

低速汽车实际道路气态污染物排放特征

姚志良¹, 申现宝², 张英志², 王岐东²

1. 北京工商大学食品学院, 北京 100048

2. 清华大学环境学院, 北京 100084

摘要 利用 SEMTECH-DS 车载排放测试系统, 对 6 辆典型低速汽车进行实际道路车载排放测试, 获得测试车辆逐秒速度, CO_2 , CO , NO_x 和碳氢化合物 (HC) 等气态污染物排放数据。基于测试数据, 对工况与污染物排放之间的关联进行解析, 计算并分析了 4 种污染物的排放因子。结果显示, 低速汽车 CO_2 , CO , NO_x 和 HC 4 种污染物排放因子总体上随速度增加而下降, 随加速度增加而升高; 不同行驶下的排放速率: 加速 > 匀速 > 减速 > 怠速; 各污染物排放速率与比功率 (VSP) 呈现很好的相关规律。测试低速汽车 CO_2 , CO , NO_x 和 HC 平均排放因子分别为 110.1, 1.66, 1.78 和 $0.49\text{g}/\text{km}^{-1}$, 其中 CO 与国 II 轻型柴油车排放限值相当, NO_x 和 HC 与国 I 轻型柴油车排放限值相当。

关键词 低速汽车; 排放因子; 排放特征; 车载排放测试

中图分类号 X501

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.25.010

On-road Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from Low-speed Vehicles

YAO Zhiliang¹, SHEN Xianbao², ZHANG Yingzhi², WANG Qidong²

1. School of Food and Chemical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China

2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract On-road emission tests were conducted for six low-speed vehicles using SEMTECH-DS, a Portable Emission Measurement System (PEMS). The instantaneous speed and emission concentration data of CO_2 , CO , NO_x and HC were collected, and the relationship between the driving cycle and emission, and the emission factors are analyzed based on the testing data. The results show that the emission factors of CO_2 , CO , NO_x and HC decrease with the increase of speed and increase with the increase of acceleration; the emission rates are the highest in the acceleration mode, followed by the cruising mode, and are the lowest in the idling mode. The emission rates of the four pollutants for low-speed vehicles have a very good correlation with VSP; the average emission factors of the CO_2 , CO , NO_x and HC for tested low-speed vehicles are 110.1, 1.66, 1.78 and $0.49\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$, respectively. The CO emission factors are comparable to the regulated values of light-duty diesel trucks with Nation II technology; and NO_x and HC emission factors are comparable to the regulated values of light-duty diesel trucks with Nation I technology.

Keywords low-speed vehicles; emission factors; emission characteristics; PEMS

0 引言

自 20 世纪 80 年代初以来, 低速汽车 (原名农用运输车, 包括三轮汽车和低速货车) 因价格便宜、适应中国农村道路条件等特点得到迅速发展。随之而来, 低速汽车的污染问题日益突出, 对北京市 12 个郊区县进行的低速汽车尾气排放抽样测试调查结果显示, 装备单缸柴油机的车辆排放合格率为 26.9%, 装备多缸柴油机车辆仅为 19.5%^[1]。于 2010 年 5 月

出台的《关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见》^[2] 指出, 空气污染的控制不能仅局限于单个城市, 需要区域协同控制。而低速汽车主要活动在农村和城市基础设施不完善、管理混乱、治安与环境卫生相对较差的城乡结合部和新建开发区, 要推进和实现大气污染的联防联控必须考虑低速汽车的排放与控制问题。因此, 开展低速汽车排放研究具有重要意义。

收稿日期: 2011-02-21; 修回日期: 2011-06-25

基金项目: 中国高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2006AA06A305)

作者简介: 姚志良, 讲师, 研究方向为机动车污染控制, 电子邮箱: yaozhl@th.btbu.edu.cn

通常机动车的排放测试在台架上进行,然而由于机动车排放受行驶工况影响很大^[3-5],台架实验受工况等条件限制难以反映车辆真实排放状况。近年来,随着人们认识的深入和车载测试仪器的快速发展,国内研究人员也开始利用车载测试系统对机动车开展排放测试研究^[6-10],然而对低速汽车的排放测试研究还仅限于实验室发动机台架测试,实际道路车载排放测试研究还处于空白。因此,十分有必要对低速汽车实际道路排放特征进行研究。

本研究选择 6 辆典型低速汽车进行实际道路车载排放测试,深入解析低速汽车在实际道路行驶过程中气态污染物的排放特征,为低速汽车的污染物排放定量以及科学有效控制提供参考和依据。

1 测试方法

1.1 测试仪器

本文采用美国 Sensors 公司生产的 SEMTECH-DS 排放分

析仪用于车载测试^[1],该排放分析仪能测试低速汽车的 CO、CO₂、总碳氢(THC)、NO、NO₂ 和 O₂ 的瞬时浓度,其中,CO、CO₂ 采用非分散红外分析法(NDIR)测量,THC 采用氢火焰离子检测器(FID)测量;NO、NO₂ 采用非分散紫外分析法(NDUV)测量,O₂ 含量采用电化学法测量。此外,SEMTECH-DS 自带全球定位系统(GPS)可记录车辆在实际行驶工况下的速度和海拔高度数据。每次测量前需对仪器进行 1h 的预热,然后利用纯 N₂ 进行调零,采用标准气体进行标定,以保证测试结果的准确性。

1.2 测试内容

本研究在北京市进行,采用固定路线紧跟车流方式。测试路线选择在城郊低速汽车活动频繁的一般道路,总长 10.7km。

选取正在运营的市场销售较多具有代表性并且车况正常的低速汽车进行测试,共选择了 3 辆三轮汽车和 3 辆低速货车,测试车辆信息如表 1 所示。

表 1 测试低速汽车信息

Table 1 Information of tested low-speed vehicles

编号	出厂年月	型号	发动机型号	发动机功率/kW	总质量/kg
1 [#]	2005-11	时风 7YPJ-1150A2 三轮汽车	ZS1150	12.1	1680
2 [#]	2005-01	时风 7YPJ-14150P1 三轮汽车	ZS1115	14.8	1730
3 [#]	2002-08	时风 7YPJ-950 三轮汽车	ZS1105	11.3	1280
4 [#]	2001-03	神宇 DFA2815CD 低速货车	玉柴 6015	58	3875
5 [#]	2009-02	时风 SF1710PD32 低速货车	ZS1125-2	20.2	2850
6 [#]	2008-10	时风 SF160T 低速货车	ZS1115-2	20.2	1710

2 结果与讨论

2.1 速度对排放的影响

为分析速度对排放因子的影响,将 (0,5], (5,10], (10,15], …, (55,60] 共 12 个速度区间匀速状态下的排放因子

进行平均处理。由于结果类似,本文以 2[#] 和 5[#] 车为例,分别代表三轮汽车和低速货车分析速度与排放因子关系,测试结果如表 2 所示,排放因子与速度的关系曲线如图 1 所示。结果显示,测试车辆 CO₂、CO、NO_x 和 HC 4 种污染物排放因子随速

表 2 2[#] 和 5[#] 测试车辆不同速度下污染物排放因子

Table 2 Emission factors of 2[#] and 5[#] tested vehicles under different driving speeds

速度 /(km·h ⁻¹)	污染物排放因子/(g·km ⁻¹)							
	CO ₂		CO		NO _x		HC	
	2 [#] 车	5 [#] 车	2 [#] 车	5 [#] 车	2 [#] 车	5 [#] 车	2 [#] 车	5 [#] 车
(0,5]	197.62	167.94	1.84	5.27	5.43	3.15	0.52	0.80
(5,10]	106.89	127.34	1.10	4.32	2.93	2.13	0.23	0.51
(10,15]	64.00	112.22	0.79	2.96	1.79	1.63	0.12	0.39
(15,20]	64.83	105.00	0.53	2.50	1.74	1.37	0.14	0.44
(20,25]	59.30	99.88	0.60	1.96	1.50	1.37	0.11	0.26
(25,30]	58.28	90.11	0.70	1.82	1.27	1.20	0.1	0.21
(30,35]	40.43	100.75	0.24	1.94	1.26	1.01	0.07	0.18
(35,40]	38.61	103.57	0.09	1.51	1.28	1.02	0.1	0.16
(40,45]	32.28	92.64	0.23	1.63	0.62	0.88	0.05	0.15
(45,50]	29.62	97.83	0.29	0.85	0.92	1.06	0.05	0.14
(50,55]	—	103.54	—	0.50	—	1.12	—	0.16
(55,60]	—	134.39	—	0.80	—	1.32	—	0.11

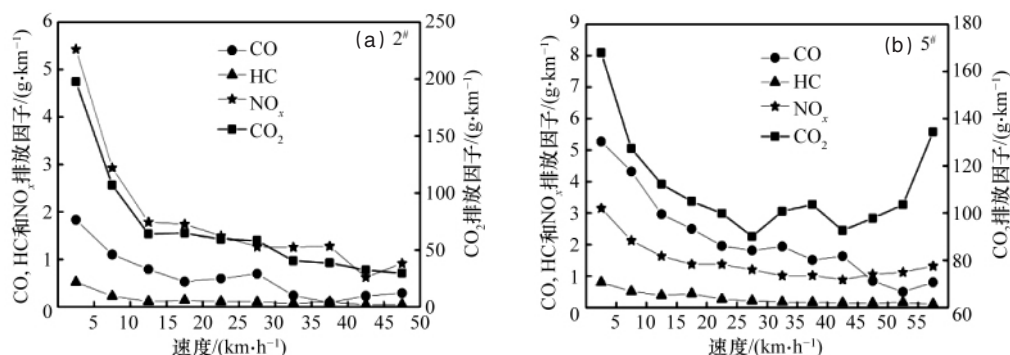


图 1 排放因子与速度关系

Fig. 1 Relationship between emission factors and speed

度增加先快速降低,随后缓慢降低,部分污染物如 NO_x 等在高速时排放因子会略有升高。总体而言,在低速汽车 40—50km/h 匀速行驶时,4 种污染物排放因子相对较低,可能是由于在 40—50km/h 速度区间,发动机处于较佳运行工况所致。

2.2 加速度对排放的影响

为分析加速度对排放的影响,取 5—10km/h 和 35—40km/h 两个速度区间分别代表低速和中速,然后将加速度分

成 $(-\infty, -1.5]$, $(-1.5, -1.0]$, $(-1, -0.6]$, $(-0.6, -0.3]$, $(-0.3, -0.1]$, $(-0.1, 0.1]$, $(0.1, 0.3]$, $(0.3, 0.6]$, $(0.6, 1.0]$, $(1.0, 1.5]$ 共 10 个加速度区间,分别计算各个区间内的平均排放因子。图 2 给出了 2[#] 和 5[#] 车加速度与排放因子的关系曲线。从图中可以看出,对于不同车辆,不同污染物的排放因子在不同速度段下的大小不同,随加速度增大而增加的程度也不尽相同,但升高的趋势一致。

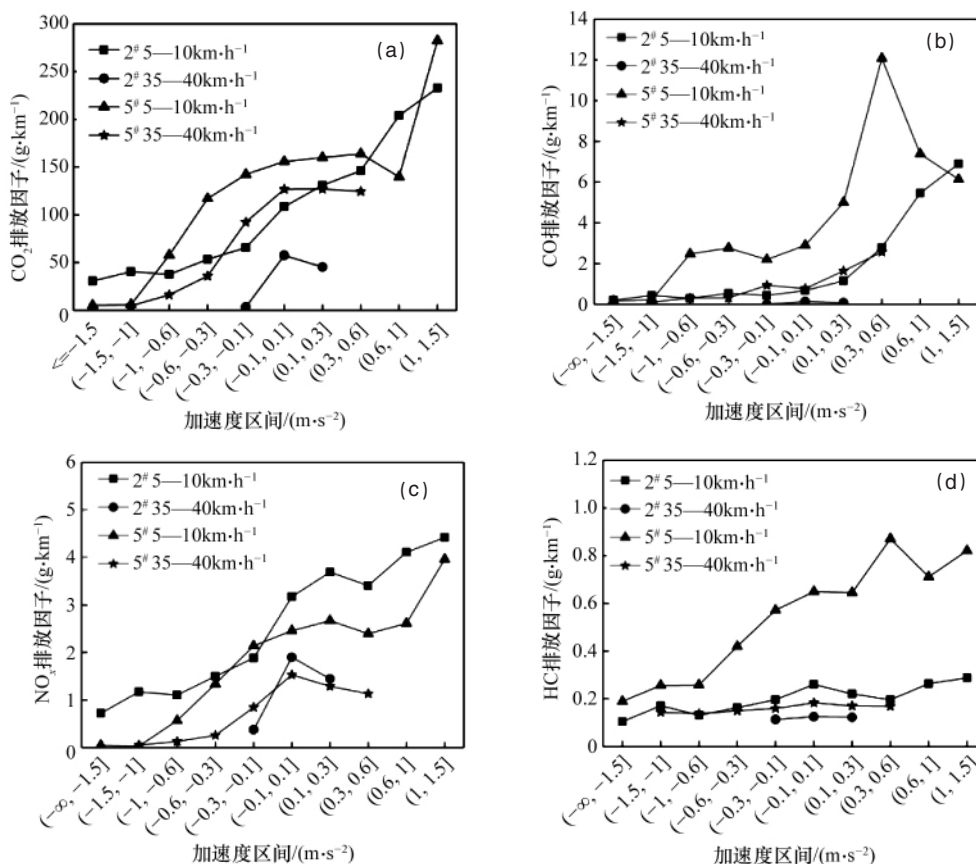


图 2 CO_2 (a), CO (b), NO_x (c) 和 HC (d) 排放因子与加速度的关系

Fig. 2 Relationship between emission factors of CO_2 (a), CO (b), NO_x (c), HC (d) and acceleration

2.3 行驶模式对排放的影响

图 3 列出了 1[#]—6[#] 低速汽车在怠速($v=0$)、加速($v \neq 0$ 且 $a > 0.1\text{m/s}^2$)、减速($v \neq 0$ 且 $a < -0.1\text{m/s}^2$)和匀速($v \neq 0$ 且 -0.1

$\text{m} \cdot \text{s}^{-2} \leq a \leq 0.1\text{m/s}^2$)^[12]行驶下的排放速率。

从图 3 可以看出,除个别车辆的个别污染物在减速和怠速模式受各车辆发动机自身状态影响出现反常外,绝大多数

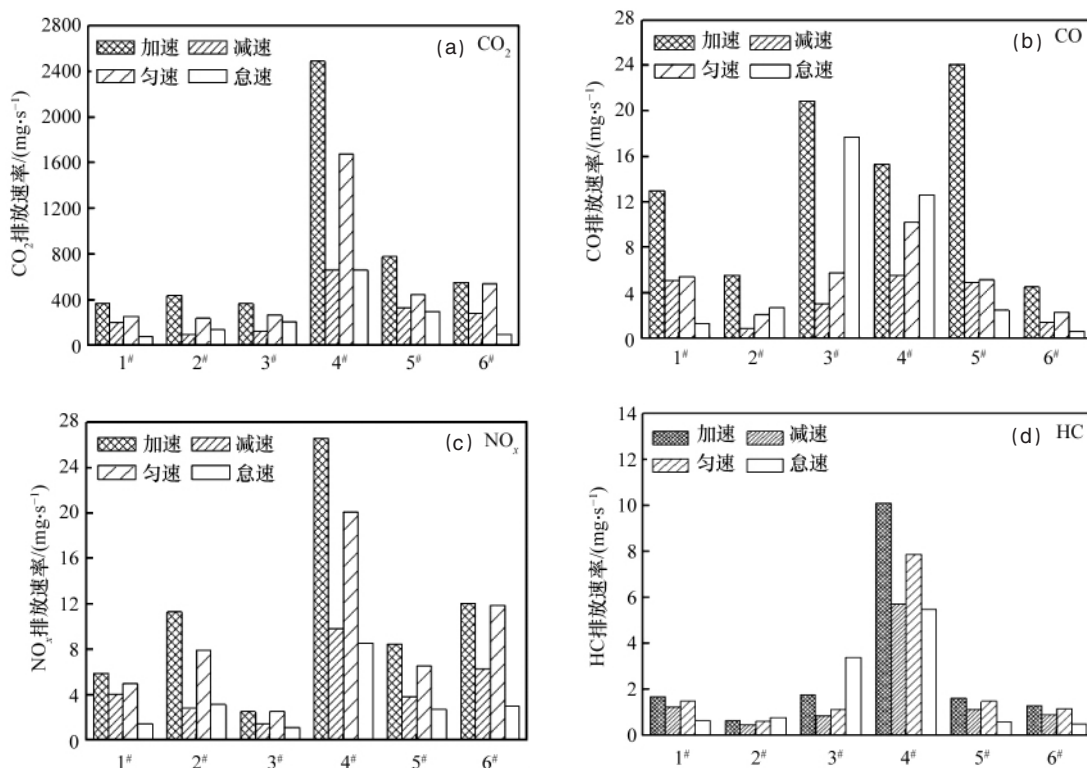


图3 1#—6#车不同行驶模式下的排放速率

Fig. 3 Average modal emission rates for 1#–6# vehicles in various driving modes

被测低速汽车4种污染物的瞬时排放速率在加速时最高,匀速次之,怠速最低。对于CO₂而言,加速模式的平均排放速率分别是匀速和减速模式的1.03—1.74倍和1.86—4.42倍;对于CO,加速模式分别是匀速和减速模式的1.5—4.65倍和2.23—6.79倍;对于NO_x,加速模式分别是匀速和减速模式的1.01—1.42倍和1.45—4.06倍;对于HC,加速模式分别是匀速和减速模式的1.02—1.58倍和1.43—2.13倍。导致上述现象的主要原因是由于车辆加速时,需要通过增加油料供应以提供足够的能量完成加速过程,发动机通常处于富燃状态,因而排放物的排放速率(特别是CO等不完全燃烧产物)会升高;减速和怠速时供油较少,排放速率较低。

表3给出了6辆测试车辆实际测试过程中不同行驶模式的平均排放贡献率。由表3可知,低速汽车大部分时间处于匀速和加速运行状态,其中加速状态占整个运行时间的32.8%和行驶里程的40.7%,但对各种污染物的平均贡献率为48.7%;减速状态对各种污染物的贡献率为13.7%—19.3%,远低于其对时间和行驶里程的贡献率。这一研究结果与非低速汽车的研究结论十分类似^[8]。机动车频繁加减速特别是急加速过程会增加行驶过程的排放,因此改善交通状况,减少加减速频率,可以降低低速汽车污染物的排放。

2.4 比功率对排放的影响

由以上研究可知,在实际行驶过程中,车辆排放受速度、加速度等多个参数综合影响,单一工况参数难以准确地模拟车辆在实际道路上的排放水平。根据José^[13]的研究,比功率

表3 测试车辆不同行驶模式平均排放贡献率

Table 3 Average distribution of durations in idling, acceleration, deceleration, and cruising modes and related emissions for tested vehicles

行驶	时间/s	行驶里程/km	平均排放贡献率/%			
			CO ₂	CO	NO _x	HC
加速	32.8	40.7	49.7	58.5	46.3	40.4
减速	25.0	27.1	14.3	13.6	15.5	19.3
匀速	27.3	32.2	30.4	20.6	31.4	30.0
怠速	14.9	0.0	5.6	7.3	6.8	10.3

(Vehicle Specific Power,VSP)综合了速度、加速度、坡度以及风阻等参数,可以更准确地模拟车辆在各行驶状况下的排放水平,计算公式为

$$VSP=v[1.1a+9.81(\arctan(\sin\theta))+0.132]+0.000302v^3 \quad (1)$$

其中, v 为车速,m/s; a 为加速度,m/s²; θ 为以弧度表示的道路坡度,本研究引入VSP,对其与低速汽车排放速率的关联进行解析。

图4给出了2#和5#车CO₂,CO,NO_x,HC排放速率与VSP的关系曲线(各污染物排放速率为单位VSP(1kW/t)的平均值)。由图4可知,VSP<0时,4种污染物的排放速率较低且随VSP增加变化不大;VSP=0时,4种污染物的排放速率出现拐点,在VSP>0时,4种污染物排放速率随VSP增加呈近似线性增长。VSP作为综合速度、加速度和坡度的一个模块化参

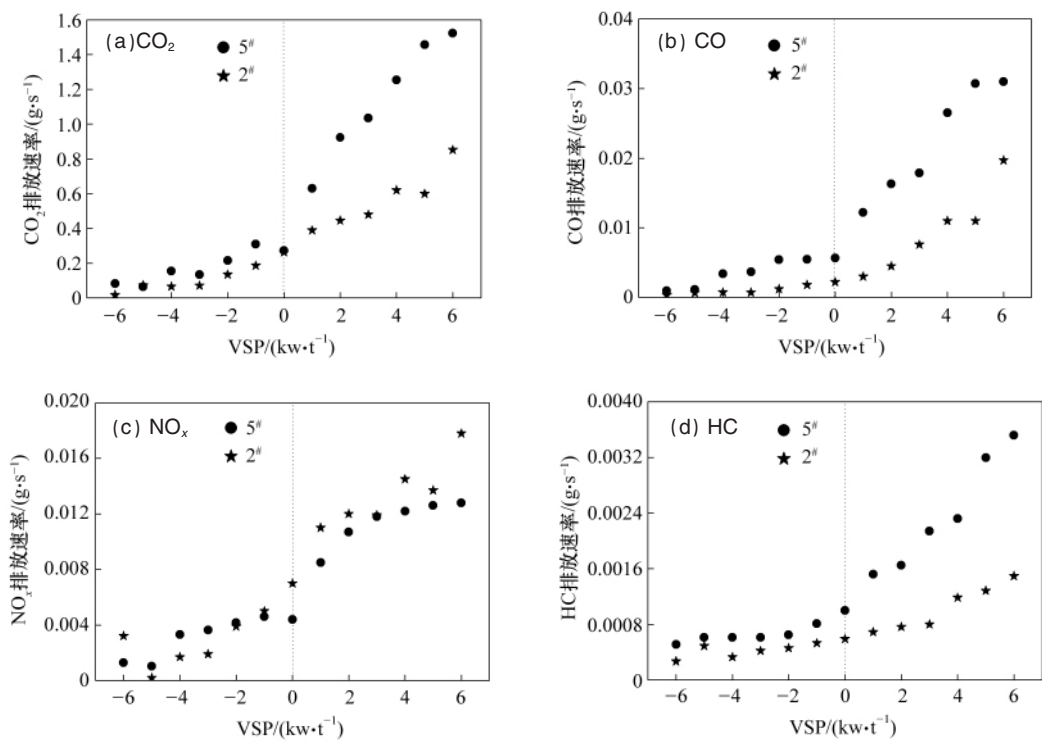


图 4 污染物排放速率与 VSP 关系

Fig. 4 Relationship between emission rates and VSP

数,与低速汽车具有很好的相关性,可以用以模拟低速汽车实际行驶工况下的排放情况。

2.5 平均排放因子

表 4 给出了 6 辆低速汽车排放因子的计算结果,从表中可知,测试车辆 CO₂,CO,NO_x 和 HC 平均排放因子分别为 110.1,1.66,1.78 和 0.49g/km。为了分析低速汽车的排放水平,本研究将测试排放因子与轻型柴油卡车的排放标准进行了

对比(表 4)。结果表明,CO 排放因子与机动车国 II 标准中轻型柴油卡车的排放限值相当,NO_x 和 HC 排放因子与国 I 标准中轻型柴油轻卡排放限值相当^[14-15],而目前中国机动车已经全面实施了国 III 标准,随着对其他类型汽车排放控制的进一步加剧,2000 多万辆的低速汽车的污染问题将会越来越突出,特别是其中的 NO_x 排放,因此加强对低速汽车排放的有效管理迫在眉睫。

表 4 测试车辆排放因子

Table 4 Emission factors for the tested vehicles

排放物	排放因子/(g·km ⁻¹)									国家标准限值(轻型柴油卡车)/(g·km ⁻¹)	
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	三轮汽车平均	低速货车平均	平均	国 I	国 II
CO ₂	73.2	65.8	65.6	262.7	108.1	85.2	68.2	152	110.1	—	—
CO	2.12	0.67	2.47	1.82	2.22	0.55	1.75	1.53	1.66	5.17	1.25
NO _x	1.31	1.77	0.60	3.07	1.36	1.92	1.23	1.89	1.78	1.96	1.3
HC	0.40	0.13	0.33	1.32	0.27	0.21	0.29	0.6	0.49		

3 结论

基于本研究低速汽车测试结果,主要结论如下。

(1) 总体而言,低速汽车 CO₂,CO,NO_x 和 HC 4 种污染物排放因子随速度增加而降低,随加速度的增大而升高。

(2) 测试低速汽车 CO₂,CO,NO_x 和 HC 4 种污染物瞬时排放速率,加速时最高,匀速次之,怠速最低;其中加速状态占整个运行时间的 32.8%和行驶里程的 40.7%,而对各种污染物的贡献率达 48.7%。

(3) 当 VSP<0 时,CO₂,CO,NO_x 和 HC 4 种污染物排放速率呈较低水平且变化不大,当 VSP>0 时,4 种污染物排放速率随 VSP 增加呈近似线性增长。

(4) 低速汽车 CO₂,CO,NO_x 和 HC 基于里程的平均排放因子分别为 110.1,1.66,1.78 和 0.49g/km,其中 CO 与国 II 轻型柴油车排放限值相当,NO_x 和 HC 与国 I 轻型柴油车排放限值相当。考虑到低速汽车的巨大保有量,需加大力度切实对低速汽车的污染排放进行控制。

参考文献 (References)

- [1] 胡淮庆, 张欣, 何涛. 北京市农用车及运输用拖拉机尾气排放现状及对策研究[J]. 北京汽车, 2005(2): 22-31.
Hu Zhunqing, Zhang Xin, He Tao. *Beijing Automotive Engineering*, 2005 (2): 22-31.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 关于推进大气污染联防联控工作改善区域空气质量的指导意见[EB/OL]. [2011-02-15]. http://zfs.mep.gov.cn/fg/gwyw/201005/t20100514_189497.htm.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Guidance of promoting joint prevention and control of air pollution and improving the regional air quality[EB/OL]. [2011-02-15]. http://zfs.mep.gov.cn/fg/gwyw/201005/t20100514_189497.htm.
- [3] Chan T L, Ning Z, Leung C W, et al. On-road remote sensing of petrol vehicle emissions measurement and emission factors estimation in Hong Kong[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(14): 2055-2066.
- [4] Joumard R, Andre R, Vidon R, et al. Influence of driving cycle on unit emissions from passenger cars [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34 (27): 4621-4628.
- [5] 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.
Huang Cheng, Chen Changhong, Jing Qiguo, et al. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2007, 27(2): 177-184.
- [6] 杨廷相, 蔡晓林, 杜青, 等. 实际道路上的车辆尾气排放因子和燃油消耗的研究[J]. 燃烧科学与技术, 2003, 9(2): 112-118.
Yang Yanxiang, Cai Xiaolin, Du Qing, et al. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2003, 9(2): 112-118.
- [7] 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 Jingnan, Hao Jiming, Fu Lixin, et al. *Environmental Science*, 2004, 25(3): 19-25.
- [8] 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.
Yao Zhiliang, Ma Yongliang, He Kebin, et al. *Acta Scientiae*

- Circumstantiae*, 2006, 26(8): 1229-1234.
- [9] 王海鲲, 傅立新, 周昱, 等. 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[J]. 环境科学, 2008, 29(10): 2970-2974.
Wang Haikun, Fu Lixin, Zhou Yu, et al. *Environmental Science*, 2008, 29(10): 2970-2974.
- [10] 付明亮, 王岐东, 姚志良, 等. 柴油卡车实际道路氮氧化物排放特征分析[J]. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2009, 27(1): 15-20.
Fu Mingliang, Wang Qidong, Yao Zhiliang, et al. *Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition*, 2009, 27 (1):15-20.
- [11] 申现宝, 王岐东, 姚志良, 等. 农用运输车实际道路油耗特征研究[J]. 北京工商大学学报: 自然科学版, 2010, 28(2): 71-75.
Shen Xianbao, Wang Qidong, Yao Zhiliang, et al. *Journal of Beijing Technology and Business University: Natural Science Edition*, 2010, 28 (2): 71-75.
- [12] Tong H Y, Hung W T, Cheung C S. On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions [J]. *Journal of the air and Waste Management Association*, 2000, 50(4): 543-554.
- [13] José L J. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [14] 国家环境保护总局. GB 18352.1—2001, 轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (I)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
State Environmental Protection Administration. GB 18352.1—2001, Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (I)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.
- [15] 国家环境保护总局. GB 18352.2—2001 轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (II)[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2001.
State Environmental Protection Administration. GB 18352.2—2001, Limits and measurement methods for emissions from light-duty vehicles (II)[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2001.

(责任编辑 岳臣)

·学术动态·

“第五届寒区水资源及其可持续利用学术研讨会”征文

由黑龙江大学黑龙江省水利学会与寒区水科学及国际河流研究会承办的“第五届寒区水资源及其可持续利用学术研讨会”拟于 2012 年 8 月 11—13 日在内蒙古自治区呼伦贝尔盟召开。

论文范围: 寒区冰情; 冰灾; 冰工程研究、气候变化条件下的雪; 水资源利用及其可持续发展量化研究; 冻土水文; 环境; 生态; 工程; 社会效应; 寒区地下水开发; 保护与利用、国际河流的资源; 环境; 法律; 人文研究; 黑龙江(阿穆尔河)流域研究以及寒区水科学研究平台与进展以及其他相关内容。

摘要截止日期: 2011 年 11 月 15 日; 论文截止日期: 2011 年 12 月 16 日。

电 话: 15204691920; 15846517926; 13258662595。

电子信箱: hanshui5@126.com。

通信地址: 黑龙江省哈尔滨市学府三道街 36 号(150080)。

大会网站: <http://m1359.meeting163.com/>。