

IVE 机动车排放模型应用研究

姚志良¹, 贺克斌^{1*}, 王岐东¹, 霍红¹, 刘欢¹, 何春玉², James Lents³

(1. 清华大学环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 北京工商大学化学与环境工程学院, 北京 100037; 3. 加州大学河边分校, 美国加州 91765)

摘要:对 IVE 模型进行了系统分析和介绍, 以北京市为研究对象给出了模型的主要输入参数的确定方法和思路, 运用 IVE 模型对北京市不同车型车队的排放进行计算. 结果表明: 公交车和卡车的排放因子明显较高, 特别是颗粒物排放因子, 分别为普通轻型车的 14 倍和 44 倍. 北京市机动车的 CO、VOC、NO_x 和 PM 的平均日排放总量分别为 2767.4、182.5、353.8 和 7.1t. 对于 CO 和 VOC, 普通轻型车的分担率分别为 42.0% 和 34.7%; 对于 NO_x 和 PM 而言, 卡车的贡献率最高, 分别达到 66.3% 和 83.0%. 此外, 比较了 IVE 模型与 MOBILE6 模型的方法和计算结果, 讨论了 IVE 模型在我国的主要应用优势.

关键词:IVE 模型; 机动车; 排放因子

中图分类号:X511 **文献标识码:**A **文章编号:**0250-3301(2006)10-1928-06

Application Study of IVE Vehicle Emission Model

YAO Zhi-liang¹, HE Ke-bin¹, WANG Qi-dong¹, HUO Hong¹, LIU Huan¹, HE Chun-yu², James Lents³

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Chemical and Environmental Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100037, China; 3. University of California at Riverside, California 91765, USA)

Abstract: This paper introduced IVE model and presented the method to quantify the main parameters by taking Beijing city as a case. Emissions from different vehicle fleets of Beijing were calculated using IVE model. The results show that emissions factors of buses and trucks were much higher, especially for PM, which were 14 and 44 times those of passenger cars. The daily CO, VOC, NO_x and PM emissions of vehicles in Beijing city were 2767.4, 182.5, 353.8 and 7.1t respectively. Common light duty vehicles were the main emission source of CO and VOC, with the contribution of 42.0% and 34.7% respectively. Trucks were the largest contributor of NO_x and PM emissions, with the contribution of 66.3% and 83.0% respectively. The methodology and calculating results of MOBILE6 and IVE model were compared, and advantages of IVE model's application in China were discussed.

Key words: IVE model; motor vehicle; emission factor

机动车排放的确定是机动车污染控制研究的基础和依据^[1~5]. 目前我国的研究主要是通过对 MOBILE 模型的参数修正以及同等技术水平机动车的年份比对^[6~11], 计算得到我国不同城市机动车的排放水平, 用于机动车污染控制决策. MOBILE 模型是基于平均速度的宏观模型, 在支持城市机动车污染控制宏观决策方面具有很强的指导意义. 然而, 随着城市机动车污染控制工作的不断深入和细化, 对高分辨率决策支持工具的需求也将越来越紧迫, 宏观的 MOBILE 模型已经无法满足这种决策需求. 因此, 为了更有效地进行科学决策, 需要将分辨率更高的机动车排放模型应用到机动车污染控制研究中. 本文对 IVE 模型进行了系统分析和介绍, 以北京市为研究对象给出了模型的主要输入参数的确定方法和思路, 运用 IVE 模型对北京市不同车型车队的排放进行计算, 并与 MOBILE6 模型进行了对比分析.

1 IVE 模型介绍

为了满足发展中国家控制机动车污染工作和研究的开展, 国际可持续发展研究中心 (International Sustainable Systems Research Center, ISSRC) 和加州大学河边分校 (University of California at Riverside, UCR) 的研究人员开发了适于发展中国家的机动车污染排放模型, IVE 模型^[12]. 该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^[13].

1.1 模型方法学

IVE 的计算方法在本质上与 MOBILE 模型的方法类似, 即利用模型内嵌的基准排放因子乘以一系列修正参数从而得到当地城市每种技术类型机动

收稿日期: 2005-11-11; 修订日期: 2006-01-05

作者简介: 姚志良 (1980—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为机动车污染控制.

* 通讯联系人, E-mail: hekb@tsinghua.edu.cn

车的排放因子。

$$Q_j = B_j \times \prod_i K_{i,j} \tag{1}$$

其中， i 为各种需要进行修正的影响因素； j 为车辆类型； Q_j 为 j 类车型的修正排放因子， g/km ； B_j 为 j 类车型的基准排放因子， g/km ； $K_{i,j}$ 为 j 类车型第 i 种修正参数，无量纲。

从方法学角度而言，IVE 和 MOBILE 模型的主要不同之处在于对行驶特征影响因素的处理上。MOBILE 利用机动车的平均速度对基准排放率进行校正，而 IVE 模型为了更好的反映行驶状态对排放率的影响，引入了 VSP(vehicle specific power) 和 ES(engine stress)2 个参数，用于表征机动车瞬态工作状态与排放的关系。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 m^2/s^3 ，又称发动机比功率。

$$VSP = v \{ 1.1a + 9.81[a \tan(\sin \theta)] + 0.132 \} + 0.000\ 302v^3 \tag{2}$$

其中 v 为车辆行驶速度， m/s ； a 为车辆行驶瞬态加速度， m/s^2 ； ϵ_i 为质量因子，无量纲； θ 为道路坡度。

为了更准确的建立发动机的历史工作状态和污染物排放的关系，IVE 模型又引入了无量纲参数 ES。ES 与机动车瞬时速度和发动机前 20s 的历史 VSP 有关，如式(3)所示。

$$ES = 0.08 \times P_{ave} + R_{index} \tag{3}$$

式(3)中， P_{ave} 为机动车前 25s 到前 5s 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，速度分割常数的取值由 v 和 VSP 决定。

IVE 模型利用 VSP 和 ES 2 个参数将发动机瞬态的工作状态分成 60 个 VSP 区间(如表 1 所示)，每个 VSP 区间对应 1 个排放水平，据此建立发动机瞬时工作状态与排放的分段对应关系。根据 VSP 区间的分布以及各区间与排放的对应关系，IVE 计算得到机动车在不同行驶工况下的排放因子。

1.2 模型结构

IVE 模型为用户提供了 Windows 版本，与 MOBILE 模型相比界面更为友好，操作相对简单。IVE 模型包括数据输入和结果输出 2 个单元，共 4 个主界面。

1.2.1 输入单元

IVE 模型的数据输入单元由 3 个数据输入界面

构成，分别为：

① 当地城市信息界面 Local Page。用户在此界面输入当地温度、道路平均坡度、1/M 计划、时间、车队行驶特征(包括 VSP 区间分布、热浸时间分布、行驶距离、平均速度、启动次数等)等。通过改变行驶距离可以计算机动车车队的平均排放因子或排放总量；

表 1 VSP 区间与 VSP 和 ES 的对应关系
Table 1 Relationship of VSP intervals with VSP, and ES

VSP 区间/ $kW \cdot t^{-1}$	ES 低负荷	ES 中负荷	ES 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, 1000)	19	39	59

② 车队技术界面 Fleet Page。此界面要求用户提供城市机动车的技术分布信息。排放因子的影响因素包括车型、发动机技术、污染控制技术、累计行驶里程、车重和燃料等，IVE 根据上述影响因素对机动车进行技术分类。由于 IVE 的服务对象为发展中国家，考虑不同地区技术分类的原则有所不同，IVE 模型采取多种技术分类方法，将机动车详细划分为 1372 种技术，每种技术对应 1 个排放水平。用户可根据当地机动车的分类习惯，选择合适的分类方法，填写 Fleet Page 输入界面。此外，用户还可根据当地的情况，增加某些技术分类；

③ 基准因子修正界面 Base Adjustment Page。IVE 模型根据美国以及发展中国家已有的大量基于 FTP 的台架测试结果设定了模型的基准排放因子。用户在 Base Adjustment 输入界面，可对模型内嵌的排放因子等参数进行校正。此外还可以添加 IVE 模型分类以外车型的基准排放因子。

1.2.2 输出单元

输出模块有 1 个界面 (Calculation Page) 构成, 模型能够计算出机动车逐时 CO 、 VOC 、 NO_x 、 SO_2 和 PM 等 5 种常规污染物、铅、醛类化合物等 6 种有毒物质, 以及 CO_2 等 3 种温室气体的排放总量. 计算的污染物排放不仅包括机动车的热运行阶段的排放, 还包括启动排放 (由于发动机启动引起, 相对于相同工况的排放增加).

2 主要参数的确定

本研究以北京市为研究对象, 将北京市的机动车 (不含摩托车) 划分为 4 大类: 即普通轻型车、出租车、公交车和卡车, 对 IVE 模型输入需求的机动车活动水平信息进行了调查研究, 调查时间为 2004 年 6 月初.

2.1 平均速度和 VSP 分布

平均速度和 VSP 分布是车队行驶特征最重要的参数. 对于普通轻型车, 本研究首先将北京市划分为 3 个区, 分别为城北居住区、中心商业区和城南居住区. 在每个区选择快速路、主干路和居民路各 1 条. 采用可逐秒记录车辆位置和速度的车载 GPS, 对选定的 3 个区域 9 条不同的路线进行测试, 测试路线如图 1 所示. 为了消除单一司机和车辆对交通流测试结果造成的不确定影响, 测试选择了 3 名司机和 3 辆测试车辆, 同时在 9 条道路上交替行驶. 测试车辆分别为赛欧、奇瑞和富康, 均为北京市常见车型, 动力性能可代表车流中车队的平均水平. 测试时间选择在工作日, 历时 14d, 获取了 07:00~21:00 之间每 h 3 个区 9 条道路上的行驶特征.

对于卡车和出租车, 安装 GPS 车载装置的车辆按照各自运营的路线行走. 每天测试时间尽量遵循运营车辆的作息时间表. 卡车和出租车各 12 辆, 每天测试 2 辆, 共进行 6d.

对于公交车, 按照公交车运营路线, 测试人员持 GPS 随机选择运营公交车乘坐进行测试, 测试时间每天 07:00~22:00, 共进行 6d.

通过对测试数据进行处理, 确定逐时平均速度和 VSP 分布.

2.2 车队信息

2.2.1 车流量分布

为了计算机动车车队 1d 的平均排放因子或总排放量, 需要知道机动车车队上路行驶的时权重系数, 即道路逐时车流量分布. 本研究采用视频数据采集技术对北京市快速路、主干路和居民路的交通流

量进行采集和分析. 以 2.1 中选择的 3 个区 9 条道路为基础, 在每条道路上选择 1 个安全且视野开阔的地点架设摄像设备. 拍摄点选择在道路边或者人行过街天桥上 (见图 1).

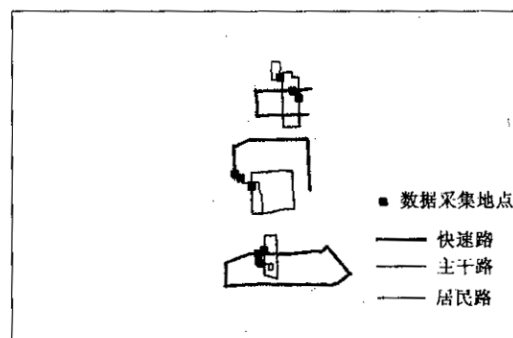


图 1 测试路线和数据采集地点

Fig. 1 Test routes and locations of data collecting

数据采集共进行 6 d, 均在工作日进行, 第 1 周的数据采集从早上 06:00 开始到下午 14:00 结束, 第 2 周的数据采集从下午 14:00 开始到晚上 21:00 结束, 每天的数据采集工作集中在 1 个区, 在 3 种道路上交替进行.

2.2.2 技术类型分布

对于普通轻型车, 选取北京市北居住区、中心商业区和南居住区内的大型商业停车场和居民区停车场进行调查, 调查中专门聘请有经验的汽车技师提供技术支持, 调查内容包括机动车车型、牌照、生产厂家、出厂年份、行驶里程、发动机技术、发动机排气量、污染控制技术、传动方式、维护保养状况和空调使用等.

对于出租车, 采取随机选择出租车司机进行直接问卷调查的方式. 调查内容包括出租车车型、出厂年份、行驶里程、发动机技术、动力传输方式、污染控制技术、每日工作小时数、每周工作天数、每日行驶里程、燃料类型和天然气使用频率 (如果是双燃料车) 等.

公交车和卡车的技术类型分布通过运输公司获取.

由调查结果, 计算出不同类型车队不同技术类型的百分比分布. 表 2 为普通轻型车的技术分布调查结果.

2.3 启动信息

为了收集机动车的启动模式信息, 选择自愿的机动车车辆安装测试仪器, 共记录 75 辆普通轻型车连续 7d 的发动机开启和关闭的信息. 测试仪器选用

表 2 北京市 2004 年 6 月普通轻型车队技术分布
Table 2 Technology distribution of common light duty vehicle fleet in Beijing in June, 2004

年份	年份分布/%	累计行驶里程/ × 10 ⁴ km	控制技术分布/%			
			化油器		电喷	
			无催化剂	有催化剂	无催化剂	有催化剂
1991	0.52	24.3	100	0	0	0
1992	1.18	22.5	67	33	0	0
1993	2.40	20.7	13	63	4	21
1994	1.90	20.0	10	78	1	10
1995	2.82	18.1	7	53	5	35
1996	4.67	14.1	4	52	3	40
1997	5.82	13.0	5	38	6	51
1998	3.63	10.3	2	25	4	69
1999	7.58	9.5	0	11	1	88
2000	5.68	8.2	0	4	2	94
2001	10.32	6.9	0	2	1	96
2002	17.37	4.7	0	0	2	98
2003	22.67	2.4	0	0	1	99
2004	13.58	0.9	0	0	1	99

的是 VOCE (vehicle operation characteristics enunciators),仪器与点烟器插孔相连自动记录通过

点烟器的电压,通过电压数值的变化确定机动车的启动、热浸时间等相关信息,计算出机动车的启动时间分布和热浸时间分布.结果显示,北京市普通轻型车平均每天启动次数为 6.7 次,06:00~09:00 和 14:00~17:00 是机动车启动最多的时段,分别占到总启动次数的 25% 左右.

其他车型的启动信息来自 IVE 模型开发者在其他发展中国家城市的测试结果.

3 结果与分析

3.1 平均排放因子

根据上述调查计算得到的参数输入 IVE 模型,运用 IVE 模型计算出北京市 4 种车型的平均排放因子,如表 3 所示.从表 3 中可以看出,对于普通轻型车,4 种污染物排放因子的路型排序为:居民路>主干路>快速路,居民路的排放因子明显很高,其 4 种污染物的排放因子都是快速路的 2 倍左右.公交车和卡车的平均排放因子明显要比普通轻型车和出租车的高,特别是 NO_x 和颗粒物.对颗粒物而言,公交车和卡车的颗粒物排放因子分别是普通轻型车的 14 倍和 44 倍.

表 3 北京市机动车分车型平均排放因子
Table 3 Average emissions factors of vehicles in Beijing

污染物	普通轻型车				出租车	公交车	卡车
	快速路	主干路	居民路	总体平均			
CO/g·km ⁻¹	7.5	11.1	19.1	16.5	32.2	41.9	45.4
VOC/g·km ⁻¹	0.5	0.7	1.2	0.9	2.2	2.6	3.8
NO _x /g·km ⁻¹	0.8	0.9	1.5	1.1	0.9	6.1	14.3
PM/mg·km ⁻¹	4.2	6.0	10.5	8.2	10.7	113.2	360.9

3.2 日排放总量和分担率

以 2004-06 为计算基准,计算得到北京市机动车的 CO、VOC、NO_x 和 PM 的平均日排放总量分别为 2 767.4、182.5、353.8 和 7.1t,4 种车型的排放分担率如图 2 所示.从图 2 中可以看出:对于 CO 和 VOC,普通轻型车贡献最高,排放分担率分别为 42.0% 和 34.7%,卡车和出租车的贡献次之.值得注意的是,出租车的保有量虽然不足普通轻型车的 1/20,但由于日均行驶里程高和排放劣化严重,对 CO 和 VOC 的排放贡献分别达到 25.8% 和 26.1%.对于 NO_x 和 PM 而言,卡车的贡献率最高,分别达到 66.3% 和 83.0%.因此,对于 CO 和 VOC 排放,普通轻型车和出租车是控制重点.对于 NO_x 和颗粒物,卡车是主要控制对象.

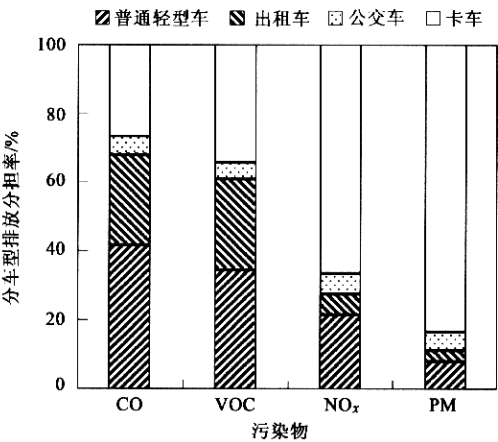


图 2 北京市机动车分车型排放分担率
Fig. 2 Emissions share of different vehicle type in Beijing
图 3 给出了北京市普通轻型车分路型排放分担

率的计算结果,对 CO、VOC、NO_x 和 PM,路型排放分担率的排序是:主干路>快速路>居民路,之所以主干路和快速路的排放分担率较高,其主要原因是主干路的流量大,行驶里程权重高.

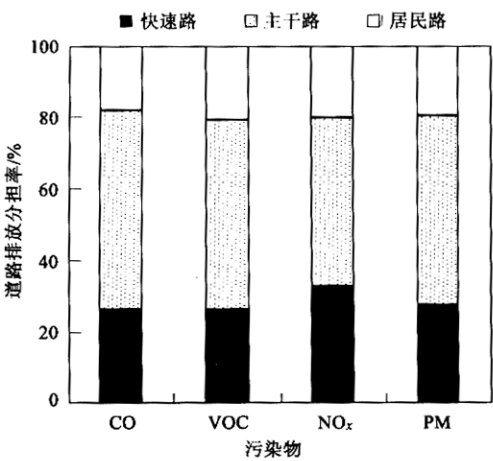


图 3 北京市普通轻型车分路型排放分担率
Fig.3 Emissions share of common light duty vehicles
by road type in Beijing

启动时由于发动机和催化剂未达到最佳操作温度,排放相对于热运行阶段明显增加.图 4 是北京市机动车启动排放分担率的计算结果.结果显示:CO、VOC、NO_x 和 PM 启动排放分别占到总排放的 22.7%、14.0%、5.5% 和 12.4%,启动对 CO、VOC 和 PM 影响最为显著.由于启动排放还会随着环境温度的降低明显增加,在冬季,启动排放的分担率会大大增加.因此,启动对排放的影响不容忽视,应引起机动车污染控制和相关研究的足够重视.

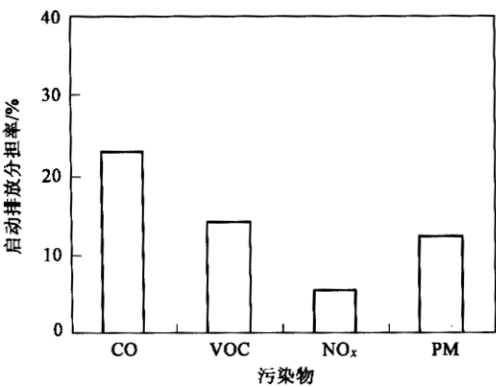


图 4 北京市机动车启动排放分担率
Fig.4 Share of start emissions of vehicles in Beijing

4 与 MOBILE 模型的对比

为了能够更深入地理解 IVE 模型的适用性,本

研究将调查的数据制作成 MOBILE6 模型的输入数据,运用 MOBILE6 模型对普通轻型车的平均排放因子进行了计算.图 5 对比了两模型得到的普通轻型车车队热运行阶段分路型逐时平均排放因子.结果显示,MOBILE6 模型的模拟结果并没有明显体现出各时段不同行驶特征对排放因子的影响,特别是由 MOBILE6 计算的 NO_x 排放因子没有表现出明显的逐时变化.而 IVE 模型输出结果则明显表现出不同时段机动车行驶状态对排放因子的影响.在早晚 2 个交通高峰时段,普通轻型车污染物排放因子最高,交通高峰时刻排放因子比午夜时段排放因子增加 1 倍.

表 4 给出了运用 IVE 和 MOBILE6 模型计算得到的普通轻型车车队热运行阶段日平均排放因子,从表 4 中可以看出,IVE 模型和 MOBILE6 模型计算得到的 CO 排放因子相差 63%,VOC 和 NO_x 排放因子相差较少.由此可见,在对时间精度要求不高的情况下,IVE 模型和 MOBILE6 的排放模拟结果相差不大;而对于某些时段,两者模拟的结果将相差 200% 以上.因此 MOBILE6 模型更适于宏观尺度的排放研究,而 IVE 模型更适于对时间分辨率要求高的排放计算.

表 4 IVE 和 MOBILE6 模型计算的普通轻型车
热运行阶段日平均排放因子

Table 4 Daily emissions factors of common light duty vehicles at hot running stage using IVE and MOBILE6 models			
污染物	IVE 模型	MOBILE6 模型	相差
CO/g·km ⁻¹	8.68	14.13	63%
VOC/g·km ⁻¹	0.59	0.55	-7%
NO _x /g·km ⁻¹	0.86	0.91	6%

5 结论

(1)应用 IVE 模型计算得到北京市普通轻型车、出租车、公交车和卡车的排放因子,其中公交车和卡车的颗粒物排放因子分别是普通轻型车的 14 倍和 44 倍.

(2)北京市机动车的 CO、VOC 和 NO_x 的平均日排放总量分别为 2767.4、182.5、353.8 和 7.1t.对于 CO、VOC,普通轻型车的分担率分别为 42.0% 和 34.7%;对于 NO_x 和 PM 而言,卡车的贡献率最高,分别达到 66.3% 和 83.0%.

(3)IVE 模型基于机动车 VSP 和 ES,与基于平均速度的宏观排放模型 MOBILE6 相比,具有较高的时间分辨率,可以更准确地体现出城市机动车污染时变化特征.

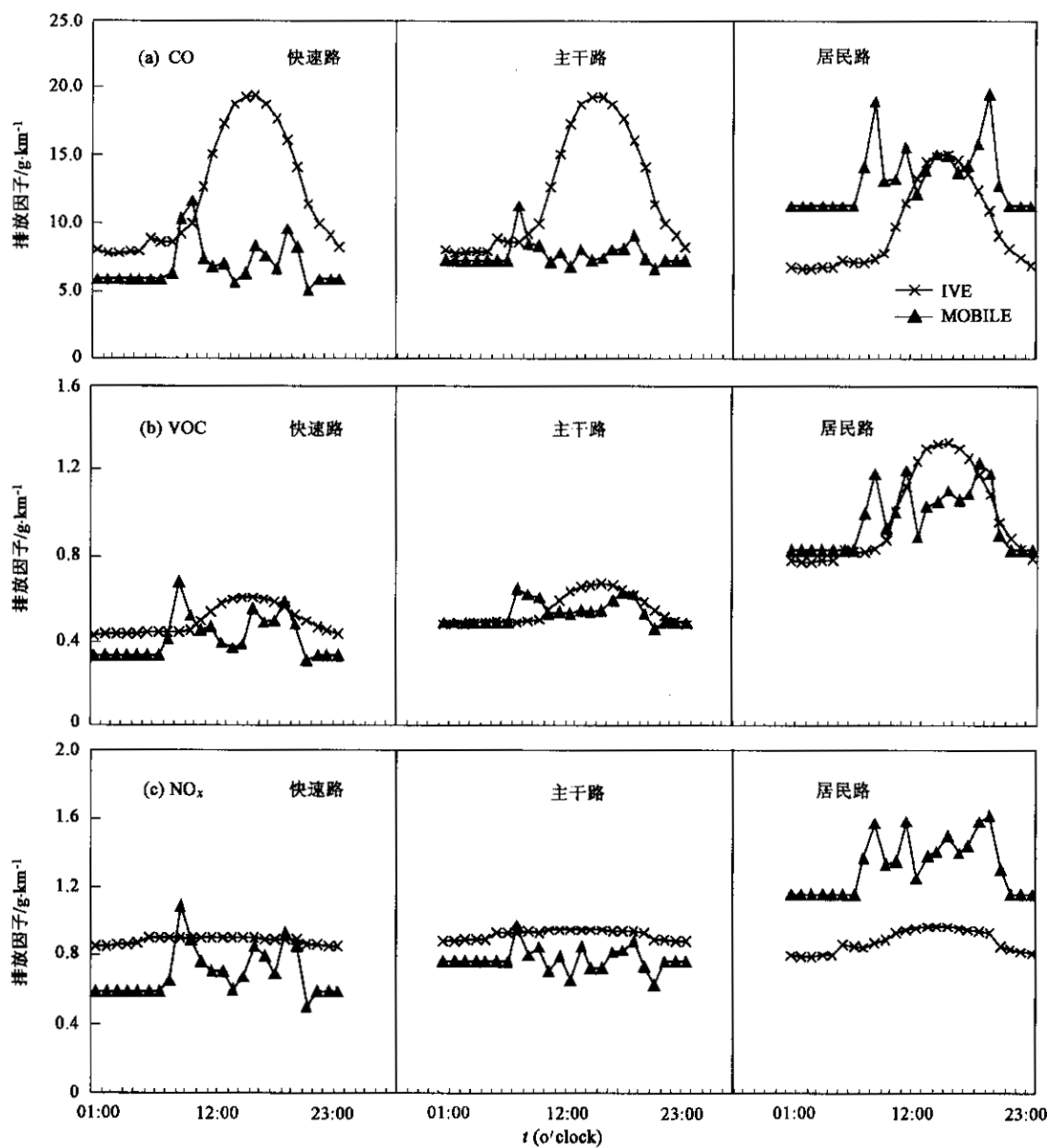


图 5 2 种模型方法计算的热运行阶段普通轻型车逐时排放因子

Fig. 5 Common light duty vehicles emissions factors per hour at hot running stage using two model methods

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] 郝吉明,吴烨,傅立新,等.北京市机动车污染分担率的研究[J]. 环境科学,2001,22(5):1~6.

[3] National Research Council. Modeling Mobile-Source Emissions [M]. Washington: National Academy Press,2000.

[4] Tong H Y, Hung W T, Cheung C S. On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions[J]. J. Air Waste Manage. Assoc.,2000,50:543~554.

[5] Bachman W, Sarasua W, Hallmark S, et al. Modeling regional mobile source emissions in a geographic information system framework[J]. Transp. Res. Part C Emerging Technol., 2000,8:205~229.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 陈盛樑,陈思龙,周忠淦.重庆城区机动车排放污染研究[J]. 重庆环境科学,2000,22(6):29~32.

[9] 吴烨,郝吉明,傅立新,等.澳门机动车排放清单[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(12):1601~1604.

[10] 王伟,项乔君,常玉林,等.城市交通系统能源消耗与环境影响分析方法[M]. 北京:科学出版社,2002.

[11] 李修刚,杨晓光,王伟,等.用于城市交通规划的机动车污染物排放因子[J]. 交通运输工程学报,2001,1(4):87~91.

[12] University of California at Riverside. IVE Model Users Manual Version 1.1.1[R].2004.

[13] 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. Washington:2005.