

# 中观机动车尾气模型在中国的适用性

郝艳召<sup>1</sup>, 王宏图<sup>2</sup>, 宋国华<sup>3</sup>, 邱兆文<sup>1</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064; 2. 长春市城乡规划设计研究院, 吉林 长春 130033;  
3. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

**摘 要:**基于道路实测分析了不同路段上车辆排放的变化,并对 MOBILE 和 IVE 这 2 个中观尾气模型进行参数标定后,通过比较实测值和预测值分析了这 2 个模型在中国的适用性。研究结果表明:行驶状况是影响路上车辆实时排放的一个重要因素,次干路及以下等级路段上车辆行驶工况更为复杂多变,容易出现高污染排放;MOBILE 和 IVE 这 2 个模型的预测值与实测值在整体变化趋势上具有较好的一致性,但均存在不同程度的低估,其中 MOBILE 对  $\text{NO}_x$  和 HC 预测误差较大,大部分路段误差超过 30%,CO 预测精度稍好,超过一半路段误差低于 30%;IVE 模型对 CO 预测精度与 MOBILE 模型基本持平,而对  $\text{NO}_x$  和 HC 预测精度大大高于 MOBILE 模型,大部分路段误差低于 15%。IVE 模型引入机动车比功率(VSP)和发动机负荷(ES)代替平均速度来反映车辆行驶对排放的影响,更适合应用于中国针对路段进行的中观层次机动车排放污染评估。

**关键词:**汽车工程;路段;排放因子;尾气模型;中观层次;适用性

中图分类号:U491.92

文献标志码:A

## Suitability of meso-level vehicle emission model in China

HAO Yan-zhao<sup>1</sup>, WANG Hong-tu<sup>2</sup>, SONG Guo-hua<sup>3</sup>, QIU Zhao-wen<sup>1</sup>

(1. School of Automobile, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Changchun Institute of Urban Planning & Design, Changchun 130033, Jilin, China; 3. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** Vehicle emissions on various road segments were analyzed based on real road test. Then the parameters in two meso-level emission models of MOBILE and IVE were calibrated, and their suitability in China was analyzed by comparing actual with model-predicted emissions. The results show that driving condition is one important influencing factor for vehicle's real time emissions, and due to complicated driving conditions on road segments that below minor arterial grade, vehicles are more likely to produce high emissions. Furthermore, the predicted results indicate that both of two models' predicted values have good consistency with actual values on the overall trend, but they underestimate vehicle actual emissions under different degrees. The prediction errors of  $\text{NO}_x$  and HC from MOBILE are high, and the relative errors in most of road segments are larger than 30%. The prediction accuracy of CO from MOBILE is slightly better, and the relative errors on more than half road segments are less than 30%. The prediction accuracy of CO from IVE is similar to that from MOBILE, but the prediction accuracy of  $\text{NO}_x$  and HC are much higher than

收稿日期:2015-07-25

基金项目:国家自然科学基金项目(71273024,51478045);陕西省科技统筹创新工程项目(2012KTZB03-01);中央高校基本科研业务专项资金项目(310822151024,310822152006)

作者简介:郝艳召(1981-),男,河北石家庄人,讲师,工学博士,E-mail:haoyz@chd.edu.cn。

that from MOBILE, and the relative errors on most of road segments are less than 15%. Since the IVE introduces two parameters of the vehicle specific power (VSP) and engine stress (ES), instead of average speed to reflect the impacts of driving condition on vehicle emissions, it is more suitable for China to evaluate meso-level vehicle emissions toward road segments. 4 tabs, 9 figs, 25 refs.

**Key words:** automobile engineering; road segment; emission factor; emission model; meso-level; suitability

0 引言

根据不同的开发目的和应用层次,机动车尾气模型可分为微观、中观和宏观 3 个层次<sup>[1]</sup>。微观模型针对单车开发,最终输出为单车的逐秒排放值(g/s),但其对路网中机动车尾气污染整体把握方面考虑不足<sup>[2-3]</sup>;宏观模型针对区域车队开发,能够计算得到研究区域内所有车辆的平均排放因子(g/km)或排放总量(t),预测周期通常为月、季度或年,但由于其时空分辨率不高,无法得到路网中各个路段不同时间的尾气污染情况<sup>[4]</sup>;中观模型针对路段开发,能够计算得到分路段、分时段的机动车尾气排放值(g/km),预测周期通常为小时或天,时空分辨率大大提高,中观模型在指导环境管理者了解掌握管辖区域内不同地点、不同时间的尾气污染规律,进而制定针对性控制策略方面更加具有优势。

目前应用较广的机动车尾气模型主要有 MOBILE 模型、COPERT 模型和 IVE 模型等。其中 MOBILE 模型开发最早,早期版本主要面向宏观层面计算<sup>[5]</sup>;之后该模型将速度进行细分,建立不同速度下的排放修正方法,同时将道路类型进行细分,实现了行驶里程在空间和时间上的分配,从而将模型应用扩展到中观层次<sup>[6-8]</sup>。COPERT 模型由欧洲环保局资助开发,其结构和原理与早期版本的 MOBILE 模型类似,因此其应用主要集中在宏观层面<sup>[9-10]</sup>。IVE 模型作为新兴的尾气模型,其开发之初就着眼于中观层次的计算,同时将计算值进行加和集计后也能够得到宏观层面的排放总量<sup>[11-14]</sup>。

中国目前还未开发出适用于国内的排放模型,因此中国学者大多利用国外模型进行输入参数本地化后开展机动车尾气污染研究<sup>[15-20]</sup>。但是现有研究大多仅采用单一模型进行机动车污染的测算,缺乏实测数据验证,甚至一些研究直接将宏观模型应用于中观层面,所得预测值误差较大。此外,目前针对多个中观尾气模型,分析其在中国的适用性研究也较少。基于此,本文选取 MOBILE 和 IVE 这 2 个中观层次的代表性模型,通过分析实测值与模型预测值的误差,比选确定最为适合中国的中观尾气

排放模型,从而为中国的机动车尾气污染评估和决策制定提供依据。

1 中观模型比选方法

1.1 实测数据处理方法

首先,采用车载尾气检测设备 OEM<sup>[21]</sup>开展多辆车的实际道路排放测试,收集数据字段包括测试路段类型、车道数以及测试车辆的逐秒速度、加速度、对应的污染物排放、经纬度和海拔;之后以经纬度字段进行数据的路网匹配,基于地图进行路段数据的分割;最终针对各个路段计算路上行驶车辆的平均排放,计算公式为

$$I_{EF_i} = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m I_{ER_{jk}}}{\sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m v_{jk}} \times 3\,600$$

式中: $EF_i$  为路段  $i$  上的机动车排放因子(g/km),  $i$  为路段编号; $I_{EF_i}$  为  $EF_i$  的计算参数; $ER_{jk}$  为测试车辆逐秒排放率(g/s); $I_{ER_{jk}}$  为  $ER_{jk}$  的计算参数; $v_{jk}$  为测试车辆逐秒速度(km/h); $j$  为路段上测试车辆数(辆); $k$  为车辆在路段  $i$  上的行驶时间(s)。

1.2 模型比选方法

本文是分析模型在中观层次的预测精度,因此主要利用模型针对各个研究路段分别进行路上行驶车辆的排放预测,预测周期为小时,模型比选流程如图 1 所示。

首先基于实测数据进行模型输入参数的本地化标定,其中 MOBILE 模型的参数标定包括车龄、车

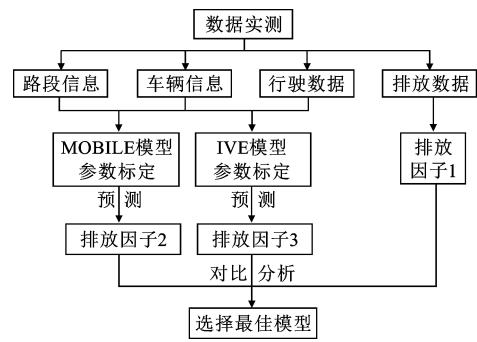


图 1 模型比选流程

Fig. 1 Process of model comparison and selection

里程累积率、行驶里程分布、燃油、环境温度和 I/M 制度等;IVE 模型的参数标定包括车队信息、行驶工况、基础排放因子校正、燃油、环境温度和湿度、I/M 制度等。之后利用模型进行各个路段上测试车辆的排放预测,通过比较模型预测值和实测值的误差,最终比选确定适用于中国的最佳中观机动车尾气模型。

2 实测数据分析

由于目前北京市城区道路上以轻型车为主,因此选取 12 辆轻型汽油车进行实际道路行驶状况下的排放测试。测试车辆均为电喷车,并全部加装了三元催化转化装置,具体信息见表 1。测试路线覆盖了快速路、主干路、次干路和支路 4 种道路类型,共包括 14 个路段,具体信息见表 2。

表 1 测试车辆信息  
Tab. 1 Information of tested vehicles

车辆类型	车龄/年	里程表计数/km
捷达 CI	4	212 512
夏利	5	372 823
桑塔纳	6	372 678
夏利	6	372 823
神龙富康	2	167 757
神龙富康	5	449 108
神龙富康	3	231 556
夏利	5	50 000
神龙富康	3	245 643
索纳塔	1	113 897
索纳塔	2	106 293
索纳塔	2	106 293

表 2 测试路段信息  
Tab. 2 Information of tested road segments

路段编号	路段名称	路段等级	车道数
1	皂君庙路	支路	1+1
2	三环(联想桥-四通桥)	快速路	3+3
3	科学院南路	次干路	1+1
4	四环(中关村三桥-四海桥)	快速路	3+3
5	北坞村路	主干路	2+2
6	闵庄路	主干路	2+2
7	香山南路	支路	1+1
8	五环(杏石口桥-八角桥)	快速路	3+3
9	石景山路	主干路	2+3
10	三环(新兴桥-花园桥)	快速路	3+3
11	车公庄西路	主干路	3+3
12	首都体育馆南路	次干路	3+3
13	中关村南大街	主干路	3+3
14	大慧寺路	支路	1+1

将实测数据按照式(1)计算得到各个路段上行驶车辆的排放因子,如图 2 所示。可以看出,各个路段上行驶车辆的 NO<sub>x</sub> 排放因子大多低于 1.0 g/km,

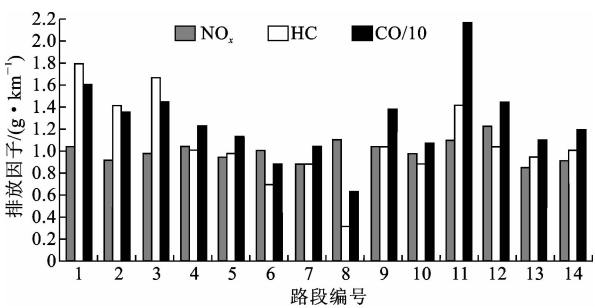


图 2 实测排放因子  
Fig. 2 Actual emission factors

其中路段 12 最高,另外,路段 8 和 11 也较高。HC 排放因子大多低于 1.2 g/km,排放较高的路段包括 1、2、3 和 11。CO 排放因子大多低于 14 g/km,超过该值的路段包括 1、3、11 和 12。综合考虑 3 种污染物可以发现,路段 1、3、11 和 12 属于重污染路段。其中除了路段 11 为主干路外,其余 3 个路段均为次干路及以下等级,这也表明低等级道路上由于交通负荷过大,车辆行驶工况复杂多变,更容易造成严重的尾气污染。

由于各个路段测试车辆相同,测试条件一致,因此主要从行驶状况方面分析实测数据之间的差异。将重污染路段 11(车公庄西路)和污染较轻路段 13(中关村南大街)进行车辆平均速度的对比,如图 3 所示。由图可以看出,虽然 2 个路段均为主干路,车道数也相同,但由于路段 13 的平均速度是路段 11 的 2.39 倍,故其 NO<sub>x</sub>、HC 和 CO 排放分别降低了 21.98%、33.12% 和 49.00%。这也表明车辆行驶状况是影响其实时排放的一个重要因素。

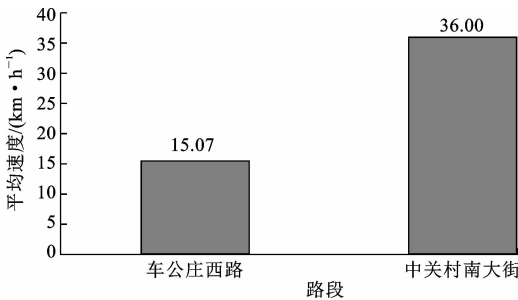


图 3 路段平均速度对比  
Fig. 3 Comparison of average speeds

3 模型预测

3.1 MOBILE 模型预测

MOBILE 模型是美国环保局开发并推荐使用的官方模型,目前的最新版本是 MOBILE6. 2。该模型在零公里排放因子基础上,考虑了车辆随车龄和行驶里程的劣化率、行驶状况、燃油、控制技术水平等诸多因素对排放的影响。早期版本允许用户输

入研究区域的整体平均速度,主要面向宏观层面的计算;之后该模型将速度细分为 14 个区间,加入不同速度下的排放修正系数,更为细致地考虑了行驶对排放的影响;同时将道路类型细分为快速路、主干路、居民路和匝道,实现了行驶里程在空间和时间上更为细致的分配,从而将模型应用扩展到中观层次<sup>[5]</sup>。目前版本可以根据用户要求预测计算不同时段、不同路段和不同车速下的尾气排放。

3.1.1 参数标定

采用实测路段的信息对参数分别进行标定,之后模型运行 16 次得到各个路段上的机动车排放。其中,车里程累积率采用杨方等基于北京市车辆调研对模型默认数据的修正值<sup>[22]</sup>;车龄分布采用路段上测试车辆的实际车龄计算得到;燃油雷氏蒸汽压和硫含量参考北京市同期实施的地方燃油标准<sup>[23]</sup>;I/M 制度采用稳态加载模拟工况法(ASM)<sup>[24]</sup>;环境温度基于实测得到。此外 MOBILE 模型需要输入分车型、分道路类型、分小时和分速度区间的行驶里程分布。本文针对单个路段分别进行机动车单小时排放预测,以皂君庙路(支路)为例,行驶里程分布参数输入见表 3。

表 3 行驶里程分布参数输入

Tab. 3 Input parameters of mileage distribution

行驶里程	参数输入
分车型分布	轻型汽油车设为 1,其他车型均设为 0
分道路类型分布	支路设为 1,其余道路类型均设为 0
分小时分布	将数据全部分配到 1 个小时,如 8:00~9:00 设为 1,其余时段均设为 0
分速度区间分布	首先计算 12 辆车在该路段上的平均速度,之后统计得到各速度区间下的行驶里程比例

3.1.2 预测结果

模型预测结果如图 4 所示。可以看出,各个路段上所预测的 NO<sub>x</sub> 排放因子大多低于 0.6 g/km, HC 排放因子大多低于 0.3 g/km,CO 排放因子大多低于 10 g/km。3 种污染物预测值均较高的路段包括 3、11 和 14,其中路段 14 最高。

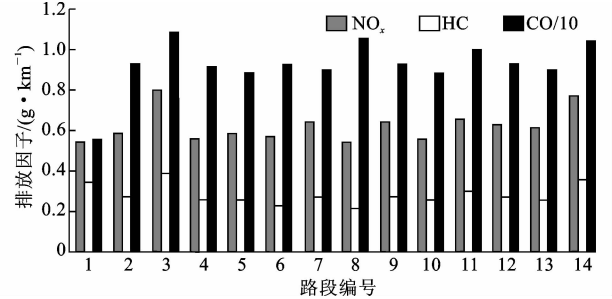


图 4 MOBILE 模型预测排放因子

Fig. 4 Emission factors predicted by MOBILE model

选取高排放路段 14(大慧寺路)和排放较低路段 10(三环,新兴桥—花园桥)进一步分析两路段上车辆在 14 个平均速度区间下的行驶里程分布,如图 5 所示。可以看出,路段 10 的分布峰值出现在 32~40 km/h 区间,24 km/h 以下的行驶里程仅占 22.70%;而路段 14 的分布峰值出现在 16~24 km/h 区间,24 km/h 以下的行驶里程则高达 60.31%。这也表明路段等级不同导致了路上车辆的行驶状况不同,而车辆在不同速度区间的行驶里程比例很大程度上影响了 MOBILE 模型的预测结果。

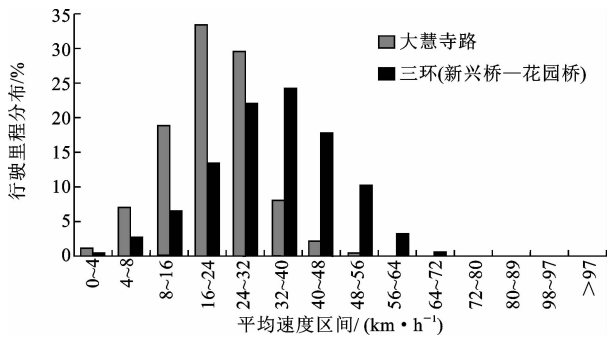


图 5 各速度区间下行驶里程分布对比

Fig. 5 Comparison of mileage distributions of different speed ranges

3.2 IVE 模型预测

IVE 模型由全球可持续发展系统研究组织(GSSR)资助开发,目前的最新版本是 IVE2.0.1。该模型在美国数据基础上,通过在其他国家进行大量数据采集和分析,建立了多个国家的基础排放因子修正系数,更适合在没有官方模型的发展中国家进行推广和使用<sup>[11]</sup>。此外该模型与 MOBILE 模型最大的区别在于引入机动车比功率(vehicle specific power, VSP)和发动机负荷(engine stress, ES)来反映车辆行驶对排放的影响。其中 ES 考虑了之前发动机运转对当前排放的历史效应,而 VSP 则取代了平均速度对排放进行修正。由于 VSP 基于逐秒速度、加速度和道路坡度计算得到,相比于平均速度能够更好地刻画车辆的行驶变化,同时也能够更好地反映出行驶对排放的细微影响<sup>[25]</sup>,因此,可以说该模型开发之初即着眼于路段上(中观层次)尾气排放的预测计算。

3.2.1 参数标定

IVE 模型中燃油、环境温度和湿度、I/M 制度参数确定方法与 MOBILE 模型相同。车队信息选取轻型汽油电喷车,3 类总行驶里程区间(<79 km, 80~161 km, >161 km)的比例基于实测车辆信息计算得到;基础排放因子修正系数采用模型自带的

北京市排放校正因子。此外 IVE 模型将车辆行驶工况以 VSP 和 ES 划分为 60 个比功率区间,需要用户输入预测路段上的车辆在这 60 个区间的行驶时间比例。该数据的获取方法为:首先基于逐秒速度和加速度数据计算 VSP 和对应 ES 值,之后将数据按照比功率区间进行聚类加和得到各区间的样本量,最终各区间样本量与总样本量之比即为该区间的行驶时间比例。

3.2.2 预测结果

模型预测结果如图 6 所示。可以看出,各个路段上所预测的  $\text{NO}_x$  和 HC 排放因子大多低于  $0.9 \text{ g/km}$ ,CO 排放因子大多低于  $11 \text{ g/km}$ 。3 种污染物预测值均较高的路段包括 3、9 和 11,其中路段 11 最高。

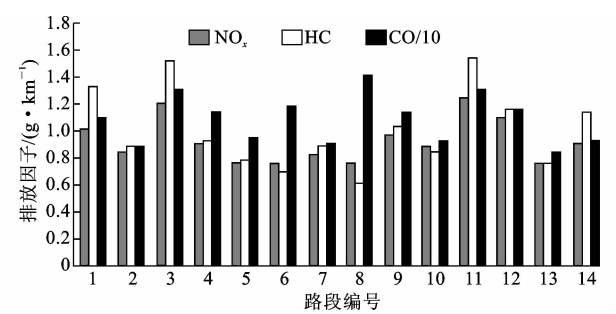


图 6 IVE 模型预测排放因子

Fig. 6 Emission factors predicted by IVE model

选取高排放路段 11(车公庄西路)和排放较低路段 13(中关村南大街)进一步分析两路段上车辆在不同比功率区间下的行驶时间分布,如图 7 所示。由于数据在城区道路测试得到,经分析发现车辆行驶主要集中在中、低比功率区间( $\leq 39$ ),因此仅针对该区间内的时间分布进行分析。

可以看出,2 个路段上车辆的行驶时间分布峰值均出现在区间 9,并且比例近似。其中路段 11 在比功率区间 11 内的分布比例是路段 13 的 1.9 倍,而在区间 12~15 内的分布比例则大大低于路段 13。这也表明虽然 2 个路段等级和车道数相同,但车辆在不同比功率区间的行驶时间比例很大程度上影响了 IVE 模型的预测结果。

4 分析与讨论

4.1 整体趋势对比

以路段 1 的实测和预测值为基底值,将其他路段的排放值分别进行标准化。对比分析 14 个路段上实测数据同模型预测值的变化趋势,如图 8 所示。可以看出,2 个模型的预测值与实测值在整体变化

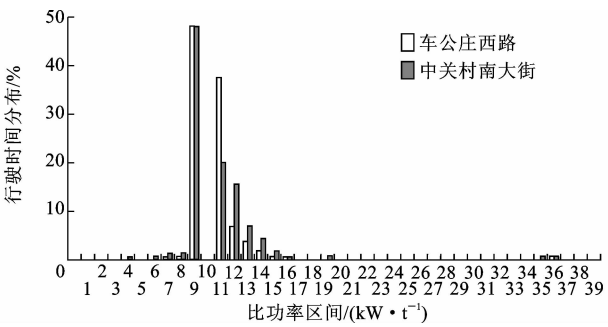
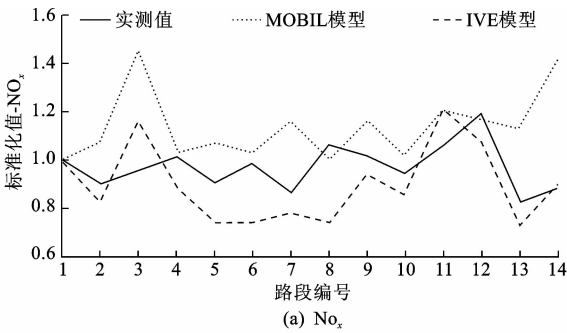
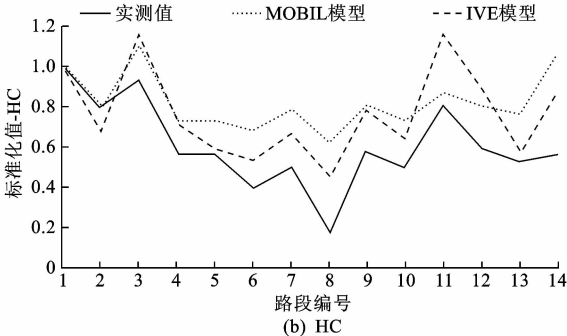


图 7 各比功率区间下行驶时间分布对比

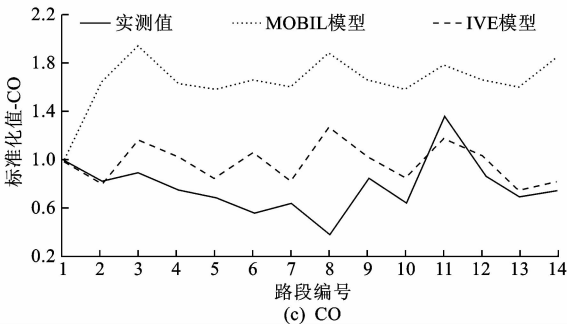
Fig. 7 Comparison of driving time distributions



(a)  $\text{NO}_x$



(b) HC



(c) CO

图 8 模型预测值与实测值趋势对比

Fig. 8 Comparison of actual and predicted values

趋势上均具有较好的一致性,IVE 模型要稍好于 MOBILE 模型。3 种污染物中 HC 的一致性最好,CO 居中, $\text{NO}_x$  次之。这也表明 MOBILE 模型通过平均速度变量,IVE 模型通过 VSP 和 ES 变量均能较好地反映出车辆行驶状况对排放的影响。

4.2 分路段对比

以各个路段的实测值为基底值,对比分析模型预

测值的相对误差,如图 9 所示。可以看出,由于模型自身数据大多基于美国车辆测试得到等原因,2 个模型的预测值均存在不同程度的低估或高估。

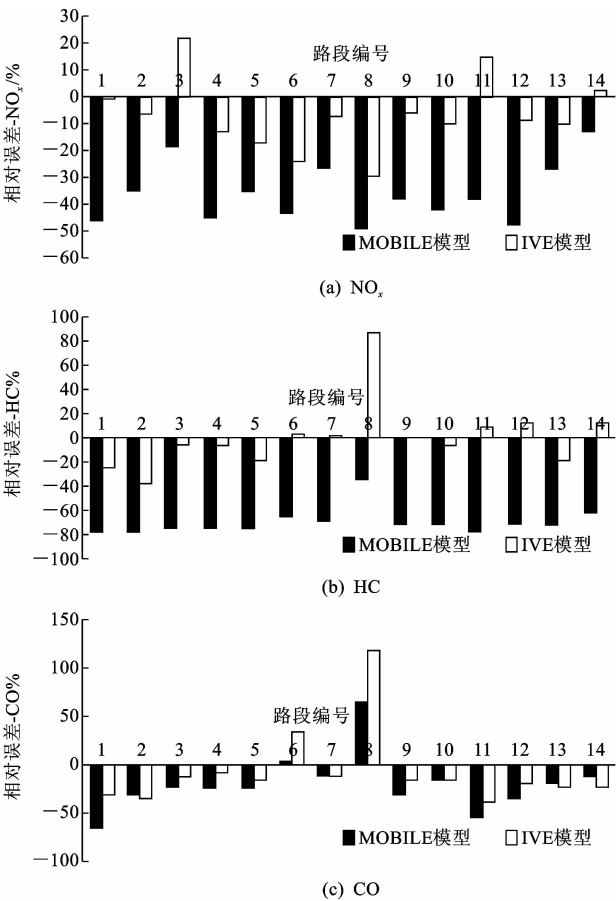


图 9 模型预测值与实测值相对误差

MOBILE 模型对 NO<sub>x</sub> 和 HC 的预测值均为低估,CO 预测值大多为低估,仅有路段 6 和 8 为高估;其中 CO 的预测误差较小,而 NO<sub>x</sub> 和 HC 的误差较大。

IVE 模型与 MOBILE 模型存在相似的趋势,3 种污染物的预测值大多为低估。其中 NO<sub>x</sub>、HC 和 CO 的高估路段分别为 3 个、4 个和 2 个,但 IVE 模型的预测误差要大大低于 MOBILE 模型。

进一步将相对误差取绝对值,分析不同误差区间下的路段个数见表 4。可以看出,MOBILE 模型中 NO<sub>x</sub> 和 HC 的误差较大,分别有 10 个和 14 个路段的预测误差超过了 30%;CO 的预测精度稍好,但也有 6 个路段的预测误差超过了 30%。IVE 模型中 NO<sub>x</sub> 和 HC 的预测精度较高,误差低于 15% 的路段均为 9 个;而 CO 预测值中误差低于 30% 的路段为 9 个,与 MOBILE 模型基本持平(8 个)。

表 4 不同误差区间下的路段个数

Tab. 4 Road segment numbers under different error intervals

相对误差 绝对值/%	不同误差区间的路段数/个					
	MOBILE 模型			IVE 模型		
	NO <sub>x</sub>	HC	CO	NO <sub>x</sub>	HC	CO
<15	1	0	3	9	9	5
15~30	3	0	5	5	3	4
>30	10	14	6	0	2	5

由以上分析知,IVE 模型无论是在整体趋势上,还是在不同路段的预测精度方面均优于 MOBILE 模型。分析原因如下。

(1)IVE 模型引入 VSP 作为车辆行驶状况的表征变量来反映车辆行驶对排放的影响。VSP 综合考虑了车辆逐秒的速度、加速度和道路坡度信息,相比于 MOBILE 模型中采用的 14 个平均速度能够更好地反映尾气排放随车辆行驶的细微变化,因此其在针对路段计算车辆排放这种中观层次的分析方面更有优势。

(2)由于污染物从发动机排出到从尾气管排出需要一定时间,因此,之前几秒的发动机运转同样对当前的尾气管排放存在影响,即存在历史效应。其中 IVE 模型引入 ES 变量来反映之前 25 s 时间内车辆行驶对当前尾气管排放的影响,而 MOBILE 模型未考虑该因素。

(3)IVE 模型从开发之初即面向美国以外没有官方模型的国家,并在世界上很多国家(包括中国的北京、上海和天津等)通过实地测试建立了对应地区的排放修正系数,使其能够更好地应用于这些国家。而 MOBILE 模型由于面向美国本土开发和应用,并未考虑其他国家的排放修正。

5 结 语

(1)车辆行驶状况是影响路上车辆实时排放的一个重要因素,其中低等级道路(次干路及以下)在较大交通负荷情况下,车辆行驶工况更为复杂多变,容易出现高污染排放。

(2)MOBILE 和 IVE 模型预测值同路段实测值在整体变化趋势上均具有较好的一致性,表明 2 个模型分别采用平均速度变量和 VSP、ES 变量均能较好地反映车辆行驶状况对排放的影响,这也说明 2 个模型在中国均具有一定的应用价值。

(3)MOBILE 模型预测值大多为低估,其中 NO<sub>x</sub> 和 HC 的预测误差较大,大部分路段的误差超过 30%;CO 的预测精度稍好,超过一半路段的误差

低于 30%。

(4)IVE 模型的预测值同样大部分存在低估,其中 CO 的预测精度与 MOBILE 模型基本持平;而 NO<sub>x</sub> 和 HC 的预测精度大大高于 MOBILE 模型,大部分路段的误差低于 15%。

(5)IVE 模型的预测精度整体上优于 MOBILE 模型,尤其是 NO<sub>x</sub> 和 HC 最为明显,因此,IVE 模型更适合应用于中国针对路段进行的中观层次机动车排放污染评估。

(6)考虑到目前道路行驶车辆以轻型车为主,其排放污染物所占比例也最高,因此本文在实测和预测时仅针对该类车型进行了分析。未来可就模型在中观层次对其他车型的适用性开展进一步分析。

## 参考文献:

## References:

- [1] 黄琼,于雷,杨方,等. 机动车尾气排放评价模型研究综述[J]. 交通环保, 2003, 24(6): 28-31.  
HUANG Qiong, YU Lei, YANG Fang, et al. A synthesis of mobile emission evaluation models[J]. Environmental Protection in Transportation, 2003, 24(6): 28-31. (in Chinese)
- [2] BARTH M J, AN F, YOUNGLOVE T, et al. Comprehensive modal emissions model (CMEM), version 2.0, user's guide[R]. Riverside: University of California, 2000.
- [3] 李冰, 储江伟. 乙醇汽油车行驶中的尾气遥感监测与排放因子分析[J]. 中国公路学报, 2014, 27(3): 122-126.  
LI Bing, CHU Jiang-wei. Remote sensing measurement and emission factor analysis for driving alcohol-gasoline vehicle[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(3): 122-126. (in Chinese)
- [4] BURÓN J M, APARICIO F, IZQUIERDO Ó, et al. Estimation of the input data for the prediction of road transportation emissions in Spain from 2000 to 2010 considering several scenarios[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(30): 5585-5596.
- [5] 郭平, 马宁, 陈刚才, 等. 重庆市机动车排放因子研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(11): 108-113.  
GUO Ping, MA Ning, CHEN Gang-cai, et al. A study on the vehicle emission factors in Chongqing[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2009, 31(11): 108-113. (in Chinese)
- [6] U. S. Environmental Protection Agency. User's guide to MOBILE 6.1 and MOBILE 6.2[R]. Washington

- DC: U. S. Environmental Protection Agency, 2003.
- [7] WANG H K, FU L X, LIN X, et al. A bottom-up methodology to estimate vehicle emissions for the Beijing urban area[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(6): 1947-1953.
- [8] 王晓宁, 孟祥海, 盛洪飞, 等. 基于几何非线性的道路立交处机动车污染排放计算[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 96-100.  
WANG Xiao-ning, MENG Xiang-hai, SHENG Hong-fei, et al. Calculation on vehicle's pollution emission of interchange based on geometric alignment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(6): 96-100. (in Chinese)
- [9] GKATZOFLIAS D, KOURIDIS C, NTZIACHRISTOS L, et al. Computer programme to calculate emissions from road transport user manual (COPERT 4), version 4.0, user's guide[R]. Copenhagen: European Environmental Agency, 2007.
- [10] ZARATE E, BELALCAZAR L C, CLAPPIER A, et al. Air quality modeling over Bogota, Colombia: combined techniques to estimate and evaluate emission inventories[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(29): 6302-6318.
- [11] DAVIS N, LENTS J, OSSES M, et al. Development and application of an international vehicle emissions model[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2005, 1939: 155-165.
- [12] BARTH M, DAVIS N, LENTS J, et al. Vehicle activity patterns and emissions in Pune, India[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007, 43(2038): 156-166.
- [13] 孙启鹏, 高怡, 马飞, 等. 基于 LEAP 和综合集成赋权的城市低碳交通政策选择方法[J]. 中国公路学报, 2014, 27(8): 105-111, 119.  
SUN Qi-peng, GAO Yi, MA Fei, et al. LEAP system and integrated weight based policy choice method for urban low-carbon transportation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(8): 105-111, 119. (in Chinese)
- [14] 郭栋, 高松, 邹广德, 等. 城市区域机动车排放定量评价方法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 72-78.  
GUO Dong, GAO Song, ZOU Guang-de, et al. Quantitative evaluation method of vehicle emission in urban region[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 72-78. (in Chinese)
- [15] 王生昌, 李百川. 公路隧道汽车污染物基准排放量[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2005, 25(1): 77-81.  
WANG Sheng-chang, LI Bai-chuan. Criterion emission amount of automotive pollution in highway tunnel[J].

- Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2005, 25(1): 77-81. (in Chinese)
- [16] 高云峰, 胡 华. 基于比功率法的信号控制交叉口排队车辆尾气排放估计[J]. 中国公路学报, 2015, 28(4): 101-108.
- GAO Yun-feng, HU Hua. Estimation of queued vehicle emissions at signalized intersections based on vehicle specific power approach [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(4): 101-108. (in Chinese)
- [17] 李铁柱. 城市交通大气环境影响评价及预测技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2001.
- LI Tie-zhu. Study on evaluation and forecast technology of urban traffic atmospheric environment influence[D]. Nanjing: Southeast University, 2001. (in Chinese)
- [18] 董红召, 徐勇斌, 陈 宁. 基于 IVE 模型的杭州市机动车实际行驶工况下排放因子的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(12): 1034-1038.
- DONG Hong-zhao, XU Yong-bin, CHEN Ning. A research on the vehicle emission factors of real world driving cycle in Hangzhou city based on IVE model [J]. Automotive Engineering, 2011, 33(12): 1034-1038. (in Chinese)
- [19] 程 颖, 于 雷, 王宏图, 等. 基于 PEMS 的 MOBILE 与 COPERT 排放模型对比研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(3): 176-181.
- CHENG Ying, YU Lei, WANG Hong-tu, et al. Comparative study of MOBILE and COPERT emission models based on PEMS[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(3): 176-181. (in Chinese)
- [20] 车汶蔚, 郑君瑜, 钟流举. 珠江三角洲机动车污染物排放特征及分担率[J]. 环境科学研究, 2009, 22(4): 456-461.
- CHE Wen-wei, ZHENG Jun-yu, ZHONG Liu-ju. Vehicle exhaust emission characteristics and contributions in the Pearl River Delta region[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(4): 456-461. (in Chinese)
- [21] 王宏图, 郝艳召, 郝珊珊. 机动车车载尾气检测技术研究综述[J]. 安全与环境工程, 2012, 19(2): 79-83.
- WANG Hong-tu, HAO Yan-zhao, HAO Shan-shan. Overview of vehicle portable emission measurement system[J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19(2): 79-83. (in Chinese)
- [22] 杨 方, 于 雷. 利用小样本调查数据调整北京市车里程累计率[J]. 北方交通大学学报, 2004, 28(2): 82-85.
- YANG Fang, YU Lei. Adjusting vehicle mileage accumulative rates in Beijing making use of small sample survey[J]. Journal of Northern Jiaotong University, 2004, 28(2): 82-85. (in Chinese)
- [23] DB 17930—2011, 车用汽油[S].
- DB 17930—2011, Gasoline for motor vehicles[S]. (in Chinese)
- [24] DB 11/122—2010, 在用汽油车稳态加载污染物排放限值及测量方法[S].
- DB 11/122—2010, Limits and measurement methods for exhaust pollutants from in-use gasoline vehicles under steady-state loaded mode[S]. (in Chinese)
- [25] PALACIOS J, LUIS J. Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and TILDAS remote sensing[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- Discrete Optimization, 2004(22): 219-230.
- [17] MÖHRING R H, SCHILLING H, SCHÜTZ B, et al. Partitioning graphs to speed up Dijkstra's algorithm [J]. ACM Journal of Experimental Algorithmics, 2007, 11(2): 1-29.
- [18] HOLZER M, SCHULZ F, WAGNER D, et al. Combining speed-up techniques for shortest-path computations[J]. ACM Journal of Experimental Algorithmics, 2005, 10(10): 269-284.
- [19] GEMSA A. Arc-flag compression student thesis[D]. Karlsruhe: Institute für Technologie, 2008.
- [20] 颜 波. 车辆自主导航系统中的动态最优路径规划[D]. 北京: 清华大学, 2004.
- YAN Bo. Dynamic path planning in vehicle autonomous navigation system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2004. (in Chinese)

(上接第 91 页)

- [14] 张照生, 杨殿阁, 张德鑫, 等. 车辆导航系统中基于街区分块的分层路网路径规划[J]. 中国机械工程, 2013, 24(23): 3255-3260.
- ZHANG Zhao-sheng, YANG Dian-ge, ZHANG De-xin, et al. Hierarchical path planning development based on community block in vehicle navigation[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(23): 3255-3260. (in Chinese)
- [15] SONG Q, WANG X F. Efficient routing on large road networks using hierarchical communities [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2011, 12(1): 132-140.
- [16] LAUTHER U. An extremely fast, exact algorithm for finding shortest paths in static networks with geographical background [J]. Software & Engineering