

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.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响 汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)

华北地区大气细颗粒物(PM_{2.5})年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应 杨伟, 姜晓丽 (2995)

郑州市民运会期间大气PM_{2.5}改善效果评估 王申博, 娄亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)

成都夏冬季PM_{2.5}中水溶性无机离子污染特征 冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)

川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析 雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)

四川省典型行业挥发性有机物源成分谱 徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)

成都市工业挥发性有机物排源成分谱 周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)

郑州市典型工业企业VOCs排放特征及风险评估 齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)

阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响 牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)

典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性 景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)

华北地区典型重工业城市夏季近地面O₃污染特征及敏感性 欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)

稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性 顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运震 (3095)

苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析 卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)

轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征 谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日起, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)

非超低与超低排放煤电机组启动过程NO_x排放特征对比分析 李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)

邢台市道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别 宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)

叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响 魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)

关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源 赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)

岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析 田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)

木沥河流域氮素污染及其污染源解析 齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)

辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析 齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)

鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应 王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾璐杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)

象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析 王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)

乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献 张慧, 王世亮, 余杨 (3204)

连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征 李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)

茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险 吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)

金盆水库沉积物铁锰释放规律 路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)

城市湖泊沉积物微塑料污染特征 王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)

西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析 刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)

海水中的红霉素与营养盐对微藻的复合影响 王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)

梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律 温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)

宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)

分层型水库藻类垂向演替的水质与细菌种群调控 闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾竞宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)

长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响 毕薇薇, 叶胜, 于健全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)

供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型 刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)

碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制 崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)

弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁(GO-nFe⁰/WMF)对水中Cr(VI)的去除特性及机制 计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)

一硫代砷在针铁矿上的吸附及影响因素 廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)

生物滤池快速启动ANAMMOX运行策略及菌群特征 王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)

低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响 张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)

羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响 邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)

低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性 高春娣, 张娜, 韩徽, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)

我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化 董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)

城镇河流CO₂及CH₄排放与市政排水管网污水输入的关联影响 李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)

控释尿素对黄河故道沙性潮土N₂O排放的影响 姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)

我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放 张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)

不同母质发育土壤Cd环境行为对水分管理模式的响应差异 黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)

锰基改性生物炭对弱碱性Cd污染土壤团聚体结构以及Cd含量特征的影响 孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)

钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响 曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)

叶面喷施2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响 杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)

《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)

轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征

谢岩¹, 廖松地¹, 朱曼妮¹, 王怡然¹, 王日超¹, 张立航¹, 余飞², 钟庄敏², 白莉³, 黄江荣³, 刘俊文², 郑君瑜^{1,2*}

(1. 华南理工大学环境与能源学院, 广州 510006; 2. 暨南大学环境与气候研究院, 广州 511443; 3. 广东省环境监测中心, 广州 510308)

摘要: 选取不同排放标准的 127 辆轻型汽油客车和 10 辆轻型汽油货车为研究对象, 利用便携式车载测试系统 (portable emission measurement system, PEMS) 结合台架稳态工况 (acceleration simulation mode, ASM), 探究了不同工况与车辆参数对轻型汽油车气态污染物二氧化碳 (CO₂)、一氧化碳 (CO)、氮氧化物 (NO_x)、碳氢化合物 (HC) 和甲烷 (CH₄) 排放的影响。结果表明, 轻型汽油车气态污染物在怠速工况下的排放率较低, 仅为加速工况和匀速工况的 22.9% 和 25.8%。污染物排放特征与工况密切相关, CO₂ 和 NO_x 在加速工况时的排放率小于匀速工况, 而 CO、HC 和 CH₄ 在加速工况时的排放率却大于匀速工况。在低速稳态下, 轻型汽油客车和轻型汽油货车 CO₂、CO、NO_x、HC 和 CH₄ 的排放因子分别为 383.20、2.98、1.60、0.14 和 0.03 g·km⁻¹ 和 360.66、2.64、1.61、0.005 5 和 0.002 7 g·km⁻¹。排放标准的加严带来了明显减排效果, CO、NO_x、HC 和 CH₄ 的排放因子从国 I ~ 国 V 分别下降了 87.5%、97.3%、97.9% 和 86.4%。车龄、行驶里程和基准质量与车辆污染物的排放存在非线性关系, 发动机排量与机动车的尾气污染物的排放呈正相关。

关键词: 轻型汽油车; 便携式车载测试系统 (PEMS); 稳态工况 (ASM); 气态污染物; 排放因子

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3112-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201912002

Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode

XIE Yan¹, LIAO Song-di¹, ZHU Man-ni¹, WANG Yi-ran¹, WANG Ri-chao¹, ZHANG Li-hang¹, YU Fei², ZHONG Zhuang-min², BAI Li³, HUANG Jiang-rong³, LIU Jun-wen², ZHENG Jun-yu^{1,2*}

(1. College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Institute for Environment and Climate Research, Jinan University, Guangzhou 511443, China; 3. Guangdong Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510308, China)

Abstract: In this study, 127 light-duty gasoline cars and 10 light-duty gasoline trucks with different emission standards were selected to explore the influences of different conditions and vehicle parameters on the emission characteristics of carbon dioxide (CO₂), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x), hydrocarbons (HC), and methane (CH₄) using a portable emission measurement system based on a chassis dynamometer under acceleration simulation mode. The results showed that the gaseous pollutants of light-duty gasoline vehicles displayed a relatively lower emission rate under the idle condition, which accounted for only 22.9% and 25.8% of the emission rate at the accelerated condition and constant speed condition, respectively. The pollutant emission characteristics were closely related to the working conditions. The emission rates of CO₂ and NO_x in the accelerated condition were less than those at the constant speed condition, while the emission rates of CO, HC, and CH₄ in the accelerated condition were higher than those at the constant speed condition. In the constant low-speed condition, the emission factors of CO₂, CO, NO_x, HC, and CH₄ were 383.20, 2.98, 1.60, 0.14, and 0.03 g·km⁻¹ for light-duty gasoline cars, respectively, and 360.66, 2.64, 1.61, 0.005 5, and 0.002 7 g·km⁻¹ for light-duty gasoline trucks, respectively. Tighter emission standards have caused significant reductions in emissions. The emission factors of CO, NO_x, HC, and CH₄ could be decreased by 87.5%, 97.3%, 97.9%, and 86.4%, respectively, from China I to China V. A non-linear relationship was found between the age, odometer, vehicle weight, and vehicular emissions. In addition, the engine displacement was positively correlated with vehicular emissions.

Key words: light-duty gasoline vehicles; portable emission measurement system (PEMS); acceleration simulation mode (ASM); gaseous pollutant; emission factors

机动车尾气是我国大气污染的重要排放源。根据中国移动源环境管理年报统计, 2018 年全国机动车保有量达到 3.27 亿辆, 其中汽车 2.4 亿辆, 占机动车的主导地位, 全国机动车保有量在过去 5 a 的年均增长率为 5.8%^[1]。我国城市人口密度高, 道路较为拥挤, 能源消耗和污染排放高度集中, 以机动车为主的移动源已经成为我国城市区域 PM_{2.5} (北京、

杭州、广州和武汉) 和 NO_x (珠三角地区) 的主要贡献源^[2-5]。此外, 机动车尾气中还富含大量有毒有害

收稿日期: 2019-12-01; 修订日期: 2020-01-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFC0213904); 广东省重点领域研发计划项目 (2019B110206001)

作者简介: 谢岩 (1995 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: 201720142302@mail.scut.edu.cn

* 通信作者, E-mail: zheng.junyu@gmail.com

污染物(如醛酮类化合物和多环芳烃),严重影响居民的身心健康和生活质量^[6]。

机动车尾气排放特征研究是构建机动车排放清单的基础,也是政府管控机动车和制定交通管制政策的科学支撑。目前,机动车尾气排放测试多采用台架^[7]、隧道^[8]和实际道路^[9]的方法,以探究机动车尾气污染物的排放特征与发动机类型、行驶工况、速度、车龄和累积行驶里程等诸多因素的复杂关系。台架测试实验条件易控制、成本低、工况可控^[10],被广泛用于研究不同类型机动车在不同工况下的污染物排放情况^[11~13]。Nakashima 等^[14]使用台架结合非相干宽带腔增强吸收光谱法测定了汽油车亚硝酸(HONO)排放因子,发现催化剂和发动机的改进以及燃油效率的提高均有助于 HONO 排放因子的降低。Fontaras 等^[15]通过台架测试获取了 13 辆欧 V 汽油车与柴油车的常规气态污染物排放因子,发现测得的排放因子与 COPERT 模型的预测较为一致。Huang 等^[16]使用台架测量了 51 辆欧 II ~ 欧 V 轻型汽油车的 CO、HC、NO 和 PM 排放因子,并通过以对汽油车为主的隧道进行连续监测评估车辆排放因子,发现高车龄车辆的高排放导致轻型汽油车的排放因子被大大低估。

稳态工况 (acceleration simulation mode, ASM) 是我国轻型汽油车尾气污染物检测的主要方法之一,其低速匀速和中低速匀速两个工况用来模拟轻型汽油车在实际道路行驶中所出现的两种基本运行工况,简易快捷且工况简单,被广泛应用在城市机动车年检时尾气检测和轻型汽油车尾气污染物排放特征的研究。吴兰钧^[17]利用 ASM 对轻型汽油车 NO_x 排放特征进行了研究,发现 NO_x 的排放与车龄有较强

的正相关性;万霞等^[18]利用 ASM 对 4518 辆轻型汽车进行尾气排放分析,发现车龄和发动机工艺及技术对车辆污染物排放有较大影响。但 ASM 主要关注车辆在低速稳态 (25 km·h⁻¹ 和 40 km·h⁻¹) 时 CO、HC 和 NO_x 的排放浓度,忽略了机动车在低速时怠速和加速工况对排放的影响及其他污染物的排放,并且缺少车辆尾气流量和油耗数据,无法用于机动车排放因子的计算,结合可以准确获取实时排放数据的便携式车载测试系统 (portable emission measurement system, PEMS),充分发挥各自的优势,从而可以快速获取不同机动车类型气态污染物的排放数据。

鉴于此,本文选取珠三角地区不同排放标准的轻型汽油客车和轻型汽油货车作为研究对象,利用 PEMS 与 ASM 相结合的机动车尾气测试系统,对机动车尾气 CO₂、CO、NO_x、HC 和 CH₄ 进行实时测量,计算轻型汽油车在不同排放标准下的 CO₂、CO、NO_x、HC 和 CH₄ 排放因子并分析其变化趋势。通过了解珠三角地区轻型汽油车在中低速工况下的污染物排放特征,以期为改进 ASM 测试方法和建立道路移动源排放清单提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 测试车辆

本研究检测了 137 辆轻型汽油车(包括 127 辆国 I ~ 国 V 排放标准的轻型汽油客车和 10 辆国 III ~ 国 V 排放标准的轻型汽油货车)在 ASM 下的尾气污染物排放情况。测试样本包含了不同品牌的常见车型,选取的机动车燃料均为汽油,喷油方式均为闭环电喷。车辆的重量、排量及行驶里程数等详细信息见表 1。

表 1 测试车辆基本信息

Table 1 Details of tested vehicles

车辆类型	排放标准	数量	基准质量/kg	行驶里程/km	排量/L
轻型汽油客车	国 I	4	1 163 ~ 1 380	192 260 ~ 235 243	1.3 ~ 2.0
	国 II	21	995 ~ 1 750	26 106 ~ 294 345	1.0 ~ 2.5
	国 III	38	985 ~ 2127	32 153 ~ 405 594	1.0 ~ 2.7
	国 IV	50	870 ~ 2 155	21 331 ~ 200 746	1.0 ~ 2.4
	国 V	7	1 220 ~ 1 325	16 489 ~ 160 000	1.4 ~ 2.0
轻型汽油货车	国 III	2	1 475 ~ 2 005	123 310 ~ 200 000	2.0 ~ 2.8
	国 IV	2	965 ~ 1 325	56 185 ~ 126 807	1.5 ~ 3.0
	国 V	6	1 070 ~ 1 310	27 ~ 12 018	1.2 ~ 1.5

1.2 测试工况

轻型汽油车的检测依据采用广东省地方标准《在用点燃式发动机汽车排气污染物排放限值及测量方法(稳态工况法)》(DB 44/592-2009)^[19]。本实验包括 ASM5025 和 ASM2540 两个测试工况,检测工序见图 1,其中 ASM5025 先于 ASM2540 工况。程

序如下:将汽车预热后加速至规定车速,然后根据汽车规定车速时的加速负荷对汽车进行加载使其保持匀速工况,测量尾气各污染物的浓度值。若在 ASM5025 工况下汽车排放未能达标,则直接进入 ASM2540 工况继续检测。ASM5025 工况的测试速度为 25 km·h⁻¹,将加速度为 1.475 m·s⁻²时输出功率

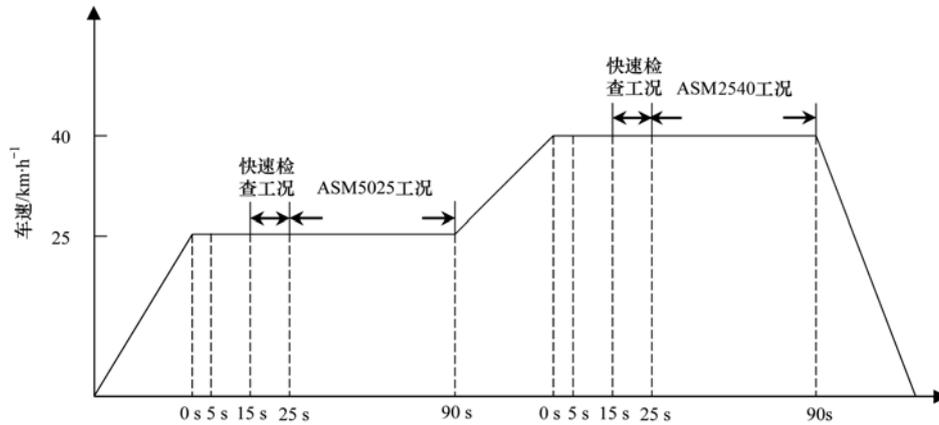


图1 ASM工况法运转示意

Fig. 1 Operation diagram of acceleration simulation mode

的50%作为加载功率,在实际操作中的加载功率为车辆基准质量的1/148;ASM2540工况的测试速度为40 km·h⁻¹,将加速度为1.475 m·s⁻²时输出功率的25%作为加载功率,在实际操作中的加载功率为车辆基准质量的1/185.两种工况的0~15 s是检测底盘测功机的模拟误差,15~25 s为10 s快速检查工况和25~90 s为65 s正常检查工况,当任一判定环节结果达标则检测完成.

1.3 测试仪器

气体分析仪采用美国Sensor公司的PEMS (SEMTECH® LDV).该测试系统由尾气流量计、预处理系统与气体分析仪组成.尾气流量计能够实时测量尾气排气流量与温湿度,同时设置采样预处理系统,去除颗粒物并干燥得到可分析样气进入气体分析仪,其中CO₂与CO检测原理为非分光红外法(NDIR),NO和NO₂检测原理为非分光紫外法(NDUV),HC和CH₄的检测原理为火焰离子化检测.

1.4 数据分析

本研究采用逐秒排放率和基于行驶里程的排放因子进行分析.

逐秒排放率计算通过尾气流量计与气体分析浓度计算得出,使用公式(1)计算.

$$EF_{ij} = \frac{\sum C_{ij}}{T_{ij}} \quad (1)$$

式中,EF_{ij}为污染物*i*在*j*工况下的排放率,mg·s⁻¹;C_{ij}为污染物*i*在*j*工况下排放量,mg;T_{ij}为污染物*i*在*j*工况下的测试时间s.

基于行驶里程的排放因子计算通过尾气流量计与气体分析浓度计算得出,使用公式(2)计算.

$$EF_i = \frac{\sum C_i}{vt} \quad (2)$$

式中,EF_i为污染物*i*的基于行驶里程的排放因子,g·km⁻¹;C_i为污染物*i*的排放量,g;v为车辆行驶速

度,km·h⁻¹;t为车辆在匀速状态下的行驶时间,h.

2 结果与讨论

2.1 不同工况下的轻型汽油车尾气排放特征

本研究对比了137轻型汽油车在怠速、加速和匀速(25 km·h⁻¹)工况下尾气污染物的排放速率,结果如表2所示.不同工况下的轻型汽油车尾气排放具有明显的差异性,车辆在怠速工况下各污染物的排放速率均低于加速和匀速工况,其原因为车辆在怠速工况下油耗和转速均较低.CO₂在怠速、加速和匀速工况下的排放速率分别为(640.54 ± 202.33)、(1929.76 ± 279.65)和(2590.24 ± 440.78) mg·s⁻¹,不同排放标准的轻型汽油车在匀速工况下的CO₂排放率均大于加速工况,国I轻型客车的CO₂排放速率较低,其原因可能是车龄较大,机动车的燃烧效率下降.CO在怠速、加速和匀速工况下的排放速率分别为(6.12 ± 5.42)、(27.36 ± 18.94)和(20.69 ± 18.88) mg·s⁻¹,除国II轻型客车在匀速的工况下的排放速率(54.50 mg·s⁻¹)大于加速工况(47.08 mg·s⁻¹),其余车辆的CO排放速率均为加速工况大于匀速工况,车辆在加速工况时的燃烧效率低于匀速工况.在加速工况和匀速工况下的NO_x排放速率变化对不同排放标准的车辆有差异,国I和国II排放标准下的轻型客车和国III标准下的轻型货车其匀速工况的NO_x排放率大于加速工况,而对于更加严格的排放标准下的NO_x排放率在加速工况略大于或基本等于匀速工况.国III轻型货车未检测出HC排放,除国II和国III轻型客车加速工况(1.68 mg·s⁻¹和0.43 mg·s⁻¹)小于匀速工况(1.83 mg·s⁻¹和0.48 mg·s⁻¹),其他车辆HC均在加速工况时有较高的排放率,HC在怠速、加速和匀速工况下的排放速率分别为(0.30 ± 0.60)、(0.80 ± 1.25)和(0.70 ± 1.05) mg·s⁻¹.轻型汽油车的

CH₄ 排放率随工况的变化情况与 HC 相似, CH₄ 在怠速、加速和匀速工况下的排放速率分别为 (0.05 ± 0.05)、(0.13 ± 0.13) 和 (0.15 ± 0.17) mg·s⁻¹. 通过对比不同排放标准和车型的污染物排放率发

现, 国 III ~ 国 V 轻型汽油货车的 HC 和 CH₄ 排放率比同排放标准的轻型汽油客车低 67.4% ~ 97.8% 和 77.1% ~ 98.9%, 而轻型货车的 CO 排放率则比同标准的轻型汽油客车高 36.1% ~ 71.5%.

表 2 轻型汽油车在 ASM 台架工况下的尾气排放速率¹⁾/mg·s⁻¹
Table 2 Exhaust emission rate of light gasoline vehicles under ASM conditions/mg·s⁻¹

车型	排放标准	CO ₂			CO		
		怠速	加速	匀速	怠速	加速	匀速
轻型汽油客车	国 I	556.43 ± 385.14	1 564.64 ± 423.88	1 968.96 ± 357.47	16.52 ± 20.62	43.12 ± 23.25	31.21 ± 21.27
	国 II	694.73 ± 454.21	2 289.17 ± 738.81	3 197.24 ± 1 024.33	8.43 ± 18.27	47.08 ± 56.10	54.50 ± 51.35
	国 III	709.88 ± 383.50	2 064.02 ± 814.74	2 706.09 ± 1 038.77	2.52 ± 5.34	16.22 ± 20.26	11.62 ± 17.18
	国 IV	692.79 ± 406.91	2 132.62 ± 781.50	2 801.62 ± 949.42	3.11 ± 6.86	13.79 ± 18.44	8.93 ± 13.83
	国 V	720.42 ± 327.24	2 059.49 ± 668.69	2 705.65 ± 847.58	2.1 ± 3.62	16.71 ± 18.02	5.05 ± 4.09
轻型汽油货车	国 III	989.35 ± 263.10	1 775.30 ± 103.13	2 085.29 ± 1 070.30	10.77 ± 14.92	56.6 ± 79.08	39.34 ± 54.99
	国 IV	327.58 ± 236.76	1 513.71 ± 569.52	2 256.9 ± 1 288.37	4.96 ± 7.01	21.89 ± 2.92	13.6 ± 9.69
	国 V	433.12 ± 171.88	2 039.15 ± 373.67	3 000.17 ± 111.25	0.54 ± 0.74	3.51 ± 6.31	1.25 ± 1.23
车型	排放标准	NO _x			HC		
		怠速	加速	匀速	怠速	加速	匀速
轻型汽油客车	国 I	6.02 ± 10.84	24.53 ± 18.85	26.49 ± 28.28	1.78 ± 0.84	3.6 ± 0.62	2.84 ± 0.58
	国 II	0.47 ± 0.83	17.07 ± 15.20	20.81 ± 21.82	0.26 ± 0.34	1.68 ± 1.91	1.83 ± 2.43
	国 III	0.41 ± 0.88	5.92 ± 11.09	5.67 ± 13.02	0.13 ± 0.30	0.43 ± 0.64	0.48 ± 1.07
	国 IV	0.60 ± 2.04	4.48 ± 8.29	4.45 ± 10.26	0.14 ± 0.33	0.37 ± 0.67	0.24 ± 0.40
	国 V	0.06 ± 0.06	1.63 ± 2.15	0.92 ± 1.13	0.05 ± 0.04	0.16 ± 0.23	0.14 ± 0.19
轻型汽油货车	国 III	0.81 ± 1.13	10.63 ± 15.01	32.27 ± 45.59	0	0	0
	国 IV	0.11 ± 0.16	0.92 ± 0.29	0.91 ± 0.27	0.036	0.11	0.1
	国 V	0.02 ± 0.02	0.32 ± 0.50	0.32 ± 0.35	0	0.01 ± 0.02	0.01 ± 0.01
车型	排放标准	CH ₄					
		怠速	加速	匀速			
轻型汽油客车	国 I	0.1 ± 0.01	0.21 ± 0.29	0.19 ± 0.26			
	国 II	0.08 ± 0.24	0.35 ± 0.66	0.48 ± 0.85			
	国 III	0.1 ± 0.39	0.24 ± 0.67	0.32 ± 1.16			
	国 IV	0.08 ± 0.30	0.17 ± 0.45	0.08 ± 0.12			
	国 V	0.01 ± 0.01	0.04 ± 0.06	0.06 ± 0.09			
轻型汽油货车	国 III	0	0	0.01			
	国 IV	0.011	0.04	0.04			
	国 V	0	0.01 ± 0.01	0.01 ± 0.01			

1) 表内数值为平均值 ± 标准差

2.2 基于稳态工况的轻型汽油客车尾气排放因子

本研究中 127 辆轻型汽油客车的排放因子如图 2 所示, 国 I ~ 国 V 的轻型汽油客车在 ASM5025 工况下的 CO₂ 排放因子分别为 (269.35 ± 58.23)、(439.76 ± 147.20)、(375.38 ± 148.74)、(388.16 ± 131.67) 和 (443.24 ± 156.71) g·km⁻¹, 除国 II 轻型客车的排放高于国 III 和国 IV 车辆, CO₂ 的排放因子随着排放标准的加严呈现上升趋势. 目前对机动车 CO₂ 的排放因子的研究较少, 何春玉等^[20] 通过美国加州大学分校开发的微观综合模式排放模型 (comprehensive modal emission model, CMEM) 模拟得到的轻型汽油客车排放因子为 542.60 g·km⁻¹, 大于 9 辆轻型车辆通过实际道路测试得到的排放因子 428.80 g·km⁻¹, 大于本研究得到的 CO₂ 排放因

子 269.35 ~ 443.24 g·km⁻¹ (平均值为 383.30 g·km⁻¹). Duarte 等^[21] 通过台架测试了 16 辆欧五的轻型客车, 分别获得了 WLTP 和 NEDC 工况下的 CO₂ 排放因子为 156.00 g·km⁻¹ 和 173.00 g·km⁻¹, 远小于本研究国 V 车辆的排放因子. 不同于 CO₂ 的排放因子变化, 不同排放标准下的 CO、NO_x、HC 和 CH₄ 的排放因子, 随着排放标准制度的推进, 污染物排放有明显的下降趋势, 可见随着对机动车排放管控的加严, 已经获得了较好的污染物排放控制效果. 但国 II 排放标准下的 CO 排放因子为 7.44 g·km⁻¹, 远大于国 I 车辆的 3.99 g·km⁻¹, 其原因为国 II 排放标准下的测试车辆中, 有部分车辆的排放因子较高, 如长安牌小型面包车的 CO 排放因子高达 28.23 g·km⁻¹, 北京现代牌小型轿车的 CO 排放因子为

24.47 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 远大于国 II 排放标准下的排放因子平均值, 部分车辆的高排放导致国 II 车辆的整体排放水平较大. 董红召等^[22]在杭州通过简易瞬态工况测得轻型客车的 CO 和 NO_x 排放因子为 1.22 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 0.28 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, CO 排放因子与本研究测得的国 III 和国 IV 车辆结果相近. 国 I ~ 国 IV 的轻型汽油客车在 ASM5025 工况下的 CH_4 排放因子分别为 (0.02 ± 0.03) 、 (0.07 ± 0.12) 、 (0.04 ± 0.16) 和 (0.01 ± 0.01) $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 与 CO 出现同样的情况, 国 II 排放标准下的长安牌小型面包车的 CH_4 排放因子达 0.41 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 明显高出其余各国 II 车辆 CH_4 排放因子一个数量级, 该车的 CO 排放因子也较高, 可能与车辆后处理系统失效有关. 何立强等^[23]在京津地区通过 NEDC 工况测得的国 I ~ 国 IV 阶段轻型汽油客车的 CH_4 排放因子分别为 0.05、0.05、0.04 和 0.03 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 与本研究具有可比性. NO_x 和 HC 呈现明显的随排放标准的加严有下降的趋势. 谢建辉等^[24]在济南通过简易瞬态工况法测得轻型汽油车的 NO_x 和 HC 排放因子为 0.70 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 0.50 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 胡京南等^[25]进行车载实验测量得到的小型客车的 CO、 NO_x 和 HC 排放因子分别为 5.58、0.82 和 0.52 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 而本研究的 CO、 NO_x 和 HC 的综合排放因子为 2.98、1.60 和 0.14 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 实际道路测试对 CO 和 HC 的测试结果偏大, NO_x 的排放因子略小于本研究. 排放因子结果的差异可能是由于采用了不同的仪器和测试工况, 另外不同的测试车辆和测试条件也会造成结果的差异. 排放标准的加严带来了非常明显的减排效果, CO、 NO_x 、HC 和 CH_4 的排放因子从国 I ~ 国 V 分别下降了 87.5%、97.3%、97.9% 和 86.4%.

根据 ASM 的检测要求, 测试车辆若在 ASM5025 工况下汽车排放未能达标, 则直接进入 ASM2540 工

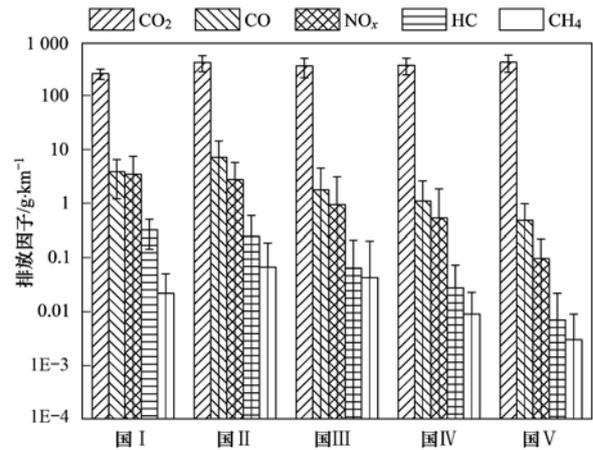


图 2 不同排放标准下的轻型汽油客车 CO_2 、CO、 NO_x 、HC 和 CH_4 排放因子

Fig. 2 CO_2 , CO, NO_x , HC, and CH_4 emission factors of light-duty gasoline cars under different emission standards

况继续测试, 测试中共有 28 辆国 I ~ 国 IV 的轻型汽油客车进入 ASM2540 工况. 如图 3 所示, 进入 ASM2540 工况检测车辆的排放因子均小于 ASM5025 工况时的排放因子, 国 I ~ 国 IV 车辆在 ASM2540 工况下的 CO、 NO_x 和 HC 排放因子相较于 ASM5025 工况分别降低了 44.8%、34.9% 和 27.9%, 低于机动车大气污染物排放清单编制技术指南中的修正比例 62.7%、79.6% 和 62.4%^[26], 表明现阶段机动车清单对于轻型汽油车中高速时的排放有一定的低估. 而且车辆的 CO_2 和 CH_4 排放因子在不同速度时与其他污染物呈现出相同的变化趋势, CO_2 和 CH_4 排放因子分别降低了 63.7% 和 39.6%.

2.3 基于稳态工况的轻型汽油货车尾气排放因子

本研究选取 10 辆国 III ~ 国 V 排放标准的轻型汽油货车计算其在低速稳态工况下的排放因子, 不同排放标准的轻型汽油货车尾气排放因子见表 3.

表 3 不同排放标准下的轻型汽油货车 CO_2 、CO、 NO_x 、HC 和 CH_4 排放因子/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$

Table 3 CO_2 , CO, NO_x , HC, and CH_4 emission factors of light-duty gasoline trucks under different emission standards/ $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$

项目	CO_2	CO	NO_x	HC	CH_4
国 III	324.95 ± 119.23	5.77 ± 7.76	4.65 ± 6.57	0.00032	0.0009
国 IV	325.00 ± 185.52	1.96 ± 1.40	0.13 ± 0.04	0.02	0.0063
国 V	432.02 ± 16.00	0.18 ± 0.18	0.05 ± 0.05	0.0014 ± 0.0015	0.0009 ± 0.0009

如表 3 所示, 国 III 和国 IV 轻型汽油货车在 ASM5025 时的 CO_2 排放因子基本持平 (325.00 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$), 国 V 车辆略有升高, 其 CO_2 的排放因子为 432.02 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$. CO 和 NO_x 的排放因子与 CO_2 的变化趋势不同, 其排放因子随排放标准的加严呈下降趋势, 国 V 货车的 CO 和 NO_x 的排放较国 III 下降了 96.9% 和 99.0%, 其中北京牌轻型封闭货车的 CO

和 NO_x 排放因子达到了 11.26 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$ 和 9.29 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 高出同标准车辆几个数量级, 其累积行驶里程已达 200 000 km, 车辆状态较差. 王伯光等^[27]进行隧道实验测量得到的轻型货车的 CO、 NO_x 和 HC 排放因子分别为 13.20、2.60 和 3.19 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 本研究轻型汽油货车的 CO、 NO_x 和 HC 综合排放因子为 2.63、1.61 和 0.0055 $\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, 隧道测试的结

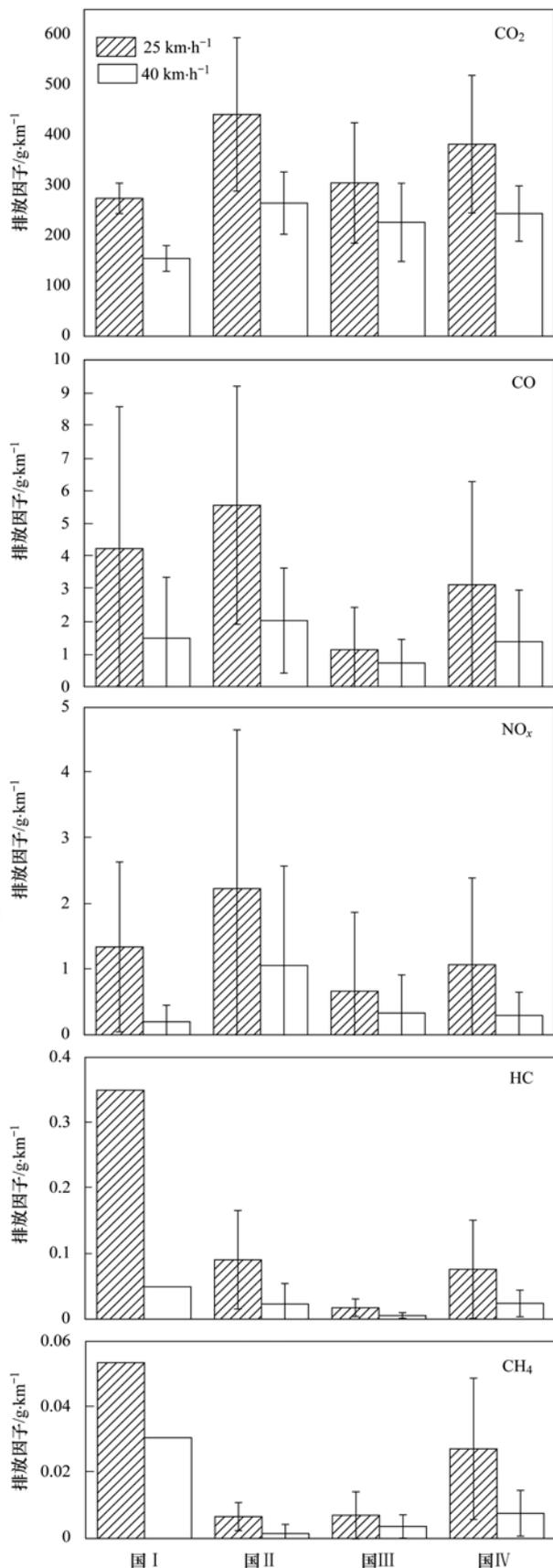


图3 轻型汽油客车不同稳态下的 CO₂、CO、NO_x、HC 和 CH₄ 排放因子

Fig. 3 CO₂, CO, NO_x, HC, and CH₄ emission factors of light-duty gasoline cars in different steady states

果均高于本研究,其原因可能为隧道测试无法准确得到单车的排放因子,车流量和车型分布对测试结果的影响较大. HC 和 CH₄ 的排放因子的差异性较大,国 IV 车辆的 HC 和 CH₄ 排放因子为 0.02 g·km⁻¹ 和 0.006 3 g·km⁻¹,分别是国 III 货车的 46.7 倍和 7.0 倍,国 V 车辆的 10.2 倍和 7.3 倍,导致此结果的原因可能是样本量较小,车辆参数的差异是导致结果误差的主要影响因素.

2.4 车龄、累积行驶里程对轻型汽油车尾气排放的影响

鉴于机动车尾气排放差异较大,为进一步分析车辆参数对车辆排放的影响,本研究使用国 IV 的 56 辆轻型汽油客车作为分析样本,分别分析车龄和累积行驶里程数对车辆排放因子的影响. 国内外大量的台架测试研究结果表明,机动车气态污染物如 CO 和 HC 的排放水平随车辆的使用年限、累积行驶里程的增加出现排放劣化情况^[28],同时发动机老化、各个零部件的磨损及催化剂的部分失效,燃烧效率和去除效率的下降会导致更多的 CO、NO_x 和 THC 排放^[29]. 将国 IV 轻型汽油客车分为 3~5、6~8 和 9~11 a 这 3 个区间,基本上覆盖了国 IV 车辆常见的车龄样本. 如图 4(a) 所示,对于 CO₂ 的排放因子是随着机动车车龄的增加而升高的,在 3~5、6~8 和 9~11 a 车辆区间的 CO₂ 排放因子分别为 308.32、398.23 和 401.40 g·km⁻¹,与 CO₂ 排放因子变化趋势不同的 HC、CH₄ 和 NO_x 排放因子随着车龄的增加呈现非线性增长,在一定增长后略微下降,HC、CH₄ 和 NO_x 均在车龄为 6~8 a 时有较大的排放,其排放因子分别为 0.03、0.01 和 0.67 g·km⁻¹,是其他车龄区间排放因子的 1.3~2.1 倍; CO 的排放因子处于相对稳定的水平,车龄在 6~8 a 的车辆 CO 排放较低,其排放因子为 0.99 g·km⁻¹. 本实验的测试车辆累积行驶里程范围为 21 311~159 527 km,所以将累积行驶里程数分为 (2~6) × 10⁴、(6~10) × 10⁴ 和 (10~15) × 10⁴ km 这 3 个区间. CO 的排放因子随着行驶里程的增加下降,在行驶里程范围 (2~6) × 10⁴ km 时排放因子最高达 1.22 g·km⁻¹; NO_x 的排放与行驶里程的关系并不明显,但是在高行驶里程时出现较高的排放,(10~15) × 10⁴ km 时的排放因子为 0.96 g·km⁻¹,HC 和 CH₄ 的排放因子随着行驶里程的增加呈现先升高然后下降的趋势,在 (6~10) × 10⁴ km 时最高为 0.04 g·km⁻¹ 和 0.01 g·km⁻¹.

2.5 基准质量、排量与变速器型式对轻型汽油车尾气排放的影响

分析基准质量、排量和变速器型式对车辆排放

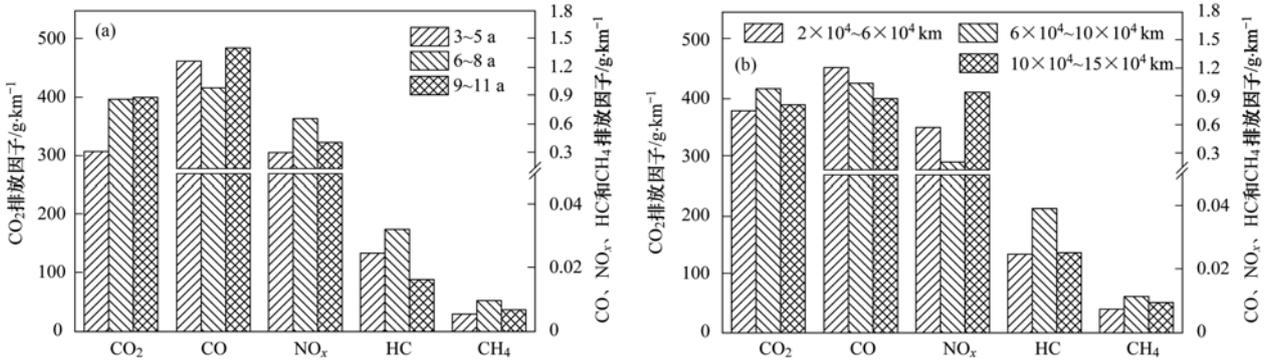


图 4 车龄和行驶里程对国IV轻型汽油客车排放的影响

Fig. 4 Effects of age and odometer on emission factors of China IV light-duty gasoline cars

的影响. 由于样本量较少, 本研究对基准质量为 1.0 t 以下的车辆不做分析, 如图 5 (a) 所示, 在 1.0 ~ 1.2 t 和 1.2 ~ 1.4 t 两个区间中, CO₂、CO、NO_x、HC 和 CH₄ 的排放因子随机动车基准质量的增加而增加, 基准质量为 1.2 ~ 1.4 t 的车辆尾气的排放因子

最大, 分别为 471.64、1.58、0.75、0.03 和 0.01 g·km⁻¹, 基准质量为 1.4 ~ 2.0 t 时的尾气排放因子较低, 除 CO 的排放因子高于 1.0 ~ 1.2 t 的车辆, 其他污染物的排放因子均低于 1.0 ~ 1.2 t 的车辆. 如图 5(b) 所示, 对于不同的变速器型式, 自动挡的车辆各污染物的排放因子均略高于手动档, 对于不同的污染物自动挡比手动档的排放因子高 7.1% ~ 26.5%; 手动档车辆动力传递效率高于自动挡车辆, 且相同速度时的发动机转数略低于自动挡, 导致手动档燃油经济性高于自动挡车辆. 将车辆按照排量分类识别排量对轻型汽油车尾气排放的影响时, 如图 5(c) 所示, CO₂、CO、HC 和 CH₄ 的排放因子随着排量的增加呈上升趋势, 在 2.0 ~ 2.4 L 排量区间内排放因子最大为 473.17、1.22、0.04 和 0.01 g·km⁻¹, NO_x 的排放因子呈现非线性增长, 在 1.4 ~ 1.8 L 时排放因子最高为 0.61 g·km⁻¹, 在此范围后随排量的增大 NO_x 有降低的趋势, 且此排量区间的车辆保有量最多. 大排量机动车意味着更大的排气量和更高的燃油消耗, 尾气污染物总量也呈现增长趋势.

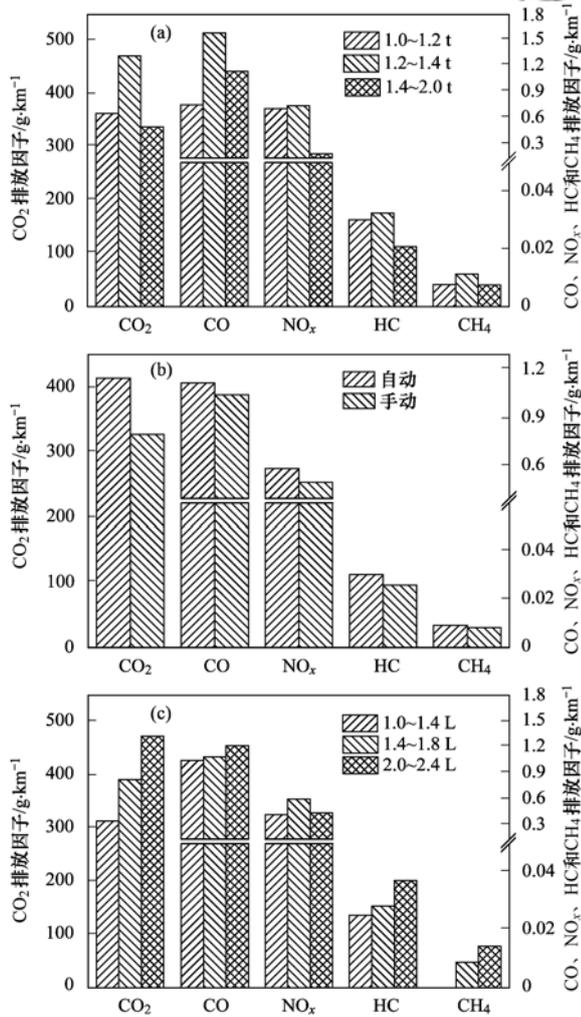


图 5 基准质量、变速器型式及排量对国IV轻型汽油车排放的影响

Fig. 5 Effects of vehicle weight, transmission type, and displacement on emission factors of China IV light-duty gasoline cars

3 结论

(1) 怠速工况下, 轻型汽油车尾气污染物排放率较低, CO₂ 和 NO_x 在加速工况时的排放率小于匀速工况, 而 CO、HC 和 CH₄ 在加速工况时的排放率大于匀速工况. 国 III ~ 国 V 轻型汽油货车的 HC 和 CH₄ 排放率均小于轻型汽油客车, 而轻型汽油货车的 CO 排放率则比同标准的轻型汽油客车高.

(2) 轻型汽油客车在稳态工况 (25 km·h⁻¹) 下的 CO₂、CO、NO_x、HC 和 CH₄ 平均排放因子分别为 383.20、2.98、1.60、0.14 和 0.03 g·km⁻¹, 通过不同的稳态工况测试得出的排放因子表明, 车辆在中速时的排放低于低速. 轻型汽油货车在稳态工况 (25 km·h⁻¹) 下的 CO₂、CO、NO_x、HC 和 CH₄ 平均排放因子分别为 360.66、2.64、1.61、0.005 5 和

0.0027 g·km⁻¹. 轻型汽油货车的单车排放差异较大,部分高行驶里程及高龄车辆导致大量的污染物排放。

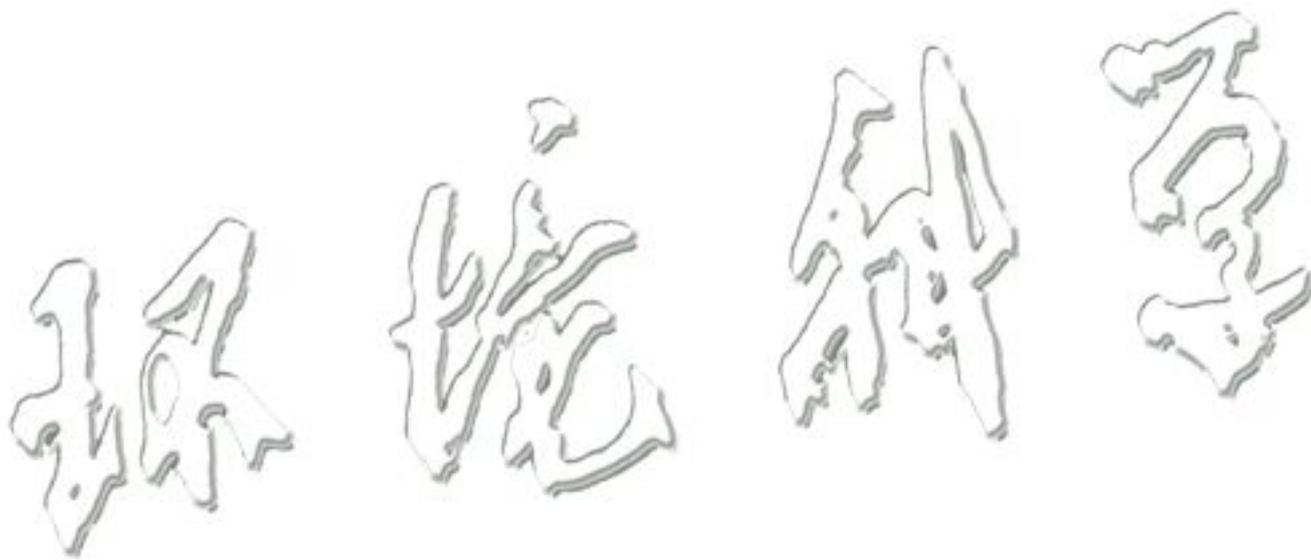
(3)CO₂ 排放因子随车龄的增加而升高, HC、CH₄ 和 NO_x 排放因子随着车龄的增加显现先增长后略微下降的趋势; CO 的排放因子受车龄影响较小,车龄在 6~8 a 的车辆 CO 排放因子最低。行驶里程对于车辆排放有一定的影响,但其影响是非线性的。

(4)气态污染物排放因子在车辆基准质量为 1.2~1.4 t 时最高,当基准质量为 1.4~2.0 t 时,除 CO 的排放因子高于 1.0~1.2 t 的车辆,其他污染物的排放因子均低于 1.0~1.2 t 的车辆;手动档的轻型汽油客车各污染物排放略低于自动挡;发动机排量与机动车的尾气污染物的排放呈正相关。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国移动源环境管理年报 [R]. 北京: 中华人民共和国生态环境部, 2019.
- [2] 王韵杰, 张少君, 郝吉明. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径 [J]. 环境科学研究, 2019, **32**(10): 1755-1762.
Wang Y J, Zhang S J, Hao J M. Air pollution control in China: progress, challenges and future pathways [J]. Research of Environmental Science, 2019, **32**(10): 1755-1762.
- [3] 葛琳琳. 长三角地区典型沿海城市大气细颗粒物污染特征与来源解析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
Ge L L. Pollution characteristics and source apportionment of air fine particulate matter in the typical coastal city of Yangtze Delta Region [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [4] Zhong Z M, Zheng J Y, Zhu M N, *et al.* Recent developments of anthropogenic air pollutant emission inventories in Guangdong province, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **627**: 1080-1092.
- [5] 吴丹, 张世秋. 中国大气污染控制策略与改进方向评析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, **47**(6): 1143-1150.
Wu D, Zhang S Q. China's air pollution control strategy and reform [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, **47**(6): 1143-1150.
- [6] 单丽, 江飞, 贺晓婧, 等. 中国道路交通源大气污染的健康影响评估 [J]. 中国环境管理, 2018, **10**(5): 59-64.
Shan L, Jiang F, He X J, *et al.* Health impact assessment of air pollution from road traffic sources in China [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2018, **10**(5): 59-64.
- [7] 马冬, 丁焰, 刘志华, 等. 轻型汽车实际行驶工况的排放研究 [J]. 安全与环境学报, 2008, **8**(5): 66-68.
- [8] 胡伟, 钟秦. 隧道实验测定南京市机动车 PM₁₀ 排放因子 [J]. 环境工程学报, 2009, **3**(10): 1852-1855.
Hu W, Zhong Q. A study on PM₁₀ emission factor of motor vehicle by tunnel test in Nanjing city [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2009, **3**(10): 1852-1855.
- [9] 葛蕴珊, 王爱娟, 王猛, 等. PEMS 用于城市车辆实际道路气体排放测试 [J]. 汽车安全与节能学报, 2010, **1**(2): 141-145.
Ge Y S, Wang A J, Wang M, *et al.* Application of Portable Emission Measurement System (PEMS) on the emission measurements of urban vehicles on-road [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2010, **1**(2): 141-145.
- [10] Wang W G, Clark N N, Lyons D W, *et al.* Emissions comparisons from alternative fuel buses and diesel buses with a chassis dynamometer testing facility [J]. Environmental Science & Technology, 1997, **31**(11): 3132-3137.
- [11] Wang J, Jin L M, Gao J H, *et al.* Investigation of speciated VOC in gasoline vehicular exhaust under ECE and EUDC test cycles [J]. Science of the Total Environment, 2013, **445-446**: 110-116.
- [12] 郭红松, 颜燕, 高明秋, 等. 测试循环对国五轻型汽油车低温排放的影响研究 [J]. 汽车工程, 2018, **40**(1): 14-18, 56.
Guo H S, Yan Y, Gao M Q, *et al.* A study on the influence of test cycles on the low-temperature emissions of China-V light-duty gasoline vehicles [J]. Automotive Engineering, 2018, **40**(1): 14-18, 56.
- [13] 檀忠意. 在用轻型汽油车稳态工况法排气污染物排放限值研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2017.
Tan Z Y. Research on emission limits for exhaust pollutants from in-use light duty vehicle with acceleration simulation mode test procedures [D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [14] Nakashima Y, Kajii Y. Determination of nitrous acid emission factors from a gasoline vehicle using a chassis dynamometer combined with incoherent broadband cavity-enhanced absorption spectroscopy [J]. Science of the Total Environment, 2017, **575**: 287-293.
- [15] Fontaras G, Franco V, Dilara P, *et al.* Development and review of Euro 5 passenger car emission factors based on experimental results over various driving cycles [J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 1034-1042.
- [16] 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.
- [17] 吴兰钧. 基于稳态工况法 (ASM) 的在用汽油车 NO_x 排放特性研究 [J]. 现代交通技术, 2013, **10**(4): 72-74.
Wu L J. Research on NO_x emission characteristics of gasoline cars based on ASM method [J]. Modern Transportation Technology, 2013, **10**(4): 72-74.
- [18] 万霞, 黄文伟, 高谋荣. 基于稳态工况法的小汽车排放测试分析 [J]. 内燃机, 2013, (3): 34-36.
Wan X, Huang W W, Gao M R. Experimental research on emission characteristics of car pollutants based on ASM [J]. Internal Combustion Engines, 2013, (3): 34-36.
- [19] DB 44/592-2009, 在用点燃式发动机汽车排气污染物排放限值及测量方法(稳态工况法) [S].
- [20] 何春玉, 王歧东. 运用 CMEM 模型计算北京市机动车排放因子 [J]. 环境科学研究, 2006, **19**(1): 109-112.
He C Y, Wang Q D. Vehicle emission factors determination using CMEM in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, **19**(1): 109-112.
- [21] Duarte G O, Gonçalves G A, Farias T L. Analysis of fuel consumption and pollutant emissions of regulated and alternative driving cycles based on real-world measurements [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, **44**: 43-54.
- [22] 董红召, 徐勇斌, 陈宁. 基于 IVE 模型的杭州市机动车实际行驶工况下排放因子的研究 [J]. 汽车工程, 2011, **33**(12): 1034-1038.
Dong H S, Xu Y B, Chen N. A research on the vehicle emission factors of real world driving cycle in Hangzhou City based on IVE model [J]. Automotive Engineering, 2011, **33**(12): 1034-

- 1038.
- [23] 何立强, 宋敬浩, 胡京南, 等. 轻型汽油车 CH_4 和 N_2O 排放因子研究[J]. 环境科学, 2014, **35**(12): 4489-4494.
He L Q, Song J H, Hu J N, *et al.* An investigation of the CH_4 and N_2O emission factors of light-duty gasoline vehicles [J]. Environmental Science, 2014, **35**(12): 4489-4494.
- [24] 谢建辉, 闫学军, 朱振明, 等. 济南市轻型汽油车污染物排放特征研究[A]. 见: 2014 中国环境科学学会学术年会(第六章)[C]. 北京: 中国环境科学学会, 2014. 472-478.
- [25] 胡京南, 郝吉明, 傅立新, 等. 机动车排放车载实验及模型模拟研究[J]. 环境科学, 2004, **25**(3): 19-25.
Hu J N, Hao J M, Fu L X, *et al.* Study on on-board measurements and modeling of vehicular emissions [J]. Environmental Science, 2004, **25**(3): 19-25.
- [26] 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南[R]. 北京: 中国环境保护部, 2015.
- [27] 王伯光, 张远航, 吴政奇, 等. 广州市机动车排放因子隧道测试研究[J]. 环境科学研究, 2001, **14**(4): 13-16.
Wang B G, Zhang Y H, Wu Z Q, *et al.* Tunnel test for motor vehicle emission factors in Guangzhou [J]. Research of Environmental Science, 2001, **14**(4): 13-16.
- [28] 郭栋, 高松, 王晓原, 等. 轻型电喷车排放随使用年限和行驶里程劣化规律分析[J]. 科学技术与工程, 2013, **13**(15): 4454-4458.
Guo D, Gao S, Wang X Y, *et al.* Analysis of emissions deterioration rule of light-duty EFI gasoline vehicle [J]. Science Technology and Engineering, 2013, **13**(15): 4454-4458.
- [29] 范菊旺. 基于底盘测功机测试的机动车劣化对污染物排放因子的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
Fan J W. A study of the effects of the deterioration of vehicle on pollutant emission factors based on chassis dynamometer tests [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.



CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)