

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2018.0323

李娟, 王新锋, 薛丽坤, 等. 2019. 济南市典型机动车的尾气颗粒物污染特征与影响因素研究 [J]. 环境科学学报, 39(1): 35-43

Li J, Wang X F, Xue L K, et al. 2019. Study on pollution characteristics and the influencing factors of exhaust particles from typical vehicles in Jinan [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 39(1): 35-43

济南市典型机动车的尾气颗粒物污染特征与影响因素研究

李娟¹, 王新锋^{1,*}, 薛丽坤¹, 高晓梅², 孙雷¹, 王文兴¹

1. 山东大学, 环境研究院, 青岛 266237

2. 济南大学, 水利与环境学院, 济南 250022

摘要:采用便携式仪器, 借鉴双怠速尾气检测法, 利用自行设计的尾气采样装置, 选择济南市区道路上 10 辆不同类型的机动车, 现场测量尾气颗粒物的质量浓度和数浓度. 基于实验数据, 分析了机动车尾气颗粒物污染特征, 深入探索了影响尾气颗粒物浓度的主要因素, 提出了相应的对策建议. 结果表明: ①怠速工况下机动车尾气中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度、PM_{0.01-1} 数浓度较低, 平均分别为 0.035~1.434 和 0.049~3.669 mg·m⁻³、(0.95~21.69)×10⁴ cm⁻³; 高怠速工况下颗粒物质量浓度和数浓度较高, PM_{2.5} 质量浓度为 0.350~5.132 mg·m⁻³, 最大值来自大型柴油货车 8.394 mg·m⁻³; PM₁₀ 质量浓度高达 1.708~7.862 mg·m⁻³, 最大值来自大型柴油客车 8.672 mg·m⁻³; PM_{0.01-1} 数浓度为 (6.78~40.68)×10⁴ cm⁻³. ②随着发动机转速和车型增大、排放标准降低, 机动车尾气中颗粒物质量浓度和数浓度明显升高. 与怠速工况相比, 高怠速工况下的 PM_{2.5} 质量浓度升高 3~44 倍, PM_{0.01-1} 数浓度升高 2~33 倍. 与小型车相比, 中、大型车的 PM_{2.5} 质量浓度升高约 5 倍, PM_{0.01-1} 数浓度升高约 2 倍. 使用 92 号汽油排放的颗粒物质量浓度与数浓度约为 95 号汽油车的 2 倍, 柴油车排放的颗粒物浓度高于汽油车. 国 III 标准的汽油车尾气颗粒物的质量浓度与数浓度约是国 IV 和国 V 标准的 2~4 倍. ③提高机动车排放标准和燃油品质, 减少在实际道路行驶中突然加速或启动等高怠速工况的瞬态变化, 加强对中、大型车尤其是大型柴油车的监管, 能够一定程度上减轻机动车尾气颗粒物污染.

关键词:机动车尾气; 颗粒物; 污染特征; 影响因素; 双怠速法

文章编号: 0253-2468(2019)01-35-09 中图分类号: X701 文献标识码: A

Study on pollution characteristics and the influencing factors of exhaust particles from typical vehicles in Jinan

LI Juan¹, WANG Xinfeng^{1,*}, XUE Likun¹, GAO Xiaomei², SUN Lei, WANG Wenxing¹

1. Shandong University, Environment Research Institute, Qingdao 266237

2. Jinan University, School of Water Resources and Environment, Jinan 250022

Abstract: Mass concentration and number concentration of exhaust particles from 10 different vehicles on the roads in urban Jinan were measured in situ by using portable instruments coupled with self-designed exhaust sampling device with double idle speed exhaust detection method as a reference. Based on the experimental data, the pollution characteristics, main factors influencing the emission of vehicle exhaust particles were analyzed deeply followed by corresponding suggestions. The results show that: ① Under idling mode, the PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations and PM_{0.01-1} number concentration of vehicle exhaust were relatively low, with the average concentration of 0.035~1.434 and 0.049~3.669 mg·m⁻³, (0.95~21.69)×10⁴ cm⁻³, respectively. By contrast, the mass and number concentrations under high idling mode were very high. The average PM_{2.5} mass concentration was 0.350~5.132 mg·m⁻³, with the maximum value of 8.394 mg·m⁻³ from large diesel van. The average PM₁₀ mass concentration was 1.708~7.862 mg·m⁻³, with the maximum value of 8.672 mg·m⁻³ from large diesel passenger bus. The average PM_{0.01-1} number concentration was (6.78~40.68)×10⁴ cm⁻³. ② With the rising engine speed, increasing vehicle size and constricting emission standard, the mass and number concentrations of exhaust particles increased significantly. When compared with idling mode, PM_{2.5} mass concentration in high idling mode increased by a factor of 3~44 and PM_{0.01-1} number concentration increases by a factor of 2~33. Compared with small vehicles, the PM_{2.5} and PM_{0.01-1} concentrations of medium and large vehicles increased by a factor of about 5 and 2, respectively. The mass and number concentrations of particles emitted from vehicles with 92# gasoline were about twice those

收稿日期: 2018-06-25 修回日期: 2018-08-01 录用日期: 2018-08-06

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2016YFC0200500); 国家自然科学基金 (No.41775118)

作者简介: 李娟 (1994—), 女, E-mail: lijuan_sdu@163.com; * 责任作者, E-mail: xinfengwang@sdu.edu.cn

with 95[#] gasoline, and the particle concentrations from diesel vehicles were higher than those from gasoline vehicles. The mass and number concentration of exhaust particles from vehicles of National III Standard increased by a factor of 2~4 when compared with the vehicles of National IV and V Standards. ③ The corresponding suggestions to the influencing factors can to a certain degree mitigate the particle pollution from vehicle exhausts, including constricting the vehicle emission standards, improving fuel quality, reducing the transient changes at high idling mode in the condition of sudden acceleration or starting, and strengthening the regulation of medium and large vehicles, especially the large diesel vehicles.

Keywords: vehicle exhaust; particulate matter; pollution characteristics; influence factors; double idle method

1 引言(Introduction)

我国中东部城市大气颗粒物污染严重,区域性霾污染频发(Yang *et al.*, 2012; Wang *et al.*, 2014). 机动车尾气是我国大气颗粒物尤其是细颗粒物(PM_{2.5})的主要来源之一(孔少飞等, 2013), 机动车尾气不仅排放NO_x、VOCs等气态污染物进而转化成二次颗粒物,而且还直接排放大量的一次颗粒物. 根据济南市大气细颗粒物的正定矩阵因子分析(PMF)源解析结果,当二次生成作为一个单独源时,机动车尾气对PM_{2.5}的直接贡献率达到17.5%(孙友敏等, 2017),而在像北京、天津等大城市的PMF源解析结果中,其直接贡献率超过25%(Gao *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017). 机动车尾气的新鲜烟羽中含有大量亚微米级颗粒物(Uhrner *et al.*, 2011; Wang *et al.*, 2012),对人体健康和大气环境的影响不容忽视. 与粗颗粒物相比,亚微米颗粒物具有更大的比表面积,可吸附更多有毒有害的重金属等物质,被吸入人体后会引起免疫反应和心肺系统疾病(Pope, 2003; Guo *et al.*, 2017),还可能诱发细胞癌变. 此外,机动车尾气中的细颗粒物可通过光散射作用降低大气能见度(Watson *et al.*, 2002),其中的黑炭成分会强烈吸收太阳辐射、影响区域气候(陈莉荣等, 2018).

机动车尾气排放的颗粒物的污染特征非常复杂,不同车辆、不同行驶条件之间差异显著. 前人利用台架和底盘测功机等对发动机或机动车排放的颗粒物进行研究,发现尾气中颗粒物的浓度受发动机类型、运行工况、行驶速度、燃油、车龄、环境温度等诸多因素的影响. 屠晓栋等(2007)利用台架实验对比了多种类型发动机不同负荷条件下超细颗粒物的排放特性,发现发动机负荷越大,尾气中颗粒物的数浓度和质量浓度越大. 刘双喜等(2009a)通过底盘测功机研究了一辆欧II标准轻型汽油车的颗粒物排放特性,发现汽油车颗粒物的排放主要发生在加速过程和冷启动过程,特别是在突然加速过程中易出现浓度峰值,数浓度高达 $1 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$;而在稳定工况下,颗粒物数浓度显著降低,数量级

保持在 10^5 cm^{-3} . 高俊华等(2010)借助底盘测功机对4辆新生产的汽车进行NEDC循环测试,发现汽油车排放的颗粒物数浓度在 10^6 cm^{-3} 数量级,热启动条件下排放的颗粒物浓度比冷启动低40%. 樊筱筱等(2016)在底盘测功机上对4辆汽油车进行整车转鼓试验,发现缸内直喷汽车排放的颗粒物数浓度比进气道喷射汽车高一个数量级. 然而,现有的研究多针对新车进行测试,难以反映城市道路实际行驶车辆的颗粒物排放特征,而且所测试的机动车数量较少,缺乏不同类型机动车排放特征之间的对比. 因此,很有必要选择道路上行驶的各类机动车,利用相对一致的测试方法,分析不同类型机动车的颗粒物排放特征,比较它们之间的差异和主要影响因素.

双怠速法是我国机动车尾气污染物检测的主要方法之一,其怠速和高怠速工况可近似模拟机动车在实际道路行驶中所出现的两种基本运行工况,被广泛应用于机动车年检时尾气中气态污染物(如CO、HC、CO₂、O₂、NO_x)的检测,也被应用于机动车尾气气态污染物排放特征的研究. 例如,江宇红等(2003)采用双怠速法测定了液化气和汽油双燃料汽车尾气的污染特征,发现与燃烧汽油相比,怠速工况下出租车燃烧液化气排放的CO和HC浓度均有升高,而高怠速工况下排放的CO浓度则有所降低. 万霞等(2015)通过双怠速法测试了两款试验车尾气中CO、HC和NO_x的浓度,发现单缸不点火故障时3种气态污染物的浓度均高于正常情况. 采用双怠速法检测时,发动机无负荷、与机动车实际道路行驶的运行工况有一定差异;但由于其操作条件和运行工况比较固定,因此,适合用于分析两种基本工况下所排放的颗粒物浓度的变化,对比不同类型机动车尾气颗粒物污染特征.

近年来,济南市机动车保有量呈现高速增长态势(朱振明等, 2008),2008—2017年济南市机动车保有量从100万辆增长到200万辆(山东统计年鉴, 2017). 机动车尾气颗粒物的大量排放(宋少洁等, 2012; 李佳琦, 2014; 何立强等, 2015),对城市大气污染特别是对细颗粒物的贡献明显增大(Song

et al., 2007; 中华人民共和国环境保护部, 2014)。为比较不同类型机动车的尾气颗粒物排放特征, 本研究选择济南市区道路上行驶的常见机动车, 采用操作条件和运行工况固定的双怠速尾气检测法, 利用自行设计的尾气采样装置, 使用便携式仪器对机动车不同运行工况下尾气烟羽颗粒物的质量浓度和数浓度进行现场直接测量, 分析了机动车尾气烟羽颗粒物污染特征, 探索了机动车尾气颗粒物排放的主要影响因素。

2 实验方法(Experimental methods)

2.1 实验车辆

实验测试的车辆选取济南市区道路上常见的燃烧汽油、柴油的流动车辆, 包括各种型号的私家车(轿车、SUV、面包车)和大型柴油车(箱式货车和载客大巴)。车型是车辆固有属性, 主要取决于车长, 本研究的车型分类中, 将紧凑型归类为小型车, 车长为 4.0~4.5 m, 将 SUV 型和面包车归类为中型车, 车长为 4.6~4.9 m, 大型车整备质量超过 3500 kg。测试车辆相关参数详见表 1。

表 1 测试车辆关键参数

Table 1 Key parameters of tested vehicles

序号	测试车辆	燃料种类	车型	整备质量/ kg	油耗/ (L·100 km ⁻¹)	排量/ L	车长/ m	车龄/ 年	排放标准	发动机类型
1	大众凌渡	95#汽油	小型车	1300	5.4~6.7	1.4	4.5	2	国 V	L 型 4 缸涡轮增压
2	福特福克斯	95#汽油	小型车	1306	5.0~6.7	1.5	4.4	3	国 IV	L 型 4 缸自然吸气
3	尼桑 Sunny	92#汽油	小型车	1055	5.8~6.2	1.5	4.4	4	国 IV	L 型 4 缸自然吸气
4	福特嘉年华	92#汽油	小型车	1150	6.2~6.9	1.5	4.3	2	国 IV	L 型 4 缸自然吸气
5	五菱面包车	92#汽油	小型车	1000	5.8~6.4	1.2	4.2	5	国 III	L 型 4 缸自然吸气
6	凯迪拉克 SRX	95#汽油	中型车	1999	10.9~12.1	2.8	4.8	3	国 V	V 型 6 缸自然吸气
7	奔驰 C200	95#汽油	中型车	1600	6.0~7.3	2.0	4.7	1	国 IV	直列 4 缸涡轮增压
8	帕萨特 B5	92#汽油	中型车	1580	5.8~7.0	2.0	4.8	6	国 III	L 型 4 缸涡轮增压
9	福田箱货	柴油	大型柴油车	4440	12~17	4.7	5.7	3	国 III	L 型 4 缸涡轮增压
10	宇通大巴	柴油	大型柴油车	11380	20~25	7.1	10.5	3	国 III	直列 6 缸中冷增压

2.2 实验仪器与装置

机动车尾气中的颗粒物浓度使用便携式仪器设备进行测量, 利用自行设计的机动车尾气采样装置将测量仪器连接到机动车排气管上, 实验装置如图 1 所示。



图 1 机动车尾气颗粒物测量实验装置

Fig.1 Experimental devices for measurements of particles from vehicle exhausts

测量颗粒物浓度所采用的便携式仪器设备: 美国 TSI 公司的 SIDEPAK AM510 防爆型数字粉尘仪和 3007 凝聚核颗粒物计数器, 分别用来实时测量并保存 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 质量浓度、PM_{0.01-1} 数浓度。AM510 防爆智能数字粉尘仪基于颗粒群光散射原

理测量粉尘质量浓度, 粒径范围是 0.1~10 μm, 浓度范围为 0.001~20 mg·m⁻³, 内置可拆卸式切割头, 可根据需要选用 PM_{1.0}、PM_{2.5} 或 PM₁₀ 切割头。3007 凝聚核颗粒物计数器通过颗粒吸附异丙醇蒸汽增大体积利用激光测量亚微米颗粒物的数浓度, 粒径范围是 0.01~1.0 μm, 浓度范围为 0~1.0×10⁶ cm⁻³。便携式仪器使用之前进行调零校准, 测量结束后及时下载数据。测量仪器的时间分辨率为 1 s (即每秒钟获取 1 个数据)。仪器设备内部安装有抽气泵, 机动车尾气通过自行设计的尾气采样装置进入仪器腔室进行实时测量。

机动车尾气采样装置由采样管、采样管固定装置和排气管固定装置 3 个部分组成。前端采样管为硬质铜管, 内径约 6 mm, 长度为 600 mm, 可耐受高温, 并对机动车尾气进行冷却。当机动车尾气湿度较高时, 铜质采样管与测量仪器之间连接一个中空的变化色硅胶干燥管, 尾气干燥之后经过导电硅胶

软管进入仪器设备进行测量. 采样管固定装置包括前后两处固定点, 后端安装一个可旋紧的固定扣, 通过旋拧来夹紧铜质采样管; 前端是一个环形金属片, 其孔径略大于铜管的外径, 铜质采样管从中间穿过, 伸入排气管约 50 mm 处. 排气管固定装置由 3 条片状金属腿、橡胶皮套、可变径喉箍组成. 3 条金属腿中间适度弯曲, 以确保与排气管外壁平整贴合; 为防止金属腿的边棱划伤排气管且防滑, 金属腿前端加有 3 段可更换的橡胶皮套; 金属腿末端套有一个可变径喉箍, 以满足不同直径排气管的安装需求. 采样装置安装到排气管之后, 可变径喉箍用螺丝刀旋紧, 金属腿与排气管紧密贴合并固定.

2.3 测量方法

本研究借鉴双怠速法, 对机动车尾气中的颗粒物质量浓度和数浓度进行现场测量. 双怠速法是当前机动车尾气检测的常用方法, 指当机动车处于空挡时通过踩油门踏板使发动机转速达到低速或者高速状态时对排放的污染物浓度进行检测的方法. 怠速工况指离合器处于接合位置、变速器处于空挡位置、油门踏板处于完全松开条件下发动机无负载时空转的运转状态, 机动车在发动机启动后的稳定、暖机时以及在十字路口车辆遇红灯和交通堵塞时等待的工况均为怠速工况. 高怠速工况指离合器处于接合位置、变速器处于空挡位置, 用油门踏板将发动机转速稳定在 50% 的额定转速或生产商技术文件中规定的高怠速转速下的状态, 机动车在实际道路上加速和高速行驶时转速达到 50% 额定转速的工况均为高怠速工况. 不同车型的怠速和高怠速下的发动机转速不同, 根据 GB18285-2005 的规定, 轻型汽车的高怠速转速为 $(2500 \pm 100) \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 重型车的高怠速转速为 $(1800 \pm 100) \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 本研究将小型车和中型车归为轻型车 (最大总质量小于 3500 kg), 将大型柴油车归为重型车 (最大总质量大于 3500 kg). 双怠速法操作简单, 检测快速、准确 (樊瑞军和任春玲, 2009; 刘杰, 2013). 与台架测试法相比, 双怠速法的测试对象为机动车整车而非发动机, 能更好地代表城市道路上行驶的机动车尾气颗粒物排放情况. 另外, 双怠速法的操作条件和运行工况较为固定, 适合不同类型机动车颗粒物排放特征的比较. 然而, 与底盘测功机测试法和实际道路行驶测试法相比, 双怠速法仅能测试发动机无负荷时两种基本工况下机动车尾气的颗粒物排放特征, 无法模拟、测试其他复杂运行工况下机动

车排放颗粒物的情况.

当便携式仪器设备通过尾气采样装置连接到机动车排气管之后, 启动机动车的发动机并热车, 然后分别在怠速和高怠速条件下测量尾气中颗粒物的质量浓度与数浓度, 测试程序如图 2 所示. 小型车和中型车: 机动车启动, 热车 (额定转速的 70%, $3500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 60 s, 高怠速工况 (额定转速的 50%, $2500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 持续 45 s, 怠速工况 (空档、油门完全松开), 持续 45 s; 重型车: 机动车启动, 热车 (额定转速的 70%, $2500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 60 s, 高怠速工况 (额定转速的 50%, $1800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 持续 45 s, 怠速工况 (空档、油门完全松开), 持续 45 s.

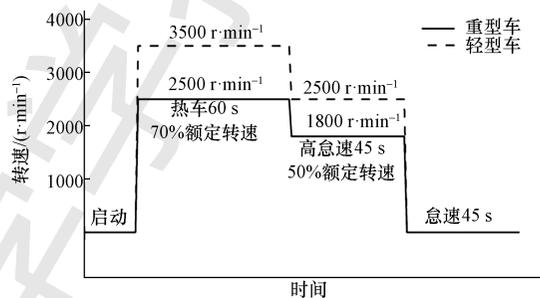


图 2 机动车尾气的测试程序

Fig.2 Testing procedure for vehicle exhaust

3 结果与分析 (Results and analyses)

3.1 济南市典型机动车尾气颗粒物污染特征

通过测试 10 辆不同机动车在怠速工况和高怠速工况下的尾气颗粒物浓度, 发现机动车尾气排放的细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 和可吸入颗粒物 (PM_{10}) 质量浓度、亚微米颗粒物 ($\text{PM}_{0.01-1}$) 数浓度随时间的变化趋势基本一致. 表 2 和表 3 分别列出了各个车辆在怠速和高怠速工况下尾气颗粒物浓度的统计结果, 其中高怠速工况下缺少奔驰 C200 的测量数据, PM_{10} 质量浓度因仪器故障部分数据缺失.

总体上, 怠速工况下机动车尾气颗粒物质量浓度和数浓度较低. 平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度的范围为 $0.035 (\pm 0.006) \sim 1.434 (\pm 0.916) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大值来自大型柴油货车福田箱货, 为 $3.380 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 平均 PM_{10} 质量浓度的范围为 $0.049 (\pm 0.007) \sim 3.669 (\pm 0.452) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 最大值来自车龄较高 (5 年)、排放标准较低 (国 III) 的汽油车五菱面包, 为 $4.908 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 平均 $\text{PM}_{0.01-1}$ 数浓度介于 $0.95 (\pm 0.17) \times 10^4 \sim 21.69 (\pm 6.28) \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 之间, 最大值来自大型柴

油客车宇通大巴,为 $2.6 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$.高怠速工况下机动车尾气颗粒物浓度很高,平均 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度达到 $0.350 (\pm 0.271) \sim 5.132 (\pm 2.378) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$,最大值来自大型柴油货车福田箱货,为 $8.394 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; PM_{10} 质量浓度高达 $1.708 (\pm 1.842) \sim 7.862 (\pm 0.323)$

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$,最大值来自大型柴油客车宇通大巴,为 $8.672 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\text{PM}_{0.01-1}$ 数浓度范围为 $6.78 (\pm 5.99) \times 10^4 \sim 40.68 (\pm 4.96) \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$,最大值来自车龄较高、排放标准较低的汽油车五菱面包,为 $5.2 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$.

表2 测试车辆怠速工况下 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度、 $\text{PM}_{0.01-1}$ 数浓度

Table 2 $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} mass concentrations and $\text{PM}_{0.01-1}$ number concentration of tested vehicles under idling mode

测试车辆	$\text{PM}_{2.5}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			$\text{PM}_{10}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			$\text{PM}_{0.01-1}$ 数浓度/ 10^4 cm^{-3}		
	均值(标准差)	最大值	最小值	均值(标准差)	最大值	最小值	均值(标准差)	最大值	最小值
大众凌渡	0.048 (0.028)	0.098	0.021	—	—	—	1.11 (0.49)	2.68	0.32
福特福克斯	0.281 (0.214)	0.559	0.020	1.256 (0.098)	1.885	1.089	1.06 (0.49)	2.19	0.30
尼桑 Sunny	0.189 (0.173)	0.818	0.020	3.291 (0.036)	3.506	3.235	2.91 (1.51)	7.67	0.56
福特嘉年华	0.078 (0.050)	0.261	0.021	—	—	—	1.00 (0.72)	3.70	0.31
五菱面包	0.033 (0.022)	0.222	0.020	0.080 (0.305)	4.908	0.020	1.69 (0.81)	6.68	0.30
凯迪拉克 SRX	0.075 (0.090)	0.676	0.020	2.449 (0.164)	2.994	2.133	1.56 (1.14)	8.00	0.76
奔驰 C200	0.035 (0.006)	0.058	0.014	0.049 (0.007)	0.075	0.028	0.96 (1.09)	9.23	0.34
帕萨特 B5	0.168 (0.169)	1.174	0.035	—	—	—	0.95 (0.17)	1.55	0.62
福田箱货	1.434 (0.916)	3.380	0.448	3.669 (0.452)	4.276	2.668	2.01 (1.11)	8.33	1.17
宇通大巴	0.445 (0.271)	1.064	0.030	—	—	—	21.69 (6.28)	25.92	14.47

表3 测试车辆高怠速工况下 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度、 $\text{PM}_{0.01-1}$ 数浓度

Table 3 $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} mass concentrations and $\text{PM}_{0.01-1}$ number concentration of tested vehicles under high idling mode

测试车辆	$\text{PM}_{2.5}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			$\text{PM}_{10}/(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$			$\text{PM}_{0.01-1}$ 数浓度/ 10^4 cm^{-3}		
	均值(标准差)	最大值	最小值	均值(标准差)	最大值	最小值	均值(标准差)	最大值	最小值
大众凌渡	0.350 (0.271)	1.483	0.218	—	—	—	7.22 (6.26)	18.45	1.81
福特福克斯	—	—	—	3.405 (1.991)	8.302	1.237	6.78 (5.99)	23.30	1.06
尼桑 Sunny	1.227 (1.163)	3.685	0.316	6.758 (1.628)	7.909	5.606	13.18 (5.36)	22.06	4.43
福特嘉年华	1.792 (1.658)	4.118	0.402	—	—	—	12.87 (5.66)	31.47	3.82
五菱面包	1.454 (1.523)	5.289	0.096	1.708 (1.842)	7.250	0.157	26.18 (14.99)	52.22	3.41
凯迪拉克 SRX	2.267 (1.978)	7.552	0.477	4.573 (1.845)	8.456	2.856	18.99 (8.69)	39.34	9.25
帕萨特 B5	5.132 (2.378)	7.621	0.676	6.701 (0.925)	7.847	5.313	31.78 (13.30)	43.19	2.09
福田箱货	4.347 (3.011)	8.394	0.161	5.146 (1.115)	8.502	4.281	27.76 (6.40)	44.99	12.77
宇通大巴	2.192 (2.125)	6.667	1.030	7.862 (0.323)	8.672	4.632	40.68 (4.96)	46.01	36.20

图3对比了怠速工况与高怠速工况下 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 质量浓度和 $\text{PM}_{0.01-1}$ 数浓度分布频率.可以看出,在怠速工况下, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度主要分布在 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 附近, PM_{10} 质量浓度多分布在 0.3 和 $3.3 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 附近两个区域, $\text{PM}_{0.01-1}$ 数浓度多分布于 $2.0 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 附近.在高怠速工况下, $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度集中分布在 0.3 和 $7.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 附近, PM_{10} 质量浓度集中于 4.5 和 $7.8 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 附近, $\text{PM}_{0.01-1}$ 数浓度则有多个峰值且最高的峰值出现在 $2.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ 附近.

综上,高怠速工况下机动车尾气直接排放的颗

颗粒物质量浓度和数浓度很高,颗粒物质量浓度呈双峰或多峰分布,表明实际道路上行驶的机动车尾气颗粒物排放特征非常复杂,受多种因素影响.怠速工况下汽车档位为空挡且发动机处于空转状态,而高怠速工况是在踩油门踏板将发动机转速稳定在50%额定转速的情况下,更接近于实际道路中机动车的行驶状况.因此,本文基于高怠速工况下尾气细颗粒物质量浓度与数浓度的测量结果,从运行工况、车型、燃油、排放标准4个方面深入分析这些因素对机动车尾气颗粒物浓度的影响.

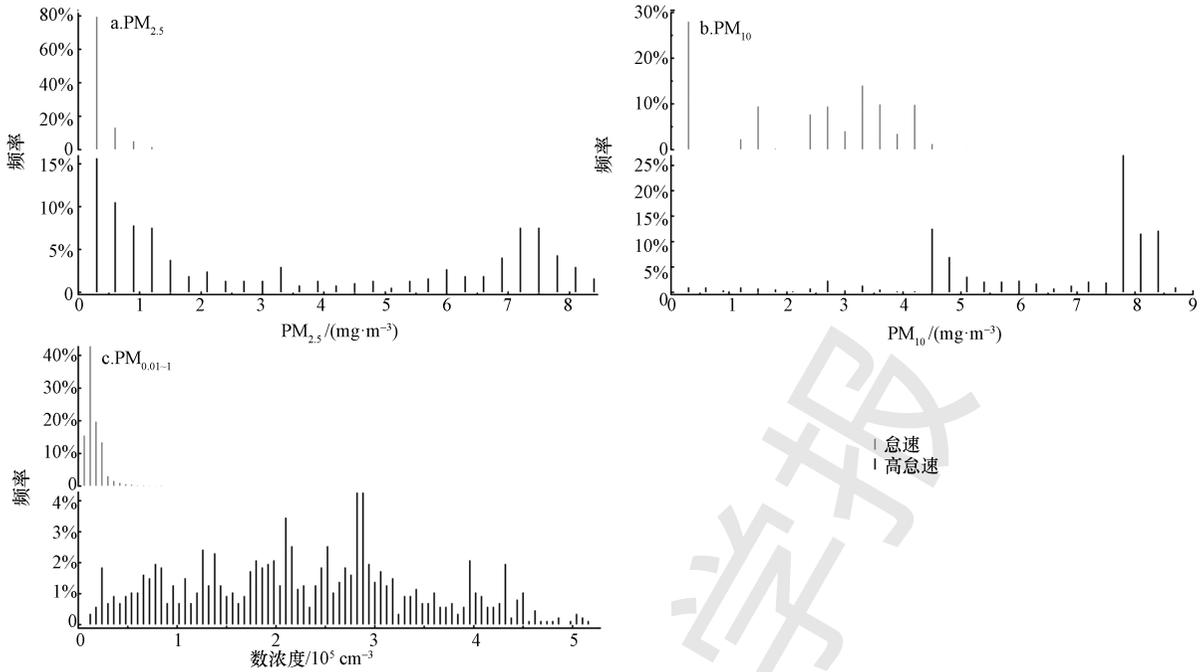


图3 机动车尾气 PM_{2.5}和 PM₁₀质量浓度、PM_{0.01-1}数浓度的分布频率

Fig.3 Distribution frequency of PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentrations and PM_{0.01-1} number concentrations of vehicle exhausts

3.2 运行工况对机动车尾气颗粒物排放的影响

图4对比了怠速与高怠速工况下不同机动车尾气中 PM_{2.5}质量浓度和 PM_{0.01-1}数浓度,发现高怠速工况下机动车尾气细颗粒物浓度显著高于怠速工况下的浓度,升高倍数随车型的不同而呈明显差异.如图4所示,高怠速条件下的机动车尾气 PM_{2.5}质量浓度约为怠速工况的3~44倍,其中汽油车高怠速工况下 PM_{2.5}质量浓度急剧上升(升高的倍数约为6~44),且中型汽油车升高的倍数最大(高达30~44),而大型柴油车 PM_{2.5}质量浓度上升的幅度相对较小(仅为3~5倍). PM_{0.01-1}数浓度的变化情况与 PM_{2.5}质量浓度类似,高怠速工况为怠速工况的2~33倍,同样是汽油车升高的倍数很大(其中

中型汽油车升高的倍数最大),而大型柴油车升高的幅度相对较小.

上述结果表明当机动车发动机的转速升高到高怠速工况时,尾气中的颗粒物质量浓度和数浓度大幅升高,这是因为机动车瞬态排放的尾气颗粒物主要产生于冷启动和加速过程中.在冷启动过程中,发动机温度较低,不利于燃油蒸发,导致燃气混合不均匀且浓度过高,部分燃气不完全氧化产生大量颗粒物.而在加速时,发动机高速运转,负荷和喷油量增加,混合气不均匀的程度进一步加大,不完全燃烧造成大量颗粒物排放(Zielinska *et al.*, 2004).陈长虹等(2005)和高继东等(2007)的研究也发现汽车启动和频繁加速是机动车尾气颗粒

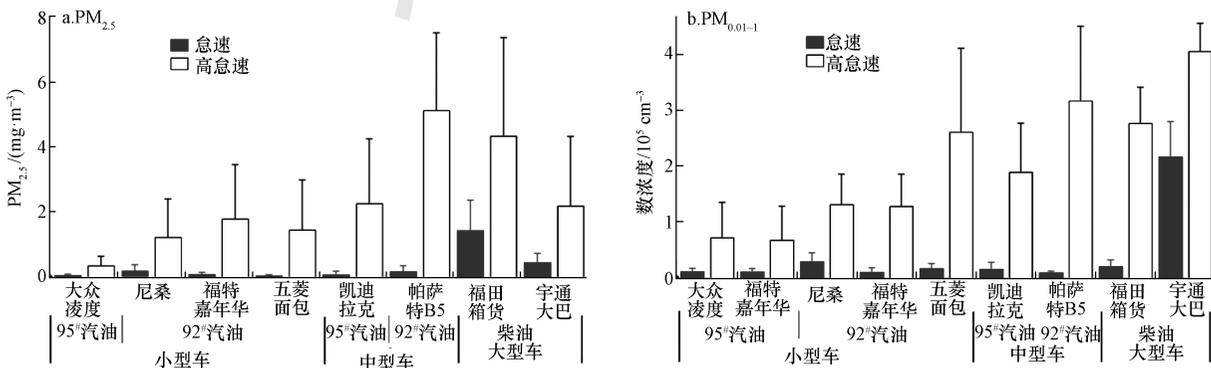


图4 不同工况下不同机动车尾气中的 PM_{2.5}质量浓度与 PM_{0.01-1}数浓度

Fig.4 PM_{2.5} mass concentrations and PM_{0.01-1} number concentrations of vehicle exhausts under different working conditions

物污染的重要原因,这与本研究中高怠速工况下颗粒物质量浓度和数浓度高的结果一致。

结合机动车道路行驶的实际情况,由于路况因素机动车车速发生瞬时变化,突然加速或突然启动等过程造成机动车尾气颗粒物排放浓度与排放量大幅增加,影响道路附近和城市环境空气质量。因此,需要采取有效措施降低机动车在高怠速工况下的颗粒物排放,例如实行动态交通规则等,减少机动车在实际道路行驶中突然加速或突然启动等工况的瞬态变化。

3.3 车型对机动车尾气颗粒物排放的影响

图5对比了3种车型(小型车、中型车、大型车)的机动车高怠速工况下尾气中颗粒物的平均浓度,图中柱子上方的数字代表测试的机动车数量,每辆机动车高怠速工况下的有效数据为45个数左右。其中,小型车中福特福克斯 $PM_{2.5}$ 质量浓度数据缺失。由图可知,不同车型的尾气颗粒物质量和数浓度有显著差异,车型越大的车所排放的颗粒物浓度越高。高怠速条件下,小型车尾气中颗粒物质量浓度和数浓度相对较低,平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $0.9\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,平均 $PM_{0.01-1}$ 数浓度为 $1.5\times 10^5\text{ cm}^{-3}$ 。中型车尾气中的颗粒物质量浓度和数浓度明显高于小型车,平均 $PM_{2.5}$ 质量浓度为 $4.2\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$,约为小型车的5倍,平均 $PM_{0.01-1}$ 数浓度为 $2.7\times 10^5\text{ cm}^{-3}$,约为小型车的2倍。大型车尾气中的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与 $PM_{0.01-1}$ 数浓度与中型车基本相当。

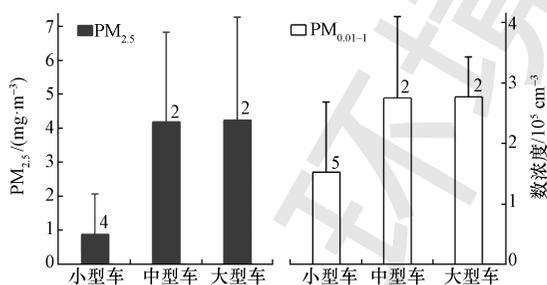


图5 不同车型的机动车高怠速工况下尾气中的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与 $PM_{0.01-1}$ 数浓度(柱子上方的数字代表机动车数量)

Fig.5 $PM_{2.5}$ mass concentrations and $PM_{0.01-1}$ number concentrations of exhausts for different size of vehicles under high idling mode (The number above the column represents the number of vehicles)

不同车型的尾气所排放的颗粒物浓度的高低与机动车发动机的类型及气缸容积等因素有关。小型车和中型车多用点燃式汽油发动机,其中中型汽油车的发动机气缸容积更大,汽油与空气混合程度

较差。大型车大多用压燃式柴油发动机,其特殊的边喷边燃烧的扩散燃烧特性决定了柴油与空气混合不完全,而且柴油发动机的燃烧室内始终存在富余空气,使得柴油车尾气排放的颗粒物较多(徐伟嘉等,2014)。因此,在满足客运和货运的基本前提下,可采取措施鼓励人们使用小型车、低能耗汽车,减少中、大型机动车的道路行驶数量,有利于减轻交通源颗粒物污染。

3.4 燃油类型对机动车尾气颗粒物排放的影响

图6对比了使用3种不同燃油(95#汽油、92#汽油、柴油)的机动车在高怠速工况下尾气中颗粒物的平均浓度,其中95#汽油小型车福特福克斯的 $PM_{2.5}$ 质量浓度数据缺失。可以看出,机动车尾气中的颗粒物浓度随燃油类型和品质不同而呈现显著差异,柴油车的颗粒物浓度高于汽油车,使用92#汽油的机动车的颗粒物浓度明显高于使用95#汽油的机动车。高怠速工况下,95#汽油车的 $PM_{2.5}$ 质量浓度和 $PM_{0.01-1}$ 数浓度平均值分别约为 $0.9\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.2\times 10^5\text{ cm}^{-3}$,92#汽油车分别为 $3.1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.1\times 10^5\text{ cm}^{-3}$,而柴油车分别为 $4.3\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.8\times 10^5\text{ cm}^{-3}$ 。某些中型汽油车直接排放的颗粒物浓度堪比大型柴油车,如国III标准的汽油车帕萨特B5,主要原因可能是本研究选用的帕萨特B5的车龄很大(6年),其尾气中高浓度的颗粒物与发动机性能下降、尾气净化装置老化有关。

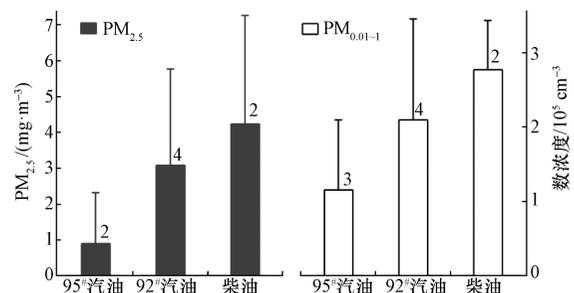


图6 不同燃油种类的机动车高怠速工况下尾气中的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与 $PM_{0.01-1}$ 数浓度

Fig.6 $PM_{2.5}$ mass concentrations and $PM_{0.01-1}$ number concentrations of vehicle exhausts with different fuel types under high idling mode

柴油车尾气颗粒物的单车排放因子很高(Zielinska *et al.*, 2004; 贺泓等, 2007; 吴银山等, 2008; 刘明月等, 2017),而柴油中硫含量的增加会导致柴油车颗粒物排放量的增加(申现宝, 2015)。对于汽油发动机,当汽油品质由95#降低到92#时,

发动机油耗增加 2%~8%不等 (孙国兵等, 2017), 导致尾气颗粒物排放量增加; 在本研究中, 92# 汽油车的尾气颗粒物浓度约为 95# 汽油车 2 倍或以上。因此, 逐步提高车用柴油和汽油的品质, 有利于减少机动车尾气颗粒物的排放。

3.5 不同排放标准的机动车尾气中颗粒物浓度的差异

机动车的排放标准可以一定程度上反映整车的(即经过尾气净化装置处理后的)尾气污染物的排放情况。图 7 对比了不同排放标准(国 III、国 IV、国 V)的汽油机动车在高怠速工况下尾气中颗粒物的平均浓度, 其中国 IV 小型车福特福克斯的 $PM_{2.5}$ 质量浓度数据缺失。由图可知, 整体上机动车尾气中的 $PM_{2.5}$ 质量浓度和 $PM_{0.01-1}$ 数浓度随机动车排放标准的提高而降低。国 III 标准的汽油车尾气中 $PM_{2.5}$ 质量浓度和 $PM_{0.01-1}$ 数浓度平均值分别为 $3.5 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $2.9\times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 国 IV 标准的汽油车分别为 $1.4 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.2\times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 而国 V 标准的汽油车分别为 $0.9 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $1.7\times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, 国 III 标准汽油车的颗粒物质量浓度与数浓度约是国 IV 和国 V 标准汽油车的 2~4 倍。需要说明, 国 V 标准汽油车的颗粒物数平均浓度略高于国 IV 标准汽油车, 可能是由于国 V 标准的机动车中凯迪拉克 SRX 整备质量大、排量大、油耗大, 因此排放的颗粒物浓度较高。

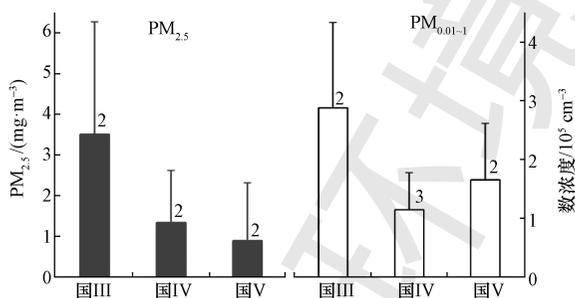


图 7 不同排放标准的机动车高怠速工况下尾气中的 $PM_{2.5}$ 质量浓度与 $PM_{0.01-1}$ 数浓度

Fig.7 $PM_{2.5}$ mass concentrations and $PM_{0.01-1}$ number concentrations of vehicle exhausts with different emission standards under high idling mode

4 结论 (Conclusions)

1) 怠速工况下, 济南市区常见机动车尾气中的颗粒物质量浓度和数浓度较低, 不同车辆的平均 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度、 $PM_{0.01-1}$ 数浓度的范围分别

为 $0.035 \sim 1.434$ 和 $0.049 \sim 3.669 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $0.95 \sim 21.69\times 10^4 \text{ cm}^{-3}$; 高怠速工况下颗粒物质量浓度和数浓度较高, 平均 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 质量浓度、 $PM_{0.01-1}$ 数浓度分别为 $0.350 \sim 5.132$ 和 $1.708 \sim 7.862 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $6.78 \sim 40.68\times 10^4 \text{ cm}^{-3}$, 最大值均来自于大型柴油车。

2) 随着发动机转速提高、车型变大、排放标准降低, 机动车尾气中的颗粒物质量浓度和数浓度明显升高。与怠速工况相比, 高怠速工况下的 $PM_{2.5}$ 质量浓度升高 3~44 倍, $PM_{0.01-1}$ 数浓度升高 2~33 倍。与小型车相比, 中、大型车的 $PM_{2.5}$ 质量浓度升高约 5 倍, $PM_{0.01-1}$ 数浓度升高约 2 倍。使用 92# 汽油的颗粒物质量浓度与数浓度约为 95# 汽油车的 2 倍, 而柴油车排放的颗粒物浓度高于汽油车。国 III 标准的汽油车尾气颗粒物的质量浓度与数浓度约是国 IV 和国 V 标准汽油车的 2~4 倍。

3) 结果表明, 提高机动车排放标准, 提高燃油品质, 减少机动车在实际道路行驶中突然加速或启动等高怠速工况的瞬态变化, 加强对中、大型车尤其是大型柴油车的监管, 鼓励使用低耗能小型汽车等, 能够一定程度上减轻机动车尾气带来的颗粒物污染。

责任作者简介:王新锋 (1985—), 男, 副教授 (博士生导师), 主要研究方向为大气颗粒物与含氮化合物的化学组成、污染特征、来源、排放、传输、转化、环境影响等, 在国内外核心期刊上发表论文 70 余篇, 其中 SCI 收录 60 余篇, E-mail: xinfengwang@sdu.edu.cn.

参考文献 (References):

- 陈莉荣, 郑辉辉, 师华定, 等. 2018. 未来黑碳气溶胶排放对区域气候变化的影响模拟[J]. 环境工程技术学报, 8(1): 1-11
- 陈长虹, 景启国, 王海鲲, 等. 2005. 重型机动车实际排放特性与影响因素的实测研究[J]. 环境科学学报, 25(7): 870-878
- 樊瑞军, 任春玲. 2009. 双怠速法在用车尾气排放检测台架系统的研究[J]. 中国新技术新产品, (11): 132
- 樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 等. 2016. 轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征[J]. 环境科学, 37(10): 3743-3749
- 国家统计局山东调查总队. 2017. 山东统计年鉴 2017 [J]. 北京: 中国统计出版社
- 高继东, 宋崇林, 张铁臣, 等. 2007. 汽油车排气中颗粒物粒径的分布特性[J]. 燃烧科学与技术, 13(3): 248-252
- 高俊华, 李洧, 高继东, 等. 2010. 汽油车颗粒物排放特性[J]. 吉林大学学报 (工学版), 40(4): 947-952
- Gao J, Peng X, Chen G, et al. 2016. Insights into the chemical characterization and sources of $PM_{2.5}$ in Beijing at a 1-h time resolution [J]. Science of the Total Environment, 542: 162-171

- Guo H, Cheng T, Gu X, *et al.* 2017. Assessment of PM_{2.5} concentrations and exposure throughout China using ground observations [J]. *Science of the Total Environment*, 601-602: 1024-1030
- 何立强, 胡京南, 祖雷, 等. 2015. 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*, 35 (3): 656-662
- 贺泓, 翁端, 资新运. 2007. 柴油车尾气排放污染控制技术综述[J]. *环境科学*, 28(6): 1169-1177
- 江宇红, 陈桂珠. 2003. 双怠速法测定 LPG 汽车尾气中污染物的排放水平[J]. *环境监测管理与技术*, 15(4): 17-18
- 孔少飞, 白志鹏. 2013. 大气颗粒物来源解析中机动车尾气成分谱研究进展[J]. *环境科学与技术*, 36(10): 26-33
- Liu B, Yang J, Yuan J, *et al.* 2017. Source apportionment of atmospheric pollutants based on the online data by using PMF and ME2 models at a megacity, China [J]. *Atmospheric Research*, 185: 22-31
- 李佳琦. 2014. 典型交通环境细颗粒物和亚微米颗粒物化学特征研究[D]. 北京:清华大学. 76
- 刘杰. 2013. 机动车尾气检测方法的优劣比较分析[J]. *科技与企业*, (11): 309
- 刘明月, 吴琳, 张静, 等. 2017. 天津市机动车尾气排放因子研究[J]. *环境科学学报*, 38(4): 1377-1383
- 刘双喜, 高俊华, 张雅洁, 等. 2009a. 轻型汽油车排气颗粒粒子排放特性试验研究[J]. *小型内燃机与摩托车*, 38(6): 22-25
- Pope C A. 2003. Cardiovascular mortality and long-term exposure to particulate air pollution; Epidemiological evidence of general pathophysiological pathways of disease [J]. *Circulation*, 109 (1): 71-77
- 申现宝. 2015. 柴油车排放烟羽中细颗粒物变化特征研究[D]. 北京:清华大学. 132
- Song Y, Shao M, Liu Y, *et al.* 2007. Source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 41 (12): 4348-4353
- 宋少洁, 吴焯, 蒋靖坤, 等. 2012. 北京市典型道路交通环境细颗粒物元素组成及分布特征[J]. *环境科学学报*, 32(1): 66-73
- 孙国兵, 李平伟, 潘宝财, 等. 2017. 95 号汽油切换到 92 号汽油对发动机性能影响的差异[J]. *科学理论探索*, 5(11): 62-91
- 孙友敏, 李少洛, 陈春竹, 等. 2017. 济南市机动车排气污染特征及对市区 PM_{2.5} 的影响研究[J]. *环境科学学报*, 38(4): 1384-1391
- 屠晓栋, 王嘉松, 张华, 等. 2007. 直喷式二冲程柴油机超细颗粒物排放特性的试验研究[J]. *内燃机工程*, 28(5): 75-78
- Uhrner U, Zallinger M, von Löwis S, *et al.* 2011. Volatile nanoparticle formation and growth within a diluting diesel car exhaust [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61 (4): 399-408
- Wang X, Chen J, Sun J, *et al.* 2014. Severe haze episodes and seriously polluted fog water in Jinan, China [J]. *Science of the Total Environment*, 493(493): 133-137
- Wang Y J, Zhang K M. 2012. Coupled turbulence and aerosol dynamics modeling of vehicle exhaust plumes using the CTAG model [J]. *Atmospheric Environment*, 59(9): 284-293
- Watson J G, Zhu T, Chow J C, *et al.* 2002. Receptor modeling application framework for particle source apportionment [J]. *Chemosphere*, 49 (9): 1093-1136
- 万霞. 2015. 工况法下单缸不点火故障对汽车尾气排放影响的对比分析[J]. *深圳职业技术学院学报*, 14(3): 25-28
- 吴银山, 林寅, 林枫. 2008. 柴油车与汽油车的排气污染和其它性能比较[J]. *环境*, (S1): 42-44
- 徐伟嘉, 李红霞, 黄建彰, 等. 2014. 佛山市机动车尾气颗粒物 PM_{2.5} 的排放特征研究[J]. *环境科学与技术*, 37 (3): 152-158
- Yang L, Zhou X, Wang Z, *et al.* 2012. Airborne fine particulate pollution in Jinan, China; Concentrations, chemical compositions and influence on visibility impairment [J]. *Atmospheric Environment*, 55(3): 506-514
- Zielinska B, Sagebiel J, Arnott W P, *et al.* 2004. Phase and size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in diesel and gasoline vehicle emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 38 (9): 2557-2567
- 中华人民共和国环境保护部. 2014. 2013 年中国机动车污染防治年报[J]. 北京:中华人民共和国环境保护部
- 朱振明, 杨晓, 杨春卿. 2008. 济南市机动车保有现状及其污染排放控制措施[J]. *中国环境管理干部学院学报*, 18(4): 7-9