

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第7期

Vol.39 No.7

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

近20年来中国典型区域PM _{2.5} 时空演变过程	罗毅,邓琼飞,杨昆,杨扬,商春雪,喻臻钰 (3003)
西安市PM _{2.5} 健康损害价值评估	魏国茹,史兴民 (3014)
河北香河亚微米气溶胶组分特性、来源及其演变规律分析	江琪,王飞,孙业乐 (3022)
南京北郊秋季PM _{2.5} 碳质组分污染特征及来源分析	徐足飞,曹芳,高嵩,鲍孟盈,石一凡,章炎麟,刘晓妍,范美益,张雯淇,卞航,刘寿东 (3033)
临安夏季霾和清洁天气PM _{2.5} 化学组成特征比较	梁林林,孙俊英,张养梅,刘畅,徐婉筠,张根,刘旭艳,马千里 (3042)
盘锦市秋冬季节PM _{2.5} 中碳组分特征及来源解析	张蕾,姬亚芹,张军,王士宝,李越洋,赵静琦,张伟 (3051)
南京冬季气溶胶光学特性及黑碳光吸收增强效应	黄聪聪,马嫣,郑军 (3057)
夏季青岛大气粗细粒子中微量元素的浓度、溶解度及干沉降通量	李鹏志,李茜,石金辉,高会旺,姚小红 (3067)
太原市夏季降水中溶解态重金属特征及来源	叶艾玲,程明超,张璐,何秋生,郭利利,王新明 (3075)
杭州地区大气CO ₂ 体积分数变化特征及影响因素	浦静姣,徐宏辉,姜瑜君,杜荣光,齐冰 (3082)
典型工业源VOCs治理现状及排放组成特征	景盛翱,王红丽,朱海林,杨强,卢滨,夏阳,余传冠,陶士康,李莉,楼晟荣,黄成,唐伟,井宝莉 (3090)
地级市域工业VOCs排放源产排特性及其控制技术应用现状:以秦皇岛市为例	胡旭睿,虎啸宇,王灿 (3096)
青霉素发酵尾气VOCs污染特征及健康风险评价	郭斌,么瑞静,张硕,马磊,康江,王姗姗 (3102)
轻型汽油车尾气OC和EC排放因子实测研究	黄成,胡馨遥,鲁君 (3110)
南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价	田春晖,杨若杼,古丽扎尔·依力哈木,钱新,王金花,李慧明 (3118)
西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析	石栋奇,卢新卫 (3126)
三峡库区主要河流秋季pCO ₂ 及其影响因素	罗佳宸,毛蓉,李思悦 (3134)
泾河支流地表水地下水的水化学特征及其控制因素	寇永朝,华琨,李洲,李志 (3142)
生物滞留对城市地表径流磷的去除途径	李立青,刘雨倩,杨佳敏,王娟 (3150)
淀山湖浮游植物功能群演替特征及其与环境因子的关系	杨丽,张玮,尚光霞,张军毅,王丽卿,魏华 (3158)
抚仙湖硅藻群落的时空变化特征及其与水环境的关系	李蕊,陈光杰,康文刚,陈丽,王教元,陈小林,刘园园,冯钟,张涛 (3168)
蓝藻水华及其降解对沉积物-水微界面的影响	王永平,谢瑞,晁建颖,姬昌辉,于剑 (3179)
生物炭对人工湿地植物根系形态特征及净化能力的影响	徐德福,潘潜澄,李映雪,陈晓艺,王佳俊,周磊 (3187)
Mn-Co/蜂窝陶瓷催化剂制备及催化臭氧化对苯二酚效能	张兰河,高伟国,陈子成,张海丰,王旭明 (3194)
Fe/Cu双金属活化过一硫酸盐降解四环素的机制	李晶,鲍建国,杜江坤,冷一非,孔淑琼 (3203)
铈酸盐改性钛酸纳米片对水中Cd(II)的吸附行为及机制	康丽,刘文,刘晓娜,刘宏芳,李一菲 (3212)
铁锰原位氧化产物吸附微量磷的实验	蔡言安,毕学军,张嘉凝,董杨,刘文哲 (3222)
制备方法对铁钛复合氧化物磷吸附性能的影响:共沉淀法与机械物理混合法	仲艳,王建燕,陈静,张高生 (3230)
电导率对厌氧产酸、正渗透与微生物燃料电池耦合工艺运行性能的影响	陆宇琴,刘金梦,王新华,李秀芬,李晔 (3240)
不同磷浓度下生物除磷颗粒系统的COD需求	李冬,曹美忠,郭跃洲,梅宁,李帅,张杰 (3247)
基质浓度对ABR反应器SAD协同脱氮除碳效能影响	张敏,姜滢,汪瑶琪,韦佳敏,陈重军,沈耀良 (3254)
采用含硫铁化学污泥作为反硝化电子供体进行焦化废水中总氮深度去除	付炳炳,潘建新,马景德,王丰,吴海珍,韦朝海 (3262)
间歇曝气下短程硝化耦合污泥微膨胀稳定性	高春娣,孙大阳,安冉,赵楠,焦二龙,祝海兵 (3271)
基于高通量测序的SBR反应器丝状膨胀污泥菌群分析	洪颖,姚俊芹,马斌,徐双,张彦江 (3279)
纳米零价铁(NZVI)对厌氧产甲烷活性、污泥特性和微生物群落结构的影响	苏润华,丁丽雨,任洪强 (3286)
气水比对后置固相反硝化滤池工艺脱氮及微生物群落影响	张千,吉芳英,付旭芳,陈晴空 (3297)
活性污泥胞外多聚物提取方法的比较	孙秀玥,唐珠,杨新萍 (3306)
耐冷嗜碱蒙氏假单胞菌H97的鉴定及其好氧反硝化特性	蔡茜,何腾霞,冶青,李振轮 (3314)
PFOS前体物质(PreFOSs)降解菌的分离鉴定及其降解特性	赵淑艳,周涛,王博慧,梁田坤,柳丽芬 (3321)
采油井场土壤微生物群落结构分布	蔡萍萍,宁卓,何泽,张敏,石建省 (3329)
铜尾矿坝不同恢复年限土壤理化性质和酶活性的特征	王瑞宏,贾彤,曹苗文,柴宝峰 (3339)
广西某赤泥堆场周边土壤重金属污染风险	郭颖,李玉冰,薛生国,廖嘉欣,王琼丽,吴川 (3349)
邻苯二甲酸酯在重庆市城市土壤中的污染分布特征及来源分析	杨志豪,何明靖,杨婷,卢俊峰,魏世强 (3358)
成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素	李珊,李启权,王昌全,张浩,肖怡,唐嘉玲,代天飞,李一丁 (3365)
塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳、无机碳含量与环境因子的相关性	赵晶晶,贡璐,安申群,李杨梅,陈新 (3373)
塔里木盆地北缘绿洲4种土地利用方式土壤有机碳组分分布特征及其与土壤环境因子的关系	安申群,贡璐,李杨梅,陈新,孙力 (3382)
高原喀斯特土壤有机碳短期稳定的温度作用机制	唐国勇,张春华,刘方炎,马艳 (3391)
施硼对水稻幼苗吸收和分泌砷的影响	朱毅,孙国新,陈正,胡莹,郑瑞伦 (3400)
不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析	胡雪芳,田志清,梁亮,陈俊德,张志民,朱祥民,王士奎 (3409)
南京大气臭氧浓度的季节变化及其对主要作物影响的评估	赵辉,郑有飞,魏莉,关清 (3418)
三峡库区涪陵和忠县两地居民发汞含量水平及影响因素分析	程楠,谢青,樊宇飞,王永敏,张成,王定勇 (3426)
人粪便好氧堆肥过程中典型抗生素的消减特性	时红蕾,王文昌,李倩 (3434)
COD/SO ₄ ²⁻ 对青霉素菌渣厌氧消化影响	强虹,李玉友,裴梦富 (3443)
果蔬类垃圾主发酵堆肥产物储放和利用的恶臭释放特征	何品晶,蒋宁玲,徐贤,韦顺艳,邵立明,吕凡 (3452)
曾用抗生素磺胺二甲嘧啶对稻田NH ₃ 挥发的影响	庞炳坤,张敬沙,吴杰,李志琳,蒋静艳 (3460)
《环境科学》征订启事(3141)	
《环境科学》征稿简则(3202)	
信息(3229, 3433, 3451)	

轻型汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子实测研究

黄成^{1,2}, 胡磬遥^{1,2}, 鲁君^{1,2}

(1. 上海市环境科学研究院, 上海 200233; 2. 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)

摘要: 选取 27 辆国 3 ~ 国 5 轻型汽油车采用实验室底盘测功机和全流稀释定容采样系统(CVS)开展了尾气颗粒物中有机碳(OC)和无机碳(EC)组分的排放因子实测,分析了启动条件、行驶工况和喷油方式对轻型汽油车 OC 和 EC 排放的影响. 结果表明,国 3 ~ 国 5 轻型汽油车 OC 平均排放因子分别为 (2.09 ± 1.03) 、 (1.59 ± 0.78) 和 (0.75 ± 0.31) $\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$, EC 平均排放因子分别为 (1.98 ± 1.42) 、 (1.57 ± 1.80) 和 (0.65 ± 0.49) $\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$,二者均随排放标准的提升呈显著下降趋势, OC/EC 值分别为 1.54 ± 0.92 、 1.53 ± 0.91 以及 1.47 ± 0.66 . OC1、OC2 以及 EC1 和 EC2 是轻型汽油车排放的最主要碳质组分,分别占 15.0%、20.6%、22.2% 和 21.7%. 冷启动条件下轻型汽油车 OC 和 EC 排放约为热启动的 1.4 和 1.8 倍;高速工况下轻型汽油车 OC 和 EC 排放因子约为城区工况的 2 倍和 4 倍;缸内直喷(GDI)发动机的 OC 排放因子与进气道喷射(PFI)发动机接近,但 EC 排放因子约是后者的 1.7 倍,随着我国轻型汽油车中 GDI 发动机日渐普及,其 EC 排放应当引起密切关注.

关键词: 机动车排放; 轻型汽油车; 碳质组分; 排放因子; 底盘测功机

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)07-3110-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201712218

Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles

HUANG Cheng^{1,2}, HU Qing-yao^{1,2}, LU Jun^{1,2}

(1. Shanghai Academy of Environmental Sciences, Shanghai 200233, China; 2. State Environmental Protection Key Laboratory of Formation and Prevention of the Urban Air Complex, Shanghai 200233, China)

Abstract: Organic carbon (OC) and elemental carbon (EC) emission factors from 27 State 3-5 light-duty gasoline vehicles (LDGVs) were tested in this study using a CVS (Constant Volume Sampling) system on a dynamometer. The influences of start conditions, driving cycles, and fuel injection technologies on the OC and EC emissions were analyzed. The results show that the OC emission factors of the tested State 3 to 5 LDGVs were (2.09 ± 1.03) , (1.59 ± 0.78) , and (0.75 ± 0.31) $\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$, respectively, and the EC emission factors were (1.98 ± 1.42) , (1.57 ± 1.80) , and (0.65 ± 0.49) $\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$. Both OC and EC emissions significantly decreased with the promotion of emission standards. The OC/EC ratios were 1.54 ± 0.92 , 1.53 ± 0.91 , and 1.47 ± 0.66 , respectively. OC1, OC2, EC1, and EC2 were the most important carbonaceous components from LDGVs, accounting for 15%, 20.6%, 22.2%, and 21.7%, respectively. OC and EC emission factors under cold-start conditions were 1.4 and 1.8 times those under hot-start conditions. OC and EC emission factors for highway cycles were 2 and 4 times those for urban cycles. OC emission factors from GDI (Gasoline Direct Injection) engines were close to those from PFI (Port Fuel Injection) engines. However, their EC emission factors were 1.7 times those from PFI engines. With the increasing popularity of GDI engines in LDGV fleets in China, the EC emissions from these engines should be paid more attention in the future.

Key words: vehicle emissions; light-duty gasoline vehicle; carbonaceous components; emission factor; dynamometer chassis

有机碳(OC)和无机碳(EC)等碳质组分是大气细颗粒物的重要组成部分^[1~3],对大气能见度、气候变化和人体健康都具有重要影响^[4~9]. 机动车排放是大气细颗粒物中 OC 和 EC 组分的主要来源之一^[10,11],其中,柴油车是机动车一次颗粒物排放的主要贡献者^[12],近年来我国针对柴油车尾气颗粒物化学组分开展了较多实测研究,发现柴油车尾气中 OC 和 EC 含量丰富,排放占比约在 80% ~ 90% 左右,OC 和 EC 组分含量较为接近^[12~14]. 相对而言,现有研究对汽油车尾气颗粒物排放的关注较少.

汽油车是我国机动车构成的主体,而且处于快速增长趋势. 截止 2016 年底,全国汽车保有量达到 1.84 亿辆,其中汽油车达到 1.63 亿辆,占到

88.5%,相比 2015 年新增约 17.0%^[15]. 近年来,越来越多的研究表明,汽油车颗粒物排放也不容忽视^[16~19],其中含有大量 OC 组分和一定量的 EC 组分^[20~23],经过二次反应生成的二次有机气溶胶(SOA)潜在贡献也是影响城市大气污染的重要来源之一^[24~26]. 获取汽油车尾气 OC 和 EC 排放因子将有助于细化大气污染物排放清单和 PM_{2.5}源解析结果,但是我国在这方面基础数据积累仍十分薄弱. 李宇飞等^[27]对国内 12 辆轻型汽油车排放进行了实

收稿日期: 2017-12-26; 修订日期: 2018-01-11

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(16dz1206704)

作者简介: 黄成(1980 ~),男,高级工程师,主要研究方向为大气污染源排放与控制, E-mail: huangc@saes.sh.cn

测,获得了轻型汽油车尾气颗粒物中 OC 和 EC 组分占碳质组分(TC)的比重,但未确定轻型汽油车的 OC 和 EC 排放因子. 因此,本研究利用实验室底盘测功机和全流稀释定容采样系统(CVS),开展了 27 辆在用国 3~国 5 轻型汽油车颗粒物采样,通过碳质组分分析确定了轻型汽油车 OC 和 EC 排放因子,旨在为大气污染源排放清单提供基础研究支撑.

1 材料与方法

1.1 试验车辆

为使测试样本具备一定的代表性,本研究按照车型大小、排放标准和出厂日期在上海市招募了 27 辆轻型汽油车开展了测试. 表 1 所示为试验车辆的基本信息,测试车辆的登记日期在 2006~2016 年之间,排量在 1.4~2.5 L 之间,最大总质量在 1 450~2 398 kg 之间. 其中,国 3、国 4 和国 5 标准车辆分别为 6、12 和 9 辆,占比为 22%、44% 和 33%,与上海市现有的国 3~国 5 轻型汽油车构成相近(13%、40%、40%),国 3、国 4 和国 5 测试车辆的平均行驶里程分别为 $(20.2 \pm 12.0) \times 10^4$ 、 $(9.5 \pm 5.6) \times 10^4$ 和 $(3.7 \pm 3.0) \times 10^4$ km. 测试车辆中 6 辆配备了涡轮增压,4 辆采用直喷技术,1 辆为进气道喷射与直喷相结合的混合喷射技术. 由于测试车辆均来自社会招募,使用的油品为市售车用汽油,测试时段为 2017 年 3~4 月间,此时上海市车用汽油应符合国五标准.

基本信息,测试车辆的登记日期在 2006~2016 年之间,排量在 1.4~2.5 L 之间,最大总质量在 1 450~2 398 kg 之间. 其中,国 3、国 4 和国 5 标准车辆分别为 6、12 和 9 辆,占比为 22%、44% 和 33%,与上海市现有的国 3~国 5 轻型汽油车构成相近(13%、40%、40%),国 3、国 4 和国 5 测试车辆的平均行驶里程分别为 $(20.2 \pm 12.0) \times 10^4$ 、 $(9.5 \pm 5.6) \times 10^4$ 和 $(3.7 \pm 3.0) \times 10^4$ km. 测试车辆中 6 辆配备了涡轮增压,4 辆采用直喷技术,1 辆为进气道喷射与直喷相结合的混合喷射技术. 由于测试车辆均来自社会招募,使用的油品为市售车用汽油,测试时段为 2017 年 3~4 月间,此时上海市车用汽油应符合国五标准.

表 1 试验车辆信息

Table 1 Information about the tested vehicles										
测试序号	车型	登记日期 (年-月)	排量 /L	里程表读数 $\times 10^4$ /km	最大总质量 /kg	排放 阶段	工作方式	喷油方式	测试工况	启动条件
1	别克	2006-09	2.5	22.5	2 398	国 3	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
2	东风标致	2007-04	1.4	16.2	1 450	国 3	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
3	别克	2007-04	1.6	15.5	1 630	国 3	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
4	东风标致	2008-01	1.6	11.7	1 754	国 3	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
5	丰田	2010-10	2.4	20.9	2 100	国 4	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
6	帕萨特	2011-09	1.9	15.4	1 897	国 4	涡轮增压	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
7	雪佛兰	2010-03	1.8	14.7	1 912	国 4	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
8	现代	2013-05	1.6	14.6	1 573	国 4	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
9	东风日产	2009-08	2.5	9.9	2 060	国 4	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
10	奥迪	2013-04	2.0	7.8	2 020	国 4	涡轮增压	缸内直喷	ECE + EUDC	热启动
11	帕萨特	2011-01	2.0	6.0	1 767	国 4	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
12	雪佛兰	2012-06	1.6	4.9	1 800	国 4	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
13	别克	2014-10	2.4	4.6	2 380	国 4	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
14	别克	2012-04	1.6	3.7	1 678	国 4	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
15	大众	2015-05	1.8	8.4	2 060	国 5	涡轮增压	缸内直喷	ECE + EUDC	热启动
16	奥迪	2016-03	2.5	7.5	2 310	国 5	自然吸气	缸内直喷	ECE + EUDC	热启动
17	别克	2015-05	2.4	5.7	2 380	国 5	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
18	别克	2016-03	1.5	5.1	1 638	国 5	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
19	北京现代	2016-07	1.6	1.4	1 642	国 5	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
20	东风本田	2016-11	2.0	0.8	1 970	国 5	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
21	东风起亚	2016-10	1.6	0.5	1 720	国 5	自然吸气	进气道喷射	ECE + EUDC	热启动
22	东风标致	2008-01	1.6	11.7	1 754	国 3	自然吸气	进气道喷射	WLTC	冷启动、热启动
23	迈腾	2008-07	2.0	43.3	2 020	国 3	涡轮增压	混合喷射	WLTC	冷启动、热启动
24	帕萨特	2011-09	1.8	5.8	1 897	国 4	涡轮增压	进气道喷射	WLTC	冷启动、热启动
25	大众	2011-11	2.0	5.8	2 090	国 4	涡轮增压	缸内直喷	WLTC	冷启动、热启动
26	东风本田	2015-02	1.8	1.7	1 680	国 5	自然吸气	进气道喷射	WLTC	冷启动、热启动
27	别克	2015-12	1.5	2.0	1 690	国 5	自然吸气	进气道喷射	WLTC	冷启动、热启动

1.2 测试设备与方法

车辆均采用底盘测功机+定容全流稀释采样方法在室温下开展测量,试验全程密闭、控温. 底盘测功机采用 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,可同时进行气态污染物、颗粒数量(PN)测量和颗粒物滤膜采样. 气态污染物方面, CO 采用非分散红外(NDIR)方法测量、HC 采用氢火焰离

子(FID)方法测量、NO_x 采用化学发光法(CLD)方法测量. PN 采用 SPCS-2000 型产品进行测量,颗粒物在进入计数器之前首先经过上游的挥发性颗粒物去除器(VPR),通过稀释和蒸发去除了颗粒物中的可挥发组分,实测的粒径范围在 23 nm~2.5 μm 之间. 颗粒物采用滤膜采样系统采集,每次试验可采集 1 张滤膜,也可根据不同的工况段进行分段采集,采样流量为 55 L·min⁻¹. CVS 系统的流量控制在

$7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$, 稀释比约在 20 倍左右. 1~21 号车辆的测试工况为欧洲城市 + 郊区驾驶循环 (ECE + EUDC), 在热启动条件下开展 1 次试验, 该循环由 4 个城市道路驾驶循环 (ECE) 和 1 个城郊高速驾驶循环 (EUDC) 组成, 时长为 1 180 s, 里程数约 11 km, 最大车速为 $120 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 每次试验按 ECE 和 EUDC 工况分段各采集 1 张石英膜, 用于分析工况对 OC 和 EC 排放的影响; 22~27 号车辆采用全球统一轻型车排放测试循环 (WLTC), 分别在冷启动和热启动条件下开展 1 次试验, 该循环由低速段 (589 s)、中速段 (433 s)、高速段 (455 s) 和超高速段 (323 s) 四段组成, 时长为 1 800 s, 里程数约 23.27 km, 最大车速超过 $130 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 1 次试验采集 1 张石英膜, 冷启动测试前, 车辆在常温下浸滞 12 h 以上.

1.3 碳质组分分析方法

OC 与 EC 组分采用美国 DRI 公司生产的 2001A 型热/光碳分析仪进行分析, 采用美国 IMPROVE_A 协议, 光学校正采用热光反射法 (TOR). 具体分析过程为: 首先从石英膜样品上截

取一块 0.523 cm^2 的圆形膜片放置入设备, 然后在热光炉中通入氦气, 在无氧气氛下程序升温, 逐步加热颗粒物样品, 在不同的温度段下使样品中 OC 挥发, 分别对应 140、280、480 以及 580°C 加热获得 OC1、OC2、OC3、OC4 组分含量. 之后通入 2% 氧/氮混合气, 在有氧气条件下继续加热升温, 使样品中的 EC 完全氧化成 CO_2 , 分别在 580、740 和 840°C 温度段下获得 EC1、EC2 和 EC3 组分含量. 上述方法分析过程中存在部分 OC 裂解形成 EC 的情况, 为避免上述情况, 本研究根据 633 nm 波段反射光强的变化, 从 EC1 中分离出裂解碳 (OPC), 然后将 OPC 从 EC1 中扣除并入 OC4. 最终, 将 OC 定义为 OC1、OC2、OC3 和 OC4 之和, 将 EC 定义为 EC1、EC2 和 EC3.

2 结果与分析

2.1 OC、EC 及其他污染物平均排放因子

图 1 所示为测试车辆的 OC、EC、气态污染物以及 PN 平均排放因子. 可见, 测试车辆各类污染物平均排放因子均随排放标准的提升呈逐渐下降趋

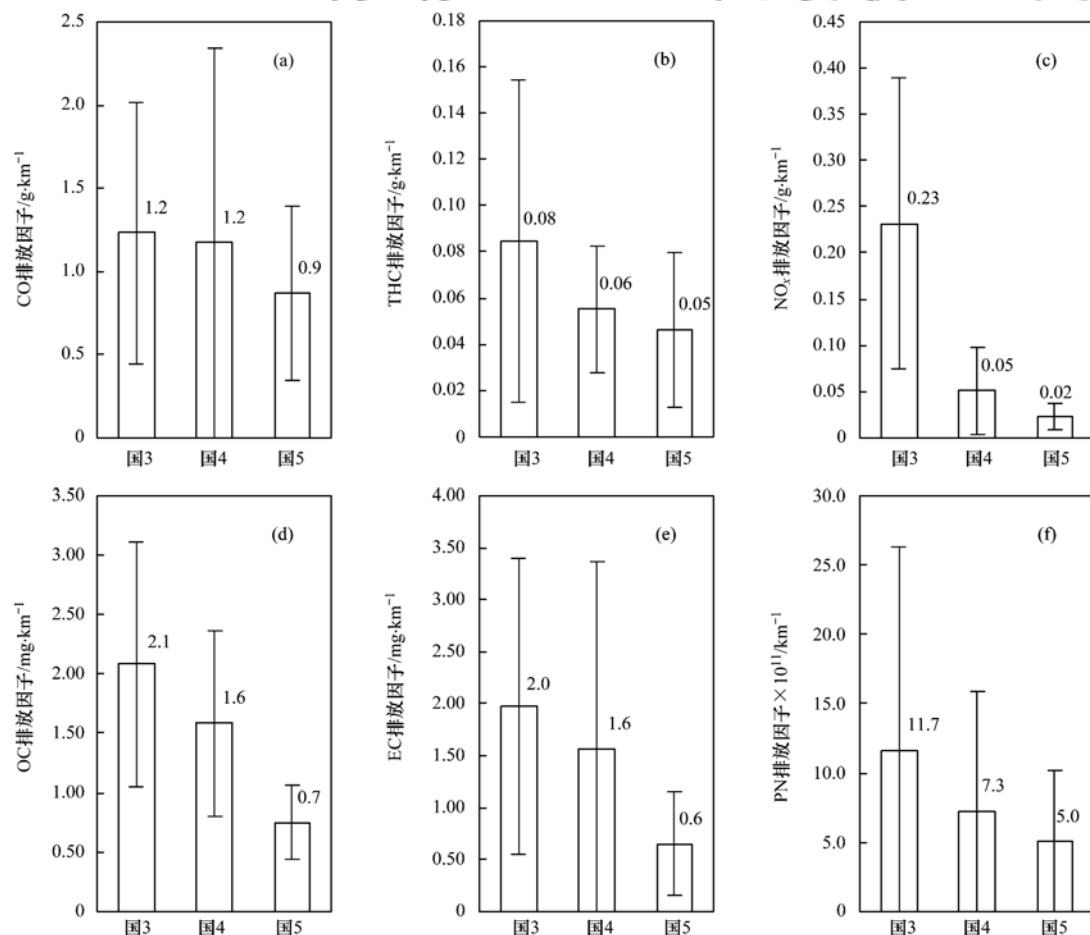


图 1 OC、EC 和其他污染物平均排放因子

Fig. 1 Average emission factors of OC, EC, and other pollutants

势,表明轻型汽油车尾气排放控制取得了较为显著的效果. 其中,国 4、国 5 车 CO 排放因子相比国 3 分别下降 5% 和 29%, THC 分别下降 35% 和 45%, NO_x 分别下降 78% 和 90%, PN 分别下降 38% 和 57%. OC 和 EC 组分排放水平相对低于气态污染物,国 3、国 4 和国 5 车 OC 平均排放因子分别为 (2.09 ± 1.03) 、 (1.59 ± 0.78) 和 (0.75 ± 0.31) $\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$,国 4、国 5 车相比国 3 分别下降 24% 和 64%; EC 平均排放因子分别为 (1.98 ± 1.42) 、 (1.57 ± 1.80) 和 (0.65 ± 0.49) $\text{mg} \cdot \text{km}^{-1}$,国 4、国 5 车相比国 3 分别下降 21% 和 67%; OC/EC 值分别为 1.54 ± 0.92 、 1.53 ± 0.91 以及 1.47 ± 0.66 ,随着排放标准的提升,OC/EC 值略有下降. 尽管国 3 ~ 国 5 轻型汽油车排放标准未对颗粒物提出控制要求,但是排放控制水平的提升使轻型汽油车尾气颗粒物及其碳质组分排放也得到了同步削减,OC 和 EC 的下降趋势基本一致,与 PN 的削减幅度相近.

2.2 OC、EC 与其他污染物排放的相关性

为分析汽油车 OC 和 EC 排放特征,本研究分别比较了 OC 与 EC、THC 和 CO 以及 EC 与 PN 排放

之间的相关性,如图 2 所示. 可见,OC 排放因子与 EC、THC 和 CO 均呈线性相关关系,上述 4 种污染物均为汽油中碳质组分不完全燃烧的产物,说明其排放机理基本相近. 本研究实测的 PN 为去除颗粒物中可挥发组分后的固体颗粒,因此与 EC 的相关性相对较好,如图 2(d) 所示. 通过比较可以发现,加强对轻型汽油车 CO 和 THC 等气态污染物的排放控制,将有助于同步改善 OC 和 EC 等颗粒物碳质组分的排放.

2.3 OC 和 EC 组分的构成特征

图 3 所示为各阶段排放标准测试车辆实测的 OC1 ~ OC4 和 EC1 ~ EC3 组分的构成情况. 轻型汽油车 OC 排放中 OC2 组分的占比最高,平均为 20.6%,其次为 OC1,平均为 15.0%. 可见,轻型汽油车 OC 排放中易挥发性有机组分含量相对较高. EC 排放中 EC1 和 EC2 组分含量相对较高,分别占 22.2% 和 21.7%. 总体来看,汽油机缸内燃烧温度和压力相对较低,形成的碳质组分主要以相对易挥发的有机组分以及较低温度段下氧化的元素碳为主. 相对而言,国 4 和国 5 车型汽油车实测的 OC1、

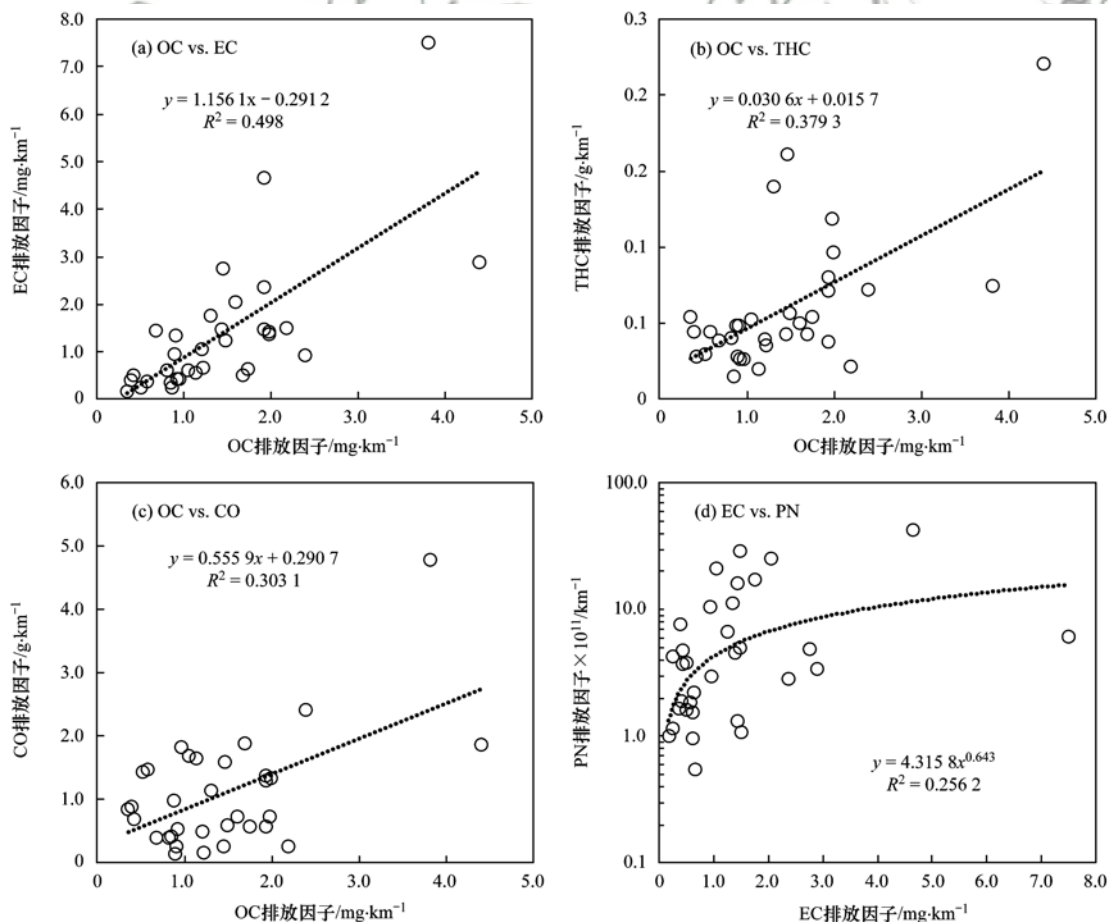


图 2 OC、EC 和其他污染物排放的相关性

Fig. 2 Relationships between the emission factors of OC, EC, and other pollutants

OC₂ 及 EC₁、EC₂ 组分占比有所下降,说明随着汽油车排放标准的提升,发动机缸内温度和压力有所上升,使不易挥发和氧化的碳质组分含量有所增加。

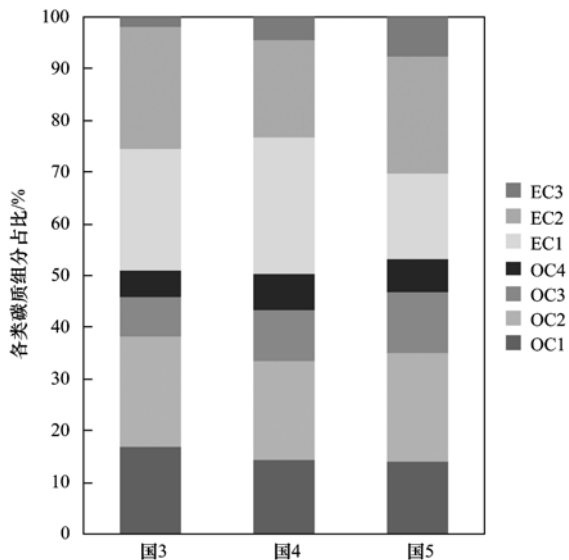


图3 各排放标准测试车辆 OC 和 EC 具体组分的构成分布

Fig. 3 Contributions of OC and EC components for each emission standard category of the tested vehicles

2.4 OC 和 EC 排放的影响因素

2.4.1 启动状态对 OC 和 EC 排放的影响

图4所示为22~27号测试车辆分别在冷启动和热启动状态下采用WLTC循环实测的OC和EC排放因子。各排放阶段测试车辆在冷启动状态下的OC和EC排放因子均高于热启动,这主要是由于汽油车在冷启动状态下燃烧室的温度较低,燃烧较不稳定,易出现不正常燃烧现象,造成OC和EC等含碳组分的不完全燃烧。平均来看,冷启动状态下OC和EC排放约为热启动的1.4和1.8倍。

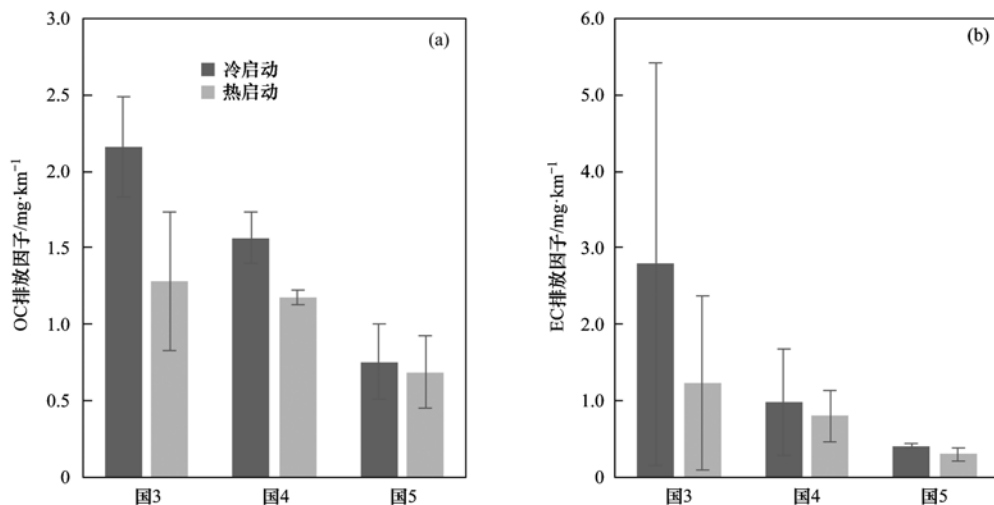


图4 冷启动和热启动状态下 OC 和 EC 排放因子比较

Fig. 4 Comparisons of OC and EC emission factors for cold- and hot-start conditions

2.4.2 行驶工况对 OC 和 EC 排放的影响

图5所示为1~21号测试车辆分别在ECE、EUDC及其综合工况下实测的OC和EC排放因子比较。ECE 和 EUDC 工况下测试车辆的 OC 排放因子均随排放标准呈显著下降趋势;相对而言,ECE 工况下的 EC 排放因子随排放标准的差异较小,说明在城区低速工况下,各阶段轻型汽油车 EC 排放水平基本接近,但 EUDC 高速工况下仍呈现随排放标准提升逐渐下降的特征。EUDC 高速工况下,轻型汽油车的 OC 和 EC 排放因子均高于 ECE 城区工况,平均约为 ECE 工况的 2 倍和 4 倍左右。可见,轻型汽油车在高速行驶时 OC 和 EC 排放将显著升高,高速行驶状态下发动机喷油量加大,空气与燃料混合不均匀导致含碳组分不完全燃烧应是导致 OC 和 EC 排放较高的主要原因。

2.4.3 喷油方式对 OC 和 EC 排放的影响

已有研究表明缸内直喷汽油机的颗粒物排放普遍高于常规的自然吸气电喷式发动机,尤其是其 EC 排放显著较高,OC 排放则相对较低^[28~32]。为比较缸内直喷发动机(GDI)与进气道喷射发动机(PFI)的 OC 和 EC 排放差异,本研究分别给出了各排放阶段下实测的 PFI 和 GDI 车型的 OC 和 EC 排放因子,如图6所示。除国5车外,GDI 车型的 OC 排放因子与 PFI 基本相近,平均排放水平与 PFI 车型一致。但是,GDI 车型的 EC 排放显著高于 PFI 车型,其平均排放因子是 PFI 车型的 1.7 倍左右,与已有研究的实测结果基本一致^[28]。近年来,随着我国对轻型汽油车油耗水平的要求愈加严格,GDI 车型因其燃油经济性较好而得到越来越多的应用,但是该车型的大规模使用将导致机动车颗粒物排放相应增加,

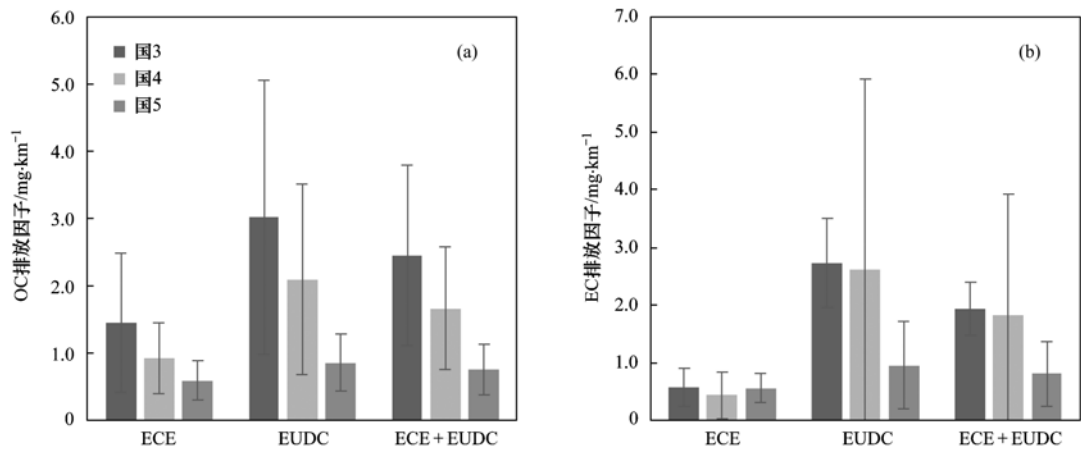


图5 ECE 和 EUDC 工况下 OC 和 EC 排放因子比较

Fig. 5 Comparisons of OC and EC emission factors for ECE and EUDC driving cycles

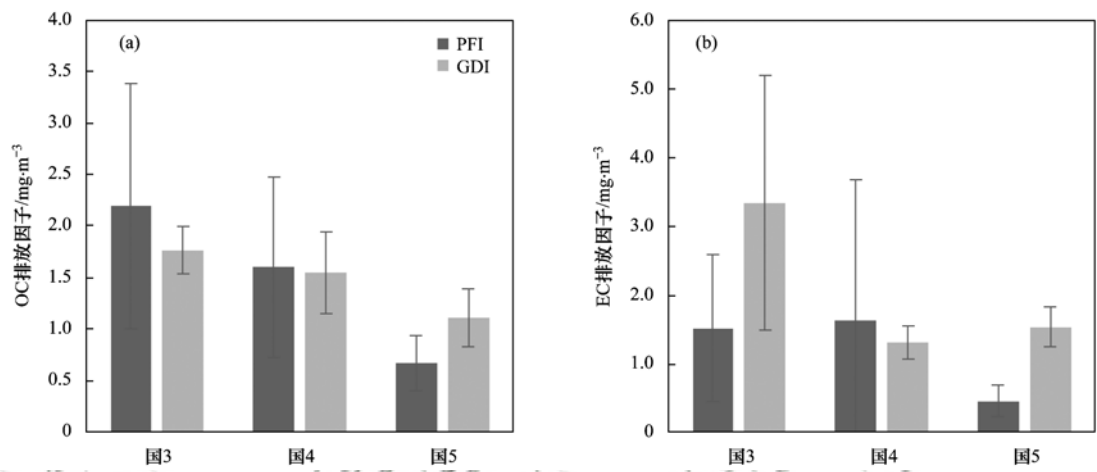


图6 自然吸气与缸内直喷汽油车 OC 和 EC 排放因子比较

Fig. 6 Comparisons of OC and EC emission factors from port fuel injection (PFI) and gasoline direct injection (GDI) vehicles

尤其是 EC 排放上升明显,应当引起必要的关注,采用合适的治理技术加以有效控制.

2.5 与已有研究的比较

由于国内针对轻型汽油车 OC 和 EC 排放因子

的实测研究相对较少,本研究参考了美国的相关测试结果^[20, 28]进行了比较,如图 7 所示. 其中, May 等^[20]实测的轻型汽油车中,除 LEV2 阶段的车辆中有部分为 GDI 车型外,其余均为 PFI 车型; Saliba

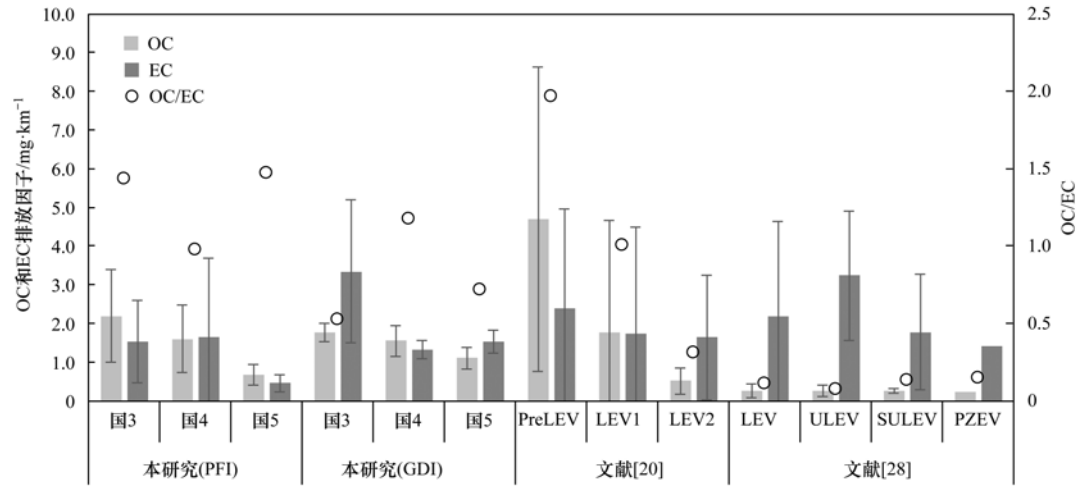


图7 本研究实测 OC 和 EC 排放因子与其他研究的比较

Fig. 7 Comparisons of OC and EC emission factors in this study with those reported in previous studies

等^[28]的研究中主要选取了 22 辆轻型乘用车的测试结果,其中主要是 GDI 车型,共 17 辆. 上述实测结果均采用与本研究一致的 CVS 方法获得. 通过比较可以发现,本研究实测的 OC 和 EC 排放因子及其比值与 May 等^[20]的测试结果相对比较接近;与 Saliba 等^[28]的实测结果比较,本研究实测的 GDI 车型的 EC 排放因子与之接近,但 OC 排放因子则远高于该研究,考虑到美国的燃油经济性标准相比我国更为严格,具体的缸内直喷技术(如壁面引导、气流引导或喷雾控制等)可能与当前美国的主流技术还存在一定的差异,导致缸内燃烧温度或压力有所区别,有待后续研究深入分析.

3 结论

(1)通过 27 辆轻型汽油车底盘测功机排放实测,本研究基本掌握了国 3~国 5 在用轻型汽油车 OC 和 EC 排放因子. 其中,国 3~国 5 车 OC 平均排放因子分别为 (2.09 ± 1.03) 、 (1.59 ± 0.78) 和 $(0.75 \pm 0.31) \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$; EC 平均排放因子分别为 (1.98 ± 1.42) 、 (1.57 ± 1.80) 和 $(0.65 \pm 0.49) \text{ mg} \cdot \text{km}^{-1}$, OC 和 EC 排放均随排放标准的提升呈下降趋势,与 PN 的排放趋势基本一致.

(2)轻型汽油车 OC 和 EC 排放与 THC 和 CO 等未完全燃烧的气态污染物排放呈线性相关关系,说明其排放成因基本相近,控制汽油车尾气中的 CO 和 THC 等气态污染物排放将有助于同步降低 OC 和 EC 排放水平.

(3)轻型汽油车排放的 OC 主要以 OC1 和 OC2 等较易挥发的有机组分为主,分别占 15.0% 和 20.6%,排放的 EC 主要以 EC1 和 EC2 等易氧化的元素碳组分为主,分别占 22.2% 和 21.7%,随着汽油车排放标准的提升,发动机缸内温度和压力上升,OC3、OC4 及 EC3 组分含量相应增加.

(4)启动状态、行驶工况及喷油方式对轻型汽油车 OC 和 EC 排放均具有一定影响,冷启动工况下,轻型汽油车 OC 和 EC 排放约为热启动的 1.4 和 1.8 倍;高速工况下,轻型汽油车 OC 和 EC 排放因子可以达到城区工况 2 倍和 4 倍左右;GDI 发动机的 OC 排放因子与 PFI 发动机基本相近,但 EC 排放因子显著高于 PFI 发动机,约是后者的 1.7 倍左右. 随着我国对轻型汽油车燃油经济性的要求日益加严,GDI 发动机日渐普及,由其导致的 EC 排放上升的问题应当引起密切关注.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Tao J, Zhang L M, Cao J J, *et al.* A review of current knowledge concerning $\text{PM}_{2.5}$ chemical composition, aerosol optical properties and their relationships across China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(15): 9485-9518.
- [3] Zhu Q, He L Y, Huang X F, *et al.* Atmospheric aerosol compositions and sources at two national background sites in northern and southern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(15): 10283-10297.
- [4] Lim S, Lee M, Kim S W, *et al.* Absorption and scattering properties of organic carbon versus sulfate dominant aerosols at Gosan climate observatory in Northeast Asia [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(15): 7781-7793.
- [5] Zhou M, Qiao L P, Zhu S H, *et al.* Chemical characteristics of fine particles and their impact on visibility impairment in Shanghai based on a 1-year period observation [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **48**: 151-160.
- [6] Cheng Z, Jiang J K, Chen C H, *et al.* Estimation of aerosol mass scattering efficiencies under high mass loading: case study for the megacity of Shanghai, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(2): 831-838.
- [7] Lu Z F, Streets D G, Winijkul E, *et al.* Light absorption properties and radiative effects of primary organic aerosol emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(8): 4868-4877.
- [8] Wang Z L, Zhang H, Zhang X Y. Simultaneous reductions in emissions of black carbon and co-emitted species will weaken the aerosol net cooling effect [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(7): 3671-3685.
- [9] Qiao L P, Cai J, Wang H L, *et al.* $\text{PM}_{2.5}$ constituents and hospital emergency-room visits in Shanghai, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(17): 10406-10414.
- [10] Huang X H H, Bian Q J, Louie P K K, *et al.* Contributions of vehicular carbonaceous aerosols to $\text{PM}_{2.5}$ in a roadside environment in Hong Kong [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(17): 9279-9293.
- [11] Klimont Z, Kupiainen K, Heyes C, *et al.* Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(14): 8681-8723.
- [12] 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 bus [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(9): 1352-1361.
- [13] Wu B B, Shen X B, Cao X Y, *et al.* Characterization of the chemical composition of $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- [14] 何立强, 胡京南, 祖雷, 等. 国 I~国 III 重型柴油车尾气 $\text{PM}_{2.5}$ 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.
- [15] 中华人民共和国环境保护部. 中国机动车环境管理年报 (2017)[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 2017.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Shen X B, Yao Z L, Huo H, *et al.* $PM_{2.5}$ emissions from light-duty gasoline vehicles in Beijing, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **487**: 521-527.
- [19] Platt S M, El Haddad I, Pieber S M, *et al.* Gasoline cars produce more carbonaceous particulate matter than modern filter-equipped diesel cars [J]. *Scientific Reports*, 2017, **7** (1): 4926.
- [20] May A A, Nguyen N T, Presto A A, *et al.* Gas-and particle-phase primary emissions from in-use, on-road gasoline and diesel vehicles [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **88**: 247-260.
- [21] Hays M D, Preston W, George B J, *et al.* Carbonaceous aerosols emitted from light-duty vehicles operating on gasoline and ethanol fuel blends[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **47** (24): 14502-14509.
- [22] Kamboures M A, Hu S S, Yu Y, *et al.* Black carbon emissions in gasoline vehicle exhaust: a measurement and instrument comparison [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2013, **63**(8): 886-901.
- [23] Zheng X, Zhang S J, Wu Y, *et al.* Characteristics of black carbon emissions from in-use light-duty passenger vehicles[J]. *Environmental Pollution*, 2017, **231**: 348-356.
- [24] Huang C, Wang H L, Li L, *et al.* VOC species and emission inventory from vehicles and their SOA formation potentials estimation in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(19): 11081-11096.
- [25] Gordon T D, Presto A A, May A A, *et al.* Secondary organic aerosol formation exceeds primary particulate matter emissions for light-duty gasoline vehicles [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(9): 4661-4678.
- [26] Bahreini R, Middlebrook A M, de Gouw J A, *et al.* Gasoline emissions dominate over diesel in formation of secondary organic aerosol mass[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, **39**(6): L06805.
- [27] 李宇飞, 李振华, 胡京南, 等. 轻型汽油车尾气 $PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$ from light-duty gasoline vehicles [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(4): 503-508.
- [28] Saliba G, Saleh R, Zhao Y L, *et al.* Comparison of gasoline direct-injection (GDI) and port fuel injection (PFI) vehicle emissions: emission certification standards, cold-start, secondary organic aerosol formation potential, and potential climate impacts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51** (11): 6542-6552.
- [29] 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.
- [30] Zhu R C, Hu J N, Bao X F, *et al.* Tailpipe emissions from gasoline direct injection (GDI) and port fuel injection (PFI) vehicles at both low and high ambient temperatures [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **216**: 223-234.
- [31] Xing J P, Shao L Y, Zheng R, *et al.* Individual particles emitted from gasoline engines: impact of engine types, engine loads and fuel components[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, **149**: 461-471.
- [32] 秦艳红, 胡敏, 李梦仁, 等. 缸内直喷汽油机排放 $PM_{2.5}$ 的理化特征及影响因素[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(5): 1332-1339.
- Qin Y H, Hu M, Li M R, *et al.* Physical and chemical characteristics of $PM_{2.5}$ emissions from gasoline direct injection engine and its influence factors [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(5): 1332-1339.

CONTENTS

Spatial-Temporal Change Evolution of PM _{2.5} in Typical Regions of China in Recent 20 Years	LUO Yi, DENG Qiong-fei, YANG Kun, <i>et al.</i>	(3003)
Evaluation the Extent of Health Damage Caused by PM _{2.5} Particulate in Xi'an City	WEI Guo-ru, SHI Xing-min	(3014)
Analysis of Chemical Composition, Source and Evolution of Submicron Particles in Xianghe, Hebei Province	JIANG Qi, WANG Fei, SUN Ye-le	(3022)
Characteristics and Source Analysis of Carbonaceous Components of PM _{2.5} During Autumn in the Northern Suburb of Nanjing	XU Zu-fei, CAO Fang, GAO Song, <i>et al.</i>	(3033)
Comparison of Chemical Components Characteristics of PM _{2.5} Between Haze and Clean Periods During Summertime in Lin'an	LIANG Lin-lin, SUN Jun-ying, ZHANG Yang-mei, <i>et al.</i>	(3042)
Characteristics and Sources of Carbon Components in PM _{2.5} During Autumn and Winter in Panjin City	ZHANG Lei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i>	(3051)
Aerosol Optical Properties and Light Absorption Enhancement of EC During Wintertime in Nanjing	HUANG Cong-cong, MA Yan, ZHENG Jun	(3057)
Concentration, Solubility, and Dry Deposition Flux of Trace Elements in Fine and Coarse Particles in Qingdao During Summer	LI Peng-zhi, LI Qian, SHI Jin-hui, <i>et al.</i>	(3067)
Characteristics and Sources of Dissolved Heavy Metals in Summer Precipitation of Taiyuan City, China	YE Ai-ling, CHENG Ming-chao, ZHANG Lu, <i>et al.</i>	(3075)
Characteristics of and Factors Affecting Atmospheric CO ₂ Concentration in Hangzhou	PU Jing-jiao, XU Hong-hui, JIANG Yu-jun, <i>et al.</i>	(3082)
Treatment Status and Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industrial Sources	JING Sheng-ao, WANG Hong-li, ZHU Hai-lin, <i>et al.</i>	(3090)
Characteristics of Industrial VOCs Emission Sources and Control Technology Application in a Prefecture-level City Region-Based on Qinhuangdao City	HU Xu-rui, HU Xiao-yu, WANG Can	(3096)
Pollution Condition and Health Risk Assessment of VOCs in Fermentation Exhaust from Penicillin Production	GUO Bin, YAO Rui-jing, ZHANG Shuo, <i>et al.</i>	(3102)
Measurements of OC and EC Emission Factors for Light-duty Gasoline Vehicles	HUANG Cheng, HU Qing-yao, LU Jun	(3110)
Pollution Levels and Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Nanjing	TIAN Chun-hui, YANG Ruo-zhu, Gulizhaer Yilihamu, <i>et al.</i>	(3118)
Contamination Levels and Source Analysis of Heavy Metals in the Finer Particles of Urban Road Dust from Xi'an, China	SHI Dong-qi, LU Xin-wei	(3126)
pCO ₂ in the Main Rivers of the Three Gorges Reservoir and Its Influencing Factors	LUO Jia-chen, MAO Rong, LI Si-yue	(3134)
Major Ionic Features and Their Possible Controls in the Surface Water and Groundwater of the Jinghe River	KOU Yong-chao, KUA Kun, LI Zhou, <i>et al.</i>	(3142)
Urban Runoff Phosphorus Removal Pathways in Bioretention Systems	LI Li-qing, LIU Yu-qing, YANG Jia-min, <i>et al.</i>	(3150)
Succession Characteristics of Phytoplankton Functional Groups and Their Relationships with Environmental Factors in Dianshan Lake, Shanghai	YANG Li, ZHANG Wei, SHANG Guang-xia, <i>et al.</i>	(3158)
Spatio-temporal Variations of Diatom Community and Their Relationship with Water Environment in Fuxian Lake	LI Rui, CHEN Guang-jie, KANG Wen-gang, <i>et al.</i>	(3168)
Effects of Algal Blooms and Their Degradation on the Sediment-water Micro-interface	WANG Yong-ping, XIE Rui, CHAO Jian-ying, <i>et al.</i>	(3179)
Effect of Biochar on Root Morphological Characteristics of Wetland Plants and Purification Capacity of Constructed Wetland	XU De-fu, PAN Qian-cheng, LI Ying-xue, <i>et al.</i>	(3187)
Preparation of Mn-Co/Ceramic Honeycomb Catalyst and Its Performance on Catalytic Ozonation of Hydroquinone	ZHANG Lan-he, GAO Wei-wei, CHEN Zi-cheng, <i>et al.</i>	(3194)
Degradation Mechanism of Tetracycline Using Fe/Cu Oxides as Heterogeneous Activators of Peroxymonosulfate	LI Jing, BAO Jian-guo, DU Jiang-kun, <i>et al.</i>	(3203)
Behavior and Mechanisms of Cd(II) Adsorption from Water by Niobate-Modified Titanate Nanosheets	KANG Li, LIU Wen, LIU Xiao-na, <i>et al.</i>	(3212)
Trace Amounts of Phosphorus Removal Based on the in-suit Oxidation Products of Iron or Manganese in a Biofilter	CAI Yan-an, BI Xue-jun, ZHANG Jia-ning, <i>et al.</i>	(3222)
Effect of Preparation Methods on Phosphate Adsorption by Iron-Titanium Binary Oxide: Coprecipitation and Physical Mixing	ZHONG Yan, WANG Jiang-yan, CHEN Jing, <i>et al.</i>	(3230)
Effects of Conductivity on Performance of a Combined System of Anaerobic Acidification, Forward Osmosis, and a Microbial Fuel Cell	LU Yu-qin, LIU Jin-meng, WANG Xin-hua, <i>et al.</i>	(3240)
COD Requirement for Biological Phosphorus Removal Granule System Under Different Phosphorus Concentrations	LI Dong, CAO Mei-zhong, GUO Yue-zhou, <i>et al.</i>	(3247)
Effect of Substrate Concentration on SAD Collaborative Nitrogen and Carbon Removal Efficiency in an ABR Reactor	ZHANG Min, JIANG Ying, WANG Yao-qi, <i>et al.</i>	(3254)
Evaluation of Advanced Nitrogen Removal from Coking Wastewater Using Sulfide Iron-containing Sludge as a Denitrification Electron Donor	FU Bing-bing, PAN Jian-xin, MA Jing-de, <i>et al.</i>	(3262)
Stability of Nitrification Combined with Limited Filamentous Bulking Under Intermittent Aeration	GAO Chun-di, SUN Da-yang, AN Ran, <i>et al.</i>	(3271)
Filamentous Sludge Microbial Community of a SBR Reactor Based on High-throughput Sequencing	HONG Ying, YAO Jun-qin, MA Bin, <i>et al.</i>	(3279)
Impact of Nano Zero-Valent Iron (NZVI) on Methanogenic Activity, Physiological Traits, and Microbial Community Structure in Anaerobic Digestion	SU Run-hua, DING Li-li, REN Hong-qiang	(3286)
Effects of Gas/Water Ratio on the Characteristics of Nitrogen Removal and the Microbial Community in Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, FU Xu-fang, <i>et al.</i>	(3297)
Comparison of Extraction Methods of Extracellular Polymeric Substances from Activated Sludge	SUN Xiu-yue, TANG Zhu, YANG Xin-ping	(3306)
Identification and Characterization of a Hypothermic Alkaliphilic Aerobic Denitrifying Bacterium <i>Pseudomonas monteilii</i> Strain H97	CAI Xi, HE Teng-xia, YE Qing, <i>et al.</i>	(3314)
Isolation, Identification, and Biodegradation Behaviors of a Perfluorooctane Sulfonic Acid Precursor (PreFOSs) Degrading Bacterium from Contaminated Soil	ZHAO Shu-yan, ZHOU Tao, WANG Bo-hui, <i>et al.</i>	(3321)
Microbial Community Distributions in Soils of an Oil Exploitation Site	CAI Ping-ping, NING Zhuo, HE Ze, <i>et al.</i>	(3329)
Characteristics of Soil Physicochemical Properties and Enzyme Activities over Different Reclaimed Years in a Copper Tailings Dam	WANG Rui-hong, JIA Tong, CAO Miao-wen, <i>et al.</i>	(3339)
Risk Analysis of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil Around a Bauxite Residue Disposal Area in Guangxi	GUO Ying, LI Yu-bing, XUE Sheng-guo, <i>et al.</i>	(3349)
Occurrence and Distribution of Phthalate Esters in Urban Soils of Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i>	(3358)
Profile Distribution of Paddy Soil Organic Carbon and Its Influencing Factors in Chengdu Plain	LI Shan, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3365)
Correlation Between Soil Organic and Inorganic Carbon and Environmental Factors in Cotton Fields in Different Continuous Cropping Years in the Oasis of the Northern Tarim Basin	ZHAO Jing-jing, GONG Lu, AN Shen-qun, <i>et al.</i>	(3373)
Soil Organic Carbon Components and Their Correlation with Soil Physicochemical Factors in Four Different Land Use Types of the Northern Tarim Basin	AN Shen-qun, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i>	(3382)
Short-term Mechanism of Warming-induced Stability for Organic Carbon in the Karst Plateau Soil	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i>	(3391)
Effects of Boron Treatment on Arsenic Uptake and Efflux in Rice Seedlings	ZHU Yi, SUN Guo-xin, CHEN Zheng, <i>et al.</i>	(3400)
Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland	HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG liang, <i>et al.</i>	(3409)
Seasonal Variation in Surface Ozone and Its Effect on the Winter Wheat and Rice in Nanjing, China	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, WEI Li, <i>et al.</i>	(3418)
Hair Mercury Concentrations in Residents of Fuling and Zhongxian in the Three Gorges Reservoir Region and Their Influence Factors	CHENG Nan, XIE Qing, FAN Yu-fei, <i>et al.</i>	(3426)
Removal of Typical Antibiotics During Aerobic Composting of Human Feces	SHI Hong-lei, WANG Xiao-chang, LI Qian	(3434)
Effect of COD/SO ₄ ²⁻ Ratio on Anaerobic Digestion of Penicillin Bacterial Residues	QIANG Hong, LI Yu-you, PEI Meng-fu	(3443)
Characteristics of Odor Emissions from Fresh Compost During Storage and Application	HE Pin-jing, JIANG Ning-ling, XU Xian, <i>et al.</i>	(3452)
Effects of the Veterinary Antibiotic Sulfamethazine on Ammonia Volatilization from a Paddy Field Treated with Conventional Synthetic Fertilizer and Manure	PANG Bing-kun, ZHANG Jing-sha, WU Jie, <i>et al.</i>	(3460)