

不同排放标准下大型柴油客车实测排放因子与 MOBILE6 预测值的对比分析

刘娟娟¹, 于 雷^{1,2}, 宋国华¹, 郝艳召¹

(1. 北京交通大学交通运输学院, 北京 100044; 2. 德克萨斯南方大学, 美国 休斯敦 77004)

摘 要: 在利用先进的车载尾气检测技术(PEMS)收集了我国大型柴油客车尾气的实时排放数据的基础上, 分析了不同排放标准下车辆(国 I、国 II、国 III)的 CO、HC、NO_x 和 PM 排放因子与速度的关系; 使用 MOBILE6 模型, 经过模型参数校正, 预测了相应车辆的排放因子, 并与不同排放标准下的车辆排放实测值进行对比, 从而验证了 MOBILE6 模型对我国大型柴油客车尾气排放预测的适用性。

关键词: 大型柴油客车; 车载尾气检测; 排放因子; MOBILE6 模型

中图分类号: X831

文献标识码: A

文章编号: 1671-1556(2009)06-0030-06

Comparative Analysis of Emission Factors Collected from the Real-world and Predicted from MOBILE6 for Heavy-duty Diesel Buses under Different Emission Standards

LIU Juan-juan¹, YU Lei^{1,2}, SONG Guo-hua¹, HAO Yan-zhao¹

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Texas Southern University, Houston TX 77004, U. S. A)

Abstract: Real-world emission data of heavy-duty diesel buses under different emission standards were collected by using the portable emission measurement system (PEMS). The differences among emission factors of CO, HC, NO_x and PM under different standards (Phase I, II and III) were compared, and the relationship between emission factors and speed were analyzed. Then, emission factors were derived by MOBILE6 emission factor model through adjusting the input parameters according to the tested buses. Finally, the real-world emission factors under different standards were compared with those predicted from MOBILE6 model, and the applicability of MOBILE6 to the emission estimation of heavy-duty diesel buses in China was analyzed.

Key words: heavy-duty diesel bus; PEMS; emission factor; MOBILE6

0 引 言

近几年为了缓解城市交通压力,我国大力推行公交优先政策,使得公交车保有量快速增长,而由此带来的尾气排放也成为城市空气污染的重要来源,因此对城市公交车辆尾气排放进行控制势在必行。

据统计,2008年北京市运营的公交车辆约74%为大型柴油客车^[1],为此笔者选择大型柴油客车为研究对象,收集其在实际道路上的尾气排放数据并进行量化分析,旨在为制定车辆尾气有效排放控制对策提供数据基础和依据。

目前机动车尾气检测方法主要有3种:底盘测功机检测(Chassis Dynamometer Test,

收稿日期:2009-06-15 修回日期:2009-07-21

基金项目:国家自然科学基金项目(50522206)、教育部博士点基金项目(T06C10020)和北京市科技计划重大项目(D08050902920801)资助。
作者简介:刘娟娟(1985—),女,硕士研究生,主要研究方向为交通环境、交通规划与管理。E-mail:liujuanjuan428@163.com

CDT)^[2]、路边遥感检测 (Remote Sensing Detection, RSD)^[3] 和车载尾气检测 (Portable Emission Measurement System, PEMS)^[4]。与其他两种检测手段相比, PEMS 可安装在测试车上实时收集实际道路上车辆尾气的排放数据, 且可长时间跟踪检测同一固定车辆以获得不同交通条件下的尾气连续排放数据, 能更真实地反映道路行驶车辆尾气的实际排放特征, 目前已得到越来越多学者的广泛认可和应用^[5]。

然而, 尽管应用先进的尾气检测技术可以获得车辆实测的尾气数据, 但是排放测试无法涵盖所有车辆, 测试的数据积累相对缓慢, 鉴于此, 有必要基于实测数据开发相应的排放模型, 以进行车辆尾气排放预测。目前, 我国还没有建立适合我国实际情况的车辆尾气排放模型, 通常采用美国环保局开发的 MOBILE 系列模型进行车辆尾气排放计算和预测, 但基于该模型的研究主要集中在轻型汽油车^[6], 而针对柴油车尤其是大型柴油客车的研究相对较少, 因此笔者采用 PEMS 设备 OEM-2100 进行车辆尾气排放数据收集, 分析了大型柴油客车排放因子随行驶状况的变化规律, 并与 MOBILE 模型预测值进行对比, 从而验证了该模型对我国不同排放标准下大型柴油客车尾气排放预测的适用性。

1 数据收集及分析

由于车辆尾气排放受车型、路况、天气等不同因素的影响较大, 因此选取具有市场代表性的大型柴油客车, 测试路线包含不同城市道路类型(快速路、

主干路、次干路、支路), 测试时间均为周二至周四典型工作日且无雨雪天气, 从而保证收集的车辆尾气数据能真实地反映北京市大型柴油客车实际道路排放水平。

1.1 测试设备及原理

测试所采用设备是美国 CATI 公司开发的实时车载尾气检测设备 OEM-2100。该设备是将尾气检测系统、GPS 全球卫星定位系统、内嵌式计算机数据集成系统集成于一体的先进的尾气数据收集系统^[7], 并获得了美国环保局 (EPA) 环境技术认证 (ETV)。其中尾气检测系统可通过与尾气管相连的探针, 得到每秒各种污染物的排放浓度和排放质量, 包括 CO、CO₂、HC、NO_x 和颗粒物 (PM); 通过在发动机相应位置安装感应器, 可得到发动机转速、进气歧管压力和进气温度等发动机运行参数, 这些参数对于计算尾气排放质量必不可少; GPS 全球卫星定位系统可以收集车辆运行中的经纬度和速度信息; 最终尾气检测系统得到的尾气数据、发动机数据以及 GPS 数据通过内嵌的计算机系统进行数据同步和数据查错, 经过一系列数据转换, 得到最终的数据文件^[8]。

1.2 测试车辆

为比较不同排放标准下大型柴油客车的尾气排放污染程度, 笔者取 3 辆分别满足国 I、国 II 和国 III 排放标准的大型柴油客车进行测试, 其生产厂家分别是市场占有率最高的北京京通、郑州宇通、上海申龙, 发动机类型均为玉柴系列, 且均采用 0 号柴油。测试车辆的具体信息如表 1 所示。

表 1 测试车辆信息

Table 1 Basic information of testing vehicles

生产厂家	发动机型号	排放标准	制造年份	里程表计数/(km)	总质量/(kg)	额定功率/(kW)	总排量/(L)	喷油类型
北京京通	YC6J190-20	国 I	1999 年	84 246	12 000	155	6.8	直喷
郑州宇通	EQB210	国 II	2004 年	180 643	11 400	155	7.8	直喷
上海申龙	YC4g220-30	国 III	2007 年	56 665	11 400	162	5.26	直喷

1.3 排放因子计算

由于各种污染物逐秒排放受外界因素(如工况、外界环境、速度、加速度、温度、路况等)影响较大, 波动性强, 而 MOBILE 模型为宏观排放预测模型, 因此笔者选取整个测试过程中的排放因子与 MOBILE 模型预测值进行对比分析。排放因子是指车辆运行单位距离所排放污染物的量(g/km), 其计算公式为

$$\overline{EF} = \frac{\sum_{i=1}^n ER_i}{\sum_{i=1}^n v_i / 3\,600} \quad (1)$$

式中: $\overline{EF}$ 为排放因子(g/km); ER_i 为第 i 秒的排放率(g/s), 来源于 PEMS 逐秒排放信息; v_i 为第 i 秒的行驶速度(km/h), 来源于 GPS 搜集数据。

经计算可得出不同排放标准下车辆的排放因

子,如表2所示。

表2 排放标准车辆各污染物的排放因子(g/km)
Table 2 Emission Factors of vehicles under different emission standards

车辆	CO	NO _x	HC	PM
国 I	4.91	16.19	1.37	0.75
国 II	5.00	8.57	2.55	1.46
国 III	3.15	6.41	0.20	0.22

由表2可以看出:国II标准车辆的CO、HC、PM排放因子均要比国I标准车辆的高,这是由于国II标准车辆的行驶里程远大于国I标准车辆,造成发动机各方面性能的降低和排放的劣化;但是国II标准车辆的NO_x的排放因子比国I标准车辆有大幅度降低,一方面是由于国II排放标准比国I排放标准稍低,另一方面可能是由于国I标准车辆车龄较大,对NO_x排放因子有一定的影响;国III标准车辆各污染物排放因子均比国I、国II标准车辆小,这是由于我国从国III排放标准开始,各种污染物排放限值较之前有很大的降低,是我国机动车尾气排放控制进入一个新阶段的标志,另一个重要原因是所选国III标准车辆车龄和行驶里程较小,发动机性能比前两辆车好,从而造成其排放要优于前两辆车。

1.4 排放因子随车辆行驶速度的变化特性

车辆行驶速度是影响其尾气排放的重要因素,不同速度区间下发动机负荷不同,因此产生的污染物排放量也不同。通过对排放因子随速度变化的特性分析,可以量化不同行驶状态下车辆的排放水平,从而制定有效的降低尾气排放的交通策略。图1至图3分别给出了3种排放标准下大型柴油客车排放因子随速度的变化曲线,根据实测的逐秒排放数据,将速度以5 km/h为步长划分为17个区间,分析不同速度区间下尾气排放的变化特性^[6]。

由图1至图3可以看出:①车辆行驶速度过低会造成大量的污染物排放。车辆行驶速度为0~5 km/h时的排放因子远远高出其他速度区间下的排放,主要原因是超低速运行导致单位行驶里程上行程时间的增加,从而产生了高贡献率的低速区间;另外,车辆低速运行时,容易造成混合气燃烧不充分,导致车辆排放和燃油经济性能都较差;随着车辆行驶速度的提高,各种污染物的排放量逐渐降低,NO_x和CO尤为明显;当车辆行驶速度达到20 km/h以后,各污染物排放因子逐渐趋于稳定,在55~70 km/h时基本达到最低,可见这个速度区间是车辆行驶时排放最理想的速度范围,并且稳定之后各污

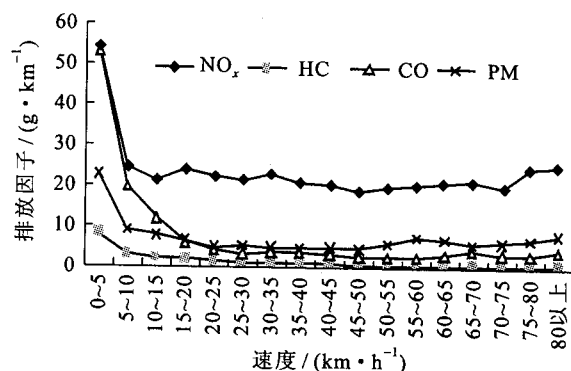


图1 国I标准车辆不同速度区间各污染物的排放因子
Fig. 1 Average emission factors in different speed bins under Phase I standard

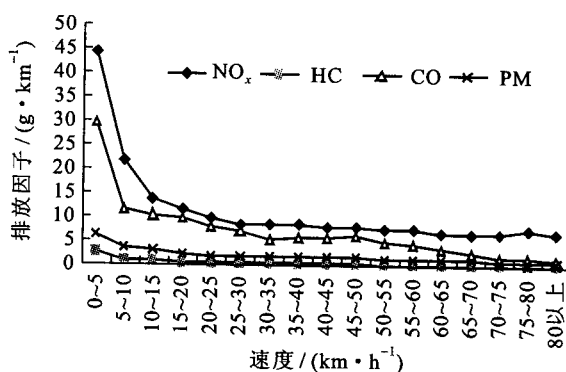


图2 国II标准车辆不同速度区间各污染物的排放因子
Fig. 2 Average emission factors in different speed bins under Phase II standard

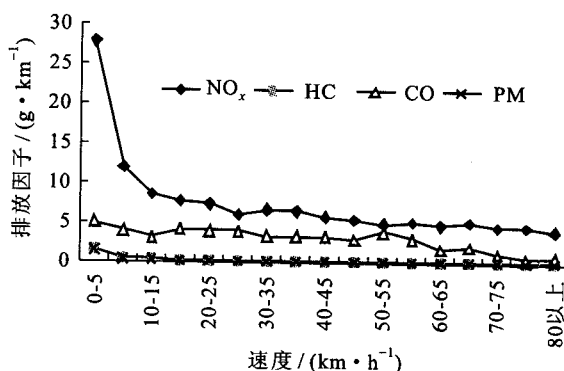


图3 国III标准车辆不同速度区间各污染物的排放因子
Fig. 3 Average emission factors in different speed bins under Phase III standard

染物排放因子均较低,HC和PM接近于0;但是国I标准车辆在速度达到80 km/h以后,各排放因子又有上升趋势,这是由于车辆速度过大时发动机负荷过大,混合气不完全燃烧造成的。②从各污染物来看,NO_x排放因子随速度的变化最为显著,速度达到20 km/h之后逐渐开始下降,但是国I标准车辆NO_x的排放在速度达到80 km/h以上时,由于发

动机负荷的增大,又出现上升趋势;国Ⅱ和国Ⅲ标准车辆明显改善了这一趋势,且排放量也大大降低,其中国Ⅱ标准车辆 NO_x 排放因子稳定在 6 g/km 左右,国Ⅲ标准车辆 NO_x 排放因子则保持在 5 g/km 以下,在 80 km/h 区间最低达到 4.27 g/km 。 CO 的变化规律同 NO_x 相似,国Ⅰ标准车辆在速度达到 80 km/h 以上时, CO 排放因子又呈现上升趋势,但是国Ⅱ和国Ⅲ标准车辆则得到明显改善。 HC 和 PM 排放较为一致,速度达到 20 km/h 以后,相对于其他排放因子其分布较为稳定, HC 和 PM 排放因子保持在 0.2 g/km 左右。另外,国Ⅲ标准车辆在速度为 $0 \sim 5 \text{ km/h}$ 区间时, CO 平均排放因子较低,可见低速运行时对 CO 排放控制较好。

由以上分析可知:控制重型车辆行驶速度是减少其尾气排放对城市空气污染的一个非常有效的途径,而 $55 \sim 70 \text{ km/h}$ 是最佳行驶速度区间;通过对比分析可以看出,国Ⅲ标准车辆相对于国Ⅰ和国Ⅱ标准车辆在各污染物排放控制上有明显改善,说明国Ⅲ标准的实施对于控制机动车排放污染成效显著。

2 MOBILE6 模型预测排放因子

2.1 MOBILE 模型

MOBILE 模型是美国环保局 (USEPA) 依据联邦 FTP 测试程序对各种在用车进行排放检测,在实测结果基础上考虑车龄、行驶里程、劣化率、速度、检查维修制度 (I/M)、环境状况、道路条件以及车用油料等诸多因素对排放的影响,所开发出的宏观机动车排放因子预测模型。该模型的计算思路是:首先根据排放控制水平得到机动车在标准工况下的基本排放因子,在此基础上根据实际条件下各种影响因素同标准工况的差别对基本排放因子进行修正,最终得到实际运行状况下的排放因子^[9]。其中各影响因素对排放的影响修正公式是在对实测排放数据长期统计和回归分析后得到的经验公式。利用该模型能得出不同年份中各车型在特定行驶速度下的排放因子。MOBILE6 是该模型发布至今的最后版本,其中加入了道路状况、道路类型对车辆排放的影响,将车辆在“启动”与“行驶”阶段的排放区分开分别进行预测,以支持机动车在空间和时间上的排放进行更为准确的分配。

2.2 模型输入的参数

MOBILE6 模型的输入参数主要包括:车型、车龄、车里程累积率、平均速度、燃油硫含量、温度、燃

油雷氏蒸汽压等,其中车龄、车里程累积率为测试时车辆的车龄和行驶里程累积情况。本次测试车辆均为重型柴油客车,其中国Ⅰ标准车辆对应于 MOBILE6 模型中的车型 21,国Ⅱ、国Ⅲ标准车辆对应于 MOBILE6 模型的车型 20,平均速度采用各车辆的实测值,分别为 27.7 km/h 、 33.5 km/h 和 30.3 km/h 。根据排放标准^[10,11]可知,国Ⅰ标准车辆柴油含硫量为 0.3% ,国Ⅱ、国Ⅲ标准车辆柴油含硫量为 0.05% 。具体的模型输入参数如表 3 所示。

表 3 MOBILE6 模型输入参数值
Table 3 Input parameters of MOBILE6

车辆	车型	车龄/a	平均速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	柴油含硫 量/($\times 10^{-6}$)	温度 /°F	燃油雷氏 蒸汽压/(Pa)	行驶里程/ (km)
国Ⅰ	21	6	27.7	3 000	77~95	12.7	84 246
国Ⅱ	20	4	33.5	500	14~50	12.7	180 643
国Ⅲ	20	1	30.3	500	14~50	12.7	56 665

2.3 测算年份的确定

由于我国实行的机动车排放标准与美国不同,而预测的测算年份对预测结果有很大影响,因此需要将我国的排放标准与 MOBILE6 模型预测的测算年份进行对应,以保证预测结果的准确性。为此,以表 3 中 3 辆不同排放标准下车辆作为基础车型,通过修改 MOBILE6 模型中的测算年份等参数,确定与我国各阶段排放水平相当的 MOBILE6 模型测算年份。具体方法为:在输入表 3 所示各参数基础上,按照我国的新车型式认证法规将行驶里程参数设为 $5 000 \text{ km}$,车龄参数设为 1,进而寻找确定同各标准排放限值^[10,11]最为接近的年份作为不同排放标准下预测的测算年份。最终通过比较,分别选择 1985 年、1988 年和 1991 年作为我国国Ⅰ、国Ⅱ和国Ⅲ不同排放标准下车辆的测算年份。在标定过程中必须注意,我国的重型车排放标准限值单位为 $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,换算成 g/km 的系数采用 $1.27^{[12,13]}$ 。

表 4 为我国重型车各排放标准的实施年份与 MOBILE6 模型预测的测算年份之间的对应情况,可见我国的排放控制水平与美国存在一定差距,各阶段均落后于美国 15 a 左右。

表 4 我国重型车排放标准实施年份与 MOBILE6 模型推算年份之间的对应情况

Table 4 Calendar year correspondence of standards in China and MOBILE6

排放标准	实施年份	模型推算年份
国Ⅰ	2000 年	1985 年
国Ⅱ	2003 年	1988 年
国Ⅲ	2008 年	1991 年

2.4 预测排放因子

通过对 MOBILE6 模型输入参数进行修改之后,分别得到了不同排放标准下大型柴油客车的排放因子,如表 5 所示。由表 5 可以看出:MOBILE6 模型对于国 I、国 II、国 III 3 个标准车辆排放预测值呈递减关系,可见排放因子预测值对预算年份的敏感性很高;另外国 III 标准车辆的 HC 和 PM 排放因子比国 I、国 II 标准车辆有明显的降低。

表 5 MOBILE6 模型预测的各污染物的排放因子(g/km)

Table 5 Emission factors calculated from MOBILE6

车辆	CO	NO _x	HC	PM
国 I	7.84	11.76	1.81	0.79
国 II	5.54	9.10	1.53	0.73
国 III	2.36	6.08	0.66	0.44

3 实测排放因子与 MOBILE6 模型预测值的对比分析

将 PEMS 实测值与 MOBILE6 模型预测值进行对比分析(如图 4~图 6)可以看出:

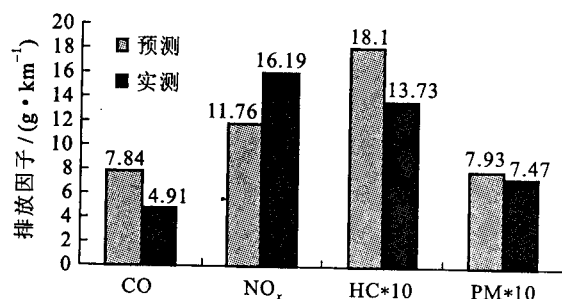


图 4 国 I 标准车辆实测排放因子与模型预测值的比较

Fig. 4 Comparison of emission factors between real-world test and model prediction under Phase I standard

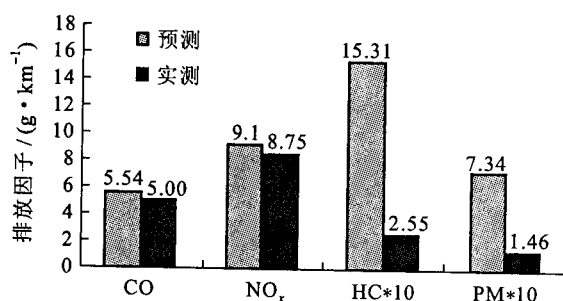


图 5 国 II 标准车辆实测排放因子与模型预测值的比较

Fig. 5 Comparison of emission factors between real-world test and model prediction under Phase II standard

(1) 国 I 标准车辆 MOBILE6 模型预测的 CO

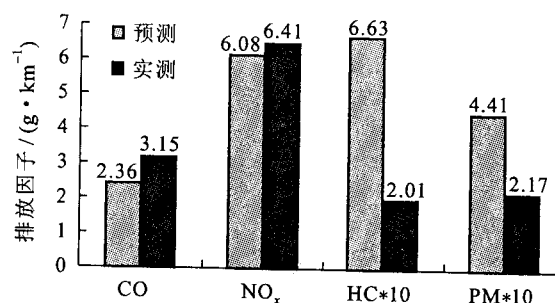


图 6 国 III 标准车辆实测排放因子与模型预测值的比较

Fig. 6 Comparison of emission factors between real-world test and model prediction under Phase III standard

排放因子误差为 59.5%, NO_x 排放因子的误差为 -27.4%, HC 排放因子的误差为 31.9%, 而模型预测的 PM 排放因子与实测值较为接近, 误差仅为 6.2%。

(2) 国 II 标准车辆 MOBILE6 模型预测的 CO 排放因子误差为 10.7%, NO_x 排放因子误差为 6.2%, HC 排放因子的误差最大, 模型预测值是实测值的 6 倍, PM 平均排放因子模型预测值是实测值的 5 倍。

(3) 国 III 标准车辆 MOBILE6 模型预测的 CO 排放因子误差为 -25%, NO_x 排放因子误差为 -5.1%, HC 排放因子模型预测值是实测值的 3.3 倍, PM 排放因子模型预测值是实测值的 2 倍。

通过将 MOBILE6 模型预测值与 PEMS 实测值进行对比可以看出: 整体说 MOBILE6 模型预测值比实测值高; CO 和 NO_x 排放因子的预测值和实测值相对比较接近, 误差在可接受范围内, HC 和 PM 排放因子误差最大, 国 II、国 III 标准车辆尤为明显, 可见 MOBILE6 模型在预测我国大型柴油客车的 HC 和 PM 排放因子时存在明显的误差。以上误差存在的主要原因有两点: 其一, MOBILE6 模型是宏观排放因子预测模型, 反映的是某一年份特定车辆类型的整体排放水平, 而 PEMS 实测数据是基于个别车辆的排放特征, 因此存在样本个体与总体的均值误差; 其二, MOBILE6 模型的基础数据是基于美国的车辆测试数据库, 而美国的机动车排放水平与我国存在差异, 无法真实反映我国重型柴油车的排放情况。

4 结 论

(1) 国 III 标准车辆相对于国 I 和国 II 标准车辆

在各污染物排放控制上有明显的改善,对机动车排放污染控制有很大的贡献。

(2) 不同排放标准下的大型柴油客车各污染物排放因子随速度变化的曲线相似,并且比较稳定。从整体上看,各污染物排放因子随速度的增加而急剧下降,速度达到 20 km/h 以后,各污染物平均排放因子逐渐趋于稳定,在 55~70 km/h 时基本达到最低值,可见这个速度区间是车辆行驶时排放最理想、燃油经济性最好的速度范围。因此要改善城市道路交通状况,提高公交车辆的运行速度是控制其污染的有效途径。

(3) 通过对比分析 MOBILE6 模型预测值与 PEMS 实测数据可知:整体上来说,MOBILE6 模型预测值比实测值高,而国 II 和国 III 标准车辆的 HC 和 PM 排放因子尤为明显,CO 和 NO_x 排放因子的预测值和实测值相对比较接近;MOBILE6 模型作为一个宏观预测模型,在预测单车排放时具有较大误差,对我国各种排放标准下大型柴油客车的排放预测适用性较差;不同排放标准下的重型柴油客车的 PEMS 实测数据具有一定的局限性,无法代表北京市所有车辆;MOBILE6 模型的基础数据是基于美国的车辆测试数据库,而美国的机动车排放水平与我国有很大差距,无法真实反映我国的重型柴油车排放情况。可见,基于我国车辆实测数据建立符合我国实际排放水平的排放因子预测模型是今后研究的方向。

参考文献:

- [1] 北京公交集团. 北京公交车已接近发达国家水平[EB/OL]. <http://auto.sina.com.cn/news/2008-11-14/1555428829.shtml>
- [2] 汪民生. 试论汽车排放的工况法测试及其应用[J]. 城市管理与科技, 2002, 4 (4): 6-9.
- [3] Enviromental Systems Products. RSD4600 Operator's Manual [R]. U. S. : ESP, 2005. 1-23.
- [4] Clean AIR Technologies Intenational INC. OEM-2100 Montana System Operation Manual [R]. U. S. : Clean AIR, 2003. 1-37.
- [5] 莫非, 于雷, 宋国华. 车载尾气检测技术及相关研究综述[J]. 车辆与动力技术, 2006, 8 (4): 57-61.
- [6] 郭淑霞, 于雷, 宋国华. 重型柴油车实测排放因子和 MOBILE6 预测值的对比分析[J]. 安全与环境工程, 2007, 14 (2): 17-21.
- [7] 张潇, 于雷, 宋国华. 基于 PEMS 技术的交叉口尾气排放特性分析[J]. 安全与环境工程, 2006, 13 (3): 50-54.
- [8] 王文, 于雷, 杨方. 基于 OEM 技术的机动车行驶周期的研究[J]. 交通环保, 2004, 25 (2): 14-17.
- [9] 刘娟. 基于实时数据修正的尾气排放因子获取技术与方法实现 [D]. 北京: 北京交通大学, 硕士学位论文, 2006.
- [10] GB 17691-2001, 车用压燃式发动机排气污染物排放限制及测量方法[S].
- [11] GB 17691-2005, 车用压燃式、气体燃料点燃式发动机与汽车机排气污染物排放限制及测量方法 (中国 III、IV、V 阶段) [S].
- [12] Kamakate, F. Sacramento Emergency Clean Air and Transportation Program Methodology Documentation [R]. California: ADL-Acurex Enviromental, 2002.
- [13] Nelson English, Loxton and Andrews Pty. Ltd. A Review of Dynamometer Correlations, In-service Strategies and Engine Deterioration [R]. Adelaide: National Environment Protection Council, 2000.

通讯作者: 于雷 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事汽车尾气排放探测与建模、城市交通管理与规划等方面的研究。E-mail: leiyu@entouch.net