 谢文理, 张皓, 陈心一 (1151)
分层型水源水库沉积物需氧量特性	苏露, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 文刚, 李扬, 陈家炜, 王晓江 (1159)
污水氮浓度和 NH_4^+ / NO_3^- 比对粉绿狐尾藻去氮能力和植物体氮组分的影响	马永飞, 杨小珍, 赵小虎, 胡承孝, 谭启玲, 孙学成, 吴金水 (1167)
水体氮磷营养负荷对苦草净化能力和光合荧光特性的影响	周裔文, 许晓光, 韩睿明, 周晓红, 冯德友, 李致春, 王国祥 (1180)
化学预氧化耦合生物锰氧化对水中有机物的去除	菅之奥, 常洋洋, 王立新, 梁金松, 柏耀辉 (1188)
铜铁氧体法处理模拟染料废水	韩志勇, 韩昆, 郝昊天, 于建伟, 石宝友, 庄媛, 孔岩 (1195)
草酸根对 α -FeOOH 多相 UV-Fenton 催化能力的增效实验	苗笑增, 戴慧旺, 陈建新, 蒋柏泉, 龚炯 (1202)
生物质基纳米 HZO 杂化材料的研制及其除磷特性	邱慧, 秦智峰, 刘凤玲, 梁晨, 宋明霞, 许正文, 管益东 (1212)
铁锰氧化物/生物炭复合材料对水中硝酸根的吸附特性	郑晓青, 韦安磊, 张一璇, 史良干, 张潇 (1220)
PAAm/HACC 半互穿网络水凝胶的制备及其对水中腐殖酸的吸附性能	刘泽琨, 周少奇, 马福臻 (1233)
二氧化钛对地下水砷的吸附及再生回用	马文静, 阎莉, 张建锋 (1241)
一体式絮体-超滤工艺去除腐殖酸效能与机制	李文江, 于莉芳, 苗瑞, 马百文 (1248)
中国城镇污水处理厂温室气体排放时空分布特征	闫旭, 邱德志, 郭东丽, 齐星昊, 郑仕侃, 程轲, 孙剑辉, 刘建伟 (1256)
硝化耦合 CANON 的铁锰氮生物净化工艺启动与运行	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王艳菊, 吕赛赛, 张杰 (1264)
纤维载体的生物膜 CANON 反应器的启动特性	顾澄伟, 陈方敏, 李祥, 黄勇, 尤星怡, 金润, 张文静, 董石语 (1272)
DO/ NH_4^+ -N 实现短程硝化过程中生物膜特性	赵青, 卞伟, 李军, 王文啸, 孙艺齐, 梁东博, 张舒燕 (1278)
AUSB 中置曝气对 CANON 颗粒污泥工艺的影响	成朔, 李冬, 张杰, 李帅, 曹瑞华, 吕赛赛 (1286)
有机碳源对启动及运行 CANON 颗粒污泥工艺的影响	李冬, 王艳菊, 吕育锋, 曹瑞华, 李帅, 张杰 (1294)
中试一体式部分亚硝化-厌氧氨氧化反应器的启动与区域特性	周正, 王凡, 林兴, 董石语, 朱强, 李祥, 黄勇 (1301)
硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响	吕亮, 尤雯, 张敏, 吴鹏, 沈耀良 (1309)
磁性纳米铁对厌氧颗粒污泥特性及其微生物群落的影响	宿程远, 郑鹏, 卢宇翔, 袁秋红, 赵力剑, 廖黎明, 黄智 (1316)
好氧颗粒污泥系统中溶解性微生物代谢产物的特征及主要组分	杨丹, 刘东方, 杜丽琼, 黄文力 (1325)
环丙沙星对膜生物反应器中微生物群落及抗性基因的影响	戴琦, 刘锐, 梁玉婷, 舒小铭, 徐灿灿, 陈吕军 (1333)
CEM-UF 组合膜-硝化/反硝化系统处理低 C/N 废水及种群结构分析	邢金良, 张岩, 陈昌明, 张博康, 郭威, 马翔山 (1342)
磷对混养反硝化污泥活性和微生物群落结构的影响	王佩琦, 周伟丽, 何圣兵, 黄荣振 (1350)
甲烷厌氧氧化协同硝酸盐还原菌群驯化及其群落特征	薛松, 张梦竹, 李琳, 刘俊新 (1357)
城市尾水排海过程中微生物及主要致病菌扩散规律	徐爱玲, 牛成洁, 宋志文, 郎秀璐, 郭明月 (1365)
氧四环素的微生物燃料电池处理及微生物群落	严伟富, 肖勇, 王淑华, 丁蕊, 赵峰 (1379)
近 30 年干县耕地土壤碳氮比时空变异特征及其影响因素	江叶枫, 钟珊, 李婕, 王澜珂, 卞荣禧 (1386)
中宁枸杞土壤碳组分分布特征及其空间异质性	王幼奇, 赵云鹏, 白一茹, 张兴 (1396)
滨海滩涂围垦区不同围垦年限土壤酶活性变化及其与理化性质关系	解雪峰, 濮励杰, 王琪琪, 朱明, 王小涵 (1404)
青藏高原中东部表层土壤中多环芳烃的分布特征、来源及生态风险评价	周雯雯, 李军, 胡健, 李兆洲 (1413)
基于 UNMIX 模型的矿区周边农田土壤金属源解析	卢鑫, 胡文友, 黄标, 李元, 祖艳群, 湛方栋, 卞荣禧 (1421)
铁锰双金属材料在不同 pH 条件下对土壤 As 和重金属的稳定化作用	费群, 阎秀兰, 李永华 (1430)
我国 3 个城市人体血清中新型溴代阻燃剂水平趋势及分布特征	王庆华, 袁浩东, 金军, 李鹏, 马玉龙, 王英 (1438)
《环境科学》征订启事 (979) 《环境科学》征稿简则 (996) 信息 (1022, 1064, 1293)	

DOC 和 CDPF 对柴油公交车颗粒物组分影响

楼狄明, 耿小雨*, 宋博, 谭丕强, 胡志远, 刘继跃

(同济大学汽车学院, 上海 201804)

摘要: 以一辆柴油公交车为试验样车, 在重型底盘测功机上运行中国典型城市公交循环(CCBC), 收集尾气颗粒物以分析柴油车安装不同后处理装置的颗粒物组分排放特性。结果表明, 原机颗粒物总碳组分中元素碳(EC)比有机碳(OC)多, 测得有机组分中, 脂肪酸占 60.9%, 直链烷烃占 32.4%, 藿烷和 PAHs 较少。脂肪酸主要是 $C_{16:0}$, C_{18} 、 C_{14} 和 $C_{18:1}$ 也较多, 直链烷烃主要分布于 $C_{18} \sim C_{24}$, $C_{21}H_{44}$ 和 $C_{22}H_{46}$ 最多。PAHs 质量排放以中小分子量为主, Pyr 最多, FL 和 PA 也较多, 毒性则以中高分子量为主, BaP 毒性最强, B(b+k)F、BaA 以及 IcdP 也是主要毒性组分。DOC 后 PAHs 总毒性降低 2.7%, 不同 CDPF 后总毒性进一步降低 89.6%~93.8%。DOC 和 CDPF 对总碳组分的减排率分别为 18.9% 和 70.5%~72.5%, 但对不同组分的减排效果差别较大, 不同贵金属负载量的 CDPF 对各组分减排效果无明显影响。

关键词: 柴油公交车; 颗粒物组分; 后处理; 中国典型城市公交循环; PAHs 毒性

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)03-1040-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.201705049

Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF

LOU Di-ming, GENG Xiao-yu*, SONG Bo, TAN Pi-qiang, HU Zhi-yuan, LIU Ji-yue

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

Abstract: A diesel bus was tested with a China City Bus Cycle (CCBC) on a heavy chassis dynamometer, and the components of the particulate emissions with different after-treatment equipment were investigated. Results showed that OC was less than EC in the particulates of the bus emissions without the use of after-treatment equipment. The organic components were mainly fatty acids (60.9%) and *n*-alkanes (32.4%), with a few hopanes and PAHs. Fatty acid components were mainly $C_{16:0}$, C_{18} , C_{14} , and $C_{18:1}$. The *n*-alkanes were mainly $C_{18} \sim C_{24}$, with $C_{21}H_{44}$ and $C_{22}H_{46}$ accounting for the greatest portion. PAH mass was concentrated in medium and small molecular weight components, such as Pyr, FL, and PA. While PAH toxicity was dominated by medium and high molecular weight components, BaP was the most toxic, followed by B(b+k)F, BaA, and IcdP. The total toxicity of the PAHs decreased by 2.7% after DOC treatment and continued to decrease by 89.6%-93.8% after CDPF treatment. After-treatment equipment significantly reduced the OC + EC emissions by 18.9% (DOC) and 70.5%-72.5% (CDPF), but the reduction rate varied from one component to another. The different precious metal loadings of the CDPF did not obviously affect the reduction rate.

Key words: diesel bus; particulate components; after-treatment; CCBC; PAH toxicity

以机动车为主的移动源排放是北上广深等特大城市的大气细颗粒物主要来源^[1,2], 柴油车在机动车保有量中仅占 12.6%, 但其颗粒物质量(PM)排放占比超过 90%^[3]。研究发现柴油机颗粒物主要由碳质组分组成, 不同负荷下颗粒物中有机碳(OC)和无机碳(EC)合计占比均为 85%左右, OC 由未燃燃油、润滑油等成分复杂的有机化合物组成, 包括致癌致畸的 PAHs; EC 为碳烟, 具有很强的吸附能力, 易成为有毒物质的富集中心和化学反应床^[4]。柴油公交车尾气直接排放到城市大气中, 对人体和环境危害极大。

目前广泛使用氧化催化转换器(DOC)和催化型颗粒捕集器(CDPF)来降低柴油机颗粒排放^[5,6]。基于台架试验的研究表明, DOC 对 PM 降幅达 20%以上^[7], CDPF 对 PM 过滤效率超过 90%, 且贵金属负载量对 PM 的排放特性有一定影响^[8,9]。目前

国内外对安装后处理的柴油机颗粒物组分研究很少且通常基于台架进行稳态试验, 与实际道路的工况差别很大, 试验结果不能很好地反映柴油车的实际颗粒物组分排放特性^[10,11]。本文选择公交车作为试验样车, 分别安装不同后处理设备在重型底盘测功机上运行中国典型城市公交车循环(CCBC), 使用石英膜收集尾气颗粒物以分析不同后处理对颗粒物组分排放特性的影响。

1 材料与方法

1.1 试验样车与后处理方案

试验样车为一在用柴油公交车, 主要参数如表

收稿日期: 2017-05-06; 修订日期: 2017-08-22

基金项目: 上海科委课题项目(16DZ1206702)

作者简介: 楼狄明(1963~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为发动机排放控制技术, E-mail: loudiming@tongji.edu.cn

* 通信作者, E-mail: gengxiaoyu233@163.com

1 所示. 使用国 V 柴油, 硫含量低于 0.001%.

试验共有 5 种尾气处理方案, 分别为: 无后处理(原机), DOC, DOC + CDPF1(A 型), DOC + CDPF2(B 型), DOC + CDPF3(C 型). 各 CDPF 区别在于贵金属负载量不同. 后处理载体参数如表 2 所示.

表 1 试验样车主要参数

Table 1 Specifications of the test bus

项目	参数
车型	申沃 SWB6100V5
发动机型号	Deutz D7E240
发动机类型	高压共轨增压中冷柴油机
排量/L	7.1
压缩比	18.1
额定功率/kW	177
最大扭矩/N·m	920

表 2 后处理载体参数

Table 2 Carrier parameters of the after-treatment

项目	DOC	CDPF1	CDPF2	CDPF3
孔密度/cpsi	400	200	200	200
孔壁厚/mm	0.06	0.35	0.35	0.35
孔隙率/%	/	55	55	55
孔径/mm	1.21	1.45	1.45	1.45
载体材料	FeCrAl	堇青石	堇青石	堇青石
贵金属配比(Pt/Pd/Rh)	10:1:0	10:2:1	10:2:1	10:2:1
贵金属负载量/g·ft ⁻³	55	15	25	35
涂层	γ-Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ + TiO ₂	Al ₂ O ₃ + TiO ₂	Al ₂ O ₃ + TiO ₂

1.2 试验工况与采样

本试验在重型底盘测功机上进行, 可模拟指定工况而避免实际交通影响, 与台架和实际道路相比, 在准确性和稳定性方面具有明显的综合优势^[12]. 试验布置如图 1 所示, 尾气经过固定稀释比的 FPS-4000 射流稀释器稀释后进入四通道颗粒采集器, 里面放置石英纤维滤膜采集颗粒物, 滤膜采样前置于马弗炉中 550℃ 焙烧 4 h, 再置于恒温恒湿箱中平衡 24 h (温度 25℃、湿度 40%), 采样后再平衡 24 h, 之后用锡箔纸封闭放入冷冻室用于后续

检测.

试验工况采用 GB/T 19754-2005 推荐的中国典型城市公交车循环(CCBC), 该循环基于北上广三市的公交运行数据制定, 含怠速、加减速、高中低速等实际道路工况, 运行时间 1 314 s, 行驶里程 5.89 km, 平均车速 16.16 km·h⁻¹, 循环工况如图 2 所示.

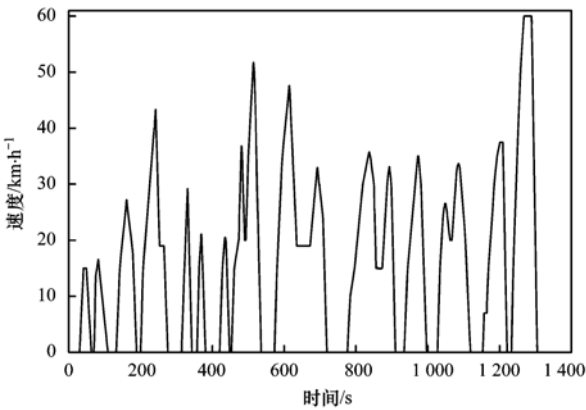


图 2 中国典型城市公交车循环工况
Fig. 2 Working diagram of CCBC

1.3 样品分析方法

使用 DRI-2001A 型有机碳/元素碳分析仪分析 OC 和 EC; 使用裁膜器截取 0.518 cm² 滤膜放入加热炉, 按照 improve-A 程序, 先在纯氮气环境下阶段升温至 140、280、480、580℃, 对应 OC1、OC2、OC3 和 OC4 组分, 再通入 2% 氧气阶段升温至 580、740、840℃, 对应 EC1、EC2 和 EC3 组分, 未发现热解碳信号. 仪器检测范围为 0.2 ~ 750 μg·cm⁻², 最低检测限度为 0.2 μg·cm⁻² (EC) 和 0.82 μg·cm⁻² (OC).

将滤膜剪碎后放入萃取瓶, 加入 D 代混标(含全氘代 C₂₄ 烷烃和 17 种全氘代 PAHs 和全氘代 C₁₇ 脂肪酸)静置 30 min, 然后加入 20 mL CH₂Cl₂ 室温下超声抽提 3 次, 每次 20 min. 将抽提液旋转浓缩至约 1 mL (70 r·min⁻¹, 32℃), 用装有石英棉的滴管过滤、转移到 2 mL 样品瓶中. 再用高纯氮气缓吹至近干, 重氮化, 浓缩定容至 50 μL, 加入六甲苯内标. 使用 Agilent 气相色谱-质谱联用仪 (7890/5975C) 分析颗粒中的有机组分, 包括烷烃、脂肪酸及 PAHs, 色谱柱为 HP-5MS (30 m × 0.25 mm × 0.25 μm), 载气为 He, 流速 1.2 mL·min⁻¹, 进样口温度 300℃, 进样量 1 μL. 采用 EI 电离源, SCAN 扫描模式. 升温程序为初始温度 60℃, 保留 2 min, 5℃·min⁻¹ 至 300℃, 保持 10 min. 利用保留时间和

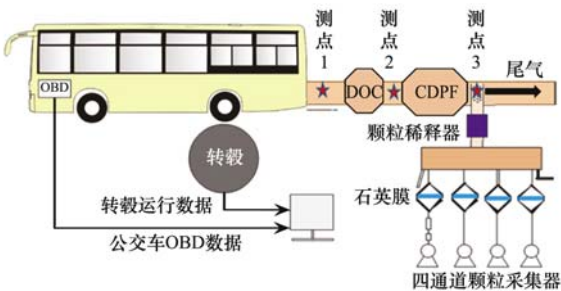


图 1 转鼓试验示意

Fig. 1 Design of the dynamometer test

特征离子定性, 利用标准物质工作曲线定量. 试验结果均符合质量保证和控制要求.

2 结果与讨论

2.1 OC、EC 分析

图3为公交车安装不同后处理的颗粒物OC、EC排放特性, 可见CCBC循环下原机颗粒物中EC较多且主要是EC2, 一般形成于较高的燃烧温度, 可反映发动机燃烧状况. OC主要是OC1、OC2和OC3, 相应组分的沸点和分子量逐渐增大, 各组分占比可间接表明颗粒物挥发性. OC/EC有助于颗粒物碳组分的源解析^[13], 试验结果显示不同后处理设备对OC/EC有明显影响. DOC后总碳质组分(OC+EC)降低了18.9%, 主要是颗粒物有机组分在贵金属催化剂作用下被氧化^[14]. 不同CDPF后的总碳质组分进一步降低, 降幅为70.5%~72.5%, 减排机制主要是对颗粒物的过滤效果. 不同贵金属负载量的CDPF减排效果无明显区别.

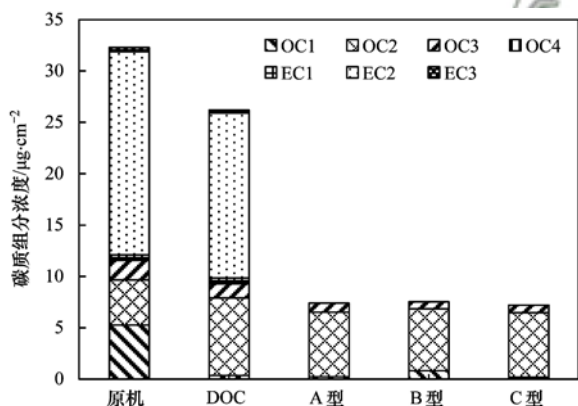


图3 不同后处理设备的颗粒物碳质组分

Fig. 3 Carbonaceous components of particulate emissions with different after-treatment equipment

2.2 有机物组分分析

颗粒物中测得的有机组分包括脂肪酸、直链烷烃、藿烷类和PAHs, 不同后处理设备的组分特性如图4所示. 可见所测有机组分中最多的均为脂肪酸, 占比为60.9%~79.6%, 直链烷烃也较多, 占比为20%~32%, 藿烷类和PAHs较少. 这一组分和比例与黄成等^[15]对公交车实际道路的有机组分排放结果相近. 纯柴油中基本不含脂肪酸, 但颗粒物中的脂肪酸较多, 可能是因为直链烷烃氧化易生成酸类物质, 部分燃油氧化不完全生成脂肪酸. DOC后有机组分相对原机降低了14.8%, 具体到各组分, 脂肪酸降低9.6%, 直链烷烃降低16.7%, PAHs降低23.0%, 藿烷降低69.4%. 不同CDPF

后有机组分进一步降低49.0%~54.4%, 其中脂肪酸降低37.2%~44.8%, 直链烷烃降低64.9%~70.8%, PAHs降低87.4%~92.4%, 藿烷降低70.2%~77.2%. 可见DOC和CDPF对不同有机组分的减排率有较大差别, 其中DOC后藿烷相对降幅最大, CDPF后PAHs相对降幅最大, 造成这种差异的原因有待进一步研究. 不同贵金属负载量的CDPF对各组分降幅无明显影响.

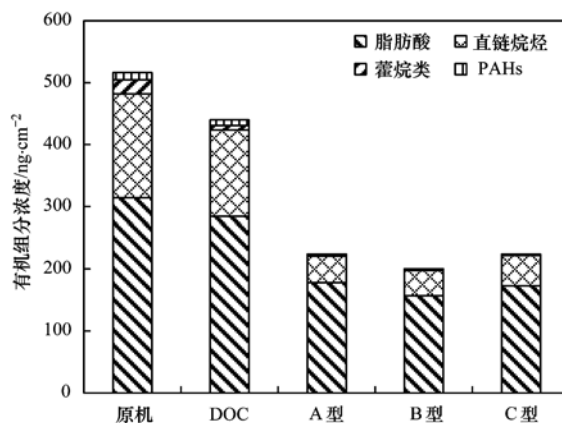


图4 不同后处理设备的有机物组分特性

Fig. 4 Organic components with different after-treatment equipment

2.3 脂肪酸组分排放特性

机动车尾气是大气有机酸主要的人为污染源, 脂肪酸具有很强的亲水性, 能够影响大气能见度和区域气候^[16,17]. 图5所示为不同后处理设备后的颗粒物脂肪酸组分排放特性. 从中可知, 不同后处理设备的脂肪酸组分中最多的均为C_{16:0}, 比重为48.9%~57.8%, 占比较大的还有C₁₈、C₁₄、C_{18:1}等, 其他组分较少, 表现出很强的偶碳优势^[18]. 这一分布特性与徐小娟等^[17]对大气颗粒物干沉降中一元脂肪酸分布规律研究中天津和唐山的结果很接近, 机动车排放可能是这些城市一元脂肪酸沉降的主要来源. DOC后各脂肪酸组分均有所下降,

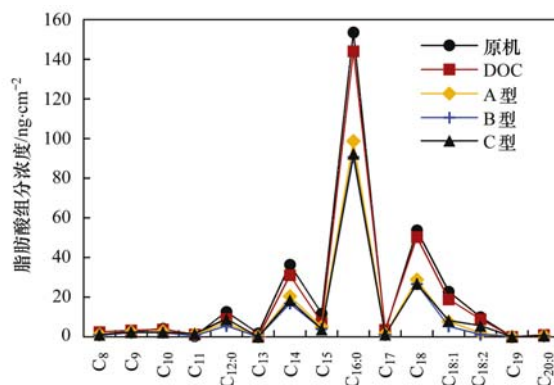


图5 脂肪酸组分排放特性

Fig. 5 Characteristics of fatty acid components

CDPF 后各组分进一步降低, 相对原机降幅达 43.3% ~ 50.1%, 减排效果明显. CDPF 贵金属负载量对脂肪酸降幅无明显影响.

2.4 烷烃组分分析

直链烷烃具有生物毒性, 对神经系统、呼吸系统和皮肤有较大危害. 图 6 是本次试验测得的颗粒物直链烷烃组分排放特性. 从中可知, 原机和 DOC 后颗粒物中碳原子数在 C_{18} ~ C_{24} 之间的直链烷烃较多, 越往两侧越少, 最多的为 $C_{21}H_{44}$ 和 $C_{22}H_{46}$. DOC 对 C_{22} 及以上的烷烃有一定减排效果而 C_{21} 及以下烷烃无明显变化. CDPF 后各直链烷烃组分均明显下降, A 型和 B 型相对原机降幅分别为 74.5% 和 75.7%, 贵金属负载量最多的 C 型 C_{25} 以上直链烷烃出现反常增加, 降幅为 54.8%.

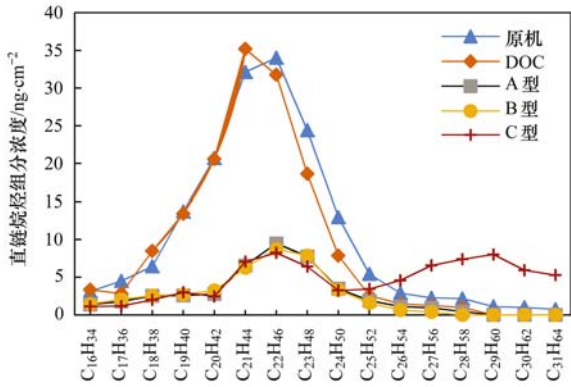


图 6 直链烷烃组分特性
Fig. 6 Characteristics of the *n*-alkane components

藿烷类化合物存在于原油和煤中, 是化石燃料燃烧的特征产物^[49], 图 7 所示为颗粒物藿烷类化合物组分排放特性. 分析发现, 不论哪种后处理设备, 藿烷各组分均有如下规律: 质量分数最高的均为 $C_{29}H$, 其次是 $C_{30}H$, Ts 比 Tm 略高, $C_{31}H$ 和 $C_{32}H$ 的 S 构型(生物构型)比 R 构型(地质构型)略高. 方冬青等^[18]曾研究过 7 类车辆的藿烷排放发现, 不管是大小型汽油车还是柴油车, 归一化处理后各组分排放规律与本文相同, 有明显的指纹特性. 很多研究认为藿烷性质非常稳定, 可作为机动车排放的理想示踪化合物^[20]. DOC 后各藿烷组分均明显降低, 降幅为 58.1% ~ 80.4%, CDPF 后各组分继续下降, 相对原机降幅达 80.7% ~ 97.4%, 而贵金属负载量无明显影响.

2.5 PAHs 组分及毒性分析

机动车排放 PAHs 较多^[21], 具有致癌、致畸性和难降解等特点, 多种组分被列为优先控制污染物. 根据环数可将 PAHs 分为 2 ~ 3 环的小分子量、

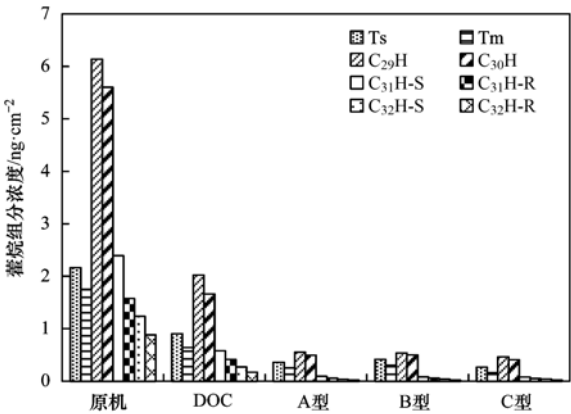


图 7 不同后处理设备的藿烷类组分特性
Fig. 7 Hopane component characteristics with different after-treatment equipment

4 环的中等分子量和 5 环及以上的高分子量, 环数相近的 PAHs 一般具有相近的理化特性, 五环的苯并(a)芘(BaP)是公认的强致癌物. 为定量判断 PAHs 各组分的毒性和对人体的危害, 有学者提出以苯并(a)芘为参照标准的各 PAHs 毒性当量因子 TEF (toxic equivalency factor), 并引入等效毒性 (BEQ) 的概念^[22,23], 将各 PAHs 组分的 BEQ 累加可得到总的等效毒性:

$$BEQ_s = \sum BEQ_i = \sum (\rho_i \times TEF_i)$$

式中, ρ_i 和 TEF_i 分别为组分 i 的浓度和毒性当量因子, BEQ_i 为组分 i 的等效毒性. 本试验在颗粒物中检测出 EPA 优控 PAHs 中的 13 种, 表 3 列出了这 13 种 PAHs 的环数和 TEF, 图 8 和图 9 分别为 PAHs 组分的浓度排放特性和等效毒性排放特性.

表 3 13 种 PAHs 环数及 TEF

Table 3 Ring number and TEF of 13 PAHs		
PAHs	环数	TEF
萘(Nap)	2	0.001
芘(Py)	3	0.001
蒽(An)	3	0.001
菲(Ph)	3	0.001
蒽(An)	3	0.01
荧蒽(FL)	4	0.001
芘(Pyr)	4	0.001
苯并(a)芘(BaA)	4	0.1
䓑(CHR)	4	0.01
苯并(b+k)荧蒽[B(b+k)F]	5	0.1
苯并(a)芘(BaP)	5	1
茚并(1,2,3-cd)芘(IcdP)	6	0.1
苯并(ghi)芘(BghiP)	6	0.01

由图 8 可知原机 PAHs 排放浓度最大的为四环的 Pyr, 质量分数达 50.8%, 三环的 PA 和四环的 FL 也较多, 质量分数分别为 17.6% 和 17.3%, 其

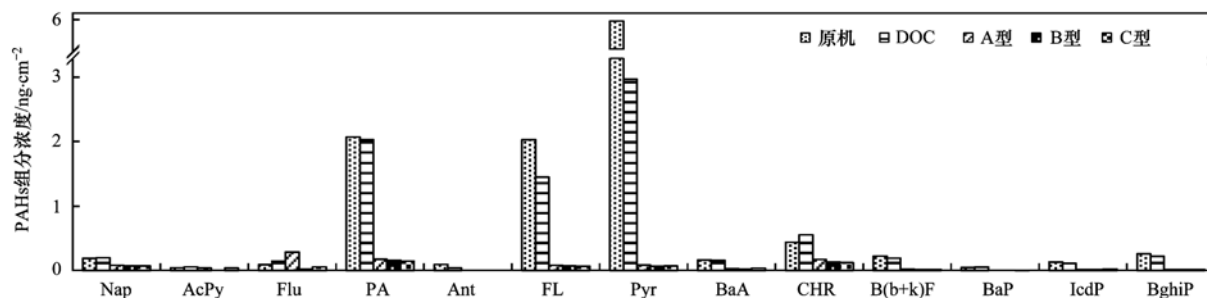


图8 颗粒物 PAHs 组分浓度排放特性

Fig. 8 PAHs components concentration emissions characteristics

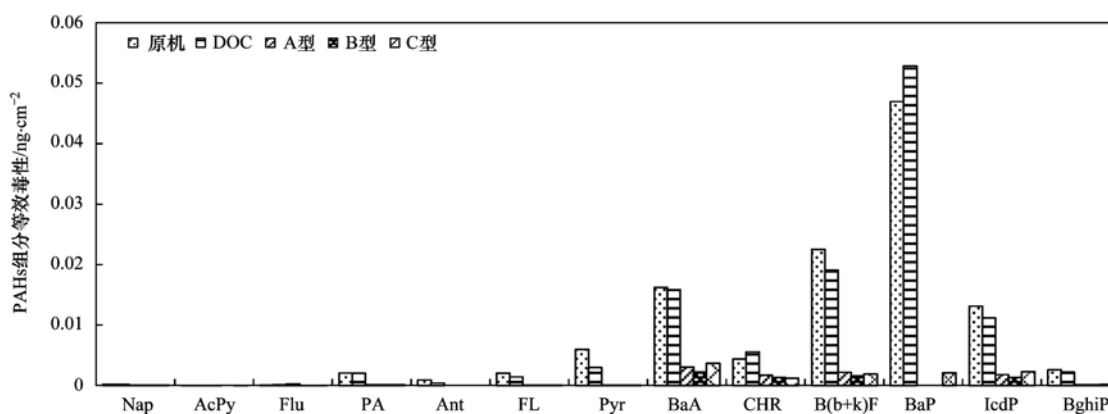


图9 PAHs 组分等效毒性

Fig. 9 PAHs component BEQ

他组分很少. PAHs 质量排放以四环和三环的中、小分子量 PAHs 为主, 这与文献[24,25]的试验结果一致. DOC 后主要 3 种 PAHs 均下降, 其中比重最大的 Pyr 降幅达 50.4%. CDPF 后各种 PAHs 组分均降至接近零, 3 种主要 PAHs 相对原机降幅达 91.6%~98.9%, 贵金属负载量无明显影响.

由图 9 可知原机 PAHs 组分中 BaP 毒性明显高于其他组分, 五环的 B(b+k)F、四环的 BaA 以及六环的 IcdP 也是主要毒性组分, 经计算这 4 种组分的排放占 PAHs 的质量分数为 4.8%, 但总毒性占比达 84.4%. 可见 PAHs 等效毒性以四环及以上的中、高分子量 PAHs 为主. DOC 后 PAHs 总毒性仅降低 2.7%. CDPF 后各组分毒性均明显降低, 总毒性降低 89.6%~93.8%, 贵金属负载量无明显影响.

3 结论

(1) 柴油公交车原机颗粒物组分中 EC 占 63.7% 且主要是 EC2, OC 主要是 OC1、OC2 和 OC3. DOC 对碳质组分减排率为 18.9%, 不同 CDPF 对碳质组分减排率为 70.5%~72.5%, 后处理设备对 OC/EC 有明显影响.

(2) 测得原机颗粒物有机组分中脂肪酸占比

60.9%, 直链烷烃占比 32.4%, 藿烷占比 4.4%, PAHs 占比 2.3%. DOC 后有机组分降低 14.8%, CDPF 后有机组分进一步降低 49.0%~54.4%. DOC 和 CDPF 均能明显减少各组分排放, 但对不同组分的减排效果有差别, CDPF 贵金属负载量对各组分减排效果无明显影响.

(3) 脂肪酸组分 $C_{16:0}$ 占比达 48.9%~57.8%, C_{18} 、 C_{14} 和 $C_{18:1}$ 也较多. 直链烷烃碳原子数集中在 C_{18} ~ C_{24} 之间, $C_{21}H_{44}$ 和 $C_{22}H_{46}$ 最多, 越往两侧越少. 藿烷类组分有明显的指纹特征, 是机动车排放理想的示踪化合物.

(4) PAHs 质量排放以四环和三环的中、小分子量为主, Pyr 最多, FL 和 PA 也较多; 等效毒性则以四环及以上的中、高分子量 PAHs 为主, BaP 毒性最强, B(b+k)F、BaA 以及 IcdP 也是主要毒性组分. DOC 后 PAHs 总毒性微降 2.7%, CDPF 后总毒性相对 DOC 降低 89.6%~93.8%.

参考文献:

- [1] 张懿华, 王东方, 赵倩彪, 等. 上海城区 $PM_{2.5}$ 中有机碳和元素碳变化特征及来源分析[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3263-3270.
Zhang Y H, Wang D F, Zhao Q B, et al. Characteristics and sources of organic carbon and elemental carbon in $PM_{2.5}$ in

- Shanghai urban area[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3263-3270.
- [2] 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 等. 南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 451-457.
- Wu M L, Guo Z B, Liu F L, *et al.* Size distributions of organic carbon and elemental carbon in Nanjing aerosol particles [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(2): 451-457.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 2016 年中国机动车污染防治环境管理年报[R]. 北京: 2016.
- [4] 陈暴. 柴油机颗粒物分形维数与碳组分的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [5] 张允华, 楼狄明, 谭丕强, 等. DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1828-1834.
- Zhang Y H, Lou D M, Tan P Q, *et al.* Effects of DOC + CDPF on emission characteristics of heavy-duty diesel vehicle [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1828-1834.
- [6] Reşitoğlu İ A, Altinişik K, Keskin A. The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust aftertreatment systems [J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2015, **17**(1): 15-27.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Huang C, Lou D M, Hu Z Y, *et al.* Ultrafine particle emission characteristics of diesel engine by on-board and test bench measurement [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, **24**(11): 1972-1978.
- [12] 高章. 基于底盘测功机的公交车整车排放和油耗测试研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [13] Fujii Y, Iriana W, Oda M, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosols emitted from peatland fire in Riau, Sumatra, Indonesia [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **87**: 164-169.
- [14] 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.
- [15] 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 等. 重型柴油公交车实际道路颗粒物排放的理化特征[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(9): 1352-1361.
- Huang C, Lou S R, Qiao L P, *et al.* Physicochemical characteristics of real-world PM emissions from heavy-duty diesel buses [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(9): 1352-1361.
- [16] Yu S C. Role of organic acids (formic, acetic, pyruvic and oxalic) in the formation of cloud condensation nuclei (CCN): a review [J]. *Atmospheric Research*, 2000, **53**(4): 185-217.
- [17] 徐小娟, 李杏茹, 王跃思, 等. 北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1425-1430.
- Xu X J, Li X R, Wang Y S, *et al.* Atmospheric dry deposition flux and sources of monocarboxylic acids in Beijing and surrounding cities [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1425-1430.
- [18] 方冬青, 蔡天骐, 张阳, 等. 我国机动车和燃油锅炉颗粒物排放特征[J]. *化学工业与工程*, 2015, **32**(5): 44-51.
- Fang D Q, Cai T Q, Zhang Y, *et al.* Characters of airborne particulate matter from vehicular exhausts and oil-powered boiler emissions [J]. *Chemical Industry and Engineering*, 2015, **32**(5): 44-51.
- [19] 周家斌, 王磊, 钱佳, 等. 武汉市冬夏季大气 PM_{2.5} 浓度及其烃类化合物的变化特征[J]. *环境污染与防治*, 2013, **35**(1): 1-5.
- Zhou J B, Wang L, Qian J, *et al.* Characterization of atmospheric PM_{2.5} in Wuhan and the variation of its hydrocarbons during winter and summer [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2013, **35**(1): 1-5.
- [20] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(4): 636-651.
- [21] Shi G L, Liu G R, Tian Y Z, *et al.* Chemical characteristic and toxicity assessment of particle associated PAHs for the short-term anthropogenic activity event: during the Chinese New Year's Festival in 2013 [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **482-483**: 8-14.
- [22] Nisbet I C T, LaGoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, **16**(3): 290-300.
- [23] Madill R E A, Brownlee B G, Joseph P D, *et al.* Comparison of the Ames *salmonella* assay and Mutatox genotoxicity assay for assessing the mutagenicity of polycyclic aromatic compounds in porewater from Athabasca oil sands mature fine tailings [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(15): 2510-2516.
- [24] 谭丕强, 周舟, 胡志远, 等. 柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1150-1155.
- Tan P Q, Zhou Z, Hu Z Y, *et al.* Emission characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in exhaust particles from a diesel car [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1150-1155.
- [25] Jin T S, Qu L, Liu S X, *et al.* Chemical characteristics of particulate matter emitted from a heavy duty diesel engine and correlation among inorganic and PAH components [J]. *Fuel*, 2014, **116**: 655-661.

CONTENTS

Characterization and Variation of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in the Yangtze River Delta Region, China	KANG Hui, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (961)
Important Effect of Secondary Inorganic Salt Extinction on Visibility Impairment in the Northern Suburb of Nanjing	YU Chao, YU Xing-na, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (972)
Day-Night Differences and Source Apportionment of Inorganic Components of PM _{2.5} During Summer-Winter in Changzhou City	LIU Jia-shu, GU Yuan, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (980)
Characteristics of Elements in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Road Dust Fall During Spring in Tianjin	WANG Shi-bao, JI Ya-qin, LI Shu-li, <i>et al.</i> (990)
Particle Size Distribution and Human Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particles from Beijing and Xinxiang During Summer	ZHANG Xin, ZHAO Xiao-man, MENG Xue-jie, <i>et al.</i> (997)
Ecological and Health Risks of Trace Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} Collected in Wuxiang Town, Shanxi Province	GUO Zhao-xia, GENG Hong, ZHANG Jin-hong, <i>et al.</i> (1004)
Characteristics of Particulate and Inorganic Elements of Motor Vehicles Based on a Tunnel Environment	LI Feng-hua, ZHANG Yan-jie, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (1014)
A 2013-based Atmospheric Ammonia Emission Inventory and Its Characteristic of Spatial Distribution in Henan Province	WANG Chen, YIN Sha-sha, YU Shi-jie, <i>et al.</i> (1023)
Emission Characteristics of Wind Erosion Dust from Topsoil of Urban Roadside-Tree Pool	LI Bei-bei, QIN Jian-ping, QI Li-rong, <i>et al.</i> (1031)
Particulate Component Emission Characteristic from a Diesel Bus with DOC and CDPF	LOU Di-ming, GENG Xiao-yu, SONG Bo, <i>et al.</i> (1040)
Water Quality in the Henan Intake Area of the South-to-North Water Diversion Project	HUANG Piao-yi, XU Bin, GUO Dong-liang (1046)
Spatio-Temporal Patterns and Environmental Risk of Endocrine Disrupting Chemicals in the Liuxi River	FAN Jing-jing, WANG Sai, TANG Jin-peng, <i>et al.</i> (1053)
Fate and Origin of Major Ions in River Water in the Lhasa River Basin, Tibet	ZHANG Qing-hua, SUN Ping-an, HE Shi-yi, <i>et al.</i> (1065)
Identification of Nitrate Sources and the Fate of Nitrate in Downstream Areas: A Case Study in the Taizi River Basin	LI Yan-li, YANG Zi-rui, YIN Xi-jie, <i>et al.</i> (1076)
Sources, Distribution of Main Controlling Factors, and Potential Ecological Risk Assessment for Heavy Metals in the Surface Sediment of Hainan Island North Bay, South China	ZENG Wei-te, YANG Yong-peng, ZHANG Dong-qiang, <i>et al.</i> (1085)
Characteristics of Heavy Metals Pollution of Farmland and the Leaching Effect of Rainfall in Tianjin	XU Meng-meng, LIU Ai-feng, SHI Rong-guang, <i>et al.</i> (1095)
Seasonal Difference in Water Quality Between Lake and Inflow/Outflow Rivers of Lake Taihu, China	ZHA Hui-ming, ZHU Meng-yuan, ZHU Guang-wei, <i>et al.</i> (1102)
Characteristics of Nitrogen Release at the Sediment-Water Interface in the Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir During the Sensitive Period in Spring	LI Xin, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (1113)
Spatial Distributions of Transferable Nitrogen Forms and Influencing Factors in Sediments from Inflow Rivers in Different Lake Basins	ZHOU Rui, YUAN Xu-yin, Marip Ja Bawk, <i>et al.</i> (1122)
Effects of Hydrological and Meteorological Conditions on Diatom Proliferation in Reservoirs	SUN Xiang, ZHU Guang-wei, DA Wen-yi, <i>et al.</i> (1129)
Vertical Distribution of Fungal Community Composition and Water Quality During the Deep Reservoir Thermal Stratification	SHANG Pan-lu, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (1141)
Community Structure and Influencing Factors of Bacterioplankton in Spring in Zhushan Bay, Lake Taihu	XUE Yin-gang, LIU Fei, SUN Meng, <i>et al.</i> (1151)
Characteristics of Sediment Oxygen Demand in a Drinking Water Reservoir	SU Lu, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (1159)
Effects of Wastewater Nitrogen Concentrations and NH ₄ ⁺ /NO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Ability and the Nitrogen Component of <i>Myriophyllum aquaticum</i> (Vell.) Verde	MA Yong-fei, YANG Xiao-zhen, ZHAO Xiao-hu, <i>et al.</i> (1167)
Effect of Nutrient Loadings on the Regulation of Water Nitrogen and Phosphorus by <i>Vallisneria natans</i> and Its Photosynthetic Fluorescence Characteristics	ZHOU Yi-wen, XU Xiao-guang, HAN Rui-ming, <i>et al.</i> (1180)
Removal of Organic Matter from Water by Chemical Preoxidation Coupled with Biogenic Manganese Oxidation	JIAN Zhi-yu, CHANG Yang-yang, WANG Li-xin, <i>et al.</i> (1188)
Treating Simulated Dye Wastewater by an <i>In Situ</i> Copper Ferrite Process	HAN Zhi-yong, HAN Kun, HAO Hao-tian, <i>et al.</i> (1195)
Experiment to Enhance Catalytic Activity of α -FeOOH in Heterogeneous UV-Fenton System by Addition of Oxalate	MIAO Xiao-zeng, DAI Hui-wang, CHEN Jian-xin, <i>et al.</i> (1202)
Fabrication of a Biomass-Based Hydrous Zirconium Oxide Nanocomposite for Advanced Phosphate Removal	QIU Hui, QIN Zhi-feng, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (1212)
Characteristic of Nitrate Adsorption in Aqueous Solution by Iron and Manganese Oxide/Biochar Composites	ZHENG Xiao-qing, WEI An-lei, ZHANG Yi-xuan, <i>et al.</i> (1220)
Preparation of PAAm/HACC Semi-Interpenetrate Network Hydrogel and Its Adsorption Properties for Humic Acid from Aqueous Solution	LIU Ze-jun, ZHOU Shao-qi, MA Fu-zhen (1233)
Groundwater Arsenic and Silicate Adsorption on TiO ₂ and the Regeneration of TiO ₂	MA Wen-jing, YAN Li, ZHANG Jian-feng (1241)
Removal Efficiency and Mechanism of Removal by Humic Acid of the Integrated Floc-ultrafiltration Process	LI Wen-jiang, YU Li-fang, MIAO Rui, <i>et al.</i> (1248)
Emission Inventory of Greenhouse Gas from Urban Wastewater Treatment Plants and Its Temporal and Spatial Distribution in China	YAN Xu, QIU De-zhi, GUO Dong-li, <i>et al.</i> (1256)
Start-up and Operation of Biofilter Coupled Nitrification and CANON for the Removal of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (1264)
Analysis of CANON Process Start-up with Fiber Carrier	GU Cheng-wei, CHEN Fang-min, LI Xiang, <i>et al.</i> (1272)
Characteristics of Biofilm During the Transition Process of Complete Nitrification and Partial Nitrification	ZHAO Qing, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Intermediate-Setting Aeration on the CANON Granular Sludge Process in the AUSB Reactor	CHENG Shuo, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (1286)
Effect of Organic Carbon Source on Start-up and Operation of the CANON Granular Sludge Process	LI Dong, WANG Yan-ju, LU Yu-feng, <i>et al.</i> (1294)
Start-Up and Regional Characteristics of a Pilot-scale Integrated PN-ANAMMOX Reactor	ZHOU Zheng, WANG Fan, LIN Xing, <i>et al.</i> (1301)
Effect of NO _x ⁻ -N Recycling Ratio on Denitrifying Phosphorus Removal Efficiency in the ABR-MBR Combined Process	LÜ Liang, YOU Wen, ZHANG Min, <i>et al.</i> (1309)
Effects of Magnetic Fe ₃ O ₄ Nanoparticles on the Characteristics of Anaerobic Granular Sludge and Its Interior Microbial Community	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, LU Yu-xiang, <i>et al.</i> (1316)
Characterization Composition of Soluble Microbial Products in an Aerobic Granular Sludge System	YANG Dan, LIU Dong-fang, DU Li-qiong, <i>et al.</i> (1325)
Influence of Ciprofloxacin on the Microbial Community and Antibiotics Resistance Genes in a Membrane Bioreactor	DAI Qi, LIU Rui, LIANG Yu-ting, <i>et al.</i> (1333)
Analysis of Low C/N Wastewater Treatment and Structure by the CEM-UF Combined Membrane-Nitrification/Denitrification System	XING Jin-liang, ZHANG Yan, CHEN Chang-ming, <i>et al.</i> (1342)
Effects of Phosphorus on the Activity and Bacterial Community in Mixotrophic Denitrification Sludge	WANG Pei-qi, ZHOU Wei-li, HE Sheng-bing, <i>et al.</i> (1350)
Acclimatization and Community Structure Analysis of the Microbial Consortium in Nitrate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XUE Song, ZHANG Meng-zhu, LI Lin, <i>et al.</i> (1357)
Diffusion of Microorganism and Main Pathogenic Bacteria During Municipal Treated Wastewater Discharged into Sea	XU Ai-ling, NIU Cheng-jie, SONG Zhi-wen, <i>et al.</i> (1365)
Oxytetracycline Wastewater Treatment in Microbial Fuel Cells and the Analysis of Microbial Communities	YAN Wei-fu, XIAO Yong, WANG Shu-hua, <i>et al.</i> (1379)
Spatial and Temporal Variability of Soil C-to-N Ratio of Yugan County and Its Influencing Factors in the Past 30 Years	JIANG Ye-feng, ZHONG Shan, LI Jie, <i>et al.</i> (1386)
Spatial Heterogeneity of Soil Carbon and its Fractions in the Wolfberry Field of Zhongning County	WANG You-qi, ZHAO Yun-peng, BAI Yi-ru, <i>et al.</i> (1396)
Response of Soil Enzyme Activities and Their Relationships with Physicochemical Properties to Different Aged Coastal Reclamation Areas, Eastern China	XIE Xue-feng, PU Li-jie, WANG Qi-qi, <i>et al.</i> (1404)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils of the Central and Eastern Areas of the Qinghai-Tibetan Plateau	ZHOU Wen-wen, LI Jun, HU Jian, <i>et al.</i> (1413)
Source Apportionment of Heavy Metals in Farmland Soils Around Mining Area Based on UNMIX Model	LU Xin, HU Wen-you, HUANG Biao, <i>et al.</i> (1421)
Stabilization Effects of Fe-Mn Binary Oxide on Arsenic and Heavy Metal Co-contaminated Soils Under Different pH Conditions	FEI Yang, YAN Xiu-lan, LI Yong-hua (1430)
Concentration and Distribution of Novel Brominated Flame Retardants in Human Serum from Three Chinese Cities	WANG Qing-hua, YUAN Hao-dong, JIN Jun, <i>et al.</i> (1438)