

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



2019

Vol.40 No.10

第40卷 第10期

目次

京津冀区域重污染期间 PM _{2.5} 垂直分布及输送·····	肖致美, 徐虹, 李鹏, 唐遵, 陈魁, 杨宁, 郑乃源, 杨文, 邓小文 (4303)
肇庆市一次典型污染天气的污染物来源解析·····	常树诚, 廖程浩, 曾武涛, 杨柳林, 俞绍才, 陈雪, 郑剑平 (4310)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中水溶性化合物的昼夜变化特征及来源解析·····	衣雅男, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 王心培, 刘晓迪, 伏梦璇, 魏本杰 (4319)
沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 PM _{2.5} 和 PM ₁₀ 排放因子及碳组分源谱·····	赵雪艳, 王静, 祝胜男, 卞思思, 张宇, 王歆华, 殷宝辉, 杨文, 白志鹏 (4330)
城市生活垃圾露天焚烧排放 PM _{2.5} 中重金属污染特征及其暴露健康风险·····	程轲, 季婉婉, 郝炜伟, 王艳, 易鹏, 支国瑞, 张佳羽, 张洋, 张诗澜 (4337)
某工业城市大气颗粒物中 PAHs 的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估·····	王娟, 郭观林, 秦宁, 侯荣, 杨敏, 康艺瑾, 段小丽 (4345)
南京城市大气氨-铵的高频演化及其气粒转化机制·····	邵生成, 常运华, 曹芳, 林煜棋, 范美益, 谢锋, 洪一航, 章炎麟 (4355)
广州地区大气棕色碳气溶胶吸收特性·····	李铸杰, 谭浩波, 郑军 (4364)
郑州市春季大气挥发性有机物污染特征及源解析·····	张翼翔, 尹沙沙, 袁明浩, 张瑞芹, 张猛, 于世杰, 李一丹 (4372)
基于原料类型及末端治理的典型溶剂使用源 VOCs 排放系数·····	梁小明, 陈来国, 孙西勃, 赵伟, 卢清, 孙家仁, 陈朋龙, 叶代启 (4382)
北京市典型溶剂使用行业 VOCs 成分谱·····	方莉, 刘明文, 陈丹妮, 李国昊, 王迪, 邵霞, 聂磊 (4395)
民用固体燃料源的 IVOCs 排放特征及燃烧温度的影响·····	卢雅静, 冯艳丽, 钱哲, 韩勇, 陈颖军 (4404)
利用地面观测资料和 AIRS 卫星资料评估 MACC 再分析臭氧数据中国地区的适用性·····	王闰芳, 马晓丹, 赵天良, 王红磊, 丁涵, 郑小波 (4412)
镁铝水滑石衍生复合氧化物的 COS 水解性能·····	魏征, 张鑫, 张凤莲, 蒋国霞, 张雨萌, 周化兵, 郝郑平, 解强 (4423)
长江源区大气降水化学特征及离子来源·····	汪少勇, 何晓波, 吴锦奎, 丁永建, 胡召富, 王利辉, 杨贵森 (4431)
连续极端降雨对东江流域水质影响分析·····	车蕊, 林澍, 范中亚, 李文静, 曾凡棠, 毛本健, 石雷, 黄志伟 (4440)
基于湖泊与出入湖水水质关联性研究:以鄱阳湖为例·····	黄冬凌, 倪兆奎, 赵爽, 张波涛, 冯明雷, 陈宏文, 李晓秀, 王圣瑞 (4450)
金泽水库上游来水及库区水质变化时空分布特征·····	刘明坤, 童俊, 胡波, 朱慧峰, 白晓慧 (4461)
太湖不同介质电导率时空变化特征·····	王瑞, 代丹, 张弛, 邓义祥, 何成达, 于涛 (4469)
大型浅水湖泊磷模型参数不确定性及敏感性分析·····	施媛媛, 李一平, 程月, 程一鑫 (4478)
基于 MODIS 影像的洪泽湖水生植被覆盖时空变化特征及影响因素分析·····	李娜, 施坤, 张运林, 龚志军, 查勇, 张毅博 (4487)
草型湖区沉积物营养盐分布与污染评价·····	张杰, 汪院生, 郭西亚, 朱金格, 邓建才 (4497)
太湖草型湖区沉积物中生物易降解物质组成与分布规律·····	祁闯, 方家琪, 张利民, 司泽君, 黄和笑, 王卓森, 李翔, 王磊, 王国祥 (4505)
淀山湖浮游动物群落时空分布特征及其与环境因子的关系·····	杜彩丽, 杨丽, 赵诣, 吴晓敏, 徐慕, 王丽卿, 张玮 (4513)
岩溶区不同土地利用下地下水碳同位素地球化学特征及生态意义·····	任坤, 潘晓东, 曾洁, 焦友军, 彭聪, 梁嘉鹏 (4523)
岩溶地下水化学对城镇化进程的时序响应·····	杨应增, 何守阳, 吴攀, 吴起鑫, 韩志伟, 罗维 (4532)
巴中北部岩溶山区地下水化学特征及演化分析·····	唐金平, 张强, 胡漾, 邵江, 何文君, 张宇 (4543)
δ-MnO ₂ /沸石纳米复合材料同时去除地下水中的铁锰氨氮·····	马文婕, 陈天虎, 陈冬, 刘海波, 程鹏, 张泽鑫, 陶琼, 张玉珠 (4553)
不同香蒲预处理方式对水平潜流人工湿地脱氮的强化效果·····	熊家晴, 卢学斌, 郑于聪, 王晓昌 (4562)
不同控制策略下短程硝化启动及运行工况优化·····	刘安迪, 赵凯亮, 刘宏, 黄利, 倪蓉, 陈永志 (4569)
启动三级 PN/A 颗粒污泥反应器处理高浓度氨氮废水·····	吉晓庆, 齐泽坤, 钱飞跃, 沈耀良, 王建芳 (4578)
聚丙烯环生物滴滤塔去除实际市政污水厂硫化氢性能及微生物群落分析·····	孙事昊, 贾沛沛, 陈凯琦, 彭永臻, 张亮 (4585)
典型工业区土壤多环芳烃污染特征及影响因素·····	冉宗信, 陈靖宇, 王亚婷, 邢智, 魏威, 余江 (4594)
5 种典型有机磷酸酯在水-土壤界面吸附特征及影响因素·····	何明靖, 杨志豪, 魏世强 (4604)
Cu ²⁺ 和 Pb ²⁺ 在 BS-12 两性修饰膨润土上的吸附及其交互作用·····	卜帅宾, 孟昭福, Sambath Yek, 张梦飞, 王腾, 任爽, 张凌恺 (4611)
滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价·····	洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞 (4620)
贵州罗甸北部喀斯特地区耕地土壤镉含量特征与风险评价·····	唐启琳, 刘秀明, 刘方, 汪花, 王世杰 (4628)
渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术·····	李娜, 贺红周, 冯爱煊, 李伟, 蒋珍茂, 魏世强 (4637)
不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选·····	陈小华, 沈根祥, 白玉杰, 郭春霞, 钱晓雍, 顾海蓉, 胡双庆, 赵庆节, 王振旗, 付侃 (4647)
小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运·····	王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉 (4654)
微塑料对小麦生长及生理生化特性的影响·····	廖苑辰, 娜孜依古丽·加合甫别克, 李梅, 王晓琳, 蒋丽娟 (4661)
药渣生物炭基质联合麦饭石对土壤-黑麦草体系的调控与机制·····	肖亮亮, 丁园 (4668)
磺胺甲噁唑污染土壤中微生物群落结构与抗生素抗性基因的分布特征·····	张海丰, 史明明, 孙艳梅, 程首涛, 高浩泽, 王旭明 (4678)
生活垃圾渗滤液处理过程中抗生素抗性基因的变化特征·····	黄福义, 周曙仡聃, 颜一军, 苏建强, 朱永官, 张炯 (4685)
有机肥施用对土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响·····	邵慧芸, 李紫玥, 刘丹, 李熠凡, 鲁璐, 王旭东, 张阿凤, 王彦丽 (4691)
灌水和生物炭施用对水稻土呼吸温度敏感性的影响·····	周鹏, 祁乐, 牛海东, 王子芳, 高明 (4700)
柑橘/大蒜盖套作下土壤 CO ₂ 排放及其效率对秸秆还田量的响应·····	游璟, 倪九派, 黄容, 张洋, 谢德体 (4708)
增温及秸秆施用对豆-麦轮作土壤微生物量碳氮及细菌群落结构的影响·····	张婷婷, 陈书涛, 王君, 王朝辉, 胡正华 (4718)
O ₃ 胁迫下冬小麦总初级生产力的损耗模拟·····	徐静馨, 郑有飞, 王圣, 王立稳, 赵秀勇, 麦博儒 (4725)
2000~2015 年中国地级市化肥使用量的时空变化特征·····	潘晓东, 李品, 冯兆忠, 段昌群 (4733)
《环境科学》征订启事 (4394) 《环境科学》征稿简则 (4449) 信息 (4584, 4593, 4653)	

沈阳市国三和国四排放标准不同车型柴油车 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子及碳组分源谱

赵雪艳¹, 王静¹, 祝胜男², 卞思思², 张宇¹, 王歆华¹, 殷宝辉^{1*}, 杨文^{1*}, 白志鹏¹

(1. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 沈阳环境科学研究院, 沈阳 110000)

摘要: 柴油车是机动车排放的大气颗粒物的主要来源, 为研究沈阳市柴油车 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放因子及其碳组分排放特征, 采用检车线车载测试方法采集了 15 辆国三和国四排放标准的小型、中型、大型载客和轻型、中型、重型载货柴油车尾气样品, 并对其中的碳组分进行化学分析. 结果表明, 国三柴油车 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放因子分别为 $(0.193 \pm 0.092) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $(0.338 \pm 0.305) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$, 国四柴油车 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放因子分别为 $(0.085 \pm 0.038) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $(0.100 \pm 0.042) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$, 随排放标准的提升 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子显著下降. 同一排放标准下, 排放因子随车型的增大而增大. TC 为柴油车的主要组分, 国四柴油车中 TC 的质量分数 (23% ~ 48%) 明显低于国三柴油车 (29% ~ 70%). 各车型柴油车元素碳 (EC) 的质量分数均大于有机碳 (OC), OC/EC 为 0.70 ± 0.29 , 且国四柴油车 OC/EC 值低于国三柴油车. 因载客汽车总行驶里程明显高于载货汽车导致油耗较高, 相同排放标准载客汽车 OC 和 EC 的质量分数高于载货汽车. 国三、国四柴油车质量分数最高的碳组分均为 EC2, 可将 EC2 作为柴油车的标识组分.

关键词: 柴油车; 排放因子; 碳组分; 国三排放标准; 国四排放标准; 沈阳

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)10-4330-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903125

Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang

ZHAO Xue-yan¹, WANG Jing¹, ZHU Sheng-nan², BIAN Si-si², ZHANG Yu¹, WANG Xin-hua¹, YIN Bao-hui^{1*}, YANG Wen^{1*}, BAI Zhi-peng¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Shenyang Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110000, China)

Abstract: Diesel vehicles were the primary source of atmospheric particulate matter (PM) emitted by motor vehicles. To study the emission factors and carbon components of $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} from diesel vehicles in Shenyang, exhaust PM samples were collected from 15 diesel vehicles including small, medium, and large passenger vehicles, and light, medium, and heavy-duty trucks under China III and China IV emission standards. This was undertaken using a dilution channel sampling system, and the carbon components were also analyzed. The results showed that the average distance-based $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} emission factors for diesel vehicles under China III were $(0.193 \pm 0.092) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ and $(0.338 \pm 0.305) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$, respectively, and for China IV were $(0.085 \pm 0.038) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ and $(0.100 \pm 0.042) \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$, respectively. This shows that the PM emission factors decreased significantly with the improvement of emission standards. Under the same emission standards, emission factors increased with the increase of vehicle passenger volume or cargo capacity. TC (total carbon) was the main component of the emissions from diesel vehicles. The mass fraction of TC under China IV (23% - 48%) was significantly lower than under China III (29% - 70%). The mass fraction of elemental carbon (EC) for all types of diesel vehicles was greater than organic carbon (OC). The OC/EC value was 0.70 ± 0.29 , and the OC/EC value for diesel vehicles under China IV was lower than under China III. The total mileage of passenger vehicles was significantly higher than that of trucks, resulting in higher fuel consumption. The mass fraction of OC and EC in passenger vehicles was higher than for trucks under the same emission standards. EC2 (elemental carbon which was measured at temperatures of 700°C) was the highest carbon content of diesel vehicles under China III and China IV emission standards, which can be used in the identification of diesel vehicles in source apportionment studies.

Key words: diesel vehicles; emission factor; carbon fraction; China III emission standards; China IV emission standards; Shenyang

近年来,随着机动车保有量的增加,机动车尾气已成为多地 $\text{PM}_{2.5}$ 的首要污染源,北京市以机动车为主的移动源对 2017 年 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献高达 45%,天津^[1]和深圳^[2]等一线城市机动车一次排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献也较高,占到了 23.5% 和 27.0%. 2017 年我国柴油车保有量 1 956.7 万辆,占汽车保有量的 9.4%,但其排放的 PM 占到汽车总排放量

的 77.8%,柴油车是机动车排放的一次大气颗粒物的主要贡献者^[3,4]. 柴油车尾气中含有大量的碳组

收稿日期: 2019-03-14; 修订日期: 2019-04-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0212501)

作者简介: 赵雪艳 (1988 ~), 女, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为大气颗粒物来源解析、大气污染源排放清单, E-mail: zhaoxy@craes.org.cn

* 通信作者, E-mail: yinbh@craes.org.cn; yangwen@craes.org.cn

分^[5], 碳组分对人体健康、环境和气候变化均有较大的影响^[6,7].

开展排放因子和碳组分化学成分谱的研究可以有效地掌握柴油车尾气污染物的排放特征, 同时也可作为污染源排放清单的编制及源解析研究提供研究基础. 国内外学者利用台架测试、底盘测功机测试、车载测试、隧道测试和模型模拟等方法获得了机动车尾气污染物的排放因子^[8]. 李宇飞等^[9]利用整车测试台架研究了 12 辆不同排放标准轻型汽油车尾气 $\text{PM}_{2.5}$ 及其碳质组分的排放特征, 发现排放因子随排放阶段升级而显著降低. 黄成等^[10]利用实验室底盘测功机开展了 27 辆在用国三至国五轻型汽油车的 OC 和 EC 的排放因子测试, 发现 OC 和 EC 的排放因子均随排放标准的提升呈显著下降趋势. 何立强等^[11]基于车载排放测试系统 (PEMS) 对 7 辆不同排放阶段的重型柴油车进行了尾气 $\text{PM}_{2.5}$ 采样分析, 发现行驶工况对其 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子及其碳质组分存在较大影响. Zhang 等^[12]基于隧道法测试了珠江隧道机动车的排放因子, 发现因夜间柴油车数量较多导致夜间 $\text{PM}_{2.5}$ 及碳组分的排放因子高于白天, Song 等^[13]在天津隧道开展的研究也得到了同样的结论. 刘明月等^[14]利用 COPERT IV 模型计算了国一至国五排放标准下机动车尾气中 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放因子, 发现相同车型排放因子随着排放标准的提高总体上呈下降趋势, 相同排放标准和燃料类型下, 各种排量的机动车之间则无明显差距.

沈阳市 2017 年机动车保有量为 222 万辆, 较之 2015 年增加了 22%^[15], 机动车排放对 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献日益突出. 但是有关沈阳市机动车排放因子的相关研究较少, 仅吴丹等^[16]借鉴其他城市排放因子计算了 2013 年沈阳市机动车大气污染物排放量. 开展沈阳市本地化的柴油车 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子及其碳组分排放特征的研究将有助于细化沈阳市大气污染物排放清单和大气颗粒物源解析结果. 2017 年我国柴油车中轻型和重型货车保有量最高, 以排放阶段分类则是国三和国四保有量较高 (占总柴油车保有量的 51.7% 和 41.0%)^[4], 因此本研究选择了沈阳市 15 辆不同车型的国三和国四柴油车开展尾气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子的采样测试工作, 并使用热光碳分析仪分析滤膜样品中的有机碳 (OC) 和元素碳 (EC), 获得了不同排放阶段不同类型车辆在检车线模拟行驶工况下的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子及其碳质组分的排放特征, 以期深入了解柴油车颗粒物排放, 并为进一步开展柴油车颗粒物排放控制提供数据基础和科学依据.

1 材料与方法

1.1 尾气样品排放测试设备及方法

使用分流式稀释通道采样法进行机动车尾气样品的采集, 在切割器切割流量下通过稀释通道设备 (芬兰 Dekati) 分流抽取机动车排气, 使用除去颗粒物的洁净空气以一定比例稀释后经过 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器 (德国 Derenda MVS) 分离, 分双通道使用石英滤膜 (美国 Whatman 公司, $\Phi = 47 \text{ mm}$) 采集 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 样品, 采集到的滤膜样品平衡后进行称重及化学组分分析. 综合考虑沈阳市柴油车车辆类型及排放标准的分布, 选择了 15 辆国三和国四排放阶段不同车型的载客柴油车和载货柴油车, 涵盖了沈阳市主要的柴油车类型. 其中, 国三排放标准 9 辆 (载客汽车 4 辆、载货汽车 5 辆), 国四排放标准 6 辆 (载客汽车 2 辆、载货汽车 4 辆), 具体的车辆信息详见表 1. 载客汽车发动机功率在 46 ~ 177 kW, 排量在 2 ~ 8 L, 行驶里程在 22 222 ~ 650 000 km 之间; 载货汽车发动机功率在 64 ~ 165 kW, 排量在 1.6 ~ 8 L, 行驶里程在 14 133 ~ 265 000 km 之间. 本研究选择在检车场柴油车检车线上使用稀释通道采样法采集柴油车尾气样品, 采样流量为 $8.5 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$, 采样时柴油车处于自由加速实验^[17]的工况下, 怠速转速在 635 ~ 954 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 之间, 采样标况体积在 10 ~ 93 L 不等.

1.2 排放因子计算方法

柴油车尾气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子指柴油车单位行驶里程 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放量. 在本研究中, 仅一部分柴油车的尾气颗粒物进入尾气流量计, 因此, 柴油车尾气 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子计算公式为:

$$\text{EF} = \frac{M \times Q_{\text{总}}}{Q_{\text{采样}} \times S}$$

式中, EF 为 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放因子, $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$; M 为通过滤膜采集到的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的质量, g; $Q_{\text{总}}$ 为实验过程中机动车排气总量, L; $Q_{\text{采样}}$ 为进入采样设备的机动车尾气量, L; S 为采样行驶里程, km.

1.3 碳组分分析方法

滤膜采样前后需要在恒温恒湿 [温度 (20 ± 1) $^{\circ}\text{C}$, 湿度 (50 ± 5) %] 的条件下平衡 24 h 后使用 AWS-1 型百万分之一自动称重天平系统 (德国康姆德润达) 称重. 称重后的石英滤膜样品使用 DRI Model 2001 A 型热碳分析仪 (美国沙漠研究所), 按照 IMPROVE 分析程序^[18]对样品中的碳组分进行测定, 分析碳组分的过程中存在部分 OC 裂解形成 EC 的情况, 这部分碳组分称为裂解碳 (OPC), 为避免

表 1 测试柴油车信息
Table 1 Information for the tested diesel vehicles

编号	车型	发动机型号	发动机功率 /kW	排量 /L	整车质量 /kg	总行驶里程 /km	载客 人数	购车时间 (年-月-日)	排放阶段
1	小型载客汽车	D4EA	46	2	1 775	22 222	4	2012-09-17	国三
2	中型载客汽车	JX493ZLQ3	85	3	5 650	317 141	19	2012-09-20	国三
3	中型载客汽车	SC28R143Q4	105	2	2 500	174 000	18	2015-09-07	国四
4	大型载客汽车	YC6A240-30	177	8	10 600	490 445	47	2009-09-04	国三
5	大型载客汽车	YC4G220-30	162	8	8 600	177 171	37	2012-09-14	国三
6	大型载客汽车(公交)	JX493ZLQ4	80	2	3 950	650 000	23	2014-09-05	国四
7	轻型载货汽车	CA4DC2-10E3	74	2.5	4 390	62 732	2	2010-09-16	国三
8	轻型载货汽车	4DW93-84E4	64	2	4 390	40 000	2	2014-08-25	国三
9	轻型载货汽车	4F20ATCI	60	1.6	4 440	43 000	4	2014-09-18	国三
10	中型载货汽车	4DX23-110E3	83	2	4 380	51 159	3	2011-08-29	国三
11	中型载货汽车	1ZR	88	2	4 495	25 765	2	2017-09-06	国四
12	重型载货汽车	YZ4DA3-30	81	8	16 000	95 825	2	2011-09-30	国三
13	重型载货汽车	BF6M2012-22E4	165	5	25 000	14 995	3	2016-09-08	国四
14	重型载货货车	1ZR	88	5	13 115	26 5000	2	2016-10-31	国四
15	重型载货汽车	1ZR	88	5	16 000	14 133	2	2014-09-28	国四

上述情况,一般根据 633 nm 波段反射光强的变化,将 OPC 从 EC1 中扣除并入 OC4,最终 $OC = OC1 + OC2 + OC3 + OC4$, $EC = EC1 + EC2 + EC3$, $TC = OC + EC$.

2 结果与讨论

2.1 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子

表 2 中给出了基于行驶里程的国三和国四排放标准下不同车型的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子.可以看出同一种车型,国四排放标准车辆的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子相较国三排放标准有明显下降,中型载客汽车、中型载货汽车和重型载货汽车这 3 种车型国四排放标准下的 $PM_{2.5}$ 排放因子分别较国三标准下降 35%、79% 和 66%,国四排放标准下的 PM_{10} 排放因子分别较国三标准下降 49%、74% 和 66%,其中中型和重型载货汽车相较中型载客汽车下降更明显,可见随着排放标准的加严, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子显著下降,何立强等^[11]研究国一至国三重型柴油车 $PM_{2.5}$ 排放因子也得到同样的规律.

比较同一排放标准不同车型 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放因子发现,国三排放标准下,小型、中型和大型载客汽车的排放因子在逐渐升高,大型载客汽车 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子分别为小型载客汽车的 1.95 和 4.41 倍,中型载客汽车 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子分别为小型载客汽车的 1.07 和 1.50 倍;国三排放标准下,重型载货汽车 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放因子明显高于轻型和中型载货,为轻型载货汽车的 2.71 和 2.15 倍,为中型载货汽车的 3.51 和 3.48 倍;国四排放标准下,重型载货汽车 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 排放因子为中型载货汽车的 5.61 和 4.70 倍.可见,大型载客汽车和重型载货汽车的排放因子明显高于其他车

型,主要是因为这两种车型载重大,发动机排量和功率也较大,在行驶工况一致时单位时间的油耗更大,柴油在气缸内发生大量的裂解反应产生大量的颗粒物,从而导致排放因子要高于其他车型^[19].

表 2 中同时给出了指南^[20]推荐的排放因子,经对比发现,国三排放标准下,小型、中型、大型载客和轻型、中型、重型载货汽车实测 $PM_{2.5}$ (PM_{10}) 排放因子分别为指南推荐排放因子的 4.41 (4.17)、1.02 (1.37)、0.75 (2.26)、0.98 (1.22)、0.57 (0.57) 和 1.42 (1.40) 倍,除小型载客和中型载货外,中型、大型载客和轻型、重型载货的实测排放因子基本上等于指南推荐的排放因子.国四排放标准下,中型、大型载客公交和中型、重型载货汽车实测 $PM_{2.5}$ (PM_{10}) 排放因子分别为指南推荐排放因子的 0.93 (0.98)、0.41 (0.45)、0.21 (0.25) 和 0.84 (0.85) 倍,大型公交和中型载货均低于指南推荐的排放因子.排放因子会受到机动车类型、燃油质量、排放阶段、行驶里程、车速和路况等诸多因素影响^[21],有研究发现机动车低速运行时降低了尾气排放控制措施的效率会导致排放因子较高^[22],柴油车满载运行较之空载状态 PM 排放因子增加,频繁的怠速、加速和减速均会导致污染物排放增加^[23].国三小型载客测试时的转速 (819 $r \cdot min^{-1}$) 高于其他载客汽车 (649 ~ 768 $r \cdot min^{-1}$),中型载货汽车测试时的转速 (651 $r \cdot min^{-1}$) 低于其他载货汽车 (771 ~ 832 $r \cdot min^{-1}$),测试时转速大时油耗较多,会导致排放因子较大,因此导致小型载客汽车排放因子高于指南推荐因子,中型载货排放因子低于指南推荐因子.大型公交车则是由于其排量较小导致其排放因子低于指南推荐因子.

表 2 不同排放阶段不同车型柴油车 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的排放因子/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$

Table 2 Distance-based $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} emission factors of diesel vehicles under different emission standards/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$

车型	排放标准	车辆数	$\text{PM}_{2.5}$ 实测 排放因子	$\text{PM}_{2.5}$ 指南 排放因子 ^[20]	PM_{10} 实测 排放因子	PM_{10} 指南 排放因子 ^[20]
小型载客汽车	国三	1	0.141	0.032	0.150	0.036
中型载客汽车	国三	1	0.151	0.148	0.225	0.164
中型载客汽车	国四	1	0.098	0.106	0.115	0.118
大型载客汽车	国三	2	0.295	0.395	0.992	0.439
大型载客汽车(公交)	国四	1	0.105	0.252	0.127	0.280
轻型载货汽车	国三	3	0.127	0.130	0.176	0.144
中型载货汽车	国三	1	0.098	0.171	0.109	0.190
中型载货汽车	国四	1	0.021	0.099	0.028	0.110
重型载货汽车	国三	1	0.344	0.171	0.379	0.190
重型载货汽车	国四	3	0.116	0.138	0.131	0.153

2.2 碳组分占比(OC、EC 以及 OC/EC)

图 1 中给出了国三和国四排放标准下不同车型柴油车排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 OC 和 EC 的占比情况. TC(OC 和 EC 之和)在 $\text{PM}_{2.5}$ 中的质量分数在 23% ~ 70% 之间, 在 PM_{10} 中的质量分数在 23% ~ 65% 之间, 可见 TC 是柴油车尾气排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的主要组分^[24]. 国三排放标准下[图 1(a)和 1(b)], 小型、中型和大型载客汽车的 TC 在 $\text{PM}_{2.5}$ (PM_{10}) 中的质量分数分别为 42.53% (42.79%)、63.64% (56.87%) 和 69.98% (64.92%), 轻型、中

型和重型载货汽车的 TC 在 $\text{PM}_{2.5}$ (PM_{10}) 中的质量分数分别为 60.22% (55.90%)、31.39% (30.74%) 和 31.44% (29.60%). 总体来看, 国三排放标准下载客汽车尾气排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 TC 的占比高于载货汽车, 且载客汽车 TC 含量随车型的增大呈上升趋势; 重型和中型载货汽车 TC 含量差异较小, 但均明显低于轻型载货. 国四排放标准下[图 1(c)和 1(d)], 中型和大型载客汽车的 TC 在 $\text{PM}_{2.5}$ (PM_{10}) 中的质量分数分别为 47.30% (45.96%) 和 47.82% (44.80%), 中型和重型载货

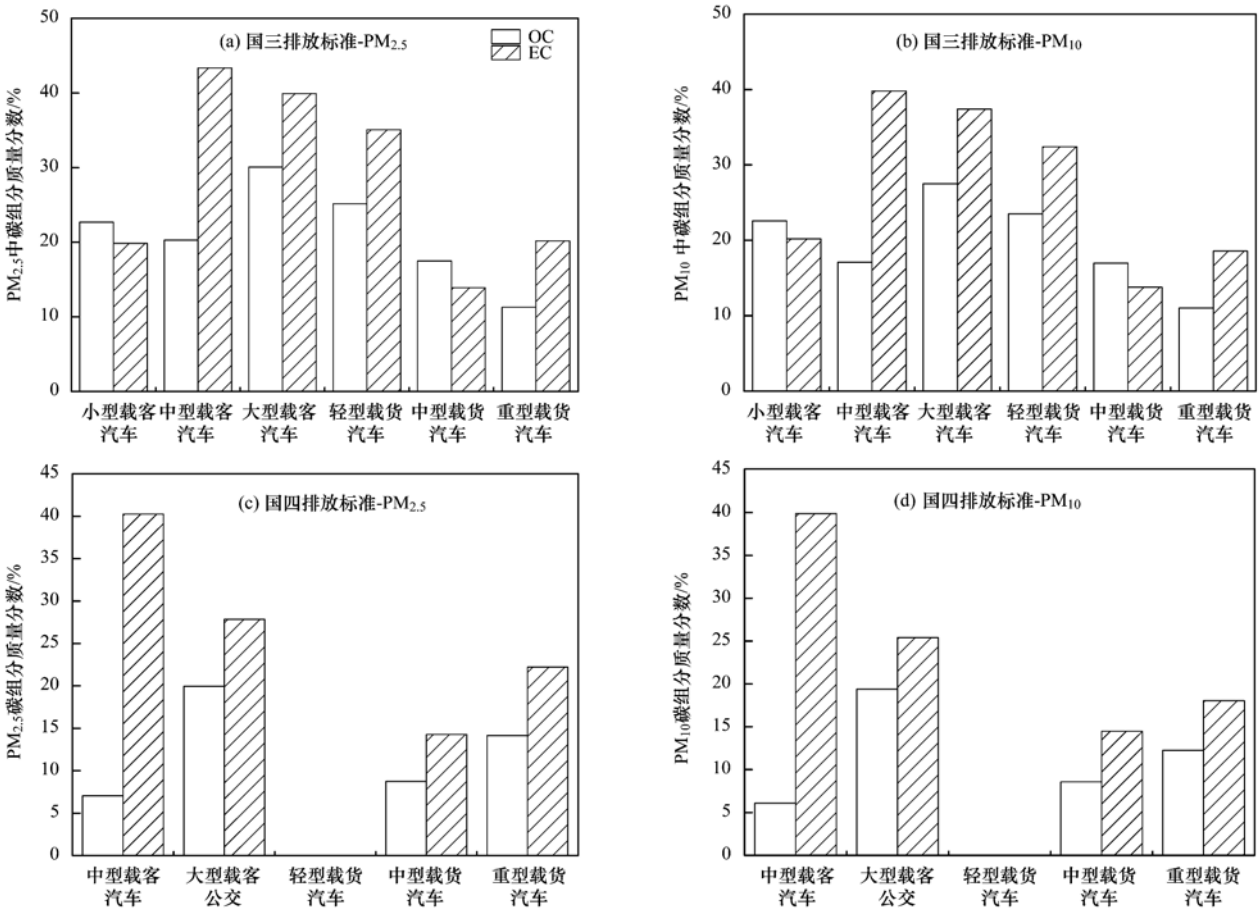


图 1 国三和国四排放标准下不同车型柴油车 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中碳组分质量分数

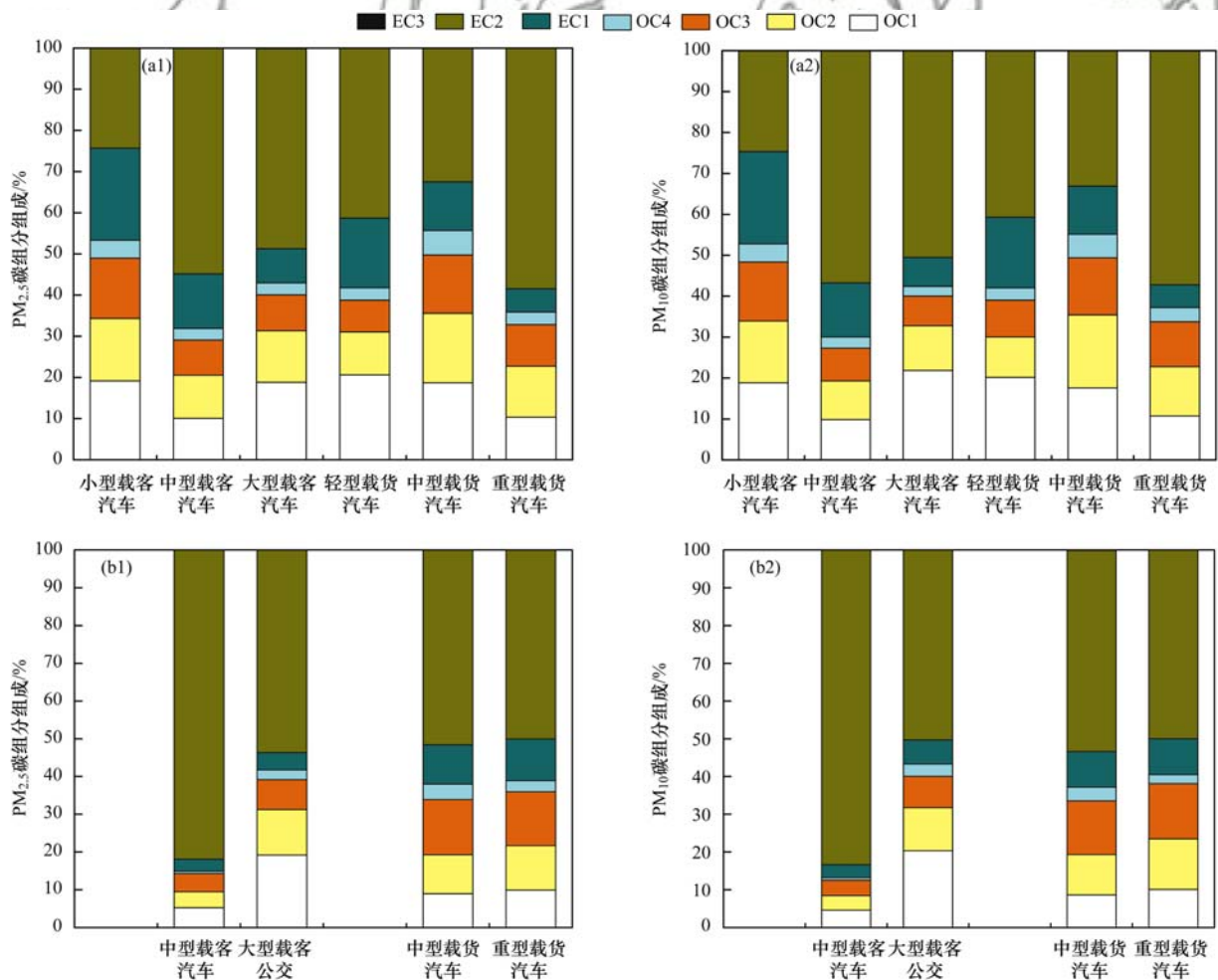
Fig. 1 Mass fraction of carbon in $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} of diesel vehicles of different models under China III and China IV standards

汽车的 TC 在 $PM_{2.5}$ (PM_{10}) 中的质量分数分别为 23.03% (23.05%) 和 36.36% (30.29%), 不同车型载客汽车 TC 的质量分数差异较小, 重型载货汽车则高于中型载货. 同一车型国四排放标准下大气颗粒物中 TC 的质量分数相较国三排放标准均有所下降, 黄成等^[25]测试的重型公交柴油车国四排放标准下 PM 成分谱中 TC 的质量分数 (62%) 低于国三排放标准 (75%), 与本研究结论一致. 此外, 各车型 $PM_{2.5}$ 中 TC 的质量分数均高于 PM_{10} , 说明柴油车尾气中碳组分更易集中在小粒径颗粒物中.

国三排放标准下, 载客汽车 OC 在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的质量分数范围分别在 20.29% ~ 30.06% 和 17.08% ~ 27.51% 之间, 载客汽车 EC 在 19.86% ~ 43.35% 和 20.21% ~ 39.79% 之间; 载货汽车 OC 在 11.27% ~ 25.15% 和 11.02% ~ 23.50% 之间, 载货汽车 EC 在 13.91% ~ 35.07% 和 13.78% ~ 32.41% 之间; 国四排放标准下, 载客汽车 OC 在 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的质量分数范围分别在 7.06% ~ 19.97% 和 6.07% ~ 19.40% 之间, 载客汽

车 EC 在 27.85% ~ 40.24% 和 25.40% ~ 39.88% 之间; 载货汽车 OC 在 8.75% ~ 14.14% 和 8.57% ~ 12.26% 之间, 载货汽车 EC 在 14.28% ~ 22.22% 和 14.48% ~ 18.03% 之间. 可见国三和国四排放标准下不同车型的柴油车 EC 的质量分数总体上是大于 OC 的, 与王刚等^[26]、Cui 等^[27] 和 Zhang 等^[28] 的研究结论一致. 国四排放标准柴油车较之国三排放标准尾气中 OC 质量分数有较大幅度地降低, 主要是国四排放标准尾气处理设施减少了气态有机碳的生成^[29]. 此外, 同一排放标准下, 载客汽车 OC 和 EC 在 PM 中的质量分数均高于载货汽车, 国三和国四排放标准下, 载客汽车的总行驶里程约为载货汽车的 3.4 和 6.7 倍, 总行驶里程高的柴油车更易导致高油耗, 所以导致载客汽车的碳组分质量分数高于载货汽车.

国三排放标准下, 载客汽车 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 OC/EC 值分别为 0.79 ± 0.28 和 0.76 ± 0.28 , 载货汽车 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 OC/EC 值分别为 0.84 ± 0.30 和 0.85 ± 0.27 ; 国四排放标准下, 载客汽车 $PM_{2.5}$



(a) 国三排放标准; (b) 国四排放标准

图2 国三和国四排放标准柴油车 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中碳组分的组成分布

Fig. 2 Contribution of carbon components of the tested vehicles under China III and China IV standards

和 PM_{10} 中 OC/EC 值分别为 0.45 ± 0.27 和 0.46 ± 0.31 , 载货汽车 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中 OC/EC 值分别为 0.62 ± 0.01 和 0.64 ± 0.04 . OC/EC 比值可以用来区分柴油车和汽油车排放, OC/EC 比值在 0.3 ~ 0.9 之间时说明 $\text{PM}_{2.5}$ 主要来自柴油车排放^[30], 本研究 OC/EC 比值均落在该范围内. 此外可以看出, 随着排放标准的提升, 载客汽车和载货汽车 OC/EC 值均有所下降, Wu 等^[29] 研究中有同样的结论.

2.3 碳组分组成

图 2 中给出了国三和国四排放标准不同车型中 7 种碳组分的组成比例, 可以看出同一车辆排放的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中碳组分组成基本一致, 因此下面主要讨论 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分的构成情况. 国三排放标准下, 小型载客汽车 EC2 的占比最高 (24.29%), 其次为 EC1 (22.4%)、OC1 (19.15%)、OC2 (15.15%) 和 OC3 (14.70%); 中型和大型载客汽车也是 EC2 占比最高 (54.88% 和 48.57%), 远高于其他组分, 其次为 OC1 和 OC2; 轻型、中型和重型载货汽车中占比最高的组分均为 EC2 (41.27%、32.49% 和 58.50%), 其次为 OC1 和 OC2. 国四排放标准下, 中型和大型载客汽车占比最高的组分均为 EC2 (81.91% 和 53.66%), 其次为 OC1 和 OC2; 中型和重型载货汽车占比最高的组分均为 EC2 (51.59% 和 50.05%), 其次为 OC3、OC2 和 EC1, 占比约在 10% ~ 15% 之间. 可见, 国三和国四排放标准下各种车型柴油车占比最高的碳组分均为 EC2, 在大气颗粒物源解析的应用中可以将 EC2 作为柴油车尾气源成分谱的标识组分^[31,32]. 此外, 同一车型国四柴油车 (重型柴油车除外) 中 EC2 在 TC 中的质量分数较之国三排放标准有所增加, 主要是因为国四柴油车 OC 的质量分数较之国三车有较大幅度的下降^[29], 导致 EC 在 TC 中的占比增大, 而 EC2 又是 EC 中占比最高的组分, 因此会导致 EC2 在 TC 中的占比增加.

3 结论

(1) 国三排放标准下, 小型、中型、大型载客柴油车和轻型、中型、重型载货柴油车基于行驶里程 $\text{PM}_{2.5}$ (PM_{10}) 的排放因子分别为 0.141 (0.150)、0.151 (0.225)、0.295 (0.992) $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 0.127 (0.176)、0.098 (0.109)、0.344 (0.379) $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$; 国四排放标准下, 中型、大型载客柴油车和中型、重型载货柴油车 $\text{PM}_{2.5}$ (PM_{10}) 的排放因子分别为 0.098 (0.115)、0.105 (0.127) $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 0.021 (0.028)、0.116 (0.131) $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$. 随排放标准的提升, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子显著下降, 中型载客汽

车、中型载货汽车、重型载货汽车 3 种车型国四柴油车较之国三柴油车 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 排放因子存在 35% ~ 79% 幅度的下降; 同一排放标准大型载客和重型载货汽车排放因子明显高于其他车型.

(2) TC 是柴油车尾气 PM 的主要组分, 国三排放标准不同车型 TC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的质量分数分别在 31% ~ 70% 和 29% ~ 65% 之间, 国四排放标准柴油车 TC 在 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 中的质量分数分别在 23% ~ 48% 和 23% ~ 46% 之间, 国四柴油车中 TC 质量分数明显低于国三柴油车.

(3) 国三和国四排放标准不同车型柴油车尾气 PM 中 EC 质量分数总体上大于 OC, OC/EC 为 0.70 ± 0.29 , 且国四柴油车 OC/EC 值低于国三柴油车. 同一排放标准下, 载客汽车 OC 和 EC 在 PM 中的质量分数均高于载货汽车, 可能是由于载客汽车总行驶里程高于载货汽车导致油耗较高所致.

(4) 国三和国四不同车型柴油车碳组分均以 EC2 为主, 且国四柴油车中 EC2 在 TC 中的占比高于国三柴油车, 后续可将 EC2 作为柴油车的标识组分应用到大气颗粒物来源解析研究中.

参考文献:

- [1] Gao J J, Wang K, Wang Y, et al. Temporal-spatial characteristics and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ as well as its associated chemical species in the Beijing-Tianjin-Hebei region of China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 714-724.
- [2] Liang C S, Duan F K, He K B, et al. Review on recent progress in observations, source identifications and countermeasures of $\text{PM}_{2.5}$ [J]. *Environment International*, 2016, **86**: 150-170.
- [3] 张景文, 咸月, 陈报章. 南昌市移动源排放清单研究[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(7): 2449-2458.
Zhang J W, Xian Y, Chen B Z. Study on the emission inventory from mobile source in Nanchang [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(7): 2449-2458.
- [4] 生态环境部. 生态环境部发布《中国机动车环境管理年报 (2018)》[R]. 北京: 生态环境部, 2018. 2-7.
- [5] Cai T Q, Schauer J J, Huang W, et al. Sensitivity of source apportionment results to mobile source profiles [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 821-828.
- [6] Jia D S, Zhang J K, He J, et al. Characteristics of atmospheric organic and elemental carbon aerosols in urban Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2016, **125**: 293-306.
- [7] Xu J, Wang Q Z, Deng C R, et al. Insights into the characteristics and sources of primary and secondary organic carbon: High time resolution observation in urban Shanghai[J]. *Environmental Pollution*, 2018, **233**: 1177-1187.
- [8] Franco V, Kousoulidou M, Muntean M, et al. Road vehicle emission factors development: a review [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **70**: 84-97.
- [9] 李宇飞, 李振华, 胡京南, 等. 轻型汽油车尾气 $\text{PM}_{2.5}$ 的排放特征[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(4): 503-508.
Li Y F, Li Z H, Hu J N, et al. Emission profile of exhaust $\text{PM}_{2.5}$ from light-duty gasoline vehicles [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(4): 503-508.
- [10] 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.
- [11] 何立强, 胡京南, 祖雷, 等. 国 I ~ 国 III 重型柴油车尾气 PM_{2.5} 及其碳质组分的排放特征[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(3): 656-662.
- He L Q, Hu J N, Zu L, *et al.* Emission characteristics of exhaust PM_{2.5} and its carbonaceous components from China I to China III heavy-duty diesel vehicles [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(3): 656-662.
- [12] Zhang Y L, Wang X M, Li G H, *et al.* Emission factors of fine particles, carbonaceous aerosols and traces gases from road vehicles: recent tests in an urban tunnel in the Pearl River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 876-884.
- [13] Song C B, Ma C, Zhang Y J, *et al.* Heavy-duty diesel vehicles dominate vehicle emissions in a tunnel study in northern China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **637-638**: 431-442.
- [14] 刘明月, 吴琳, 张静, 等. 天津市机动车尾气排放因子研究[J]. 环境科学学报, 2018, **38**(4): 1377-1383.
- Liu M Y, Wu L, Zhang J, *et al.* Investigation of vehicle emission factors in Tianjin[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, **38**(4): 1377-1383.
- [15] 沈阳市统计局. 2018 年沈阳统计年鉴[R]. 沈阳: 沈阳市统计局, 2018.
- [16] 吴丹, 张立平, 闫艳芳, 等. 沈阳市机动车大气污染物排放清单的研究[J]. 环境监测管理与技术, 2018, **30**(6): 30-33.
- Wu D, Zhang L P, Yan Y F, *et al.* Development of vehicle emission inventory in Shenyang [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2018, **30**(6): 30-33.
- [17] 国家环境保护总局, 国家质量监督检验检疫总局. GB 3847-2005. 车用压燃式发动机和压燃式发动机汽车排气烟度排放限值及测量方法[S].
- [18] 梅德清, 朱宗宁, 孙天硕, 等. 机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征[J]. 环境科学, 2019, **40**(1): 114-120.
- Mei D Q, Zhu Z N, Sun T S, *et al.* Size distribution and carbon component characteristics of atmospheric particulate matter from motor vehicles[J]. Environmental Science, 2019, **40**(1): 114-120.
- [19] Wu B B, Shen X B, Cao X Y, *et al.* Carbonaceous composition of PM_{2.5} emitted from on-road China III diesel trucks in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2015, **116**: 216-224.
- [20] 环境保护部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)[EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/t20150107_293955.htm, 2014-12-31.
- [21] Lin Y C, Li Y C, Amesho K T T, *et al.* Characterization and quantification of PM_{2.5} emissions and PAHs concentration in PM_{2.5} from the exhausts of diesel vehicles with various accumulated mileages [J]. Science of the Total Environment, 2019, **660**: 188-198.
- [22] Grigoratos T, Fontaras G, Giechaskiel B, *et al.* Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles[J]. Atmospheric Environment, 2019, **201**: 348-359.
- [23] Chen L, Wang Z, Liu S, *et al.* Using a chassis dynamometer to determine the influencing factors for the emissions of Euro VI vehicles[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2018, **65**: 564-573.
- [24] Yang J, Ma S X, Gao B, *et al.* Single particle mass spectral signatures from vehicle exhaust particles and the source apportionment of on-line PM_{2.5} by single particle aerosol mass spectrometry[J]. Science of the Total Environment, 2017, **593-594**: 310-318.
- [25] 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.
- [26] 王刚, 郎建垒, 程水源, 等. 重型柴油车 PM_{2.5} 和碳氢化合物的排放特征[J]. 中国环境科学, 2015, **35**(12): 3581-3587.
- Wang G, Lang J L, Cheng S Y, *et al.* Characteristics of PM_{2.5} and hydrocarbon emitted from heavy-duty diesel vehicle [J]. China Environmental Science, 2015, **35**(12): 3581-3587.
- [27] Cui M, Chen Y J, Tian C G, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} from two tunnels with different vehicular fleet characteristics[J]. Science of the Total Environment, 2016, **550**: 123-132.
- [28] Zhang Y Z, Yao Z L, Shen X B, *et al.* Chemical characterization of PM_{2.5} emitted from on-road heavy-duty diesel trucks in China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **122**: 885-891.
- [29] Wu B B, Shen X B, Cao X Y, *et al.* Characterization of the chemical composition of PM_{2.5} emitted from on-road China III and China IV diesel trucks in Beijing, China[J]. Science of the Total Environment, 2016, **551-552**: 579-589.
- [30] Cheng Y, Lee S C, Gu Z L, *et al.* PM_{2.5} and PM_{10-2.5} chemical composition and source apportionment near a Hong Kong roadway [J]. Particuology, 2015, **18**: 96-104.
- [31] Omidvarborna H, Kumar A, Kim D S. Characterization of particulate matter emitted from transit buses fueled with B20 in idle modes[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2014, **2**(4): 2335-2342.
- [32] Liu B S, Zhang J Y, Wang L, *et al.* Characteristics and sources of the fine carbonaceous aerosols in Haikou, China [J]. Atmospheric Research, 2018, **199**: 103-112.

CONTENTS

Vertical Distribution and Transport of PM _{2.5} During Heavy Pollution Events in the Jing-Jin-Ji Region	XIAO Zhi-mei, XU Hong, LI Peng, <i>et al.</i> (4303)
Source Apportionment of Air Pollutants for a Typical Pollution Event in Zhaoqing	CHANG Shu-cheng, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (4310)
Diurnal Variations and Source Analysis of Water-soluble Compounds in PM _{2.5} During the Winter in Liaocheng City	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (4319)
Emission Characteristics of Exhaust PM and Its Carbonaceous Components from China III to China IV Diesel Vehicles in Shenyang ...	ZHAO Xue-yan, WANG Jing, ZHU Sheng-nan, <i>et al.</i> (4330)
Characteristics of Heavy Metal Pollutants of PM _{2.5} from Open Burning of Municipal Solid Waste (MSW) and the Associated Exposure Health Risks	CHENG Ke, JI Wan-wan, HAO Wei-wei, <i>et al.</i> (4337)
Size Distribution Characteristics and Inhalation Exposure of Particle-Bound PAHs in an Industrial City	WANG Juan, GUO Guan-lin, QIN Ning, <i>et al.</i> (4345)
High-frequency Evolution of Urban Atmospheric Ammonia and Ammonium and Its Gas-to-Particle Conversion Mechanism in Nanjing City	SHAO Sheng-cheng, CHANG Yun-hua, CAO Fang, <i>et al.</i> (4355)
Optical Absorption Properties of Brown Carbon Aerosols in Guangzhou	LI Zhu-jie, TAN Hao-bo, ZHENG Jun (4364)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Spring in Zhengzhou	ZHANG Yi-xiang, YIN Sha-sha, YUAN Ming-hao, <i>et al.</i> (4372)
Raw Materials and End Treatment-based Emission Factors for Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent Use Sources	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SUN Xi-bo, <i>et al.</i> (4382)
Source Profiles of Volatile Organic Compounds (VOCs) from Typical Solvent-based Industries in Beijing	FANG Li, LIU Wen-wen, CHEN Dan-ni, <i>et al.</i> (4395)
Emission Characteristics of IVOCs from the Combustion of Residential Solid Fuels and the Impact of Burning Temperature	LU Ya-jing, FENG Yan-li, QIAN Zhe, <i>et al.</i> (4404)
Evaluation of MACC Reanalysis Ozone Data over China Using Ground-based and AIRS Satellite Observations	WANG Run-fang, MA Xiao-dan, ZHAO Tian-liang, <i>et al.</i> (4412)
Hydrolysis of COS over MgAl Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	WEI Zheng, ZHANG Xin, ZHANG Feng-lian, <i>et al.</i> (4423)
Chemical Characteristics and Ionic Sources of Precipitation in the Source Region of the Yangtze River	WANG Shao-yong, HE Xiao-bo, WU Jing-kui, <i>et al.</i> (4431)
Effects of Continuous Extreme Rainfall on Water Quality of the Dongjiang River Basin	CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhong-ya, <i>et al.</i> (4440)
Correlation Analysis of Water Quality Between Lake Inflow and Outflow: A Case Study of Poyang Lake	HUANG Dong-ling, NI Zhao-kui, ZHAO Shuang, <i>et al.</i> (4450)
Spatio-temporal Distribution Characteristics of the Water Quality in the Jinze Reservoir and Its Inflow	LIU Ming-kun, TONG Jun, HU Bo, <i>et al.</i> (4461)
Temporal and Spatial Variations in the Conductivity in Different Media in Taihu Lake, China	WANG Rui, DAI Dan, ZHANG Chi, <i>et al.</i> (4469)
Uncertainty and Sensitivity Analysis of Phosphorus Model Parameters in Large Shallow Lakes	SHI Yuan-yuan, LI Yi-ping, CHENG Yue, <i>et al.</i> (4478)
Spatio-temporal Variations in Aquatic Vegetation Cover and the Potential Influencing Factors in Lake Hongze Based on MODIS Images	LI Na, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4487)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrients in the Surface Sediments of a Macrophyte-Dominated Zone in Lake Taihu	ZHANG Jie, WANG Yuan-sheng, GUO Xi-ya, <i>et al.</i> (4497)
Composition and Distribution of Biodegradable Compounds in the Macrophyte Dominated Zone of Lake Taihu	QI Chuang, FANG Jia-qi, ZHANG Li-min, <i>et al.</i> (4505)
Temporal and Spatial Variation of Zooplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai ...	DU Cai-li, YANG Li, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (4513)
Geochemical Characteristics and Ecological Significance of Carbon Isotopes in Groundwater Under the Influence of Different Land Use Types in Karst Areas	REN Kun, PAN Xiao-dong, ZENG Jie, <i>et al.</i> (4523)
Temporal Response of Subterranean Karst Stream Hydrochemistry to Urbanization	YANG Ying-zeng, HE Shou-yang, WU Pan, <i>et al.</i> (4532)
Hydrochemical Characteristics of Karst Groundwater in the Mountains of Northern Bazhong City, China	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (4543)
Removal of Fe(II), Mn(II), and NH ₄ ⁺ -N by Using δ-MnO ₂ Coated Zeolite	MA Wen-jie, CHEN Tian-hu, CHEN Dong, <i>et al.</i> (4553)
Strengthening Effect of Different Cattail Pretreatment Methods on the Denitrification of Horizontal Subsurface Flow in a Constructed Wetland	XIONG Jia-qing, LU Xue-bin, ZHENG Yu-cong, <i>et al.</i> (4562)
Short-cut Nitrification Start-up and Optimization of Operating Conditions Under Different Control Strategies	LIU An-di, ZHAO Kai-liang, LIU Hong, <i>et al.</i> (4569)
Start-up of a Three-stage PN/A Granular Sludge Reactor for Treating Wastewater with High Concentrations of Ammonia	JI Xiao-qing, QI Ze-kun, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (4578)
Removal of Hydrogen Sulfide Produced in a Municipal WWTP Using a Biotrickling Filter with Polypropylene Rings as the Packing Material and Microbial Community Analysis	SUN Shi-hao, JIA Ti-pei, CHEN Kai-qi, <i>et al.</i> (4585)
Characteristics and Influencing Factors of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Typical Industrial Areas of Chengdu	RAN Zong-xin, CHEN Jin-yu, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (4594)
Absorption Characterization and the Identification of Factors Influencing Five Organophosphate Esters in Water-Soil System	HE Ming-jing, YANG Zhi-hao, WEI Shi-qiang (4604)
Adsorption and Interaction of Cu ²⁺ and Pb ²⁺ on BS-12 Amphoteric Modified Bentonites	BU Shuai-bin, MENG Zhao-fu, Sambath Yek, <i>et al.</i> (4611)
Concentration Characteristics, Source Analysis, and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Peak-cluster Depression Area, Southeast of Yunnan Province	HONG Tao, KONG Xiang-sheng, YUE Xiang-fei (4620)
Cd Accumulation and Risk Assessment for Arable Soils in the Karst Region of Northern Luodian, Guizhou	TANG Qi-lin, LIU Xiu-ming, LIU Fang, <i>et al.</i> (4628)
Safe Utilization of Paddy Soils Lightly Polluted with Cadmium in Western Chongqing	LI Na, HE Hong-zhou, FENG Ai-xuan, <i>et al.</i> (4637)
Accumulation of Cd in Different Crops and Screening of Low-Cd Accumulation Cultivars	CHEN Xiao-hua, SHEN Gen-xiang, BAI Yu-jie, <i>et al.</i> (4647)
Absorption and Transportation of Selenium Nanoparticles in Wheat and Rice	WANG Ya-qi, ZHU Li-na, LI Kui, <i>et al.</i> (4654)
Effects of Microplastics on the Growth, Physiology, and Biochemical Characteristics of Wheat (<i>Triticum aestivum</i>)	LIAO Yuan-chen, Nazgul-Jahitbek, LI Mei, <i>et al.</i> (4661)
Regulation and Mechanism of a Dregs Biochar Matrix Combined with Maifanite on a Soil-Ryegrass System	XIAO Liang-liang, DING Yuan (4668)
Microbial Community Structure and the Distribution of Antibiotic Resistance Genes in Soil Contaminated by Sulfamethoxazole	ZHANG Hai-feng, SHI Ming-ming, SUN Yan-mei, <i>et al.</i> (4678)
Dynamics of Antibiotic Resistance Genes During the Municipal Solid Waste Leachate Treatment	HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, YAN Yi-jun, <i>et al.</i> (4685)
Effects of Manure Application Rates on the Soil Carbon Fractions and Aggregate Stability	SHAO Hui-yun, LI Zi-yue, LIU Dan, <i>et al.</i> (4691)
Effects of Irrigation and Biochar Application on the Respiratory Temperature Sensitivity of Paddy Soil	ZHOU Peng, QI Le, NIU Hai-dong, <i>et al.</i> (4700)
Response of Soil CO ₂ Emissions to Straw-returning in Citrus/Mushroom Intercropping Systems	YOU Jing, NI Jiu-pai, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4708)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen and Bacterial Community Structure	ZHANG Ting-ting, CHEN Shu-tao, WANG Jun, <i>et al.</i> (4718)
Simulated Ozone Damage on Gross Primary Productivity (GPP) in a Winter Wheat Field	XU Jing-xin, ZHENG You-fei, WANG Sheng, <i>et al.</i> (4725)
Spatial and Temporal Variations in Fertilizer Use Across Prefecture-level Cities in China from 2000 to 2015	PAN Xiao-dong, LI Pin, FENG Zhao-zhong, <i>et al.</i> (4733)