

应用车载测试系统研究轻型机动车在实际道路上的排放特征

王海鲲¹, 傅立新^{1*}, 周昱¹, 林鑫¹, 陈爱忠², 葛卫华^{1,3}, 杜譔¹

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 深圳市环保局环境信息中心, 深圳 518026; 3. 解放军防化指挥工程学院, 北京 102205)

摘要: 采用一套车载排放测试系统, 对深圳市 7 辆具有代表性的轻型车辆进行了实际道路排放测试. 根据测试结果, 分析了机动车运行工况对排放的影响, 比较了基于油耗和行驶里程的排放因子, 并计算了各测试车辆的平均排放因子. 结果表明, 深圳市轻型机动车加速和减速运行模式共占整个运行时间的 66.7% 和行驶里程的 80.3%, 对各种污染物的贡献率达 74.6% ~ 79.2%, 并且加速模式下的排放水平明显高于其他运行模式; 基于油耗的排放因子受车速的影响较小, 可以避免因机动车运行工况不同所带来的排放差异, 从宏观尺度更为合理地预测机动车污染物排放量; 车辆技术水平对排放影响很大, 化油器车的 CO、HC 和 NO_x 排放因子分别是欧 III 车的 19.9 ~ 20.5、5.6 ~ 26.1 和 1.8 ~ 2.0 倍; 我国在进行轻型车排放测试时使用 ECE + EUDC 工况, 不能反映我国城市实际道路行驶工况下的机动车排放水平.

关键词: 车载测试系统; 机动车排放; 实际道路; 运行模式

中图分类号: X701 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2970-05

Investigation of Emission Characteristics for Light Duty Vehicles with a Portable Emission Measurement System

WANG Hai-kun¹, FU Li-xin¹, ZHOU Yu¹, LIN Xin¹, CHEN Ai-zhong², GE Wei-hua^{1,3}, DU Xuan¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Environmental Information Center of Shenzhen Environmental Protection Bureau, Shenzhen 518026, China; 3. Command and Engineering College of Chemical Defense of Chinese PLA, Beijing 102205, China)

Abstract: Emission from 7 typical light-duty vehicles under actual driving conditions was monitored using a portable emission measurement system to gather data for characterization of the real world vehicle emission in Shenzhen, including the effects of driving modes on vehicle emission, comparison of fuel consumption based emission factors ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$) with mileage based emission factors ($\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$), and the average emission factors of the monitored vehicles. The acceleration and deceleration modes accounted for 66.7% of total travel time, 80.3% of traveling distance and 74.6%-79.2% of vehicle emission; the acceleration mode contributed more than other driving modes. The fuel based emission factors were less dependent on the driving speed; they may be utilized in building macro-scale vehicle emission inventory with smaller sensitivity to the vehicle driving conditions. The effect of vehicle technology on vehicle emission was significant; the emission factors of CO, HC and NO_x of carbureted vehicles were 19.9-20.5, 5.6-26.1 and 1.8-2.0 times the more advanced vehicles of Euro III, respectively. Using the ECE + EUDC driving cycle would not produce the desired real-world emission rates of light duty vehicles in a typical Chinese city.

Key words: portable emission measurement system; vehicle emission; real world; driving mode

机动车排放已经成为我国城市大气污染的主要来源^[1]. 目前, 我国研究者主要利用美国环保局的 MOBILE 模型^[2~4] 或者欧盟环保署的 COPERT 模型^[5,6] 对国内的机动车污染物排放量进行计算, 较好地反映了我国宏观尺度的机动车污染物排放水平. 但是, 这些模型中的排放因子主要通过实验室底盘测功机测量机动车在标准测试循环下的平均排放状况来获得, 不能反应机动车在不同时空分布下的排放特征, 而这对于通过城市交通流管理来控制机动车污染物排放具有重要的参考意义. 此外, 实验室标准测试循环与实际道路机动车运行特征存在较大的

差异, 实验室测试结果往往不能反映实际道路机动车的真实排放水平. 因此, 研究机动车实际道路的排放特征具有重要意义.

车载排放测试能够获得机动车的瞬时排放数据, 可以为机动车在实际道路上的排放特征分析和模拟提供可靠的数据支持, 因此车载排放测试正逐渐成为机动车排放研究的热点. 比利时 Flemish 技术

收稿日期: 2007-10-17; 修订日期: 2007-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50678092)

作者简介: 王海鲲(1979~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为机动车污染控制, E-mail: whk06@mails.tsinghua.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: fuchen@tsinghua.edu.cn

研究所 (VITO)^[7,8] 和美国北卡罗莱纳州立大学 (NCSU)^[9,10] 的研究者们分别利用 VOEM 和 OEM 2100 车载测试系统,研究了轻型车行驶特征对排放的影响.国内的天津大学^[11,12]、香港理工大学^[13]、清华大学^[14,15] 和上海市环境科学研究院^[16~20] 等也做了轻型车和重型车车载排放测试研究.但是,这类方法操作难度大,耗时长,因此样本数也十分有限.

本研究利用清华大学开发的车载测试系统,分析了不同运行工况对深圳市轻型汽油车排放的影响,旨在为我国机动车排放模型的开发和机动车污染控制提供必要的基础数据.

1 材料与方法

1.1 测试设备

本研究基于清华大学建立的机动车排放测试系统,对深圳市机动车实际道路排放水平进行了测试,测试系统如图 1 所示.

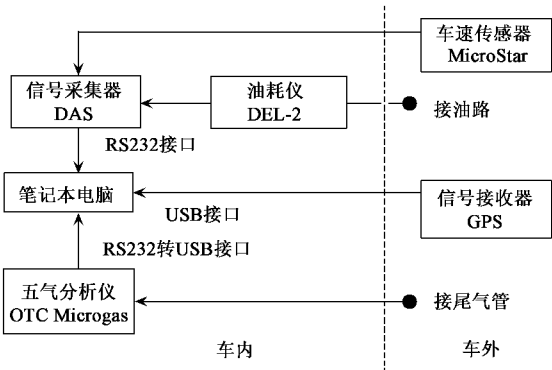


图 1 车载排放测试系统
Fig.1 Sketch of on-road emissions test system

利用 OTC Microgas 五气分析仪测量机动车尾气排放中 HC、CO、NO_x、CO₂、O₂ 的实时体积浓度.其中,HC、CO 和 CO₂ 采用不分光红外分析法 (NDIR) 测量,NO_x 和 O₂ 采用电化学传感器测量.利用 Corrys-Datron Microstar 非接触式雷达传感器测试机动车的逐时速度、距离及加速度.利用 Corrys-Datron DFL-2 油耗仪测量车辆的瞬时油耗.采用集思宝 (Garmin) Vista GIS 采集器的气压测高功能测试道路坡度.在本系统中五气分析仪、车速传感器、油耗仪都以等步长数字信号将瞬时测量数据实时传送到计算机内存储.道路坡度数据在测试结束后导入计算机.

1.2 测试路线

根据交管部门和城市规划部门对深圳市交通道

路不同类型的划分,深圳道路可分为高速公路、环城快速干道、城市主干线、城市次干线和支路,共 5 大类.本研究的测试路线位于深圳市的罗湖区、福田区、南山区和宝安区,涵盖了深圳市区内主要道路和车流分布,同时也覆盖了城市规划部门划分的 5 种道路类型.

测试时间为 2004 年 11 月和 2005 年 1 月,涵盖了工作日和非工作日,从 07:30 ~ 19:00,包含了 1 d 中车流量的早晚高峰时间段.测试车辆跟随道路车流,以反映实际道路机动车运行工况.

1.3 测试车辆

为了使测试结果能够反映轻型车的实际排放水平,本研究选择了深圳市机动车保有量较大的 7 种车型进行测试(如表 1 所示).它们代表了深圳市不同控制水平和车龄的车辆.其中,2 号和 7 号车属于化油器车;1 号、3 号和 4 号车符合欧 I 标准;5 号车符合欧 II 标准;6 号车为欧 III 多点电喷车.另外,1 号和 7 号车属于商务用车;4 号和 5 号车为出租车;其他为家庭用车.

表 1 测试车辆技术参数						
Table 1 Technical information of tested vehicles						
编号	车型	排量 /L	基准质量 /kg	登记 年份	行驶里程 × 10 ⁴ /km	技术类型
1	金杯	1.6	2 800	2001	12	单点电喷
2	捷达 CL	1.8	1 470	1999	16	化油器
3	帕萨特	1.8	1 775	2002	9	多点电喷
4	捷达 CL	1.6	1 480	2001	60	多点电喷
5	桑塔纳 2000	1.8	1 585	2003	30	电喷
6	别克 SGM	2.0	1 863	2004	1.56	多点电喷
7	三菱帕杰罗	2.0	2 920	1996	27.3	化油器

2 结果与讨论

2.1 运行模式对排放的影响

为了更好地研究机动车运行模式对排放的影响,对机动车实时排放数据进行了分析.图 2 显示了 3 号车在实际道路上的瞬时速度和排放,其余车辆与 3 号车相似.

可见,机动车的瞬时排放速率与运行工况关系密切,在加速状态下的污染物排放速率明显高于其他运行状态,特别是在急加速(车速较高的情况下加速)状态下,其排放速率更高.图 3 显示该车在怠速 ($v = 0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$)、加速 ($v \neq 0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 且 $a > 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$)、减速 ($v \neq 0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 且 $a < -0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) 和匀速 ($v \neq 0 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 且 $-0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2} \leq a \leq 0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$) 运行模式下排放速率.可以看出,对于各种污染物而

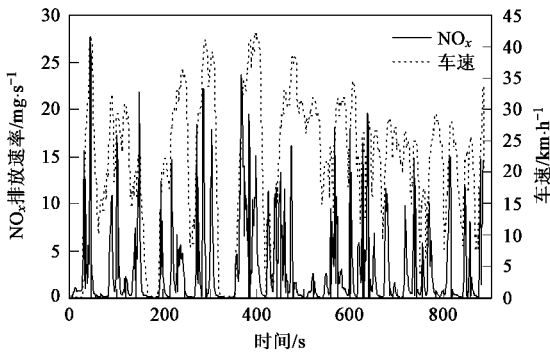


图2 3号车 NO_x 实时排放速率

Fig.2 Second-by-second NO_x emissions for 3[#] vehicle in real-world

言,该车在加速状态下的排放速率分别为怠速、减速和匀速状态下的 2.6 ~ 12.4、1.6 ~ 3.1 和 1.4 ~ 1.9 倍,这个结果与 Frey 等^[9]的研究相似.

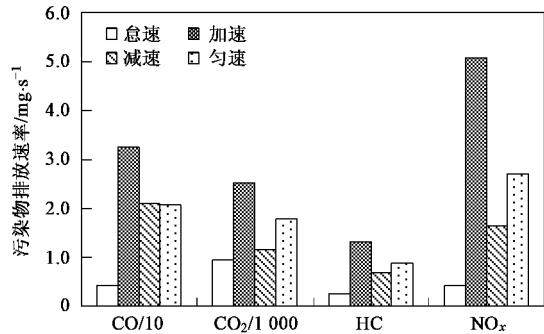


图3 3号车不同运行模式下的排放因子

Fig.3 Average modal emission rates for 3[#] vehicle in real-world

本研究还考察了不同运行模式对整个行驶过程的排放贡献,结果如表 2 所示.可见,深圳市机动车大部分时间处于加速或减速运行状态,2 种状态共占整个运行时间的 66.7%和行驶里程的 80.3%.其中,加速状态时间比为 34.0%,行驶里程占 42.1%,对各种污染物的排放贡献达 45.5% ~ 59.0%,是机动车污染物排放的主要运行模式;减速状态对各种污染物的贡献率为 22.2% ~ 30.2%,远低于其对时间和行驶里程的贡献率,特别是对 NO_x,其贡献率仅为 22.2%,这与减速状态下发动机的燃烧温度较低有关.可见,机动车频繁地加减速特别是急加速过程会增加其运行过程的排放,因此必须改善道路状况,减少机动车加减速的频率,以降低机动车污染.

2.2 油耗排放因子与里程排放因子

目前广泛应用的机动车排放因子主要包括 2

表 2 1~7 号车不同运行模式对排放、时间和里程的平均贡献率/%
Table 2 Average distribution of idle, acceleration, deceleration and cruise with respect to travel time, distance traveled and emissions for 7 vehicles/%

运行模式	时间	行驶里程	CO	HC	NO _x
怠速	12.8	0.0	6.8	6.3	0.8
加速	34.0	42.1	45.5	47.3	59.0
减速	32.7	38.2	30.2	27.3	22.2
匀速	20.5	19.7	17.5	19.1	17.9

类,分别基于行驶里程($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$)和油耗($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$).国内在建立机动车排放清单时,主要采用的是基于行驶里程的排放因子,具体的方法是:先应用模型计算机动车在平均速度下的里程排放因子,再乘以相应的行驶里程获得机动车的排放量.但是,由前面的讨论可知,即使在相同的运行速度下,由于加速度不同,机动车排放因子差别也很大;并且,影响机动车活动水平的因素很多,很难准确地获得机动车行驶里程数据.因此,这种方法建立的机动车排放清单受到诸多质疑^[21].

本研究利用车载测试获得的机动车瞬时运行工况和排放数据,对这 2 类排放因子随速度变化的敏感性进行了分析,结果见图 4.

可见,CO、CO₂ 和 HC 的里程排放因子均随速度的增加呈下降趋势,且对速度变化非常敏感,它们在速度区间(5, 10] $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的排放因子分别是(55, 60] $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时 6.0、4.1 和 2.8 倍;而油耗排放因子随速度增加变化平缓,在速度区间(5, 10] $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时的排放因子(g/L)分别是(55, 60] $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时 1.4、1.0 和 0.7 倍.但是,NO_x 正好与上述 3 种污染物相反,其油耗排放因子随速度增加而增加,而里程排放因子对速度变化并不敏感,这与 Shah 等^[22]和黄成等^[20]的研究结果相似.因此,在缺乏机动车运行工况数据时,应用基于油耗的排放因子建立城市机动车排放清单,可以避免运行工况对排放的影响,从宏观尺度合理地预测机动车 CO、CO₂ 和 HC 的排放量^[23].

2.3 不同技术车辆的排放因子

本研究中,各测试车辆的平均速度从 15.1 ~ 45.7 $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ 不等,这是因为不同车辆在测试过程中的路线有所区别,其运行工况也不相同,而运行工况对排放的影响很大.为了便于比较,本研究基于机动车比功率(vehicle specific power, VSP)参数^[24],将实际运行工况分成不同的 VSP 区间,得到不同区间的平均油耗和排放因子,并按照 ECE + EUDC 混合工况的 VSP 区间分布加权求和,获得基于 ECE + EUDC 工况的标准排放因子^[25],结果如表 3 所示.

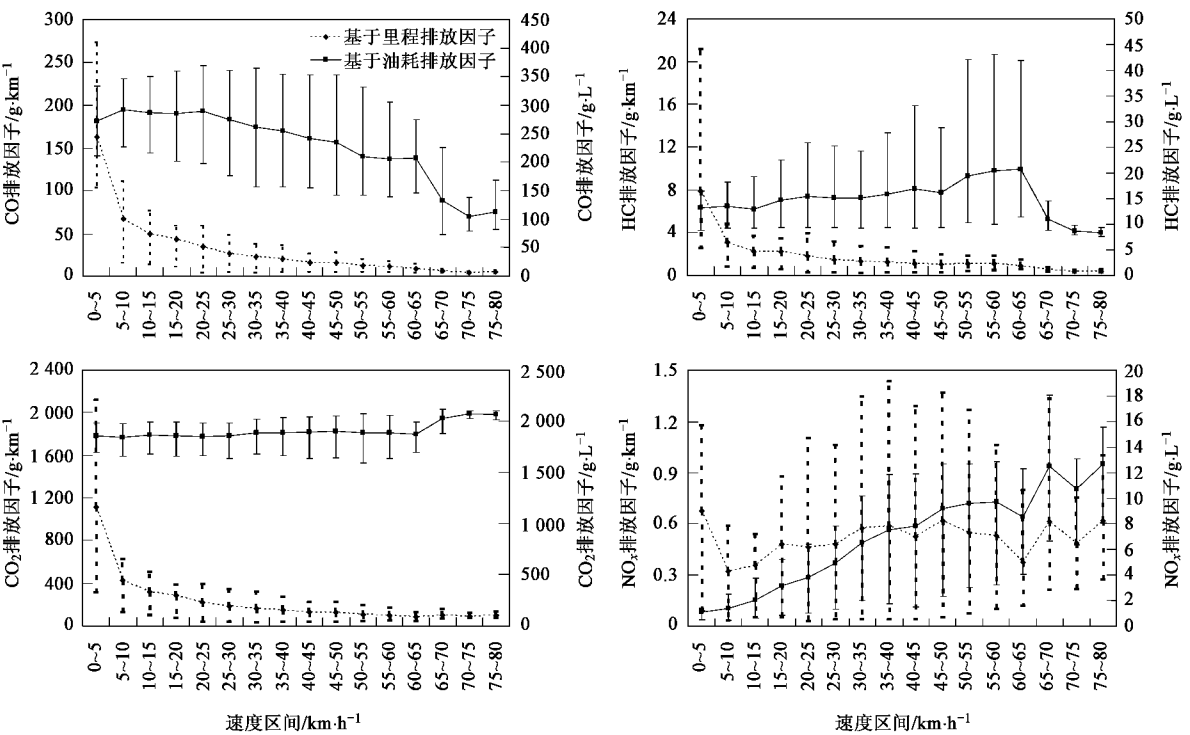


图 4 2 号车不同速度区间对应的油耗和里程排放因子

Fig.4 Influence of speed on fuel-based and VKT-based emission factors for 2[#] vehicle

表 3 测试车辆的燃油经济性及排放水平

Table 3 Fuel consumption rates and emission factors for the tested vehicles

车辆编号	排放标准	平均速度 /km·h ⁻¹	百公里 油耗/L	实际排放因子/g·km ⁻¹			ECE + EUDC 排放因子/g·km ⁻¹		
				CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x
1	欧Ⅰ	21.2	13.8	7.28	0.21	0.1	5.32	0.15	0.95
2	—	25.2	8	19.46	1.17	0.49	14.89	0.96	0.46
3	欧Ⅰ	27.1	9.7	3.01	0.12	0.38	2.5	0.1	0.35
4	欧Ⅰ	38.1	7.1	14.52	1.02	0.15	12.23	0.87	0.25
5	欧Ⅱ	15.1	12.7	2.39	0.58	0.24	1.63	0.37	0.2
6	欧Ⅲ	20	10.1	0.95	0.21	0.26	0.62	0.14	0.18
7	—	45.7	7.4	18.86	5.49	0.53	24.63	7.13	0.62

可见,随着机动车排放标准的严化,单车排放水平逐渐下降,排放因子由高到低依次为化油器车和排放标准分别达到欧Ⅰ、欧Ⅱ、欧Ⅲ的车辆;但是应当看到,即使是同一排放标准的车型,不同车辆之间的排放水平也存在差异.表中的1、3、4号车都满足欧Ⅰ排放标准,但是4号车在ECE + EUDC工况下的CO和HC的排放因子为12.23 g·km⁻¹和0.87 g·km⁻¹,分别是2号车和3号车的2.3、5.8倍和4.9、8.8倍,这是因为4号车是出租车,其累计行驶里程明显高于1号和3号车,且维护状况较差.因此,在建立城市机动车排放清单时,有必要区别于一般的轿车,单独考虑出租车的排放.

另外,从表3还可以看出,同一车辆在实际道路和ECE + EUDC工况(平均速度为33.3 km·h⁻¹)下的

排放因子存在一定的差异.除7号车外,其余车辆在ECE + EUDC工况下的CO和HC排放因子比实际工况小15.8% ~ 34.7%和14.7% ~ 36.2%,而2种工况的NO_x排放因子也存在较大差异.这是因为深圳市实际道路工况较差,平均速度一般 < 33.3 km·h⁻¹,而我国目前在进行轻型车实验室排放测试时,仍然使用欧洲的ECE + EUDC工况,不能够反映我国城市实际道路行驶工况下的机动车排放水平.

3 结论

(1) 机动车运行工况对排放的影响很大,在加速(特别是急加速)状态下的污染物排放速率明显高于其他运行状态.深圳市机动车大部分时间处于加速或减速运行状态,2种状态共占整个运行时间的

66.7%和行驶里程的 80.3%,对各种污染物的贡献率达 74.6%~79.2%。因此,必须加强交通管理,减少车辆的不稳定运行,从而减少机动车污染物的排放。

(2)与基于行驶里程的排放因子相比,油耗排放因子可以避免因机动车运行工况不同所带来的排放差异,在无法准确地获取机动车活动水平时,其可以从宏观尺度更为合理地预测机动车 CO、CO₂ 和 HC 排放量。

(3)提高车辆技术水平是减少机动车排放的有效措施。本研究的结果表明,2 号化油器车的 CO、HC 和 NO_x 排放因子分别是 6 号欧Ⅲ车的 20.5、5.6 和 1.8 倍。而且,由于出租车用途的特殊性,其排放因子明显高于同一技术水平的其他轿车,在建立城市机动车排放清单时有必要单独考虑。

(4)我国目前在进行轻型车排放测试时使用欧洲的 ECE + EUDC 工况,不能反映我国城市实际道路行驶工况下的机动车真实排放水平,有必要建立能够反映我国实际道路运行特征的行驶工况。

参考文献:

- [1] 郝吉明,贺克斌,傅立新,等.城市机动车污染控制:国际经验分析与中国的研究成果[M].北京:中国环境科学出版社,2000.
- [2] 傅立新,贺克斌,何东全,等. MOBILE 汽车源排放因子计算模型研究[J]. 环境科学学报,1997, 17(4): 474-479.
- [3] 傅立新,郝吉明,何东全,等.北京市机动车污染物排放特征[J]. 环境科学,2000, 21(3): 68-70.
- [4] 何东全,郝吉明,贺克斌,等.应用模型计算机动车排放因子[J]. 环境科学,1998, 19(3): 7-10.
- [5] 谢绍东,宋翔宇,申新华.应用 COPERT Ⅲ 模型计算中国机动车排放因子[J]. 环境科学,2006, 27(3): 415-419.
- [6] 宋翔宇,谢绍东.中国机动车排放清单的建立[J]. 环境科学,2006, 27(6): 1041-1045.
- [7] de Vlieger I. On-board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger Cars [J]. Atmospheric Environment, 1997, 31: 3753-3761.
- [8] de Vlieger I, de Keukeleere D, Kretzschmar J G. Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars [J]. Atmospheric Environment, 2000, 34: 4649-4655.

- [9] Frey H, Unal A, Roupail N M, *et al.* On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2003, 53: 992-1002.
- [10] Unal A, Frey H, Roupail N M. Quantification of highway vehicle emissions hot spots based upon on-board measurements [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2004, 54: 130-140.
- [11] 赵慧,张镇顺,熊永达.实际道路行驶中汽车排放特性的研究[J]. 燃烧科学与技术,1999, 5(1): 100-107.
- [12] 杜青,杨廷相,郑伟,等.机动车实际道路排放特性及若干影响因素的研究[J]. 内燃机学报,2002, 20(4): 297-302.
- [13] Tong H Y, Hung W T, Cheung C S. On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions [J]. Journal of Air Waste Management Association, 2000, 50: 543-554.
- [14] 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.
- [15] 姚志良,马永亮,贺克斌,等.宁波市实际道路下汽车排放特征的研究[J]. 环境科学学报,2006, 26(8): 1229-1234.
- [16] 陈长虹,景启国,王海鲲,等.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,2005, 25(7): 870-878.
- [17] 潘汉生,陈长虹,景启国,等.轻型柴油车排放特征与机动车比功率的实测研究[J]. 环境科学学报,2005, 25(10): 1370-1313.
- [18] 景启国,陈长虹,潘汉生,等.公交柴油车道路排放特征的实测研究初探[J]. 环境科学学报,2006, 26(9): 1405-1411.
- [19] 黄成,陈长虹,景启国,等.重型柴油车车载排放实测与加载影响研究[J]. 环境科学,2006, 27(11): 2303-2308.
- [20] 黄成,陈长虹,景启国,等.重型柴油车实际道路排放与行驶工况的相关性研究[J]. 环境科学学报,2007, 27(2): 177-184.
- [21] Gertler A W, Pierson W R. Motor vehicle emission modeling issues [J]. Science of the Total Environment, 1994, 146/147: 333-338.
- [22] Shah S D, Johnson K C, Miller J W, *et al.* Emission rates of regulated pollutants from on-road heavy-duty diesel vehicles [J]. Atmospheric Environment, 2006, 40: 147-153.
- [23] Yanowitz J, McCormick R L, Graboski M S. In-use emissions from heavy-duty diesel vehicles [J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34: 729-740.
- [24] Jimenez J L. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing [D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1999. 53-103.
- [25] 林鑫.宏观微观相结合的机动车排放清单改进研究[D].北京:清华大学,2007. 12-31.