

基于工况的城市机动车排放模型 DCMEM 的开发

王岐东¹, 霍红¹, 姚志良¹, 贺克斌¹, 于昕²

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 北京中宇绿源科技有限公司, 北京 100176)

摘要: 基于我国 5 个城市实际道路车载测试数据, 引入比功率(VSP)和发动机负荷(ES)作为反映机动车行驶状况的特征参数, 建立轻型车基于 VSP 和 ES 的 60 个排放单元 BIN 的排放率数据库, 开发了基于工况的城市机动车排放模型(DCMEM), 该模型能够计算城市或任一工况下轻型车不同车型的 CO、NO_x 和 HC 排放因子。DCMEM 模型计算值与上路测试结果相比, CO 与 NO_x 偏差 < 10%, HC < 18%。

关键词: 机动车; 排放模型; 行驶工况

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)11-3285-06

Development of the Driving Cycle-based Mobile Emission Model (DCMEM)

WANG Qi-dong¹, HUO Hong¹, YAO Zhi-liang¹, HE Ke-bin¹, YU Xin²

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Zhongyulvyan Technology Co. Ltd., Beijing 100176, China)

Abstract: Vehicle specific power (VSP) and engine stress (ES) were introduced to reflect the driving characteristics of vehicles in China. Emission rates of 60 BIN based on VSP and ES for light-duty vehicles were calculated on the basis of the on-board emission test data in 5 cities of China. The driving cycle-based mobile emission model (DCMEM) was developed to simulate CO, NO_x and HC emission factors of light-duty vehicles for different cities or driving cycles. The differences in CO and NO_x emission factors between the DCMEM simulation results and the on-board emissions testing results were less than 10%, and less than 18% for HC.

Key words: mobile vehicle; emission model; driving cycle

机动车污染已经成为城市空气污染的重要来源^[1,2]。在过去的十几年里, 尽管我国实施了一系列措施来控制机动车排放, 然而随着机动车保有量的迅速增长及其他相关因素的影响, 机动车排放污染问题依然十分严峻。因此, 需要研究者对城市机动车排放机制和规律进行更深入地研究, 以支持决策, 更好地控制机动车污染。

排放因子是机动车污染控制决策制定过程中的基础和关键。以往国内的相关研究主要基于国外的排放因子模型, 通过对模型主要参数的修正而获得国内的排放因子。其中较典型的机动车排放因子模型为美国国家环保局(USEPA)开发的 MOBILE 模型, 以及国际可持续发展研究中心(ISSRC)和加州大学河边分校(UCR)开发的 IVE 模型。基于平均速度的 MOBILE 模型是最早在我国使用的机动车排放因子模型, 目前已经在很多城市得到应用^[3,4]。与 MOBILE 模型相比, IVE 模型基于机动车行驶工况, 具有较高的分辨率, 其对车型的分类更适于发展中国家^[5,6]。目前 IVE 模型已在我国北京、上海和杭州等城市得到应用^[7~9]。

然而, 由于 MOBILE、IVE 等国外模型均基于国外车辆测试结果而建立, 其模型中的核心排放因子

库均来自美国 EPA 的测试数据。而与美国相比, 我国在车型分类及单车排放因子方面均存在较大差异, 导致模型模拟结果和中国的实际情况可能存在较大误差, 这在一定程度上将影响科学决策。到目前为止, 国内仍没有统一的、国家公认的机动车排放因子模型。因此, 开发和建立我国机动车排放因子模型已迫在眉睫, 这一工作的开展将对国家统一进行机动车污染治理工作起到重要的促进作用。

本研究以 IVE 排放因子模型的方法为基础, 采用了基于国内实测数据的核心排放因子库, 及适合我国实际情况的车型分类, 针对城市尺度, 建立基于工况的城市机动车排放模型, 即 DCMEM 模型(driving cycle-based mobile emission model)。该模型的开发将为我国控制机动车污染排放提供基础和依据。

1 实验描述

采用清华大学环境科学与工程系搭建的机动车车载排放测试系统, 对北京、重庆、长春、成都和吉林

收稿日期: 2007-11-23; 修订日期: 2008-01-28

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422201); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A305)

作者简介: 王岐东(1964~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为机动车污染控制, E-mail: wangqd@tsinghua.edu.cn

市 5 个不同规模的城市进行了实际工况的机动车排放测试.在每个城市各选取一条有代表性的固定路线,涵盖城市不同功能区(如商业区、居民区等)、不

同道路类型(如快速路、主干路和居民路),作为车载测试的行驶路线.共获取 38 辆轻型车的有效行驶和排放数据,测试车辆基本情况如表 1 所示,数据累计

表 1 5 城市测试车辆基本情况

Table 1 Information of the test vehicles in the five cities								
测试城市	微型车	轿车	出租车	其他车 1)	发动机技术类型	行驶里程分类	燃油类型	数据累积/s
北京	2	5	2	2	3	3	1	396 000
重庆	1	7	2	1	2	3	1	356 400
长春	1	1	4	1	2	3	1	151 200
成都	1	3	—	1	1	2	1	97 200
吉林	—	—	4	—	2	1	2	146 880
合计	5	16	12	5	—	—	—	1 147 680

1)其他车辆包括机动车发动机排量>1 000 mL的面包车和 SUV 等车型

达1 147 680 s.

2 DCMEM 模型开发

2.1 模型方法学简述

DCMEM 模型利用反映发动机状态的 VSP 和 ES 2 个机动车运行参数构建机动车排放因子模型.VSP 概念综合了速度、加速度、坡度以及风阻等参数,其物理意义为发动机输出功率与机动车质量的比值,单位为kW/t或者m²/s³,又称发动机比功率.VSP 概念最初于 1999 年提出^[10],随后被应用到各种机动车排放因子研究之中^[11~13].其简化后的计算公式如式(1)所示.

$$\begin{aligned} \text{VSP} = & v \{ 1.1a + 9.81[\operatorname{atan}(\sin \theta)] + 0.132 \} \\ & + 0.000\,302v^3 \end{aligned} \tag{1}$$

式中, v 为车辆行驶速度(m/s); a 为车辆行驶瞬态加速度(m/s²); θ 为道路坡度.

有研究表明,发动机的排放不但与其瞬时工作状态有关,而且与其历史工作状态有一定关系.据此,IVE 模型的开发者提出 ES 概念用于建立发动机排放与历史 VSP 的模拟关系,其表达式如式(2)所示.

$$ES = 0.08 \times P_{\text{ave}} + R_{\text{index}} \tag{2}$$

式中, P_{ave} 为机动车前 25 s 到前 5 s 的 VSP 平均值,kW/t;0.08 为经验系数,单位为t/kW; R_{index} 为发动机转速指数,为瞬态速度与速度分割常数的商,IVE 模型开发者根据大量实验数据的分析结果,建立了用速度和 VSP 来确定速度分割常数的关系.

根据实测排放数据与 VSP 和 ES 关系曲线,IVE 模型开发者根据 VSP 和 ES 划分了 60 个排放单元(BIN)(如表 2 所示),并假设每个排放单元内,机动车的排放水平相同;BIN 划分的基本原则是,在 VSP

变化对排放变化的影响较大区域,即敏感区域,对 BIN 划分的比较细致,非敏感区域则对 BIN 划分的相对比较粗略,这样可最大程度地减小模型模拟结果和实际情况之间的误差.

本研究基于 VSP 和 ES,建立发动机模型化参数 BIN 与排放速率的对应关系,构建基于工况的机动车排放模型(DCMEM),模型框架见图 1.基于本研究的实际上路测试数据,建立了各类轻型车在每个排放单元的排放速率库.

表 2 BIN 与 VSP 和 ES 的对应关系

Table 2 Relationship between BIN and VSP, ES			
VSP/kW·t ⁻¹	ES		
	低负荷	中负荷	高负荷
	[-1.6, 3.1)	[3.1, 7.8)	[7.8, 12.6)
[- 80.0, - 44.0)	0	20	40
[- 44.0, - 39.9)	1	21	41
[- 39.9, - 35.8)	2	22	42
[- 35.8, - 31.7)	3	23	43
[- 31.7, - 27.6)	4	24	44
[- 27.6, - 23.4)	5	25	45
[- 23.4, - 19.3)	6	26	46
[- 19.3, - 15.2)	7	27	47
[- 15.2, - 11.1)	8	28	48
[- 11.1, - 7.0)	9	29	49
[- 7.0, - 2.9)	10	30	50
[- 2.9, 1.2)	11	31	51
[1.2, 5.3)	12	32	52
[5.3, 9.4)	13	33	53
[9.4, 13.6)	14	34	54
[13.6, 17.7)	15	35	55
[17.7, 21.8)	16	36	56
[21.8, 25.9)	17	37	57
[25.9, 30)	18	38	58
[30, 1 000)	19	39	59

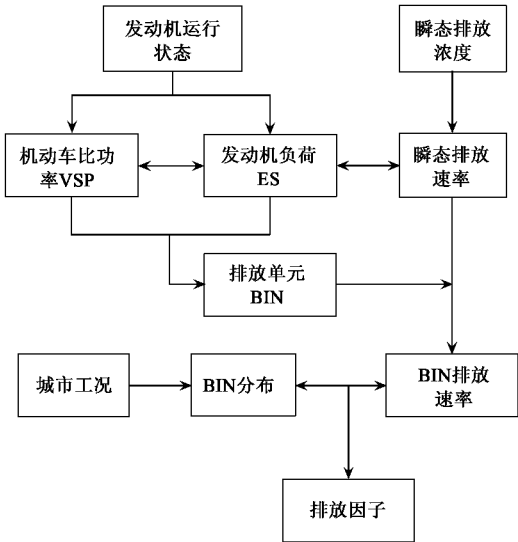


图1 DCMEM 模型框架

Fig.1 Framework of the DCMEM model

2.2 车型分类

本研究依据车型、发动机技术类型、行驶里程和燃料类型进行轻型车分类.将轻型车分为微型车(M)、轿车(C)、出租车(T)和其他车(O)4类;发动机技术类型包括化油器车(C)、化油器改造车(R)和电喷车(M)3类;按行驶里程分为<8万 km(N)、8~12万 km(M)和>12万 km(O)行驶里程;按燃料类型分为汽油(P)和乙醇汽油(E).根据实测的车辆数据,将轻型车共计划分13类,见表3.L表示轻型车.

表3 机动车分类

Table 3 Classification of vehicles

代码	描述
LMMNP	<8万 km 的微型电喷汽油车
LCCMP	8~12万 km 的化油器汽油轿车
LCCOP	>12万 km 的化油器汽油轿车
LCRMP	8~12万 km 的化油器改造汽油轿车
LCROP	>12万 km 的化油器改造汽油轿车
LCMMP	8~12万 km 的电喷汽油轿车
LCMNP	<8万 km 的电喷汽油轿车
LTMMP	8~12万 km 的电喷汽油出租车
LTMOP	>12万 km 的电喷汽油出租车
LTCOP	>12万 km 的化油器汽油出租车
LTCOE	>12万 km 的化油器乙醇汽油出租车
LTMOE	>12万 km 的电喷乙醇汽油出租车
LOMNP	<8万 km 的其他电喷汽油车

2.3 DCMEM 模型的构建

DCMEM 模型的构建方法如图2所示,其包括两方面内容:建立机动车排放速率库,这是模型的核心;

在这一过程中,利用车载排放测试系统获得实际工况下机动车排放的基础数据,对机动车测试数据进行一系列过滤非有效数据点、插值平滑物理运动参数等数据处理,计算ES和VSP值、BIN分布、以及BIN排放,最终建立对应于BIN的排放速率库;对于任一城市机动车行驶工况,计算ES和VSP从而获得BIN分布.据此,根据所建立的BIN排放速率库计算得到该工况下的排放因子,其计算方法见式(3).

$$E_{\text{DCMEM}} = \frac{1\,000 \times \left[\sum_{b=0}^{59} (E_b \times \text{FD}_b \times t) \right]}{\sum \bar{v} \times t} \quad (3)$$

式中, E_{DCMEM} 为排放因子(g/km); E_b 为排放速率库排放单元 b 的对应污染物的排放速率(g/s); FD_b 为排放单元 b 的分布频率(%); t 为工况的总运行时间(s); $\bar{v}$ 为该工况的平均速度(m/s).

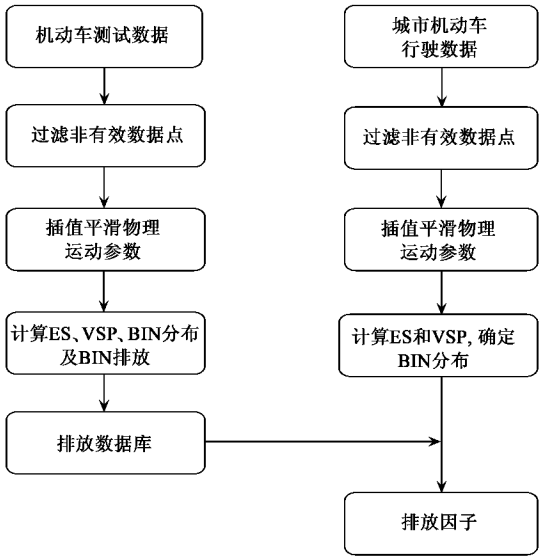


图2 DCMEM 模型构建方法

Fig.2 Method of the development of the DCMEM model

3 模型结果与验证

3.1 中国城市机动车排放因子模拟

利用DCMEM模型,输入5个测试城市的工况^[14],模拟出5个城市各类轻型车的污染物排放因子,如图3所示.为了对比分析,本研究利用DCEME模型模拟了ECE15+EUDC和FTP75这2种工况下中国车辆的排放因子,也列于图3.

从图3可以看出,各城市同类型车辆的排放因子差别很大.综合而言,北京车辆的CO和HC排放因子最高,其化油器车辆的CO和HC排放因子比其他城市同类型车辆高20%~50%,比电喷车辆高

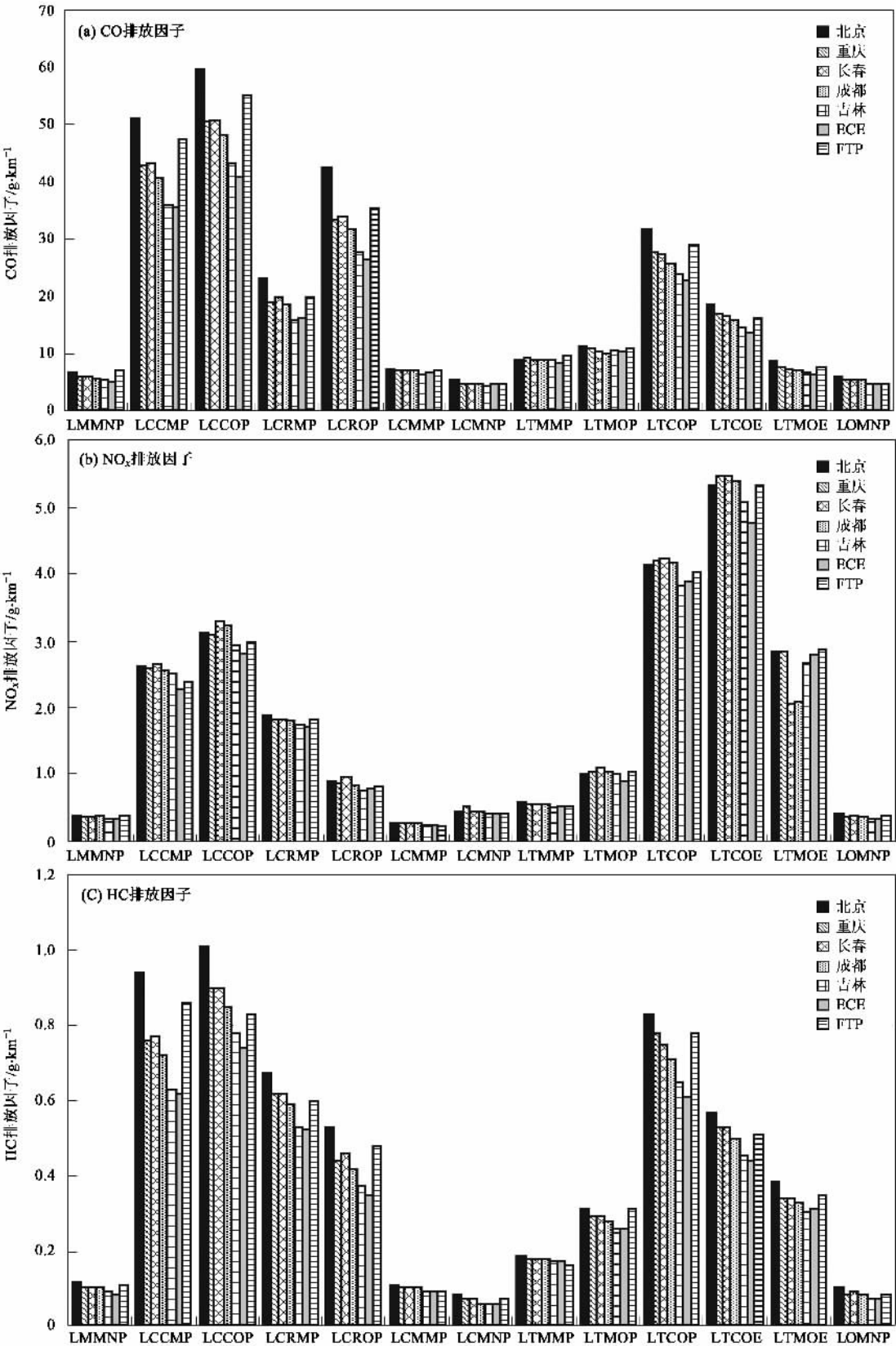


图 3 DCMEM 模型各类车型污染物排放因子模拟结果

Fig.3 Emission factors simulated by the DCMEM model

2% ~ 30% .北京较高的排放因子是由它较低的平均速度、较高的加减速和怠速比例等行驶特征所导致的.重庆和长春的 CO 和 HC 排放因子也较高,成都稍次之,吉林市排放因子最低.由此可见,在大城市内,由于机动车保有量高,道路通行能力相对较弱,车辆平均速度低,加减速频繁,怠速比例高,导致燃料燃烧不充分,使得车辆产生较高的 CO 和 HC 排放因子,而中等规模城市,例如吉林市,在路车辆相对较少,车辆行驶畅通,因此排放因子较低.

各城市 NO_x 排放差异相对较小.重庆、长春和成都的机动车 NO_x 排放水平最高,北京次之,吉林市最低.从工况分析原因,是由于重庆等城市已修架城市快速路,车辆可达到较高速度,而高速行驶的车辆由于发动机燃烧温度升高,会释放大量的 NO_x.北京虽然已有城市快速路系统,但是由于城市车辆拥堵情况严重,因此即使在快速路上,车辆也无法以较快的速度行驶.吉林市无城市快速路,所以车辆不会达到较高的行驶速度.

ECE 和 FTP 工况下的排放因子和我国城市机动车排放因子的差异也很明显.使用 ECE 工况会严重

低估我国城市的排放因子,它比最低的吉林市工况排放因子还要低 1% ~ 10% .而 FTP 工况的 HC 和 CO 排放因子,比北京工况低 3% ~ 20% ,比其他城市高 5% ~ 35% .由此可见,即便是使用中国车辆的测试结果,但选用并不代表中国的行驶工况,例如 ECE 和 FTP 工况,也一样会给我国城市机动车排放因子的估算带来较大误差.

3.2 模型结果验证

采用本研究在北京、重庆、长春、成都和吉林市获取的部分在路实测数据与模型模拟结果进行对比,验证模型的可靠性.表 4 分别给出了 13 种不同单车类型模型计算结果和上路测试结果的比较情况.从表 4 的验证结果来看,模型计算结果与上路测试结果吻合得较好,污染物 CO、NO_x 和 HC 的相对误差分别为 7.50%、5.41% 和 13.67% ,HC 的误差相对较高,主要原因是其排放因子的数值较小,波动较大.而且,模型计算值与上路测试值之间具有很好的相关性,CO 排放因子的相关系数 R^2 为 0.97,NO_x 排放因子的相关系数 R^2 为 0.99 和 HC 的相关系数 R^2 为 0.91.

表 4 13 种车型污染物排放因子验证结果

单车类型	CO 平均值/g·km ⁻¹			NO _x 平均值/g·km ⁻¹			HC 平均值/g·km ⁻¹		
	模型计算	上路测试	相对误差/%	模型计算	上路测试	相对误差/%	模型计算	上路测试	相对误差/%
LMMNP	6.12	5.8	5.23	0.37	0.36	3.65	0.11	0.10	8.77
LCCMP	47.26	49.77	- 5.32	2.63	2.48	5.67	0.85	1.00	- 17.93
LCCOP	48.2	39.17	18.74	3.23	3.16	2.23	0.72	0.64	11.97
LCRMP	23.23	21.34	8.15	1.87	1.98	5.70	0.67	0.56	16.99
LCROP	42.73	38.37	10.21	0.90	0.84	5.95	0.53	0.40	23.51
LCMMP	7.07	6.53	7.58	0.27	0.24	9.09	0.11	0.12	- 13.27
LCMNP	4.92	4.64	5.58	0.46	0.46	- 1.59	0.06	0.06	5.93
LTMMP	9.10	8.37	8.03	0.57	0.53	- 7.47	0.19	0.16	12.35
LTMOP	10.69	9.91	7.25	1.04	1.09	- 4.84	0.29	0.26	9.23
LTCOP	29.78	27.07	9.11	4.17	4.08	2.23	0.81	0.63	- 21.99
LTCOE	14.44	13.32	7.76	5.08	4.71	7.28	0.45	0.37	17.73
LTMOE	6.65	5.83	12.37	2.66	2.36	11.23	0.16	0.14	12.15
LOMNP	5.43	5.28	2.87	0.38	0.37	3.44	0.09	0.08	5.85
相关性 R^2	0.97		—	0.98		—	0.91		—
平均值			7.50			5.41			13.67

综合上述分析,DCMEM 模型计算值与上路测试结果相比,NO_x 与 CO 偏差 < 10% ,HC < 18% .

4 结论

(1) 利用机动车车载排放测试系统,对 3 种规

模 5 个城市的 38 辆机动车进行了实际工况的上路测试,获得了 5 个城市机动车逐秒排放数据.通过由 VSP 和 ES 确定的 BIN 与实测瞬时(逐秒)排放速率的对应关系,建立了 13 种轻型车对应于 60 个 BIN 的不同污染物的排放速率库.

(2) 利用不同污染物的排放速率库和工况与排放单元分布的转换关系,建立了城市机动车排放因子模型(DCMEM),模型可计算轻型车任一工况下的排放因子.验证结果表明:模型与实测结果 NO_x 与 CO 偏差 $< 10\%$, HC $< 18\%$.

(3) 城市行驶工况对排放因子的影响很大.由于中国城市行驶工况差异较大,因此建立基于工况的排放因子模型是迫切而必要的.一方面需要继续完善覆盖各种车型的排放速率库,另一方面还要对各类城市规模的行驶工况进行测试研究.

参考文献:

[1] 郝吉明,傅立新,贺克斌,等.城市机动车排放污染控制[M].北京:中国环境科学出版社,2000.

[2] Fu L X, Hao J M, He D Q, *et al*. Assessment of vehicular pollution in China[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2001, **51**: 658-668.

[3] 霍红,贺克斌,王岐东.机动车污染排放模型研究综述[J].环境污染与防治,2006, **28**(7): 526-530.

[4] 何东全,郝吉明,贺克斌,等.应用模式计算机动车排放因子[J].环境科学,1998, **19**(3): 7-10.

[5] University of California, at Riverside. International Vehicle Emission Model 1.0.3[R].2003.

[6] Davis N, Lents J. Development of the emission rates for use in the IVE

model[A]. In: Davis N (ed). Reports on the Development of the IVE Model and Data Collected in Santiago, Chile and Nairobi, Kenya. Los Angels[C]. University of California at Riverside, 2002.

[7] 姚志良,贺克斌,王岐东,等. IVE 机动车排放模型应用研究[J].环境科学,2006, **27**(10): 1928-1933.

[8] 王海鲲,陈长虹,黄成,等.应用 IVE 模型计算上海市机动车污染物排放[J].环境科学学报,2006, **26**(1): 1-9.

[9] Guo H, Zhang Q Y, Shi Y, *et al*. Evaluation of the International Vehicle Emission (IVE) model with on-road remote sensing measurements[J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2007, **19**(7): 818-826.

[10] Jiménez-Palacios J L. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing [D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 1999.

[11] Zhang K S, Frey H C. Road grade estimation for on-road vehicle emissions modeling using light detection and ranging data[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2006, **56**(6): 777-788.

[12] Davis N, Lents J, Osses M, *et al*. Development and application of an international vehicle emissions model[A]. In: Transportation Research Board 81st Annual Meeting[C]. Washington, D. C. 2005.

[13] Kuhns H D, Mazzoleni C, Moosmuller H, *et al*. Remote sensing of PM, NO, CO and HC emission factors for on-road gasoline and diesel engine vehicles in Las Vegas, NV [J]. Science of the Total Environment, 2004, **322**: 123-137.

[14] 王岐东.基于工况的城市机动车排放因子研究[D].北京:清华大学.2005.