ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

# ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷 第10期
2016年10月15日

# 目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 $PM_{2.5}$ 清除作用 …… 孙兆彬,廖晓农,王占山,李梓铭,赵秀娟,花丛(3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力 …… 董群,赵普生,陈一娜(3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价 …… 刘丹,解强,张鑫,王海林,闫志勇,杨宏伟,郝郑平(3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数 …… 徐志荣,姚轶,蔡卫丹,李嫣,许明珠,王浙明(3702)
2014 年 APEC 期间北京市 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 氧化性损伤能力研究 … 郭茜,邵龙义,王文华,侯聪,赵承美,幸娇萍,马施民(3708)
武汉市洪山区夏季 $PM_{2.5}$ 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析 …… 孙焰,祁士华,张莉,邢新丽,杨丹,胡天鹏,瞿程凯(3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 $PM_{2.5}$ 的统计特性 …… 王振,余益军,徐圃青,李艳萍,夏京,殷磊(3723)
$PM_{2.5}$ 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析 …… 杨懂艳,刘保献,石爱军,张大伟,丁萌萌,周健楠,富佳明,景宽(3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成 …… 刘刚,黄柯,李久海,徐慧(3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征 …… 樊筱筱,蒋靖坤,张强,李振华,何立强,吴烨,胡京南,郝吉明(3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子 …… 邢辉,段树林,黄连忠,韩志涛,刘勤安(3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露 …… 张文娟,王利军,王丽,史兴民,卢新卫(3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究 …… 段振亚,苏海涛,王凤阳,李智坚,李韶璞,王书肖(3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响 …… 陈瑞,陈华,王定勇,向玉萍,申鸿(3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响 …… 廖昱,孙玉川,沈立成,梁作兵,王尊波(3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价 …… 王成龙,邹欣庆,赵一飞,李宝杰(3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价 …… 何晓丽,吴艳宏,周俊,邴海健(3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 …… 钱锋,吴婕赟,于会彬,宋永会,张美,孔令昊,何孟常(3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 …… 何小松,张慧,黄彩红,李敏,高如泰,李丹,席北斗(3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质 …… 常海东,金鹏康,付博文,李雪兵,贾锐珂(3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响 …… 丁帅,王圣瑞,张蕊,肖焱波,焦立新,李乐,王忠诚,尹诗诗(3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制 …… 黄雪娇,石纹豪,倪九派,李振轮(3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征 …… 焦平金,许迪,朱建强,于颖多(3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料 …… 李洁,肖琳(3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能 …… 王文东,刘荟,马翠,韩雨,常妮妮(3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中嗅味物质的去除效能及其微生物特性 …… 宣雍祺,周丽,邓慧萍,蔡宙,李大鹏,刘刚(3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响 …… 赵园园,张玥,李素英,石宝友,李贵伟,孙改清(3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除 …… 刘伟,蔡广强,卢小艳,刘丽君,张金松,刘嘉祺,曲莹(3877)
$O_3$/UV 降解含氮杂环化合物喹啉 …… 陈傲蕾,常凤民,汪翠萍,徐恒,吴静,左剑恶,王凯军(3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析 …… 胡金梅,虞磊,黄天寅(3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析 …… 孙秀梅,宋广清,席宏波,周岳溪,牛远方(3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢 …… 王晓玲,员东丹,白莉,李紫棋,余勇,秦旭东,张晓旭,赵可(3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究 …… 付璐璐,甄毓,贺惠,张玉,米铁柱(3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析 …… 蒙小俊,李海波,曹宏斌,盛宇星(3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究 …… 刘洋,黄懿梅,曾全超(3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响 …… 胡小兵,饶强,唐素兰,姜晶,谢瑞桃,郝文静,钟梅英(3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究 …… 黄福义,李虎,安新丽,欧阳纬莹,苏建强(3949)
菌株 *Desulfovibrio* sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素 …… 谢柄柯,张玉,王晓伟,孙超越,周集体(3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响 …… 徐珊珊,侯朋福,范立慧,薛利红,杨林章,王绍华,李刚华(3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响 …… 曾清苹,何丙辉,李源,夏力文,杨龙龙,邓雪梅,李川(3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响 …… 张文娟,佘冬立,Gamareldawla H. D. Agbna,夏永秋(3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响 …… 王群艳,吴小红,祝贞科,袁红朝,隋方功,葛体达,吴金水(3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟 …… 施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩(3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控 …… 王英杰,邹佳玲,杨文弢,周航,廖柏寒(4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响 …… 周贵宇,姜慧敏,杨俊诚,张建峰,张水勤,梁雷(4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响 …… 宋贤威,赵秀兰,张进忠,胡梦坤,徐艳昭,王明禹(4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响 …… 秦余丽,熊仕娟,徐卫红,赵婉伊,王卫中,陈永勤,迟荪琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体(4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究 …… 董冰冰,陈友媛,惠红霞,陆维佳,杨秀卿,刘逸凡(4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为 …… 黎敏丹,郑国贸,万祎,胡建英(4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能 …… 宿程远,郑鹏,阮祁华,覃菁菁,卢宇翔,李俊兵(4062)
《环境科学》征订启事(3827) 《环境科学》征稿简则(4053) 信息(3736, 3930, 4043)

# 轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征

樊筱筱[1],蒋靖坤[1*],张强[1],李振华[1],何立强[1,2],吴烨[1],胡京南[2],郝吉明[1]
(1. 清华大学环境学院,北京 100084; 2. 中国环境科学研究院国家环境保护机动车污染控制与模拟重点实验室,北京 100012)

**摘要**: 我国机动车颗粒物排放研究多集中于重型柴油车,对于轻型汽油车的研究相对较少. 本研究对 3 辆缸内直喷(GDI)汽车和 1 辆进气道喷射(PFI)汽车排放颗粒物的数浓度与粒径分布进行测试,并利用两台不同检测下限的颗粒物冷凝生长计数器(CPC)对轻型汽油车颗粒物实际排放水平进行了探究. 结果表明,GDI 汽车排放的颗粒物数浓度高于 PFI 汽车一个数量级,冷启动下颗粒物主要在测试循环前 200 s 大量产生,GDI 汽车排放颗粒物数浓度与工况速度变化关系密切,而 PFI 汽车变化相对较小. GDI 与 PFI 汽车排放的颗粒物粒径分布均具有核模态和积聚模态两个特征峰,核模态颗粒物峰值粒径约为 20 ~ 27 nm,积聚模态约为 80 ~ 95 nm. 粒径检测下限为 2.5 nm 的 UCPC 测得的颗粒物数浓度比法规使用的粒径测量下限为 23 nm 的 CPC 测量结果分别高出 35.0% (GDI)和 50.4% (PFI). 表明喷油技术是影响颗粒物数量排放水平的关键因素,法规测试会低估轻型汽油车实际颗粒物排放水平.

**关键词**:轻型汽油车; 缸内直喷; 颗粒物; 数浓度; 粒径分布
**中图分类号**: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2016)10-3743-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.2016.10.010

# Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles

FAN Xiao-xiao[1], JIANG Jing-kun[1*], ZHANG Qiang[1], LI Zhen-hua[1], HE Li-qiang[1,2], WU Ye[1], HU Jing-nan[2], HAO Ji-ming[1]
(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Vehicle Emission Control and Simulation, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract**: In this study, three GDI (gasoline direct injection) and one PFI (port fuel injection) light-duty gasoline vehicles were characterized for their particle emission (number concentration and size distributions). Two condensation particle counters (CPC) with different activation efficiencies (50% cut off diameter) were used. It was found that the number concentration of particles emitted by GDI gasoline vehicle was approximately one order of magnitude higher than that from PFI gasoline vehicle. High emission of particles occurred within the first 200 s of cold start. The number concentration of particles emitted from GDI vehicle was largely influenced by the vehicle working condition, while that of PFI vehicle was relatively stable despite of varying working conditions. The size distributions of particles emitted from GDI and PFI vehicles had both nucleation mode and accumulation mode. The peak diameter of nucleation mode particles was in the range of 20-27 nm, while that of accumulation mode particle was in the range of 80-95 nm. The number concentrations measured by the UCPC (50% cut off diameter of 2.5 nm) were 35% (GDI) and 50.4% (PFI), respectively, higher than those measured by the CPC (50% cut off diameter of 23 nm) used by the regulation.

**Key words**:light duty vehicle; gasoline direct injection; particle; number concentration; size distribution

随着城市化进程的加速,机动车保有量快速增加,机动车排放成为城市细颗粒物污染的重要来源[1]. 以往对机动车排放颗粒物的研究,主要关注其质量浓度,多集中在柴油车[2~4],汽油车虽然占据机动车保有量的 84.7%[5],但由于其排放的颗粒物质量浓度较低,因此研究相对较少. 随着车用技术的更新,缸内直喷(gasoline direct injection, GDI)技术得到广泛应用,这种有别于传统进气道喷射(port fuel injection, PFI)方式的发动机技术,虽然具有良好的燃油经济性和 $CO_2$ 减排效果,但由于其进气方式的改变引起排放颗粒物大幅增加[6],又引起了人们对于轻型汽油车排放颗粒物数浓度的关注与研究. 近年来试验研究表明,GDI 汽油机颗粒物排放水平远高于传统 PFI 汽油机[7,8],甚至高于装有颗粒物捕集器(diesel particulate filter, DPF)的柴油机[9]. 汽油车排放的颗粒物主要是 100 nm 以下的超细颗粒物[10],而医学研究证实,100 nm 以下超细颗粒物易对人体健康造成影响[11].

针对轻型汽油车排放颗粒物的控制,我国 2013

**收稿日期**: 2016-04-07; **修订日期**: 2016-05-10
**基金项目**: 环境保护公益性行业科研专项(201409013); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2013CB228505)
**作者简介**: 樊筱筱(1990 ~ ),女,硕士研究生,主要研究方向为机动车污染控制,E-mail: shirleypp33@aliyun.com
* 通讯联系人, E-mail: jiangjk@tsinghua.edu.cn

年颁布的轻型车国 V 排放标准中给出了颗粒物数浓度测量的方法,并将 GDI 汽油车排放颗粒物质量浓度纳入限值[12]. 国Ⅵ标准中将进一步加入汽油车排放颗粒物数浓度的具体限值. 目前法规中规定的颗粒物数浓度测量方法是参考欧盟标准,采用颗粒物测量项目(particle measurement programme, PMP)对于机动车数浓度测量方法的建议,只针对 23 nm 以上的非挥发性固体颗粒物进行测量[13]. 然而国外研究发现,23 nm 测量下限的设置可能会低估实际固体颗粒物排放水平. Gidney 等[14]发现燃料在有金属添加剂的情况下小于 23 nm 的颗粒物除了挥发性组分还有无机组分,直接忽略 23 nm 以下的颗粒物会造成颗粒物数浓度水平被低估. Zheng 等[15]使用不同粒径测量下限的 CPC 对不同工况下加装 DPF 的轻型柴油车颗粒物排放水平进行了测试,发现在 11 nm 以下存在大量颗粒物. Yamada 等[16]对使用 PMP 方法测量 23 nm 以下颗粒物的不确定性及校正方法进行了研究. 目前针对我国轻型汽油车 23 nm 以下颗粒物对数浓度测量结果影响的研究尚属空白,了解 23 nm 以下颗粒物数浓度排放水平对于轻型汽油车颗粒物排放控制具有重要的指导意义.

由此可见,掌握我国现阶段轻型汽油车颗粒物数浓度排放水平,了解其具体排放特征,对于改善环境质量和人体健康 都具有重要的意义. 本研究针对 4 辆轻型汽油车排放颗粒物的数浓度与粒径分布进行测试,并对其排放的 23 nm 以下的颗粒物进行了分析.

## 1 材料与方法

### 1.1 测试车辆与油品

本研究试验用车选用了 4 辆轻型汽油车. 其中 1 ~3 号为缸内直喷汽油车(GDI),4 号为进气道喷射汽油车(PFI). 1、3 号汽油车采用涡轮增压发动机,排放标准为国Ⅳ标准. 2、4 号汽油车采用自然吸气发动机,2 号车排放标准为美标 Tier2,4 号车排放标准为国Ⅳ标准. 4 辆汽油车均采用三元催化器(TWC)作为后处理系统. 具体试验用车信息如表 1.

试验所用油品为定制汽油,油品质量符合 2018 年将实施的国五车用汽油标准,经检测试验燃油主要理化特性如表 2.

**表 1 试验用车相关参数**

Table 1 Parameters of the tested vehicles

| 编号 | 排量/L | 功率/kW | 车重/kg | 喷油形式 | 进气方式 | 后处理系统 | 排放标准 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1.8 | 118 | 2 000 | GDI | 涡轮增压 | TWC | 国Ⅳ |
| 2 | 2.5 | 137 | 1 977 | GDI | 自然吸气 | TWC | Tier2 |
| 3 | 1.8 | 118 | 2 060 | GDI | 涡轮增压 | TWC | 国Ⅳ |
| 4 | 2.0 | 108 | 2 000 | PFI | 自然吸气 | TWC | 国Ⅳ |

**表 2 试验燃油主要理化特性**

Table 2 Physiochemical properties of the tested fuel

| 燃油 | 密度/kg·m$^{-3}$ | 硫含量/mg·kg$^{-1}$ | 芳烃含量/% | 烯烃含量/% | 研究法辛烷值 | 马达法辛烷值 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 汽油 | 735.3 | <1 | 33.5 | 20.9 | 98.3 | 89.2 |

### 1.2 测定系统与方法

测试在底盘测功机上进行整车转鼓试验. 试验工况选用新欧洲驾驶循环(New European Driving Cycle, NEDC),工况内包括 780 s 低速市区测试工况与 400 s 高速市郊测试工况,总行驶距离约为 10.95 km,时长为1 180 s. 试验车辆排放的尾气经全流定容稀释系统(constant volume sampling, CVS),与经高效过滤器后的稀释空气进行混合后,在下游由颗粒物与气态污染物测试系统进行检测. 测试系统如图 1 所示.

测试针对试验轻型汽油车排放颗粒物的数浓度、粒径分布以及气态污染物进行. 利用芬兰 DEKATI 公司生产的静电低压撞击器(Electrical Low

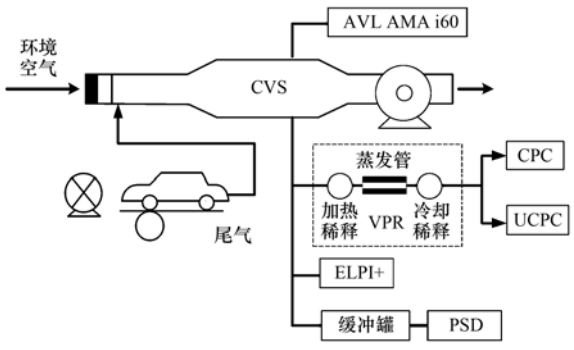


**图 1 测试系统示意**

Fig. 1 Measurement system

Pressure Impactor, ELPI$^+$)逐秒测量颗粒物数浓度. ELPI$^+$有 14 个分粒径通道,可获得颗粒物瞬态粒径分布数据,测量范围为 6 nm ~ 10 μm. 利用实验室搭建的颗粒物粒径谱仪(particle size distributions, PSD)测量颗粒物平均粒径分布[17]. PSD 由两组扫描电迁移率粒径谱仪(nano-SMPS 与 regular-SMPS)组成,可同时分别测量 3 ~ 67 nm 和 20 ~ 600 nm 颗粒物的粒径分布. PSD 扫描周期为 120 s,考虑到 PSD 时间分辨率,测试中在 PSD 前加设一个 15 L 的缓冲罐以保证稳态测量条件. 利用奥地利 AVL 公司的 AMA i60 排放测试系统对 HC 和 CO 等气态污染物进行测量. 利用挥发性组分去除系统(volatile particle remover, VPR)和美国 TSI 公司的颗粒物冷凝生长计数器(condensation particle counter) CPC 3790 与 UCPC 3776 分别对 23 nm ~ 2.5 μm 与 2.5 nm ~ 2.5 μm 的总颗粒物数浓度进行测量.

## 2　结果与讨论

### 2.1　轻型汽油车颗粒物数浓度与粒径分布特征

图 2 给出了 4 辆试验车在 NEDC 循环下颗粒物数量排放结果. 1 ~ 4 号车颗粒物数浓度结果依次为: $1.8\times10^{12}$、$5.6\times10^{11}$、$1.4\times10^{12}$、$3.4\times10^{10}$ $km^{-1}$. 3 辆 GDI 汽油车颗粒物数浓度排放水平高于 4 号 PFI 汽油车一个量级. 采用涡轮增压的 1 号和 3 号国Ⅳ汽油车颗粒物数浓度结果高于美标 Tier 自然吸气 2 号车 50% 左右.

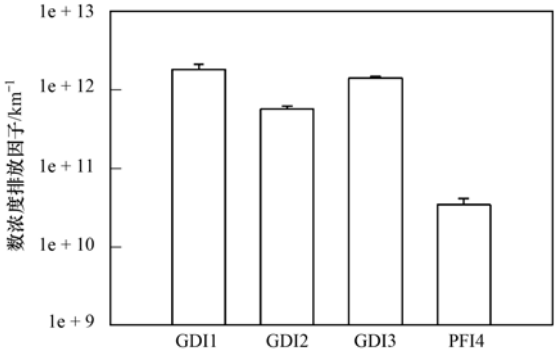


**图 2　轻型汽油车颗粒物数量排放**

Fig. 2　PN emissions of light-duty gasoline vehicles

处于相同排放标准阶段下 GDI 汽油车排放的颗粒物数量明显高于 PFI 汽油车一个数量级,这与王计广等[18]和付海超等[19]的研究结果一致. 可见燃油喷射技术能极大地影响排放颗粒物的数浓度. 相较于进气道喷射方式,缸内直喷技术直接以较高压力将燃油喷入气缸内与空气混合,形成可燃混合气燃烧做功,燃烧前油气混合时间缩短,容易使得燃油与空气尚未充分混合,造成缸内局部混合气过浓,燃烧不完全,从而增加排放颗粒物的数浓度.

对于采用同一喷油技术不同进气方式的 GDI 车而言,本研究中采用涡轮增压技术的 1 号和 3 号车颗粒物排放要都高于采用自然吸气的 2 号车. 而付海超等[19]的研究中,测试的 3 辆 GDI 汽油车中,采用自然吸气的 GDI 汽车 PN 排放结果位于涡轮增压技术的 2 辆车之间,这可能与所选车型技术差异较大有一定关系.

图 3 给出了 4 辆试验车在 NEDC 循环下颗粒物平均粒径分布结果. 从中可知,GDI 与 PFI 汽车颗粒物排放呈现双峰分布的特征. 颗粒物可分为呈现出核模态与积聚模态两种模态. 其中 GDI 汽车核模态峰值粒径约为 20 ~ 27 nm,积聚模态峰值粒径约为 80 ~ 95 nm. GDI 汽车排放的颗粒物以积聚模态颗粒物为主. PFI 汽车排放颗粒物水平要明显低于 GDI 汽车,其排放的颗粒物也主要是积聚模态颗粒物为主,峰值粒径约为 95 nm,但与 GDI 汽车相比,积聚模态颗粒物所占比例较低.

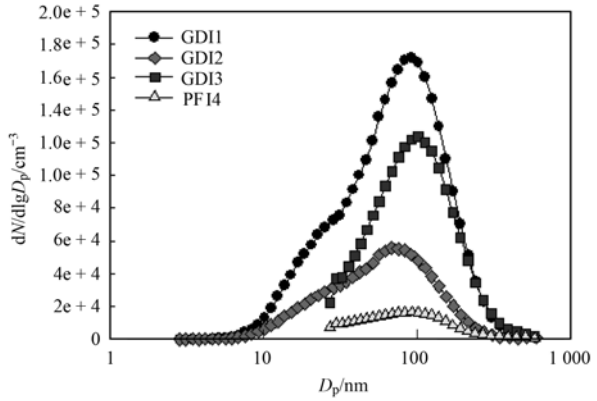


**图 3　轻型汽油车颗粒物平均粒径分布**

Fig. 3　Average particle size distributions of light-duty gasoline vehicles

这一结果与陆叶强等[20]和胡志远等[21]的研究结果较为一致. PFI 汽油车与 GDI 汽油车相比,PFI 汽油车油气混合时间长,混合程度较 GDI 汽油车更为均匀,因此不完全燃烧程度要低于 GDI 汽油车,产生的积聚模态颗粒物比例也就更低了. 而与原达[22]的研究结果相比,本研究中 GDI 汽油车核模态颗粒物排放水平有较大差异. 核模态颗粒的形成会受到许多因素的影响,目前国内外针对 GDI 发动机颗粒物形成机制的研究还较少,一般认为内燃机排放的核模态颗粒物主要由挥发性有机组分和硫酸盐成核形成. 燃料和润滑油中的硫是颗粒物中硫酸盐的主要来源. 不同润滑油会引起 GDI 汽油车排放颗

粒物的显著差异[23]. 本研究中使用的油品为定制汽油,含硫量 < 1 mg·kg$^{-1}$,远低于目前市售汽油水平. 低硫油品的使用使得核模态颗粒物成核前体物浓度降低,因而导致本研究中核模态颗粒物浓度较低的情况出现.

**2.2** 轻型汽油车颗粒物排放与工况之间关系

利用 CPC 与 ELPI$^+$ 分别获取逐秒的轻型车颗粒物数浓度与粒径分布数据. 图 4 给出了 NEDC 循环下,轻型车颗粒物瞬态排放与行驶工况对应的情况. 结果显示,GDI 汽油车前 200 s 产生大量颗粒物. 在前 720 s 的市区测试工况下,颗粒物排放瞬态变化与 NEDC 工况内车辆行驶速度有着较好一致性,在急加速的工况下,速度变化即对应着数浓度变化的响应. 在后 400 s 市郊高速工况下,随着行驶速度的提升,颗粒物排放高于市区测试工况. 而 PFI 汽油车颗粒物主要在工况运行的前 200 s 内产生,之后颗粒物排放一直处于较低水平,颗粒物瞬态响应与工况变化关系不大,在市郊高速工况后 200 s 内出现峰值.

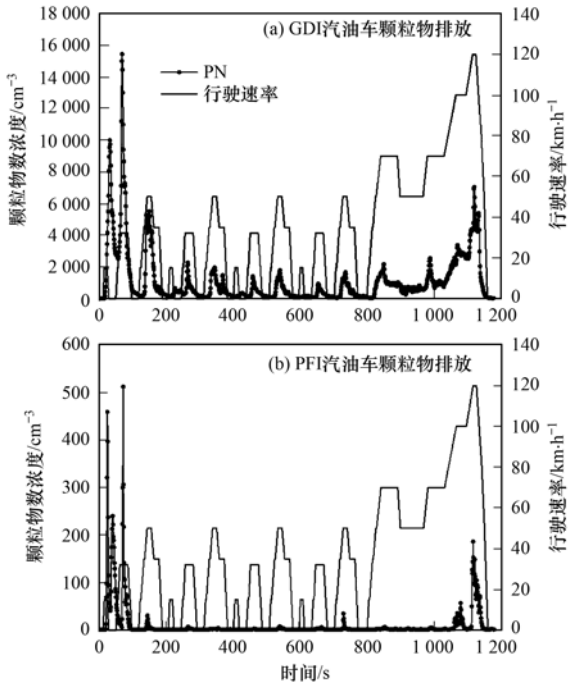


**图 4 轻型汽油车瞬态颗粒物排放**

Fig. 4 PN transient emissions of light-duty gasoline vehicles

GDI 与 PFI 汽车在工况前 200 s 均出现了颗粒物大量排放的情况,这可能因为车辆都是冷启动,在工况前 200 s 发动机温度较低,不利于燃油的蒸发,为了使发动机顺利启动需要提高喷油量,因此就造成了燃气混合不均匀,混合气浓度过高的情况,使得部分燃气氧化不完全,从而产生了大量颗粒物. 而暖机过程结束后,GDI 与 PFI 汽车排放的颗粒物都大幅减少,而两车颗粒物排放与工况的响应出现明显差异. 这主要是因为 PFI 汽车的燃气在进入气缸燃烧前就已经混合均匀,在气缸内发生的是均质燃烧,工况的改变不会影响燃烧状态,因此 PFI 汽车在暖机后颗粒物排放水平很低,且几乎不受工况影响. 而 GDI 汽车燃气混合时间则短得多,在急加速的工况下发动机负荷增加,喷油量增加,这使得混合气混合不均匀的程度进一步加大,局部过浓的混合气因为燃烧不完全而造成颗粒物数量的增加. 而在急减速的工况下亦然. 因此 GDI 汽车的颗粒物瞬态排放与工况中车辆的行驶速度有很好的对应关系. 而随着市郊工况下行驶速度的升高,颗粒物排放水平也进一步增加.

为了进一步了解 GDI 与 PFI 汽车在工况内的排放情况,图 5 给出 NEDC 循环下汽油车瞬态 HC 与 CO 排放. 可以看出,GDI 与 PFI 汽车的 HC 和 CO 排放主要是在前 200 s 内大量产生. 而两者相比,PFI 汽车尽管颗粒物排放水平远低于 GDI 汽车,但 HC 排放水平相当,CO 排放甚至高于 GDI 汽车. 由此体现出在冷启动工况前 200 s 内,由于气缸内燃气的不完全燃烧,未燃尽的 HC 以及不完全燃烧产物 CO 大量产生. 此时排气温度也不够高,三元催化器还未达到最佳工作状态,HC 和 CO 的排放在前

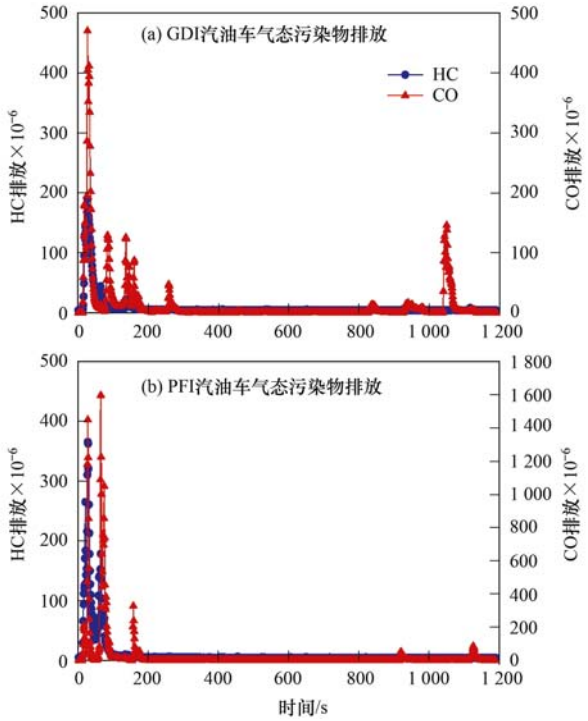


**图 5 汽油车瞬态 HC 与 CO 排放**

Fig. 5 HC and CO emissions of light-duty gasoline vehicles

200 s 出现峰值. 此后由于燃烧条件的稳定以及三元催化器的正常工作,HC 和 CO 的排放得到有效控制,保持在较低排放水平.

图 6 进一步给出了 NEDC 循环下 GDI 汽油车瞬态粒径分布的变化规律,其中不同颜色表示颗粒物数浓度水平. 可以看出,瞬态粒径分布与总颗粒物数浓度有着很好的对应关系,也体现出工况的行驶特征. 从瞬态粒径分布上可以看出明显两个模态颗粒物的出现.

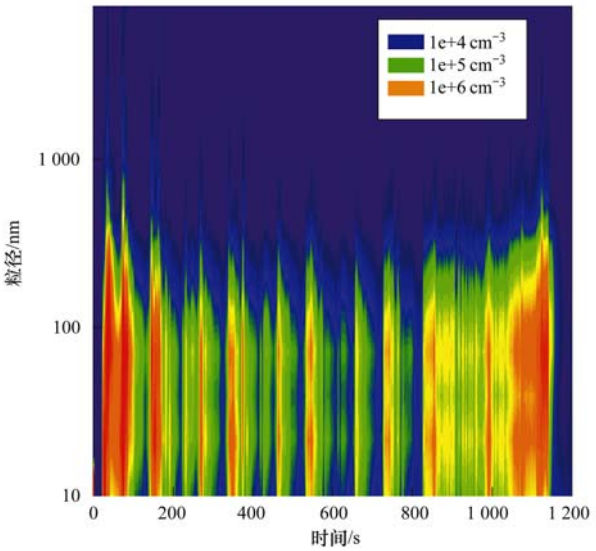


**图 6　GDI 汽油车瞬态粒径分布**

Fig. 6　Transient particle size distribution of GDI car

## 2.3　测量下限设定对数浓度测试结果的影响

轻型车国 V 标准中对于颗粒物数浓度的测量,只针对 23 nm 以上的非挥发性固体颗粒物进行,从而更好地实现颗粒物数浓度的可重复测量. 然而这样却忽视了 23 nm 以下颗粒物在轻型车排放中的影响.

本研究中利用两台颗粒物冷凝生长计数器 CPC 3790 和 UCPC 3776 对 3 号 GDI 汽油车和 4 号 PFI 汽油车进行了数浓度的测量,其中 CPC 和 UCPC 测量的颗粒物范围分别为 >23 nm 和 >2.5 nm. 颗粒物冷凝生长计数器置于法规要求的挥发性组分去除系统 VPR 之后,VPR 系统由加热稀释器、蒸发管、冷却稀释器组成,能有效去除挥发性气态污染物. 测试结果如图 7 所示. UCPC 3776( >2.5 nm)测得的 3 号 GDI 汽油车和 4 号 PFI 汽油车颗粒物数浓度排放因子分别为 $1.89 \times 10^{12}$ km$^{-1}$ 和 $5.07 \times 10^{10}$ km$^{-1}$, CPC 3790( >23 nm)的测试结果为 $1.40 \times 10^{12}$ km$^{-1}$和 $3.37 \times 10^{10}$ km$^{-1}$. 两者相比,UCPC 比 CPC 测量值分别高出 35.0%(GDI)和 50.4%(PFI). 也即说明,去除挥发性组分后,2.5 ~ 23 nm 粒径范围内固体颗粒物占据了颗粒物总数的 25.9%(GDI)和 33.5%(PFI).

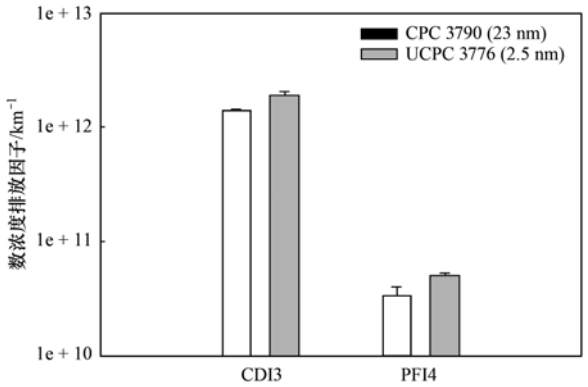


**图 7　CPC 与 UCPC 测量结果对比**

Fig. 7　Comparison of CPC and UCPC measurement results

欧盟法规中采用 PMP 项目的研究建议,设置 VPR 系统防止挥发性气态组分因冷凝成核,形成大量核模态颗粒物. 这部分核模态颗粒物的形成容易受到稀释中温度、停留时间、稀释比例等因素的影响[24],进而造成数量测量的不稳定,因此法规中利用 VPR 系统将挥发性组分去除,只针对固体颗粒物进行计数. 然而本研究的结果显示,即使在 VPR 系统去除挥发性组分之后,2.5 ~ 23 nm 范围内仍存在大量的核模态颗粒物. 这部分颗粒物有可能是因为挥发性组分通过 VPR 系统时并未完全蒸发去除,而重新成核形成的,也可能是难以被 VPR 系统去除的固体颗粒物. Giechaskiel 等[25]曾对 VPR 系统的去除效率进行研究,结果显示 VPR 系统在设定的温度和停留时间下,能对 30 nm 的四十烷颗粒物实现 99% 的削减. 本研究中 2.5 ~ 23 nm 范围内颗粒物的比例远超 Giechaskiel 的研究结果,这很有可能是因为轻型汽油车在 23nm 以下会产生大量不可忽略的固体颗粒物. 换言之,法规 23 nm 测量下限的设定,不考虑 23 nm 以下固体颗粒物的排放,会低估轻型汽油车的颗粒物实际排放水平. 在本研究中,这种低估程度约为 30%. 这一结果与 Yamada 等[16]在稳态工况下测量的 GDI 汽油车颗粒物 23nm 以下颗粒物所占比重相比,本研究结果略高,这主要是因为核模态颗粒物的产生与行驶工况有着紧密联系. 而这一结果与重型柴油车的测量结果差异较大,Johnson 等[26]在使用粒径测量下限分别为 3 nm 和 23 nm 的 CPC 测量不同工况下重型柴油车颗粒物排放时,二者结果上体现出数量级上的差异,这进一步体现出轻型汽油车与重型柴油车在颗粒物排放上的

特征差异.

为进一步获得 2.5 ~23 nm 范围内颗粒物数量变化规律,将 3 号 GDI 汽油车 UCPC 与 CPC 测量数浓度差,与 NEDC 工况下车辆行驶速度对比如图 8.

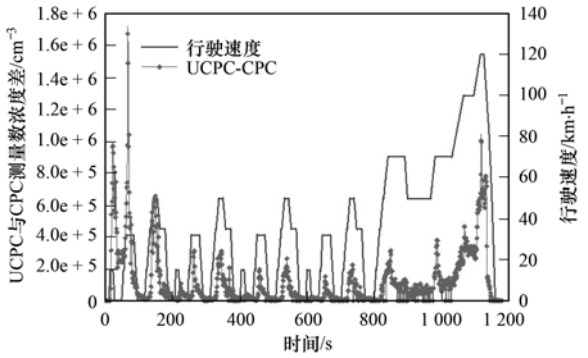


**图 8 23 nm 以下颗粒物数量随工况的变化**

Fig. 8 Variation of number concentration of sub-23 nm particles with the working condition

结果显示,GDI 汽油车 2.5 ~23 nm 范围内的颗粒物数量变化与总颗粒物变化有着很大的相似性. 3 号车在工况前 200 s 汽车启动阶段产生大量 23 nm 以下的颗粒物,颗粒物排放瞬态变化与 NEDC 工况内车辆行驶速度有着较好一致性,在加速情况下颗粒物大量产生,并在高速的市郊工况下颗粒物排放达到峰值. 这说明冷启动以及急加速工况下,会产生大量粒径在 23 nm 以下的颗粒物.

## 3 结论

(1)对于相同排放标准阶段下的轻型汽油车,喷油技术是影响颗粒物数量排放水平的关键因素,GDI 汽车排放的颗粒物数浓度比 PFI 汽车排放的颗粒物大约高了一个数量级.

(2)轻型汽油车在 NEDC 循环工况下排放的颗粒物粒径分布呈现双模态的特征. GDI 汽车排放核模态颗粒物峰值粒径约为 20 ~27 nm,积聚模态颗粒物峰值粒径约为 80 ~95 nm,主要以积聚模态为主. PFI 汽车排放积聚模态颗粒物峰值粒径约为 95 nm.

(3)轻型汽油车冷启动下颗粒物以及 HC 与 CO 主要在工况前 200 s 产生. GDI 汽车的瞬态排放与工况变化有着较强的响应,在急加速的工况下,颗粒物排放明显增加. PFI 汽车的瞬态排放相对较为稳定.

(4)法规中对轻型车排放颗粒物数量测量设置的 23 nm 下限会低估实际排放水平 25% ~35%. GDI 汽车在 23 nm 以下也会排放大量的固体颗粒物,这部分核模态颗粒物主要在冷启动和急加速工况下产生.

致谢:本实验是在厦门环境保护机动车污染控制技术中心的赖益土等大力支持下完成的,在此向他们表示衷心的感谢.

**参考文献:**

[1] Cheng S Y, Lang J L, Zhou Y, *et al*. A new monitoring-simulation-source apportionment approach for investigating the vehicular emission contribution to the $PM_{2.5}$ pollution in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, **79**: 308-316.

[2] Zheng X, Wu Y, Jiang J K, *et al*. Characteristics of on-road diesel vehicles: black carbon emissions in Chinese Cities based on portable emissions measurement[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(22): 13492-13500.

[3] Lau C F, Rakowska A, Townsend T, *et al*. Evaluation of diesel fleet emissions and control policies from plume chasing measurements of on-road vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 171-182.

[4] 楼狄明, 徐宁, 范文佳, 等. 国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(2): 526-532.
Lou D M, Xu N, Fan W J, *et al*. Particulate distribution characteristics of Chinese Phrase V diesel engine based on butanol-diesel blends[J]. Environmental Science, 2014, **35**(2): 526-532.

[5] 环境保护部机动车排污监控中心. 2015 年中国机动车污染防治年报[R]. 环境保护部机动车排污监控中心, 2016.

[6] Choi K, Kim J, Ko A, *et al*. Size-resolved engine exhaust aerosol characteristics in a metal foam particulate filter for GDI light-duty vehicle[J]. Journal of Aerosol Science, 2013, **57**: 1-13.

[7] Braisher M, Stone R, Price P. Particle number emissions from a range of European vehicles[R]. SAE Technical Paper, 2010.

[8] Liang B, Ge Y S, Tan J W, *et al*. Comparison of PM emissions from a gasoline direct injected (GDI) vehicle and a port fuel injected (PFI) vehicle measured by electrical low pressure impactor (ELPI) with two fuels: gasoline and M15 methanol gasoline[J]. Journal of Aerosol Science, 2013, **57**: 22-31.

[9] Badshah H, Khalek I. Solid Particle emissions from vehicle exhaust during engine start-up[J]. SAE International Journal of Engines, 2015, **8**(4): 1492-1502.

[10] Myung C L, Park S. Exhaust nanoparticle emissions from internal combustion engines: a review [J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, **13**(1): 9-22.

[11] Penttinen P, Timonen K L, Tiittanen P, *et al*. Ultrafine particles in urban air and respiratory health among adult asthmatics[J]. European Respiratory Journal, 2001, **17**(3): 428-435.

[12] GB 18352.5-2013, 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第五阶段)[S].

[13] Giechaskiel B, Dilara P, Andersson J. Particle measurement programme (PMP) light-duty inter-laboratory exercise: repeatability and reproducibility of the particle number method [J]. Aerosol Science and Technology, 2008, **42**(7): 528-543.

[14] Gidney J T, Twigg M V, Kittelson D B. Effect of organometallic fuel additives on nanoparticle emissions from a gasoline passenger

car[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(7): 2562-2569.

[15] Zheng Z Q, Durbin T D, Karavalakis G, *et al*. Nature of Sub-23-nm particles downstream of the European particle measurement programme (PMP)-compliant system: a real-time data perspective[J]. Aerosol Science and Technology, 2012, **46**(8): 886-896.

[16] Yamada H, Funato K, Sakurai H. Application of the PMP methodology to the measurement of sub-23 nm solid particles: calibration procedures, experimental uncertainties, and data correction methods[J]. Journal of Aerosol Science, 2015, **88**: 58-71.

[17] Liu J Q, Jiang J K, Zhang Q, *et al*. A spectrometer for measuring particle size distributions in the range of 3 nm to 10 μm[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016, **10**(1): 63-72.

[18] 王计广, 李孟良, 徐月云. GDI 和 PFI 汽油车的颗粒物排放特性研究[A]. 见: 2014 中国汽车工程学会年会论文集[C]. 北京: 中国汽车工程学会, 2014.

[19] 付海超, 李昕晏, 王建海, 等. GDI 与 PFI 汽油车微粒排放特性的试验研究[J]. 汽车工程, 2014, **36**(10): 1163-1170.
Fu H C, Li X Y, Wang J H, *et al*. An experimental study on particulate emission characteristics of GDI and PFI vehicles[J]. Automotive Engineering, 2014, **36**(10): 1163-1170.

[20] 陆叶强, 陈秋方, 孙在, 等. 汽车排放超细微粒数浓度及粒径谱特征的实验研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(9): 3309-3314.
Lu Y Q, Chen Q F, Sun Z, *et al*. Ultrafine particle number concentration and size distribution of vehicle exhaust ultrafine particles[J]. Environmental Science, 2014, **35**(9): 3309-3314.

[21] 胡志远, 李金, 谭丕强, 等. 汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4181-4187.
Hu Z Y, Li J, Tan P Q, *et al*. Research on NEDC ultrafine particle emission characters of a port fuel injection gasoline car[J]. Environmental Science, 2012, **33**(12): 4181-4187.

[22] 原达. 缸内直喷(GDI)汽油机微粒排放粒径分布特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
Yuan D. Study on the particle number and size distribution from a Gasoline Direct Injection (GDI) engine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.

[23] Pirjola L, Karjalainen P, Heikkilä J, *et al*. Effects of fresh lubricant oils on particle emissions emitted by a modern gasoline direct injection passenger car[J]. Environmental Science & Technology, 2015, **49**(6): 3644-3652.

[24] Rönkkö T, Virtanen A, Vaaraslahti K, *et al*. Effect of dilution conditions and driving parameters on nucleation mode particles in diesel exhaust: laboratory and on-road study[J]. Atmospheric Environment, 2006, **40**(16): 2893-2901.

[25] Giechaskiel B, Chirico R, DeCarlo P F, *et al*. Evaluation of the particle measurement programme (PMP) protocol to remove the vehicles' exhaust aerosol volatile phase[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(21): 5106-5116.

[26] Johnson K C, Durbin T D, Jung H, *et al*. Evaluation of the European PMP methodologies during on-road and chassis dynamometer testing for DPF equipped heavy-duty diesel vehicles[J]. Aerosol Science and Technology, 2009, **43**(10): 962-969.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 10

Oct. 15, 2016


## CONTENTS


Scavenging Effect of Rime and East Wind on $PM_{2.5}$ Under Air Heavy Pollution in Beijing ····· SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, *et al.* (3679)

Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes ····· DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)

Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing ····· LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, *et al.* (3693)

Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province ····· XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, *et al.* (3702)

Oxidative Capacity of the $PM_{10}$ and $PM_{2.5}$ in Beijing During 2014 APEC ····· GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, *et al.* (3708)

Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of $PM_{2.5}$ During Summer in Hongshan District, Wuhan ····· SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, *et al.* (3714)

Statistical Characteristics of Urban Changzhou $PM_{2.5}$ Based on *k*-means Analysis ····· WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, *et al.* (3723)

Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for $PM_{2.5}$ ····· YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, *et al.* (3730)

Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion ····· LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, *et al.* (3737)

Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles ····· FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, *et al.* (3743)

Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China ····· XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, *et al.* (3750)

Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China ····· ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, *et al.* (3758)

Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants ····· DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, *et al.* (3766)

Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area ····· CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, *et al.* (3774)

Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved *n*-alkane in Underground River ····· LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, *et al.* (3781)

Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China: Based on PMF Model ····· WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, *et al.* (3789)

Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region ····· HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, *et al.* (3798)

UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis ····· QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, *et al.* (3806)

Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause ····· HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, *et al.* (3813)

Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming ····· CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, *et al.* (3821)

Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake ····· DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, *et al.* (3828)

Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments ····· HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, *et al.* (3835)

Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water ····· JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, *et al.* (3842)

GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of *M. Aeruginosa* ····· LI Jie, XIAO Lin (3850)

Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies ····· WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, *et al.* (3858)

Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process ····· XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, *et al.* (3864)

Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species ····· ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, *et al.* (3870)

Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China ····· LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, *et al.* (3877)

Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by $O_3$/UV ····· CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, *et al.* (3884)

Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of *Klebsiella oxytoca* GS-4-08 with Sucrose ····· HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)

Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater ····· SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, *et al.* (3899)

Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow ····· WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, *et al.* (3906)

Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary ····· FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, *et al.* (3914)

Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater ····· MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, *et al.* (3923)

Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau ····· LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)

Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge ····· HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, *et al.* (3939)

Comparative Investigation of Antibotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate ····· HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, *et al.* (3949)

Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain *Desulfovibrio* sp. CMX ····· XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, *et al.* (3955)

Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields ····· XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, *et al.* (3963)

Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China ····· ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, *et al.* (3971)

Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields ····· ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, *et al.* (3979)

Effects of Soil Texture on Autotrophic $CO_2$ Fixation Bacterial Communities and Their $CO_2$ Assimilation Contents ····· WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, *et al.* (3987)

Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System ····· SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, *et al.* (3996)

Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments ····· WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, *et al.* (4004)

Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil ····· ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, *et al.* (4011)

Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer ····· SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, *et al.* (4020)

Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels ····· QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, *et al.* (4030)

Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in *Lolium perenne* L. and *Pharibitis purpurea* (L.) Voigt ····· DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, *et al.* (4044)

*In vitro* Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes ····· LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, *et al.* (4054)

Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues ····· SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, *et al.* (4062)

# 《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 10 月 15 日　第 37 卷　第 10 期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

（Monthly　Started in 1976）

Vol. 37　No. 10　Oct. 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）<br>北京市环境保护科学研究院<br>清 华 大 学 环 境 学 院 | **Co-Sponsored** by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085）<br>电话：010-62941102，010-62849343<br>传真：010-62849343<br>E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | **Edited** by | The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE）<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel：010-62941102, 010-62849343; Fax：010-62849343<br>E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出　　版 | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码：100717 | **Published** by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话：010-64017032<br>E-mail：journal@ mail. sciencep. com | **Distributed** by | Science Press<br>Tel：010-64017032<br>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 | 中国国际图书贸易集团有限公司<br>（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