

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3  
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM<sub>2.5</sub> 分布格局演变及其影响因素 ..... 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 ..... 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM<sub>2.5</sub> 化学组分及来源分析 ..... 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM<sub>2.5</sub> 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 ..... 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 ..... 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 ..... 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 ..... 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 ..... 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 ..... 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 ..... 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 ..... 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 ..... 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 ..... 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 ..... 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 ..... 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 ..... 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 ..... 张琪, 黄凌, 殷可佳, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 ..... 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 ..... 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 ..... 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹翔, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 ..... 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 ..... 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 ..... 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 ..... 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) ..... 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 ..... 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 ..... 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 ..... 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 ..... 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 ..... 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 ..... 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 ..... 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 ..... 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 ..... 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 ..... 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 ..... 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 ..... 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 ..... 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 ..... 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 ..... 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 ..... 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 ..... 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 ..... 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 ..... 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 ..... 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 ..... 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 ..... 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 ..... 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 ..... 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N<sub>2</sub>O 排放的影响 ..... 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 ..... 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 ..... 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 ..... 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As<sup>5+</sup> 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 ..... 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

# 在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测

王瑞宁<sup>1</sup>, 胡馨遥<sup>2</sup>, 任洪娟<sup>1</sup>, 马冬<sup>3</sup>, 徐冲<sup>1</sup>, 赵玺乾<sup>4</sup>, 王孟昊<sup>1</sup>, 徐为标<sup>1</sup>, 安静宇<sup>2</sup>, 黄成<sup>2\*</sup>

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 上海市环境科学研究院, 国家环境保护城市大气复合污染成因与防治重点实验室, 上海 200233; 3. 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; 4. 江苏大学汽车与车辆工程学院, 镇江 212013)

**摘要:** 分别选取国3~国5轻型汽油车9辆和重型柴油车15辆采用实验室底盘测功机和全流稀释定容采样系统(CVS)开展了汽柴油车尾气颗粒物排放因子实测和粒径分布比较, 分析并比较了行驶工况和排放控制水平对汽柴油车尾气颗粒物排放因子和粒径分布的影响。结果表明, 轻型汽油车和重型柴油车的颗粒数量单位燃料平均排放因子分别为 $(4.1 \pm 4.0) \times 10^{14} \text{ kg}^{-1}$ 和 $(5.7 \pm 4.3) \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ , 重型柴油车颗粒数量排放因子是轻型汽油车的 $(14 \pm 7)$ 倍。轻型汽油车超高速工况下颗粒物数量排放因子显著高于其他工况, 颗粒数排放因子达到 $(5.1 \pm 5.0) \times 10^{13} \text{ km}^{-1}$ , 分别是低速、中速和中速工况的11.7、14.1和7.3倍, 重型柴油车高速工况颗粒数排放因子分别是低速和中速工况的2.5倍和1.4倍, 且增长的颗粒物主要为核模态颗粒。国3~国5排放控制水平下汽油车颗粒物数量排放因子分别为 $(2.7 \pm 1.7) \times 10^{13}$ 、 $(2.6 \pm 1.3) \times 10^{13}$ 和 $(1.6 \pm 1.2) \times 10^{13} \text{ km}^{-1}$ , 重型柴油车颗粒物数量排放因子分别为 $(2.2 \pm 1.2) \times 10^{15}$ 、 $2.0 \times 10^{15}$ 和 $(7.1 \pm 2.1) \times 10^{14} \text{ km}^{-1}$ , 随着排放控制水平的提升, 轻型汽油车和重型柴油车颗粒数排放控制总体上均呈现较好下降趋势, 但柴油车排放粒径110nm以上颗粒物随排放标准提升未有改善, 虽然柴油车粒径110 nm以上的数量排放因子相对较低, 但其对环境的危害不容忽视, 应当引起必要的关注。

**关键词:** 粒径分布; 机动车排放; 排放因子; 底盘测功机; 颗粒物污染

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1151-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201909114

## Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles

WANG Rui-ning<sup>1</sup>, HU Qing-yao<sup>2</sup>, REN Hong-juan<sup>1</sup>, MA Dong<sup>3</sup>, XU Chong<sup>1</sup>, ZHAO Xi-qian<sup>4</sup>, WANG Meng-hao<sup>1</sup>, XU Wei-biao<sup>1</sup>, AN Jing-yu<sup>2</sup>, HUANG Cheng<sup>2\*</sup>

(1. School of Mechanical and Automobile Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2. State Environment Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of the Urban Air Complex, Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 3. State Environment Protection Key Laboratory of Vehicle Pollution Control and Simulation, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. School of Mechanical and Automobile Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Particle size distribution and emission factors from 9 State 3-5 light-duty gasoline vehicles (LDGVs) and 15 State 3-5 heavy-duty diesel vehicles (HDDVs) were tested in this study using a constant volume sampling (CVS) system on a dynamometer. The influences of driving cycles and emission control level on the PM emission factors and particle size distribution were analyzed. The results show that the PM emission factors of the tested LDGVs and HDDVs were  $(4.1 \pm 4.0) \times 10^{14}$  and  $(5.7 \pm 4.3) \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ , respectively; the HDDV PM emission factor was  $(14 \pm 7)$  times less than that of LDGVs. Regarding LDGVs, the PM emission factor under the extra high speed condition was much more than that of the other speed conditions at  $(5.1 \pm 5.0) \times 10^{13} \text{ km}^{-1}$ , 11.7, 14.1, and 7.3 times more than that under the low, medium, and high speed conditions, respectively. Regarding HDDVs, the emission factor under the high speed condition was 2.5 and 1.4 times that under the low and medium speed conditions, respectively, and was mostly of nuclei-mode particles. At the emission control level of State 3-5, the PM emission factors of LDGVs were  $(2.7 \pm 1.7) \times 10^{13}$ ,  $(2.6 \pm 1.3) \times 10^{13}$ , and  $(1.6 \pm 1.2) \times 10^{13} \text{ km}^{-1}$ , respectively, and those of HDDVs were  $(2.2 \pm 1.2) \times 10^{15}$ ,  $2.0 \times 10^{15}$ , and  $(7.1 \pm 2.1) \times 10^{14} \text{ km}^{-1}$ , respectively. With improvement in emission control level, the particle number emission control of LDGVs and HDDVs generally showed a good downward trend. However, the emission of PM above 110 nm from LDGVs did not improve with the emission control level. Although the quantity emission factor of HDDVs with particle size above 110 nm is relatively low, its harm to the environment cannot be ignored, which should justify necessary attention.

**Key words:** particle size distribution; vehicle emission; emission factors; dynamometer chassis; PM pollution

收稿日期: 2019-09-11; 修订日期: 2019-10-31

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0212106); 国家自然科学基金项目(21777101); 上海市科委项目(18dz1203100); 上海市生态环境局项目(沪环科2019-01号)

作者简介: 王瑞宁(1994~), 男, 硕士, 主要研究方向发动机排放控制, E-mail: ruining\_w@163.com

\* 通信作者, E-mail: huangc@saes.sh.cn

颗粒物的粒径大小决定了其对大气能见度和人体健康的影响程度<sup>[1~3]</sup>,直径小于 50 nm 的核模态颗粒物(nuclei-mode particles)不但可以通过人体的呼吸直达肺部并沉积下来,甚至可进入血液循环并流向大脑和心脏,对人体的呼吸、免疫系统产生危害<sup>[4]</sup>.直径大于 50 nm 积聚模态颗粒(accumulation-mode particles)对颗粒物质量浓度具有显著贡献,是导致大气能见度下降的重要因素<sup>[5~7]</sup>.

机动车排放的颗粒物中核模态和积聚模态颗粒均十分丰富,其中,核模态颗粒尽管在总质量中占比较低,但其颗粒数量往往占据主导地位<sup>[8~11]</sup>.机动车是我国城市大气细颗粒物的重要来源,其对 PM<sub>2.5</sub> 的污染贡献可达 20%~30%<sup>[12]</sup>,摸清机动车颗粒物排放的粒径分布特征,将有助于更好地揭示其对大气颗粒物的污染贡献及健康效应.已有研究表明,汽、柴油车颗粒物粒径分布特征存在差异,柴油车单位燃料颗粒质量和数量排放因子通常比汽油车多一个数量级<sup>[9,13~15]</sup>,其颗粒体积排放因子接近汽油车的 30 倍左右<sup>[16]</sup>.为了减少机动车排放的颗粒物对大气环境的影响,从机动车第六阶段排放标准开始设置了颗粒数排放限值.因此,摸清机动车排放的粒径分布特征及其影响因素对于控制其颗粒数排放具有十分重要的意义.

机动车排放控制水平和行驶工况是影响其颗粒物粒径分布特征的重要因素.近年来机动车排放标准逐步提升,汽、柴油车颗粒物排放水平总体呈下降趋势<sup>[17~20]</sup>,但是对不同粒径段颗粒物的影响仍鲜有研究涉及.为此,本研究分别选取了 9 辆轻型汽油车和 15 辆重型柴油车,采用底盘测功机和全流稀释定容采样系统(CVS)方法,搭载颗粒物粒径谱仪,对汽、柴油车颗粒物粒径分布进行了实测,掌握了机动车颗粒物的粒径分布特征及其受排放控制水平和行驶工况的影响,以期为摸清机动车排放对大气环境的影响提供基础研究支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验车辆

本研究共选取 24 辆汽、柴油车开展测试.轻型汽油车 9 辆,包括 2 辆国 3、3 辆国 4 和 4 辆国 5,发动机功率在 74~106 kW 之间,其中,8 辆均为多点喷射发动机,1 辆为缸内直喷发动机.重型柴油车共 15 辆,包括 12 辆国 3、1 辆国 4 和 2 辆国 5,除 1 辆车为重型厢式货车(发动机功率为 128 kW)外,其余均为集装箱货运车辆,发动机功率在 199~250 kW 之间,均为高压共轨发动机,具体车辆信息见表 1.测试油品均使用市售国 5 汽油和柴油.

表 1 试验车辆信息

Table 1 Information about the tested vehicles

序号	车型	燃料种类	出厂日期 (年-月)	排放标准	发动机功率 /kW	排量 /L	喷油方式	里程表 读数/km	最大总 质量/kg	测试循环
1	东风标致	汽油	2008-01	国 3	74	1.6	多点喷射	129 054	1 739	WLTC
2	通用别克	汽油	2008-02	国 3	88	1.8	多点喷射	88 486	1 675	WLTC
3	雪弗兰	汽油	2013-06	国 4	105	1.8	多点喷射	125 719	1 881	WLTC
4	本田思域	汽油	2011-07	国 4	103	1.8	多点喷射	90 951	1 680	WLTC
5	起亚福瑞迪	汽油	2010-09	国 4	90	1.6	多点喷射	116 100	1 640	WLTC
6	长安逸动	汽油	2015-02	国 5	82	1.6	多点喷射	47 825	1 700	WLTC
7	本田思铭	汽油	2014-12	国 5	100	1.8	多点喷射	23 529	1 680	WLTC
8	大众朗逸	汽油	2016-05	国 5	81	1.6	缸内直喷	30 650	1 755	WLTC
9	启辰	汽油	2016-06	国 5	106	2.0	多点喷射	18 007	1 850	WLTC
10	陕汽	柴油	2011-11	国 3	213	9.7	高压共轨	224 117	18 000	C-WTVC
11	陕汽	柴油	2013-06	国 3	213	9.7	高压共轨	293 967	18 000	C-WTVC
12	江淮	柴油	2013-06	国 3	199	9.7	高压共轨	268 668	18 000	C-WTVC
13	陕汽	柴油	2011-11	国 3	199	9.7	高压共轨	459 502	18 000	C-WTVC
14	陕汽	柴油	2011-03	国 3	199	9.7	高压共轨	489 236	18 000	C-WTVC
15	陕汽	柴油	2011-03	国 3	199	9.7	高压共轨	374 484	18 000	C-WTVC
16	陕汽	柴油	2011-03	国 3	199	9.7	高压共轨	89 642	18 000	C-WTVC
17	陕汽	柴油	2011-03	国 3	199	9.7	高压共轨	412 907	18 000	C-WTVC
18	陕汽	柴油	2008-04	国 3	199	9.7	高压共轨	652 985	18 000	C-WTVC
19	陕汽	柴油	2011-03	国 3	199	9.7	高压共轨	407 854	18 000	C-WTVC
20	红岩	柴油	2013-06	国 3	250	8.7	高压共轨	464 716	18 000	C-WTVC
21	红岩	柴油	2011-03	国 3	250	8.7	高压共轨	533 717	18 000	C-WTVC
22	陕汽	柴油	2014-07	国 4	242	9.7	高压共轨	324 680	18 000	C-WTVC
23	陕汽	柴油	2017-06	国 5	242	7.5	高压共轨	82 219	18 000	C-WTVC
24	东风	柴油	2018-06	国 5	128	6.5	高压共轨	51 361	16 000	C-WTVC

## 1.2 测试设备与方法

车辆均采用底盘测功机和定容全流稀释采样方法开展测量, Suarez-Bertoa 等<sup>[21]</sup>和 Weber 等<sup>[22]</sup>的研究表明环境温度会影响机动车的排放性能,因此试验全程在密闭试验舱内进行,温度控制在 25℃ 左右. 轻型汽油车底盘测功机采用德国 Schenck 公司的 48'四驱可调轴距式产品, CVS 系统采用 HORIBA 公司的 MEXA-7400DLE 系列产品,可同时进行 CO、THC 和 NO<sub>x</sub> 等气态污染物测量. 重型柴油车底盘测功机采用德国 MAHA 公司的 ECDM-72H 测功机系统, CVS 系统采用 HORIBA 公司的 MEXA-7000 系列产品,可测污染物与汽油车一致. 颗粒物粒径谱使用美国 TSI 公司的 EEPS-3090 型粒径谱仪进行测量, EEPS 使用一个特殊的充电系统和多级静电计同时获得所有粒子粒径的信号,可显示 32 个粒径通道中结果,检测范围是 5.6 ~ 560 nm,检测频率为 10 Hz, 早先研究者使用 SMPS 研究粒径分布特征,但是其分析频率仅为 0.03 Hz, 由于 EEPS 较快的分析频率,更加适合被用于分析颗粒物粒径分布特征,已被国内外学者广泛使用. 汽油车 CVS 系统的流量控制在 9 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>, 测试工况采用全球轻型车统一测试循环(worldwide harmonized light vehicles test cycle, WLTC), 分别在冷启动、热启动条件下各开展一次试验,该循环共 1 800 s, 由 4 个部分组成,分别是低速 589 s、中速 433 s、高速 455 s 和超高速 323 s,最高车速 131.3 km·h<sup>-1</sup>,平均车速 46.5 km·h<sup>-1</sup>,行驶距离约 23.3 km,怠速时间占比为 13.2%,冷启动测试前,车辆在常温下浸滞 12 h 以上. 柴油车 CVS 系统的流量控制在 140 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>,测试工况为世界重型商用车瞬态循环(world transient vehicle cycle, C-WTVC),每辆车在热车状态下各开展两次试验,该循环共 1 800 s,分为市区循环(低速)900 s、公路循环(中速)468 s 和高速循环(高速)432 s 这 3 个部分,最高车速 87.6 km·h<sup>-1</sup>,平均车速 41 km·h<sup>-1</sup>,行驶距离 20 km,怠速时间占比为 13.3%.

## 1.3 计算方法

每辆车不同工况下单位燃料排放因子计算公式如(1)所示:

$$EF = \frac{c_m F_m}{E_m} \times 10^6 \times \frac{1}{60} \quad (1)$$

式中,汽油车  $m$  分为低速、中速、高速、超高速和全工况,柴油车  $m$  分为低速、中速、高速和全工况,  $EF$  为每辆车在  $m$  工况下单位燃料排放因子(kg<sup>-1</sup>);  $C_m$  为  $m$  工况下颗粒物的浓度(个·cm<sup>-3</sup>);  $F_m$  为 CVS 流量(m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>);  $E_m$  为  $m$  工况下消耗

的燃油质量(kg). 全工况考虑整个 1 800 s 测试循环,即全工况排放因子为该车的排放因子.

每辆车不同工况下单位里程排放因子计算公式如(2)所示:

$$ES = \frac{c_m F_m}{S_m} \times 10^6 \times \frac{1}{60} \quad (2)$$

式中,  $ES$  为每辆车在  $m$  工况下单位里程排放因子(km<sup>-1</sup>);  $C_m$  为  $m$  工况下颗粒物的浓度(个·cm<sup>-3</sup>);  $F_m$  为 CVS 流量(m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>);  $S_m$  为  $m$  工况下行驶的距离(km).

单位燃料平均排放因子计算公式如(3)所示:

$$EF_a = \frac{1}{i} \sum_i EF_i \quad (3)$$

式中,  $EF_a$  为单位燃料平均排放因子(kg<sup>-1</sup>);  $i$  为测试车辆的总量(辆);  $EF_i$  为某测试车辆单位燃油排放因子(kg<sup>-1</sup>),可由公式(1)计算获得.

不同排放控制水平下单位燃料平均排放因子计算公式如(4)所示:

$$EF_{a,L} = \frac{1}{j} \sum_j EF_j \quad (4)$$

式中,  $EF_{a,L}$  为  $L$  排放控制水平下单位燃料平均排放因子(kg<sup>-1</sup>);  $j$  为  $L$  排放控制水平下测试车辆的数量(辆);  $EF_j$  为  $L$  排放控制水平下某测试车辆单位燃油排放因子(kg<sup>-1</sup>),可由公式(1)计算获得;  $L$  包括国 3、国 4 和国 5 排放控制水平.

## 2 结果与讨论

### 2.1 颗粒数量排放因子

轻型汽油车和重型柴油车的颗粒数量单位燃料平均排放因子分别为  $(4.1 \pm 4.0) \times 10^{14}$  kg<sup>-1</sup> 和  $(5.7 \pm 4.3) \times 10^{15}$  kg<sup>-1</sup> (表 2), 单位里程排放因子分别为  $(2.2 \pm 2.1) \times 10^{13}$  km<sup>-1</sup> 和  $(1.9 \pm 1.4) \times 10^{15}$  km<sup>-1</sup>, 国 4 和国 5 轻型汽油车的颗粒数排放因子分别是国 3 车的 106.5% 和 67.4%, 国 4 和国 5 重型柴油车颗粒数排放因子则分别是国 3 车的 83.3% 和 30.3%, 近年来车辆排放控制水平逐步提升对颗粒物数量具有一定的控制效果. 重型柴油车颗粒数量排放因子是轻型汽油车的  $(14 \pm 7)$  倍, 与已有研究测试结果相近<sup>[15,16,23~26]</sup>.

### 2.2 颗粒物粒径分布特征

图 1 所示分别为轻型汽油车和重型柴油车的颗粒物数量粒径分布和颗粒物质量粒径分布. 由图 1 (a) 可知, 轻型汽油车和重型柴油车排放的颗粒物数量粒径分布总体呈单峰状, 颗粒物粒径主要集中在 10 ~ 30 nm 左右的粒径段, 轻型汽油车和重型柴油车的颗粒数峰值粒径分别在 20 nm 和 12 nm 左

右,然后随着粒径逐渐增大,颗粒物数量呈下降趋势.图1(b)表明重型柴油车的颗粒物质量粒径大致呈双峰状,峰值粒径分别位于80 nm和250 nm左

右,超过350 nm左右,颗粒物质量随粒径增大呈快速上升趋势;轻型汽油车颗粒物质量粒径分布呈单峰状,峰值粒径位于220 nm左右.

表2 汽油车和柴油车颗粒数平均排放因子

排放标准	轻型汽油车		重型柴油车		因子比 (柴油车/汽油车)	文献
	测试方法	排放因子/kg <sup>-1</sup>	测试方法	排放因子/kg <sup>-1</sup>		
国3	WLTC	(4.6 ± 3.1) × 10 <sup>14</sup>	C-WTVC	(6.6 ± 4.0) × 10 <sup>15</sup>	14 ± 4	本研究
国4	WLTC	(4.9 ± 2.0) × 10 <sup>14</sup>	C-WTVC	5.5 × 10 <sup>15</sup>	11 ± 8	本研究
国5	WLTC	(3.1 ± 3.0) × 10 <sup>14</sup>	C-WTVC	(2.0 ± 0.6) × 10 <sup>15</sup>	6 ± 5	本研究
平均	WLTC	(4.1 ± 4.0) × 10 <sup>14</sup>	C-WTVC	(5.7 ± 4.3) × 10 <sup>15</sup>	14 ± 7	本研究
未知	隧道	(1.6 ± 0.4) × 10 <sup>15</sup>	隧道	(12 ± 3) × 10 <sup>15</sup>	7.5 ± 2.7	[15]
欧四及以上	隧道	(3.9 ± 1.4) × 10 <sup>14</sup>	隧道	(3.3 ± 1.3) × 10 <sup>15</sup>	8 ± 5	[16]
欧二及以上	隧道	(4.6 ± 1.3) × 10 <sup>14</sup>	隧道	(7.1 ± 3.3) × 10 <sup>15</sup>	15 ± 8	[23]
国5及以上	道路追车	3.2 × 10 <sup>14</sup>	道路追车	3.3 × 10 <sup>15</sup>	10.3	[24]
未知	隧道	2.5 × 10 <sup>14</sup>	隧道	8.2 × 10 <sup>15</sup>	33	[25]
未知	MMP	6.0 × 10 <sup>14</sup>	MMP	4.5 × 10 <sup>15</sup>	7.5	[26]

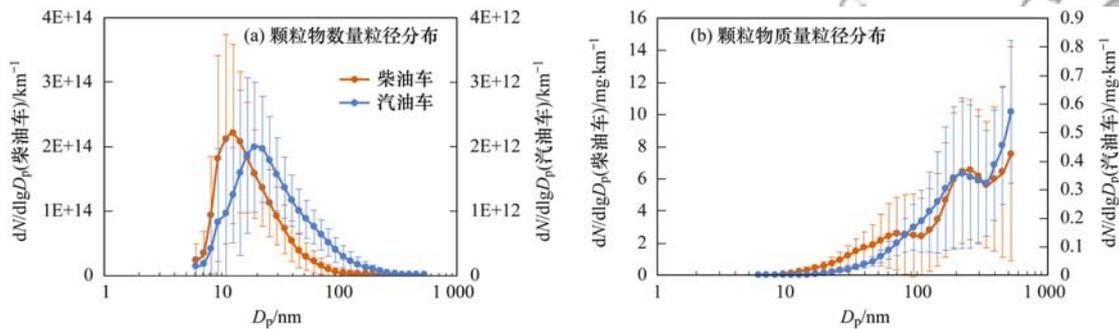


图1 汽油车和柴油车粒径分布特征

Fig. 1 Particle size distribution from gasoline and diesel vehicles

2.3 工况对粒径分布特征的影响

图2所示为轻型汽油车和重型柴油车在冷、热启动以及各工况段下的核模态和积聚模态的颗粒物数量排放因子比较.已有研究表明汽油车冷启动工况时间约在车辆启动后300 s左右,因此选取启动后300 s分析启动工况排放.轻型汽油车根据WLTC测试循环分为低速、中速、高速和超高速这4段,平均车速分别为18.9、39.9、56.6和90.9 km·h<sup>-1</sup>;重型柴油车行驶工况分为低速、中速、高速这3段,平均车速分别为24.0、43.8和74.8 km·h<sup>-1</sup>.汽油车方面,启动后300 s内,冷启动颗粒物数量排放因子约是热启动的2倍,其中冷启动积聚模态颗粒数排放因子是热启动的6.8倍,核

膜态则是热启动的1.7倍,主要是由于冷启动工况下颗粒物中含有大量未燃烧碳氢凝结的有机组分,粒径相对更大.从各种工况段来看,超高速工况下颗粒物数量排放因子显著高于其他工况,颗粒数排放因子达到(5.1 ± 5.0) × 10<sup>13</sup> km<sup>-1</sup>,分别是低速、中速和高速工况的11.7、14.1和7.3倍.重型柴油车的颗粒物数量排放因子也随车速上升呈显著上升趋势,高速工况颗粒数排放因子分别是低速和中速工况的2.5倍和1.4倍,且增长的颗粒物主要为核模态颗粒.

图3所示为轻型汽油车和重型柴油车在各种工况下的粒径分布特征.可见,轻型汽油车颗粒数粒径分布随工况存在较大差异.冷启动期间,除10 nm以

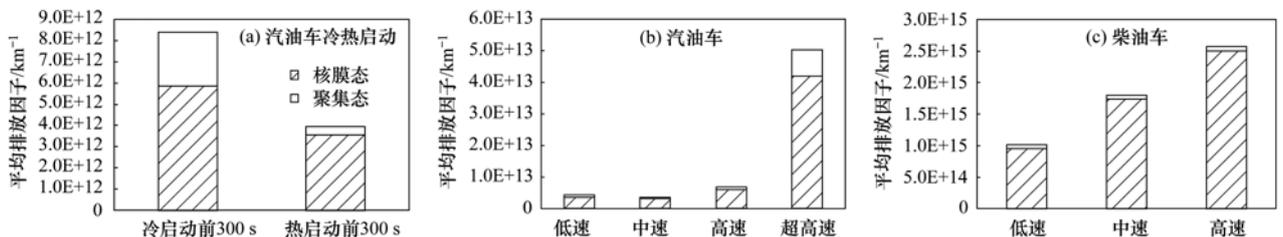


图2 汽油车和柴油车各模态颗粒物数量排放因子

Fig. 2 Comparisons of PM emission factors from gasoline and diesel vehicles under different driving conditions

下颗粒与热启动接近外,其他粒径段颗粒物数量显著高于热启动. 低速、中速和高速工况下颗粒数粒径分布较为接近,峰值粒径位于 10 nm 左右,但在超高速工况下,峰值粒径增大至 20 nm 左右,且 20 nm 以上粒径段颗粒数均显著高于其他工况. 总体来看,冷启动和超高速工况是轻型汽油车颗粒物控制的重

点. 相对而言,重型柴油车各工况下的颗粒数粒径分布特征无显著差异,峰值粒径均位于 10 ~ 20 nm 之间,随着速度的上升,核模态颗粒物数量呈逐渐上升趋势,而积聚模态颗粒数则相应呈下降趋势,高速工况下柴油车负荷更高,燃烧温度相对更高,更有利于超细颗粒物生成.

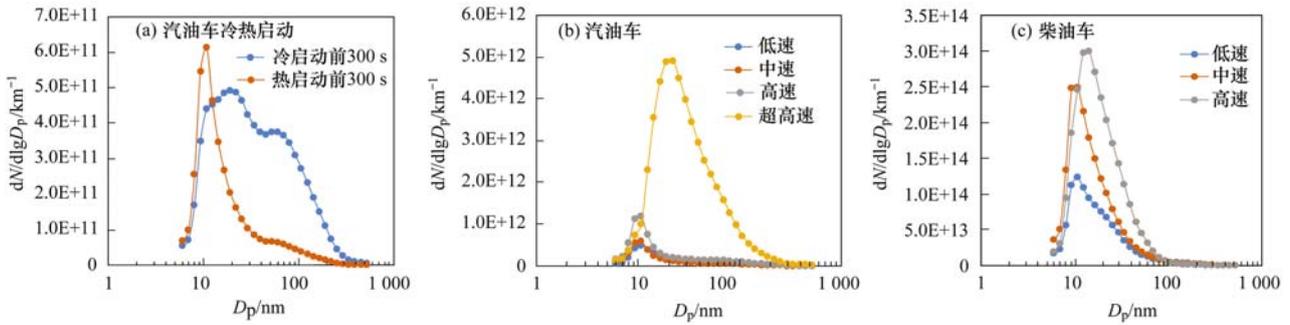


图 3 汽油车和柴油车各工况下颗粒数粒径分布比较

Fig. 3 Comparisons of particle size distribution from gasoline and diesel vehicles under different driving conditions

2.4 排放控制水平对粒径分布特征的影响

图 4 所示为各排放阶段轻型汽油车和重型柴油车实测颗粒物数量平均排放因子比较. 国 3、国 4 和国 5 排放控制水平下汽油车颗粒物数量平均排放因子分别为  $(2.7 \pm 1.7) \times 10^{13}$ 、 $(2.6 \pm 1.3) \times 10^{13}$  和  $(1.6 \pm 1.2) \times 10^{13} \text{ km}^{-1}$ , 国 4 和国 5 的汽油车相比于国 3 下降了 0.6% 和 41.5%; 国 3、国 4 和国 5 的

重型柴油车颗粒物数量平均排放因子分别为  $(2.2 \pm 1.2) \times 10^{15}$ 、 $2.0 \times 10^{15}$  和  $(7.1 \pm 2.1) \times 10^{14} \text{ km}^{-1}$ , 国 4 和国 5 的重型柴油车相比于国 3 下降了 9.0% 和 67.4%. 总体来看,随着排放控制水平的提升,轻型汽油车和重型柴油车颗粒数排放控制总体上均呈现较好地下降趋势.

图 5 所示为各排放控制水平下轻型汽油车和重

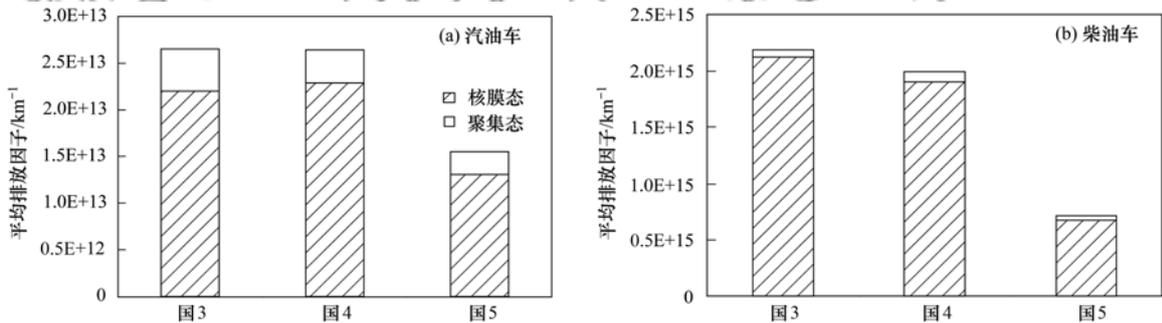


图 4 不同排放控制水平汽油车和柴油车颗粒物数量排放因子比较

Fig. 4 Comparisons of PM emission factors with different emission standards from gasoline and diesel vehicles

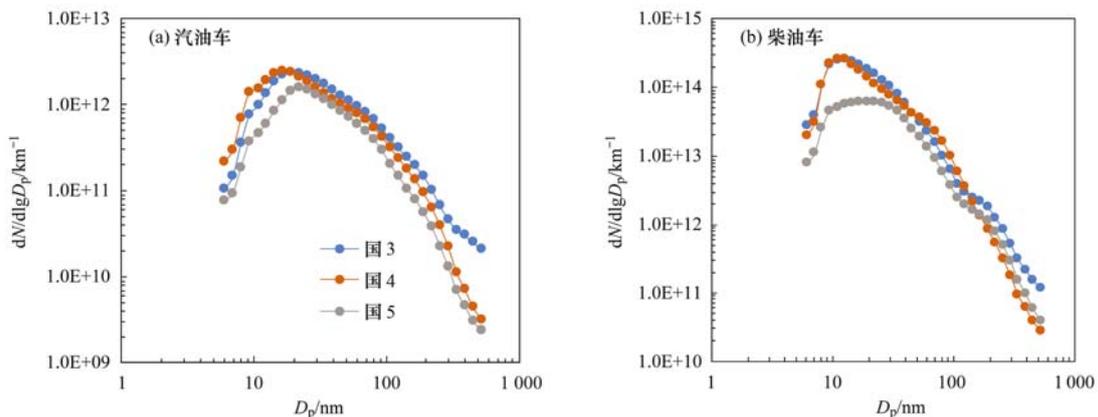


图 5 不同排放控制水平汽油车和柴油车颗粒物数量粒径分布特征

Fig. 5 Comparisons of PM emission factors with different emission standards from gasoline and diesel vehicles

型柴油车实测粒径分布特征,横纵坐标均为对数坐标.汽油车和柴油车在大部分粒径下颗粒物排放控制取得了较为显著的效果.汽油车方面,国5所有粒径大小的颗粒物排放水平最低,然而随着排放水平的提升,粒径在20~50 nm的颗粒物减排效果较小.柴油车方面,随着排放水平的提升,粒径110 nm以下的颗粒物减排效果明显,但是国5排放水平所排粒径110 nm以上的颗粒物却大于国4,虽然粒径110 nm以上的数量排放因子相对较低,但其对环境的危害不容忽视,应当引起必要的关注.

### 3 结论

(1)选取了9辆轻型汽油车和15辆重型柴油车,通过底盘测功机实测得出:轻型汽油车和重型柴油车的颗粒数量单位燃料平均排放因子分别为 $(4.1 \pm 4.0) \times 10^{14} \text{ kg}^{-1}$ 和 $(5.7 \pm 4.3) \times 10^{15} \text{ kg}^{-1}$ ,单位里程平均排放因子分别为 $(2.2 \pm 2.1) \times 10^{13} \text{ km}^{-1}$ 和 $(1.9 \pm 1.4) \times 10^{15} \text{ km}^{-1}$ ,重型柴油车颗粒数量单位燃料平均排放因子是轻型汽油车的 $(14 \pm 7)$ 倍.

(2)轻型汽油车和重型柴油车排放的颗粒物数量粒径分布总体呈单峰状,颗粒物粒径主要集中在10~30 nm左右的粒径段,但质量分布特征不同,重型柴油车的颗粒物质量粒径大致呈双峰状,轻型汽油车颗粒物质量粒径分布呈单峰状.

(3)汽油车启动后300 s内,冷启动颗粒物数量排放因子约是热启动的2倍,其中冷启动积聚模态颗粒数排放因子是热启动的6.8倍,核膜态则是热启动的1.7倍,冷启动前300 s内颗粒物排放较高应当引起必要的关注.

(4)轻型汽油车超高速工况下颗粒物数量平均排放因子显著高于其他工况,颗粒数排放因子达到 $(5.1 \pm 5.0) \times 10^{13} \text{ km}^{-1}$ ,分别是低速、中速和高速工况的11.7、14.1和7.3倍.重型柴油车高速工况颗粒数排放因子分别是低速和中速工况的2.5倍和1.4倍,且增长的颗粒物主要为核模态颗粒.

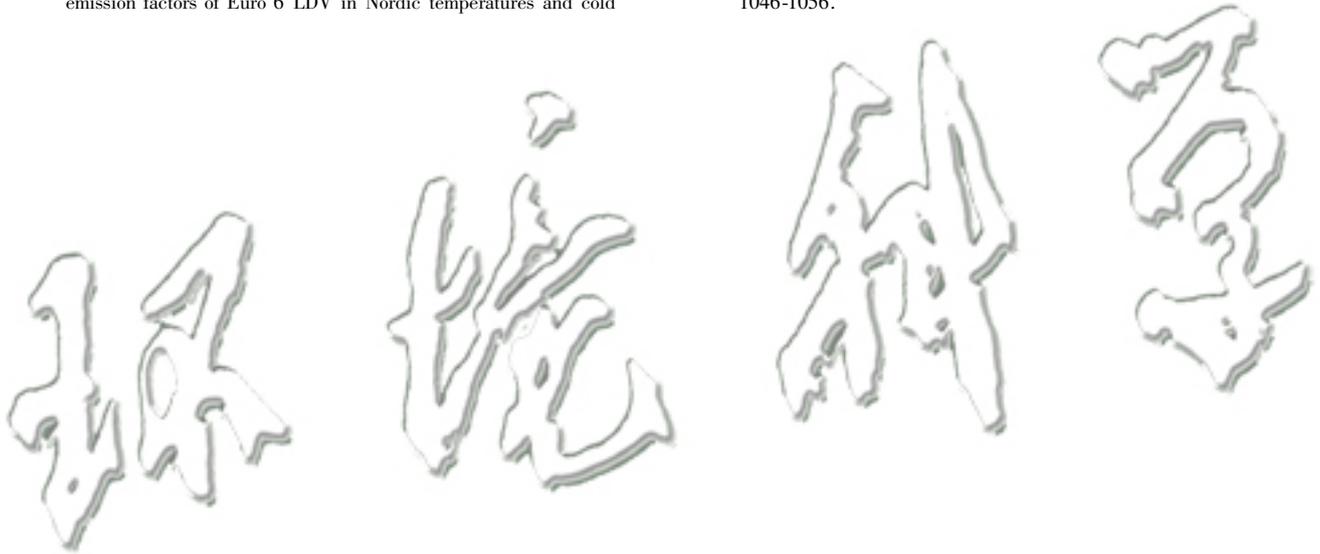
(5)国3、国4和国5排放控制水平下汽油车颗粒物数量平均排放因子分别为 $(2.7 \pm 1.7) \times 10^{13}$ 、 $(2.6 \pm 1.3) \times 10^{13}$ 和 $(1.6 \pm 1.2) \times 10^{13} \text{ km}^{-1}$ ,重型柴油车颗粒物数量平均排放因子分别为 $(2.2 \pm 1.2) \times 10^{15}$ 、 $2.0 \times 10^{15}$ 和 $(7.1 \pm 2.1) \times 10^{14} \text{ km}^{-1}$ ,随着排放控制水平的提升,轻型汽油车和重型柴油车颗粒数排放控制总体上均呈现较好的下降趋势,但柴油车排放110 nm以上颗粒物随排放标准的提升未有改善,虽然柴油车粒径110 nm以上的数量排放因子相对较低,但其对环境的危害不容忽视,

应当引起必要的关注.

### 参考文献:

- [1] Brunekreef B, Holgate S T. Air pollution and health [J]. *Lancet*, 2002, **360**(9341): 1233-1242.
- [2] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. USA: John Wiley & Sons, 2008.
- [3] Lin Z J, Tao J, Chai F H, *et al.* Impact of relative humidity and particles number size distribution on aerosol light extinction in the urban area of Guangzhou [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(3): 1115-1128.
- [4] Chan Y C, Simpson R W, McTainsh G H, *et al.* Characterisation of chemical species in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> aerosols in Brisbane, Australia[J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(22): 3773-3785.
- [5] Tian S L, Pan Y P, Wang Y S. Size-resolved source apportionment of particulate matter in urban Beijing during haze and non-haze episodes[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(1): 1-19.
- [6] Dall'Osto M, Beddows D C S, Tunved P, *et al.* Simultaneous measurements of aerosol size distributions at three sites in the European high Arctic [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(11): 7377-7395.
- [7] Du P, Gui H Q, Zhang J S, *et al.* Number size distribution of atmospheric particles in a suburban Beijing in the summer and winter of 2015 [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **186**: 32-44.
- [8] Kittelson D B. Engines and nanoparticles; a review [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1998, **29**(5-6): 575-588.
- [9] Kumar P, Morawska L, Birmili W, *et al.* Ultrafine particles in cities [J]. *Environment International*, 2014, **66**: 1-10.
- [10] Huang C, Lou D M, Hu Z Y, *et al.* A PEMS study of the emissions of gaseous pollutants and ultrafine particles from gasoline- and diesel-fueled vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **77**: 703-710.
- [11] Karner A A, Eisinger D S, Niemeier D A. Near-roadway air quality: synthesizing the findings from real-world data [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(14): 5334-5344.
- [12] 中华人民共和国生态环境部. 2018年中国机动车环境管理年报[R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019.
- [13] Wu Y, Zhang S J, Hao J M, *et al.* On-road vehicle emissions and their control in China: a review and outlook [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **574**: 332-349.
- [14] Haugen M J, Bishop G A. Long-term fuel-specific NO<sub>x</sub> and particle emission trends for in-use heavy-duty vehicles in California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **52**(10): 6070-6076.
- [15] Li X, Dallmann T R, May A A, *et al.* Size distribution of vehicle emitted primary particles measured in a traffic tunnel [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **191**: 9-18.
- [16] Ban-Weiss G A, Lunden M M, Kirchstetter T W, *et al.* Size-resolved particle number and volume emission factors for on-road gasoline and diesel motor vehicles [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2010, **41**(1): 5-12.
- [17] 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.
- [18] 黄成, 胡馨遥, 鲁君. 轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究[J]. 环境科学, 2018, **39**(7): 3110-3117.  
Huang C, Hu Q Y, Lu J. Measurements of OC and EC emission factors for light-duty gasoline vehicles [J]. Environmental Science, 2018, **39**(7): 3110-3117.
- [19] Huang C, Tao S K, Lou S R, *et al.* Evaluation of emission factors for light-duty gasoline vehicles based on chassis dynamometer and tunnel studies in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2017, **169**: 193-203.
- [20] Huang C, Hu Q Y, Lou S R, *et al.* Ammonia emission measurements for light-duty gasoline vehicles in China and implications for emission modeling[J]. Environmental Science & Technology, 2018, **52**(19): 11223-11231.
- [21] Suarez-Bertoa R, Astorga C. Impact of cold temperature on Euro 6 passenger car emissions[J]. Environmental Pollution, 2018, **234**: 318-329.
- [22] Weber C, Sundvor I, Figenbaum E. Comparison of regulated emission factors of Euro 6 LDV in Nordic temperatures and cold start conditions: diesel-and gasoline direct-injection [J]. Atmospheric Environment, 2019, **206**: 208-217.
- [23] Kirchstetter T W, Harley R A, Kreisberg N M, *et al.* On-road measurement of fine particle and nitrogen oxide emissions from light-and heavy-duty motor vehicles [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(18): 2955-2968.
- [24] Wen Y F, Wang H, Larson T, *et al.* On-highway vehicle emission factors, and spatial patterns, based on mobile monitoring and absolute principal component score[J]. Science of the Total Environment, 2019, **676**: 242-251.
- [25] Geller M D, Sardar S B, Phuleria H, *et al.* Measurements of particle number and mass concentrations and size distributions in a tunnel environment[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(22): 8653-8663.
- [26] Park S S, Kozawa K, Fruin S, *et al.* Emission factors for high-emitting vehicles based on on-road measurements of individual vehicle exhaust with a mobile measurement platform[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2011, **61**(10): 1046-1056.



## CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer .....	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM <sub>2.5</sub> During Autumn and Winter in Yangquan City .....	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM <sub>2.5</sub> from Taian City During the Summer .....	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan .....	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration .....	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo .....	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City .....	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province .....	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process .....	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning .....	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park .....	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017 .....	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China .....	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China .....	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles .....	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta .....	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring .....	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions .....	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin .....	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province .....	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau .....	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir .....	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature .....	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu .....	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China .....	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System .....	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area .....	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland .....	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies .....	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution .....	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials .....	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics .....	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir .....	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers .....	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake .....	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water .....	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX .....	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR) .....	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor .....	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure .....	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy .....	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance .....	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge .....	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City .....	LI Yan-lin, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil .....	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta .....	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria .....	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China .....	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N <sub>2</sub> O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain .....	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors .....	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite .....	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils .....	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As <sup>5+</sup> Stress .....	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)