

基于MOVES模型本地化的轻型车排放因子估计方法

单肖年¹, 刘皓冰², 张小丽¹, 陈小鸿³, 叶建红³

(1. 河海大学 土木与交通学院, 南京 210024; 2. 新墨西哥大学 土木与环境工程系, 阿尔伯克基 87123; 3. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 考虑中美两国车辆排放限制标准及测试工况的差异, 提出了MOVES模型本地化修正的方法, 并进行了案例分析。研究表明, 我国车辆排放控制水平虽较为滞后但发展较快, 如我国国I至国VIa轻型车一氧化碳排放限值标准所对应的美国轻型车排放特征年份分别为: 1995、1999、2002、2007、2010及2012年。此外, 对估计的轻型车排放因子与真实的测试结果进行了对比分析。

关键词: 交通环境; MOVES模型; 轻型车排放清单; 车辆排放因子; 车龄分布

中图分类号: U121

文献标志码: A

Localization of Light-Duty Vehicle Emission Factor Estimation Based on MOVES

SHAN Xiaonian¹, LIU Haobing², ZHANG Xiaoli¹, CHEN Xiaohong, YE Jianhong

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210024, China; 2. The University of New Mexico, Albuquerque 87123, USA 3. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: With consideration of the differences of vehicle emissions limits standards and testing driving cycles between China and the United States, a method of MOVES (motor vehicle emissions simulator) localization is proposed, and a case study of Shanghai is made. The result reveals that although the vehicle emission control in China lags behind, it develops rapidly. For example, the emission characteristic years of light-duty vehicles in the United States corresponding to the carbon monoxide emission limit standards of China I to China VIa are 1995, 1999, 2002, 2007, 2010 and 2012. The estimated light duty vehicle emissions factors are compared with the real test results.

Key words: traffic environment; MOVES (motor vehicle emissions simulator) model; light duty vehicle emission inventory; vehicle emissions factors; vehicle age distribution

为了准确地估计车辆污染物排放特征, 欧美发达国家从20世纪60年代起就开始实测车辆排放数据, 开发了基于排放因子及平均速度修正的宏观车辆排放模型, 如MOBILE (mobile source emission factor model) 模型、EMFAC (emission factors) 模型等。本世纪初, 随着对实际工况下车辆排放的关注以及车载排放测试系统的发展, 能够实时地采集车辆在实际运行工程中的污染物排放特征, 研究者构建了基于车辆行驶特征的微观车辆排放模型, 即以表征车辆行驶工况的参数为度量指标, 如车辆比功率 (vehicle specific power, VSP)、速度/加速度等, 进而分析不同工况下的车辆排放特征, 如CMEM (comprehensive modal emissions model) 模型、MOVES (motor vehicle emissions simulator) 模型等。

车辆排放特征的地域性强, 受当地车辆行驶状况、驾驶行为、车辆排放水平和燃油品质的影响大。前述的车辆排放模型均是根据当地实际行驶工况设计, 如美国FTP工况 (federal test procedure), 并基于大量的实验或实测数据统计建模而成。MOVES模型中开放的数据库存储了不同车辆类型、车龄、车速及车辆比功率下的车辆基本排放因子, 称之为微单元 (Bin), 同时存储了其他相关影响因素的修正系数。由此, MOVES模型灵活开放的数据库及模型结构增加了模型的移植性, 使得世界很多城市采集表征当地实际的车辆行驶工况数据、车辆技术特征及行驶环境数据等, 对MOVES模型进行本地化修正, 进而估计车辆污染物排放特征。

收稿日期: 2021-01-09

基金项目: 国家自然科学基金 (52002113); 江苏省自然科学基金 (BK20200526); 中央高校基本科研业务费专项资金 (B200202084)

第一作者: 单肖年 (1990—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为城市综合交通规划、交通能源与环境、智能交通系统等。E-mail: shanxiaonian@hhu.edu.cn



论文
拓展
介绍

MOVES初始模型发布于2009年12月,2010年黄冠涛等^[1]即对MOVES模型的系统组成进行了介绍,2013年岳园园等^[2]率先对MOVES模型中车辆行驶工况、车龄分布、车用燃油及行驶环境等相关输入参数进行了本地化修正,估计了北京市轻型车污染物排放因子。随后我国研究者从多个维度对MOVES模型进行了本地化修正,探究了不同城市不同车辆类型的污染物排放特征,包括轻型车/重型车排放因子或排放清单等。现有研究对MOVES模型的本地化修正可以覆盖影响机动车排放的绝大多数要素,包括燃油标准、劣化系数、车龄分布、车辆排放技术、车辆行驶工况以及行驶环境等^[2-8]。具体而言,燃油标准是指我国车用汽油及车用柴油标准与模型内置的美国燃油标准在使用时间跨度及成分组成上存在差异,例如张广昕等^[3]利用MOVES模型剖析了汽油中不同硫含量对车辆排放因子的变化特征。劣化系数是指随着车辆车龄及行驶里程的增长,车辆排放因子呈现增长趋势,Liu等^[4]即对中美两国轻型车不同污染物的劣化系数进行了较为全面的修正,并通过不同车龄阶段进行表达。车辆排放技术是指单车排放控制技术的差异,例如曹杨等^[5]分析了我国轻型车排放标准与欧洲、美国轻型车排放标准实施年份的差异,Shan等^[6]分析了中美两国重型公交车排放技术的差异。车辆行驶工况是指在实际道路行驶条件下的车辆比功率分布特征,MOVES模型中内置了美国当地城市的车辆行驶工况数据,研究者需要对本地的车辆行驶工况数据进行采集与分析^[7]。行驶环境着重体现在车辆行驶过程中的环境温度与湿度特征。

现有的研究对MOVES模型本地化修正多停留在输入参数较为简单的修正,如直接使用本地车龄分布、温度湿度等。部分学者较好地对中美两国机动车污染排放限制标准进行了分析^[4-6],但中美两国车辆污染物排放特征的差异性对比研究较为不足,总体上缺乏较为全面、统一的MOVES模型本地化修正方法。此外,由于中美两国车辆排放限值标准推进的年限及测试工况有明显的差异性,例如2000年国内使用的轻型车并不能直接等同于2000年在美国使用的轻型车,且车辆不同的污染物排放限值标准及车用燃油存在显著差异。在对MOVES模型进行本地化修正及移植过程中,亟需考虑上述中美两国车辆排放限值标准及测试工况的差异性。

基于上述的背景,本文旨在提出MOVES模型本地化修正的建模方法并进行案例分析,剖析我国

典型城市轻型车污染物排放特征,进而探究交通运行特征对车辆污染物排放的影响,有助于促进我国城市机动车污染排放的定量化分析或中美车辆排放控制技术差异分析。

1 MOVES模型本地化修正方法

1.1 MOVES模型及研发进展

美国环保署2009年12月发布了移动源排放测算模型MOVES2010,用于取代2004年发布的MOBILE6.2模型,成为新一代车辆排放计算模型,并于2015年及2020年对MOVES模型进行了更新迭代,分别为MOVES2014及MOVES3模型。MOVES模型的模拟空间范围涵盖了宏观、中观及微观三个层面。宏观及中观层面是指国家及县市机动车排放总量估计,微观层面是指路段、交叉口及停车场等车辆排放因子估计。MOVES模型模拟的污染物种类繁多,如HC、CO、NO_x及PM(particulate matter)等。

MOVES模型内置的数据库按照Bin微单元划分方法存储了两类车辆能耗及排放清单,反映了影响车辆能耗及排放特征的主要因素,如表1所示。一类是根据车辆类型、燃油类型、车重、发动机等组合模式,另外一类是根据车型、车龄、车速及车辆比功率的组合模式,前者表征了车辆的技术特征,后者体现了车辆实际行驶过程中的工况特征。MOVES模型不仅能够估计车辆运行阶段的能耗及排放特征,还能够估计启动、刹车摩擦等其他车辆运行状态的能耗及排放特征。此外,由于车辆实际的车公里数难以获得,MOVES模型中采用车龄来表征车辆劣化的特征。MOVES模型中道路类型分为5类,包括了道路设施及非道路设施等,其中限制出入口(restricted access)是指快速路或高速公路,不限制出入口(unrestricted access)是指地面道路,如主次干路等。

1.2 MOVES本地化修正的必要性

MOVES的Bin划分方法及宏微观统一的思想,给模型的应用带来了很大的灵活性。非美国本土城市可借助于MOVES模型微观层面的数据结构,基于当地的车辆实际行驶工况特征及车辆技术特征,估计实际交通运行情况下的车辆污染物排放因子。微观层面MOVES模型的核心输入是表征车辆行驶工况的车辆比功率分布,模型的其他输入包括有:燃油类型、道路类型、车龄分布、劣化系数、温度湿度等。

表 1 MOVES 模型方法描述
Tab. 1 Description of MOVES model method

MOVES 模型	模型方法
表征车辆使用指标	车公里、车辆使用时间,不仅可考虑运行状况下的排放,还能用同样的指标考虑其他“非道路”多种情况下的排放进程,如停车的蒸发等。
模拟的污染物类型	标准污染物:CO、NO _x ;碳氢化合物:HC、非甲烷烃类等 颗粒物:PM _{2.5} 、PM ₁₀ 等; 有毒气体:苯、甲醛、乙醛、丙烯醛、甲基叔丁基醚等 温室气体:CO ₂ 、CH ₄ 、N ₂ O;能耗
可模拟的排放进程	行驶、启动、刹车摩擦、轮胎摩擦、蒸发浸透等。
模型计算思路	微单元(Bin)方法,MOVES 模型两类基础 Bin 数据: 表征车辆技术特征:根据车型、燃油类型、车重、发动机等组合; 表征车辆行驶工况特征:根据车型、车龄、车速及车辆比功率等组合。
修正系数	劣化率,温度湿度修正,空调使用,检修制度。
车辆使用与排放的关系	考虑到车辆使用情况和车辆排放情况并没有绝对的对对应关系。先确定车辆的活动,再划分至不同排放水平
与排放相关的特征指标	燃油类型,发动机技术,重量,发动机尺寸
车辆速度特征指标	平均车速、逐秒车速或车辆比功率
行驶工况类型	存储不同车型道路类型的 26 条行驶工况;微观估计时,需输入行驶工况数据
道路类型划分	按照接入口交叉形式及地区:城市限制出入口、城市不限制出入口、乡村限制出入口、乡村不限制出入口、非道路设施
考虑车辆劣化指标	车龄

MOVES 模型本地化修正不仅需要对输入的相关参数进行修正,还需要关注车辆技术特征的差异性,即中美两国车辆排放限值标准推进的进程及测试工况有明显的差异性。我国车辆排放限值标准制定参照欧洲标准体系,从 2000 年至 2020 年间先后制定了轻型车国 I 至国 VI 的尾气排放限值标准,时间跨度仅为 20 年,以车辆 CO 排放限值标准为例,如图 1 所示。

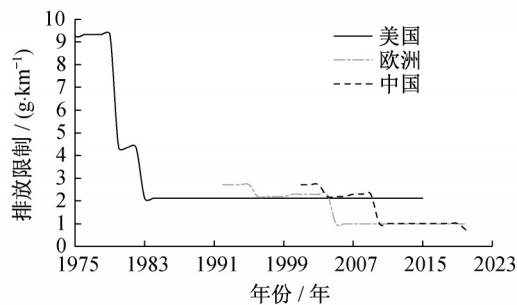


图 1 美国、欧洲及中国轻型汽油车 CO 排放限值标准变化
Fig. 1 Changes of CO emission limits for light-duty gasoline vehicles in the United States, Europe, and China

由图 1 可知,我国轻型汽油车 CO 排放限值标准下降趋势与欧洲几乎一致。美国从 1960 年代开始关注机动车排放污染,并逐步采取严格的车辆尾气排放限值标准措施,在 1990 年初,轻型汽油车 CO 排放限值已经与我国轻型车国 III 阶段相当,从图 1 中可以看出 2005 年我国车辆排放限值与美国排放限值较为一致。然而,需要说明的是,我国排放限值标准采用的是新车排放限值,而美国在 1994 后车辆排放限值考虑的是 5 年或者行驶 5 万英里的车辆排放

限值,整体来说我国车辆排放标准还要往后推 5 年,即认为 2010 年以后,我国机动车排放标准与美国较为一致。对于 2001 年的车辆来说其排放特征与美国 80 年代初的车辆一致。

另一方面,在车辆排放限值标准制定过程中,中美两国车辆测试的标准工况也同样具有显著差异性。我国国标的 I 型试验借鉴欧洲 ECE15 (economic commission for Europe) +EUDC (extra urban driving cycle) 稳态工况,而美国采用 FTP 瞬态工况,如图 2 所示。考虑到车辆排放限值标准的差异、车辆排放测试工况的差异及车用燃油标准的差异,MOVES 模型本地化修正的难点是需要结合我国实际的车辆排放限值标准及测试工况对 MOVES 模型的排放清单进行深入修正。

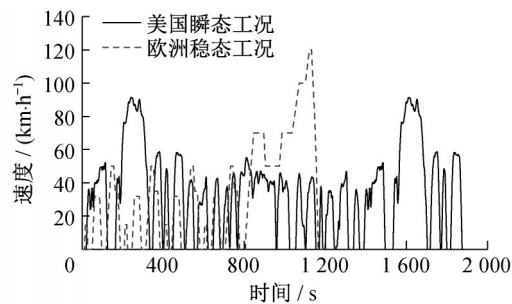


图 2 欧洲 ECE15+EUDC 稳态工况与美国 FTP 瞬态工况
Fig. 2 European ECE 15+EUDC steady state condition and American FTP transient condition

1.3 MOVES 模型本地化修正的建模流程

为进一步明晰 MOVES 模型本地化修正的思路,MOVES 模型机动车排放特征计算过程如图 3 所

示。根据一定时空范围内的车辆行驶轨迹数据,估计得到车辆VSP-Bin分布特征,结合模型中内置的不同VSP-Bin分布下的车辆排放速率数据库,可以估计得到车辆基础因子;随后结合车用燃油、气象信息、车龄分布及劣化特征等相关参数,估计得到某车辆类型综合排放因子;进一步利用车型结构组成及车公里数据,计算得到某区域一定时空下的机动车排放总量或排放清单。

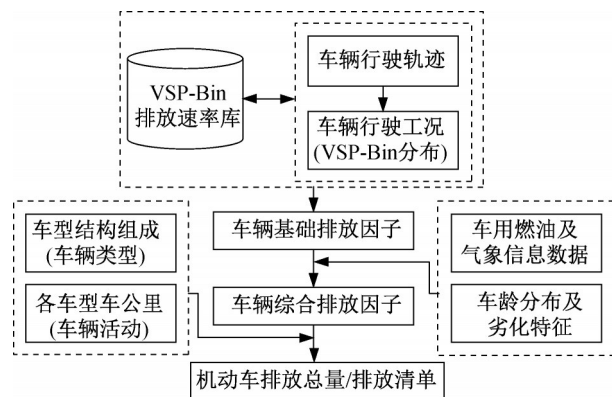


图3 MOVES模型计算过程

Fig. 3 Computational procedure of MOVES model

基于第1.1节及1.2节的分析,本文提出了MOVES建模流程及模型输入/修正的参数,如图4所示。图中通过虚线边框的方式凸显出MOVES模型需修正的关键输入参数,包括:车辆排放限值、车龄分布、燃油标准、劣化系数、行驶工况以及行驶环境等。此外,对于我国车辆I/M (inspection maintenance) 制度的修正,可以在劣化系数修正中进行考量;车辆空调参数选择默认值,本次研究中未考虑修正。由此,基于MOVES模型本地化修正,进而估计车辆实际运行状况下的污染物排放因子。对于我国各标准新车污染物排放清单的修正,首先基于我国车辆排放限值标准测试工况,使用MOVES模型估计得到不同年份下的车辆排放因子,与我国车辆各阶段排放限值进行对比,进而确定我国各阶段车辆不同污染物排放限值标准对应的美国车辆年份。

对各标准新车排放清单修正有两种:①修正MOVES模型排放清单数据库中有关车龄的所有微单元;②对车辆排放因子的估计年份及车龄分布进行联合修正。选择途径①需要对所有的微单元进行遍历修正,难度高;选择途径②虽然会增加模型的运行次数,但能够准确地表征我国车辆的技术特征,本文选择途径②作为各标准新车排放清单修正的方法。

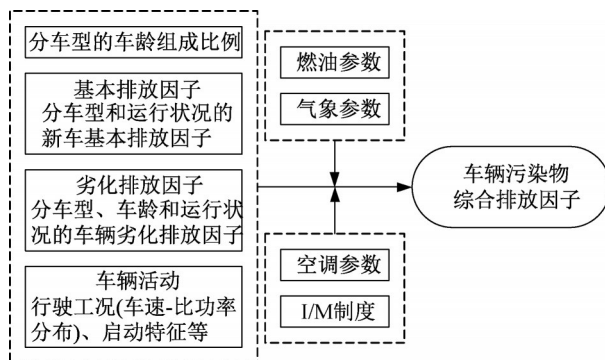


图4 MOVES模型建模流程及输入参数修正

Fig. 4 Modeling process and input parameter modification of MOVES

2 MOVES模型轻型车排放清单匹配

2.1 车辆排放清单匹配方法

MOVES模型存储有美国从60年代至现在的各类车型、各时间阶段和各类污染物排放清单,基于开放的数据结构,可以将我国不同排放限制水平的车辆精确地匹配到美国各时间阶段的车辆,从而对新车排放清单进行匹配,以符合我国不同排放限值阶段的车辆技术特征。

具体操作流程:在MOVES模型中,对每一阶段的轻型车分别进行我国车辆排放标准的I型运行试验仿真,对比仿真前后轻型车CO、HC、NO_x及PM特征,确定我国轻型车不同排放限值对应的美国年份信息。需要说明的是,我国车辆排放限值标准国III阶段后(2007年后的新车)的轻型车I型运行试验条件为“冷启动+工况运行”,在-7℃环境下静置12h以上;然后在25℃环境下进行ECE15+EUDC工况测试,并从工况开始计算车辆排放数值。同时,燃油类型应该同步考虑相对应年份的燃油标准。国I及国II标准的I型试验操作不存在冷启动,允许发动机预热40s,无法在MOVES模型中直接仿真。Piotr及Jerzy^[9]指出冷启动试验的HC、CO及NO_x排放分别是国I及国II预热试验排放的1.5、2.2及1.2倍。借鉴上述研究成果,对国I及国II轻型车的排放限值进行匹配。近30年轻型车I型试验污染物排放仿真值,以CO及PM₁₀为例,如图5所示。

由图5可知,根据我国车辆CO排放限值标准,确定我国不同轻型车排放标准所对应的美国模型年份分别为:1995、1999、2002、2007、2010及2012年。研究中需要进一步区分不同污染物我国车辆排放限值标准所对应的美国模型年。

针对PM₁₀而言,我国轻型车排放限值标准列出的是PM数值,未具体区分PM₁₀及PM_{2.5}排放限值,

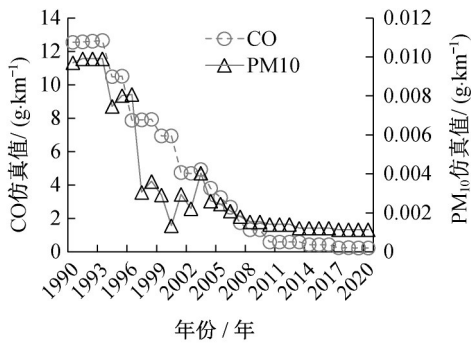


图5 车辆I型仿真试验CO及PM₁₀排放值

Fig. 5 Results of CO and PM₁₀ emission factors

无法对PM的排放物做出准确的修正。郝艳召等^[8]研究发现国I至国IV轻型车PM₁₀的排放值分别为

0.026、0.011、0.007及0.003 g·km⁻¹。参考上述数值,确定了轻型车PM₁₀排放物的美国模型年份为1994、1997、2002、2004、2007及2012年。

2.2 车辆排放清单匹配结果

根据2.1节的车辆排放清单匹配方法,可以确定HC及NO_x车辆排放限值对应的年份,汇总如表2所示。此外,国标实施前的车辆排放特征与美国1970~1975年生产的车辆排放特征相当。总体上,我国轻型车污染物排放限值要落后于美国轻型车排放限值,且落后的年份差距随着我国车辆排放限值标准的不断推进而缩小。此外,不同的轻型车排放物所对应的美国模型年是不同的,我国轻型车对HC及PM₁₀排放物的限值要落后于对NO_x及CO排放物的限值。

表2 符合我国轻型车排放标准的MOVES模型美国排放清单年份匹配

Tab. 2 Comparison of model year of emission limits for light-duty vehicles between the United States and China

年份 燃油标准		国 VIa	国 V	国 IV	国 III	国 II	国 I
		2020—至今	2018—2020	2010—2018	2007—2009	2005—2006	2000—2004
		油品 VIA	油品 V	油品 IV	油品 III	油品 II	油品 I
HC	仿真值/(g·km ⁻¹)	0.02	0.03	0.09	0.18		
	限值/(g·km ⁻¹)	0.1	0.1	0.1	0.2	HC+NO _x	HC+NO _x
	年份	2012	2006	2001	2000	1.06	1.45
NO _x	仿真值/(g·km ⁻¹)	0.065	0.065	0.077	0.14	0.7 (0.95)	0.97 (1.31)
	限值/(g·km ⁻¹)	0.06	0.06	0.08	0.15	1998	1995
	年份	2014	2013	2005	2004		
CO	仿真值/(g·km ⁻¹)	0.69	0.86	0.959	2.312	4.903	6.18
	限值/(g·km ⁻¹)	0.7	1.0	1.0	2.3	2.2 (4.84)	2.72 (5.98)
	年份	2012	2010	2007	2002	1999	1995
PM ₁₀	仿真值/(g·km ⁻¹)	0.001 4	0.0018	0.003	0.008	0.0129	0.033
	限值/(g·km ⁻¹)			0.003	0.007	0.011 (0.013)	0.026 (0.031)
	年份	2012	2007	2004	2002	1997	1994

注:由于国I及国II轻型车排放限值测试工况存在差异,括号内数值为文献[10]中国I及国II测试数值。

3 MOVES 模型本地化——以上海市为例

3.1 燃油参数选择

燃油品质对车辆污染物排放具有较大的影响,尤其是车辆排放限值标准的推进与车用燃油标准的制定密切相关。我国车用汽油质量标准的推进,主要体现在对含硫量、烯烃含量、锰含量以及苯含量等提出更为严格的控制。由于数据限值,本文估计的基准年份为2013年,在燃油参数选择时采用车用汽油国IV标准及DB31/427—2009上海市车用汽油参数标准。在MOVES2014模型中,通过15个参数细分出6 884种燃油类型。对比发现,对于芳香烃含量、含氧量常数、T50及T90而言,MOVES内置的

燃料组成均满足上述标准,研究中按照雷氏蒸汽压、含硫量及苯含量数值进行升序,选择一致性较高的燃油,其中又以硫含量作为主要指标。

根据相关监测,上海汽油硫含量在5×10⁶~30×10⁶,且2013年下半年上海实施国V标准的油品。研究以上海市车用汽油DB31/427—2009为标准,确定MOVES2014模型中Fuel Formulation ID=2 420为汽油燃料,作为上海市轻型车汽油的燃料推荐值。

3.2 轻型车车龄分布修正

车龄分布是指不同年份出厂车辆占车辆总数的比例分布,MOVES模型需要按照车辆使用类型分别输入车龄分布。本文根据实际调查数据计算上海市2013年轻型车车龄分布特征。上海市环境监测中心于2014

年6月~8月,通过检测站调研的方式,调查了近3万辆轻型车的使用年限特征,其中本地小汽车约为2.25万辆,外地牌照小汽车约为0.75万辆,本地牌照小汽车与外地牌照比值约为1:0.33,与上海市第4次综合交通调查数据相一致,由于该数据的大样本特征,且上海市2014年及2013年私人小汽车拥有政策并没有发生改变,调研所获得轻型车车龄分布可以作为上海市2013

年轻型车污染物排放估计的车龄分布特征。

由于上海市快速路在工作日高峰时段7:30~9:30以及16:30~18:30禁止外省市号牌小客车、出租空车、实习车通行。因此,快速路轻型车的车龄分布估计时,需要剔除外地牌照及沪C牌照小汽车数量;而地面道路轻型车车龄分布估计时,需要包括所有车辆车龄数据,快速路及地面道路轻型车车龄分布如图6所示。

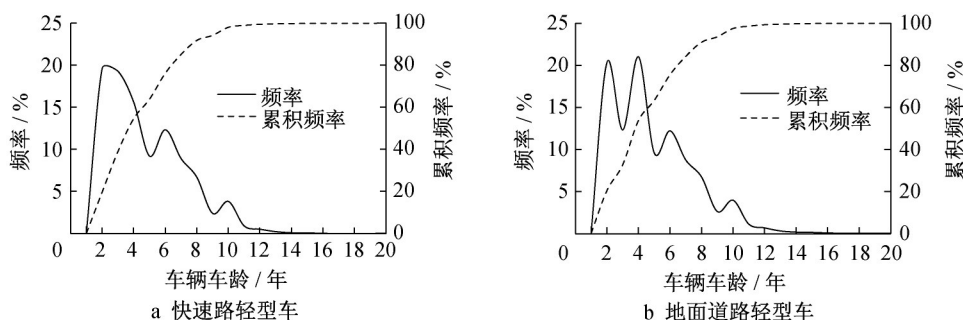


图6 车辆车龄分布特征

Fig. 6 Vehicle age distribution of light duty vehicle in Shanghai

上海市快速路车龄均值为4.8,车龄为2、3、4比例均超过15%,前5年车龄累积比例达到64%。上海市地面道路轻型车平均车龄约为5年(均值为4.91),车龄为1的拥车比例低(0.14%),车龄分布存在两个峰值,分别是2年(20.29%)及4年(21.00%),车龄为3年时的比例仅为12.30%,车龄分布具有明显的跳跃与波动特征,这是由于外地牌照的车辆混入所引起的。同时,也间接地说明了若从车管所调取上海市注册的

轻型车数据,进而计算得到的车龄分布并不能代表实际在上海市内运行的轻型车车龄分布特征。

考虑到不同污染物具有不同的目标年份设定,HC为2004年, NO_x 为2008年,CO为2010年, PM_{10} 为2007年,修正的快速路及地面道路轻型车车龄分布如图7所示。不同污染物呈现不同的车龄分布特征,进一步说明MOVES模型排放清单匹配的必要性。针对轻型车不同污染物排放因子估计需要运行4次。

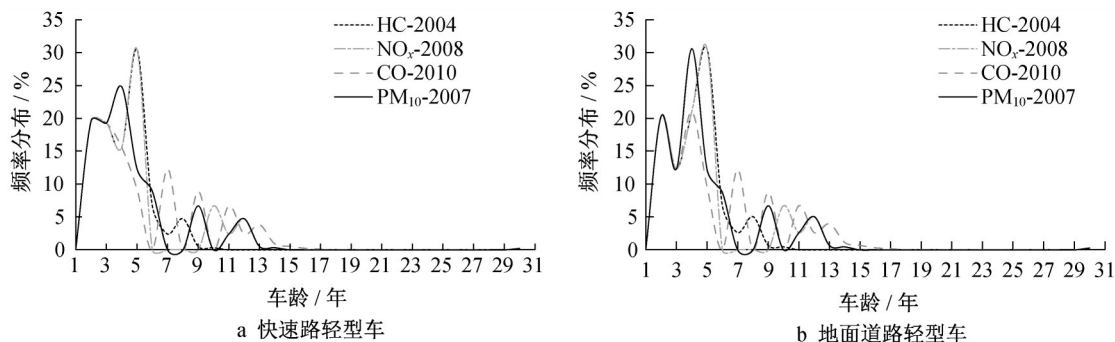


图7 不同污染物的模型年份及车龄分布修正

Fig. 7 Model years and revised vehicle age distribution for different vehicle emissions

3.3 劣化系数修正

在第2小节中讨论了我国不同排放标准下的新车排放清单匹配问题。车辆实际使用过程中,车辆的排放特征将会进一步劣化,主要是受到行驶里程数及我国I/M制度的影响。MOVES模型中根据车龄储存了不同车龄分布下的劣化系数,分为车龄小于3年、4~5年、6~7年、8~9年、10~14年、15~19年及大于20年,

共7组。研究中,需要按照我国轻型车实际行驶里程随年份的变化进行修正。借鉴相关研究成果^[11],得到轻型车车龄劣化系数修正,如表3所示。

由表3可知,我国劣化系数要高于美国同比例数值,推行系统的I/M检验维护制度对降低我国“旧车”的劣化排放具有重要作用。此外,轻型车PM的劣化系数假设与MOVES模型一致。

表3 车辆劣化系数修正

Tab. 3 Revised deterioration factor of light-duty vehicle

车龄/年	HC		NO _x		CO	
	美国	中国	美国	中国	美国	中国
0~3	1	1	1	1	1	1
4~5	1.9	3.4	1.7	3.2	2.3	2.5
6~7	2.8	6.1	2.2	5.8	3.1	4.4
8~9	3.7	8.9	2.7	8.6	3.6	6.2
>10	5.1	15.9	3.2	15.5	4.6	10.8

3.4 其他输入参数

(1) 气象参数

MOVES 模型中的气象数据输入为估计年月日时问点的温度及湿度。通过查阅上海市历史气象数据,结合往年的历史数据,确定研究分析时段为 2013 年 5 月初工作日的早高峰,进而设定温度为 25℃ (77 ℉),湿度为 70 %。

(2) 车队信息数据

MOVES 模型中需要输入的车队信息包括车型分布比例以及各车型的车龄分布。车辆排放计算的车辆分类与交通运行车辆分类不一致,与我国车辆分类也不太相同。MOVES 模型在移植至我国使用时,需要考虑车辆类型的对应性。本文研究中,轻型车选择模型编号为 21。

(3) 车辆行驶工况数据

MOVES 模型对车辆行驶工况的描述通过以下三种途径实现:① 输入车辆或路段的平均车速,主要用于美国地区县市、州及国家层面,且只能估计机动车的排放总量;② 车辆逐秒车速,MOVES 模型将车辆或路段的逐秒车速转化为车辆-比功率分布,进而估计车辆排放因子,用于路段、交叉口等微观层面;③ 直接输入车辆-比功率分布。途径①只适用于美国地区的城市,途径②输入车辆逐秒速度的方法,输入数据繁多,工作较为复杂,通常选择途径③。作者已经计算了上海市快速路及地面道路车辆-比功率分布特征^[12],可直接输入到 MOVES 模型相关的模块中,估计车辆排放因子。

4 本地轻型车排放因子估计

4.1 快速路轻型车排放因子估计

由图 8 知,上海市快速路轻型车的平均车速在 10~110 km·h⁻¹时,HC 排放因子约为 0.05~0.22 g·km⁻¹,CO 排放因子约为 1.34~5.91 g·km⁻¹,NO_x 排放因子约为 0.28~0.72 g·km⁻¹,PM₁₀ 排放因子约为 0.001 4~0.006 2 g·km⁻¹。快速路轻型车各排放污染物随着速度增长呈现快速下降后缓慢下降的趋势(NO_x 除外,缓慢下降后开始上升)。

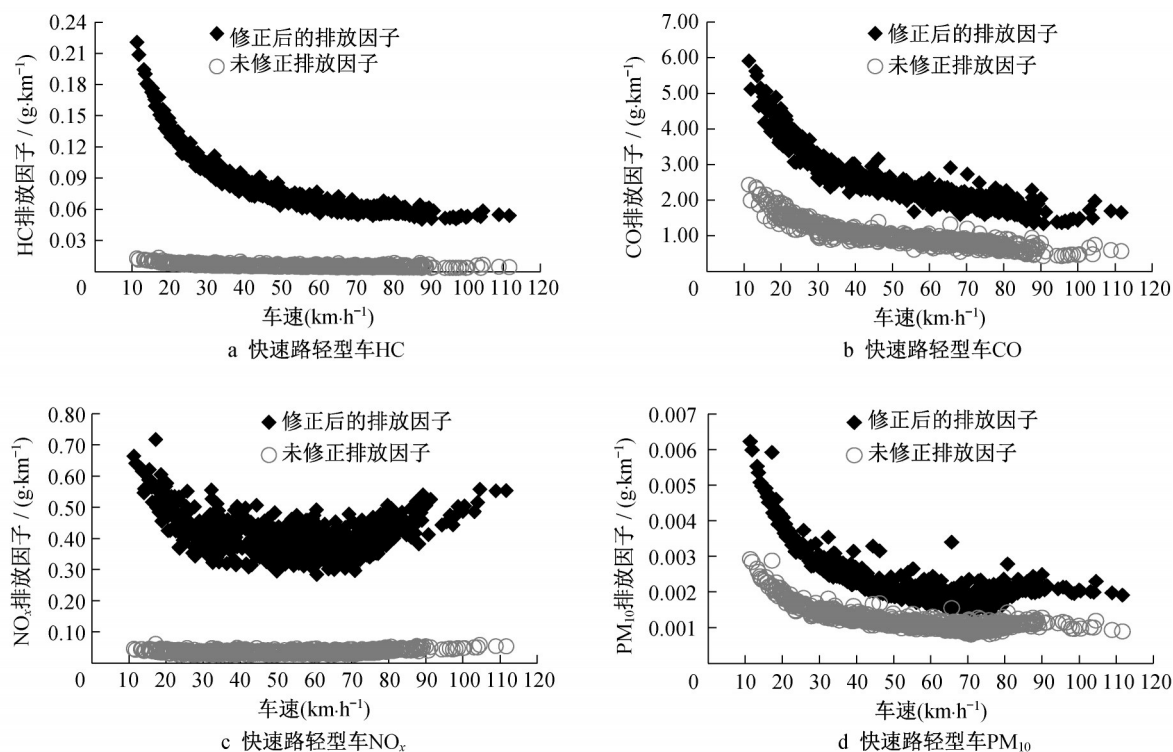


图8 上海市快速路轻型车污染物排放因子

Fig. 8 Vehicle emission factors on expressway in Shanghai

4.2 地面道路轻型车排放因子估计

由图9可知,上海市地面道路轻型车的平均车速在5~70 km·h⁻¹时,HC排放因子约为0.06~0.55 g·km⁻¹,CO排放因子约为1.87~11.91 g·km⁻¹,NO_x排放因子约为0.30~1.63 g·km⁻¹,PM₁₀排放因

子约为0.000 97~0.008 0 g·km⁻¹。此外,与快速路同一速度的排放因子相比,地面道路轻型车排放因子较高,这是由于受到道路交叉口的影响,地面道路轻型车加减速模式比重高,进而导致车辆排放因子更高。

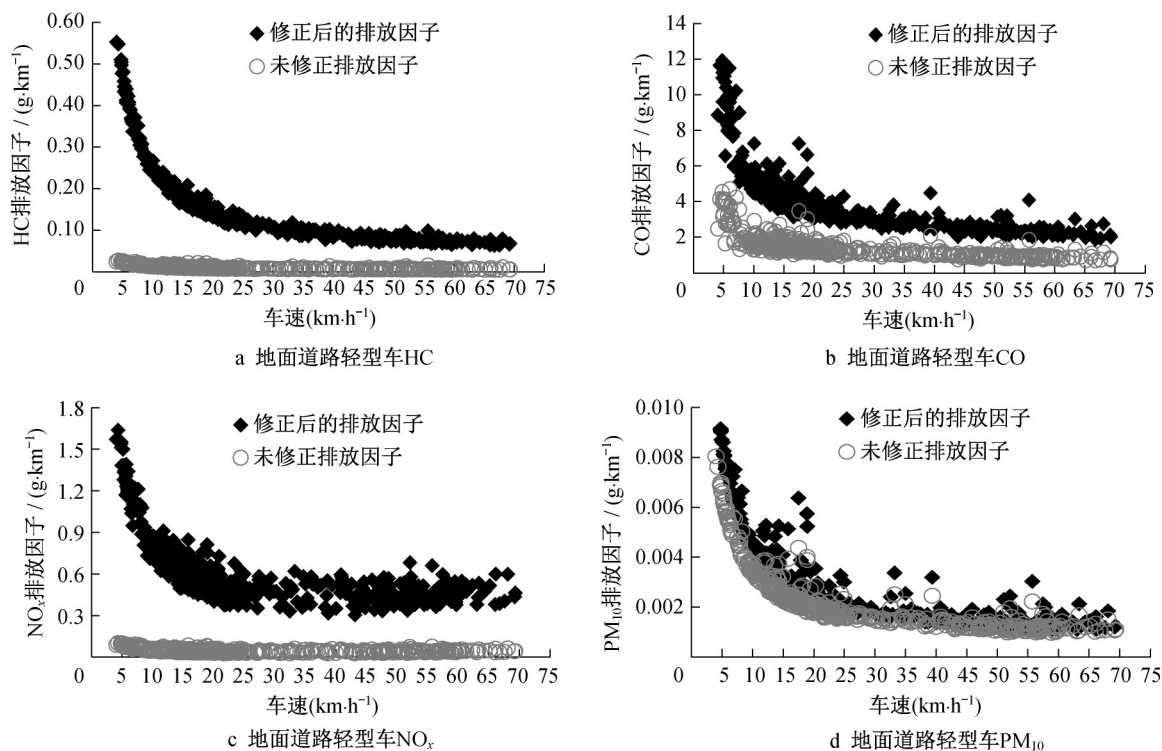


图9 上海市地面道路轻型车污染物排放因子

Fig. 9 Vehicle emission factors on ground-level road in Shanghai

4.3 轻型车排放因子估计准确性分析

在缺乏实际车载排放测试数据的情况下,研究借

鉴以往车载排放测试的相关结果^[13],说明MOVES模型本地化修正估计结果的准确性,如表4所示。

表4 MOVES模型本地化修正估计结果的准确性

Tab. 4 Accuracy of results based on Localized MOVES

污染物排放因子	国I	国II	国III	快速路	地面道路
HC/(g·km ⁻¹)	0.60 (0.663)	0.48 (0.314)	0.17 (0.191)	0.079	0.16
CO/(g·km ⁻¹)	14.4 (6.71)	9.8 (2.52)	6.30 (1.18)	2.45	3.92
NO _x /(g·km ⁻¹)	0.95 (0.409)	0.77 (0.324)	0.30 (0.100)	0.41	0.60

注:括号内数值是2014年我国环境保护部颁布的汽油车小型客车综合基准排放系数

由表4可知,受到车辆的车龄、行驶里程等相关因素的影响,实测轻型车排放因子高于汽油车小型客车综合基准排放系数。MOVES模型本地化修正估计的快速路轻型车CO、HC及NO_x排放因子平均值分别为2.45、0.079、0.41 g·km⁻¹,地面道路轻型车CO、HC及NO_x排放因子平均值分别为3.92、0.16、0.60 g·km⁻¹。综合考虑上海市轻型车车龄分布特征,以国III及国IV轻型车为主,MOVES模型本地化修正的轻型车排放因子特征与实际观测的结果较为接近,说明了模型估计结果的准确性。

此外,研究中不仅估计了MOVES模型本地化修正后的结果,同时考虑了MOVES模型不修正情况下,仅输入轻型车实际行驶工况数据,估计轻型车排放因子。MOVES模型本地化修正及为修正估计结果对比分析,如表5所示。表中,括号内数值是指本地化修正的轻型车污染物排放因子是未修正轻型车污染物排放因子的倍数。

由表5可知,MOVES模型本地化修正的快速路轻型车HC、CO、NO_x排放因子是未修正轻型车污染物排

表 5 MOVES 模型本地化修正及未修正结果分析
Tab. 5 Results of localized and default MOVES

污染物排放因子	MOVES 模型本地化修正		MOVES 模型未修正	
	快速路	地面道路	快速路	地面道路
HC/ (g·km ⁻¹)	0.079	0.16	0.005 7 (13.85)	0.009 9 (16.16)
CO/ (g·km ⁻¹)	2.45	3.92	0.98 (2.53)	1.46 (2.68)
NO _x / (g·km ⁻¹)	0.41	0.60	0.037 (11.08)	0.046 (13.04)
PM ₁₀ / (g·km ⁻¹)	0.002 3	0.002 9	0.001 2 (1.87)	0.002 3 (1.25)

放特征的 13.85 倍、2.53 倍及 11.08 倍,PM 排放差距较小;尤其是在低速行驶环境下(车速小于 30 km·h⁻¹),我国车辆污染物排放因子快速上升,中美车辆的排放因子差距大。MOVES 模型本地化修正的地面道路轻型车的 HC、CO 及 NO_x 排放因子分别是 MOVES 模型未修正的车辆排放因子的 16.16 倍、2.68 倍及 13.04 倍。由此可见,若不考虑中美两国车辆排放限值水平的差异性及劣化系数的不同,仅输入当地的车辆行驶工况数据,并不能准确地估计车辆排放特征,说明了 MOVES 模型本地化修正的必要性。

5 总结

由于 MOVES 模型开发的美国本土性,本文首先介绍了 MOVES 模型的适用范围及方法,论述了模型本地化修正的必要性及建模流程。结合我国新车排放限值标准及测试工况,对我国轻型车的使用年份与美国车辆的使用年份进行匹配,例如我国国 I 至国 VIa 轻型车排放限值标准所对应的 MOVES 模型美国轻型车年份分别为:1995、1999、2002、2007、2010 及 2012 年。其次从燃油参数选择、车龄分布修正、劣化系数及其他输入参数等方面,对 MOVES 模型进行了本地化修正。最后,基于 MOVES 模型本地化修正及不同道路环境下的车辆行驶工况数据,估计了上海市轻型车在不同运行速度下的污染物排放因子,轻型车污染物排放特征随速度的增长均呈现快速下降后缓慢下降的趋势(NO_x 除外,缓慢下降后开始上升),快速路及地面道路轻型车排放特征趋势具有一致性。

作者贡献说明:

单肖年:论文主要构思者,数据分析,方法构建,论文撰写。
刘皓冰:参与方法构建与数据分析,论文撰写指导。
张小丽:参与数据收集与分析。
陈小鸿:参与方法构建,思路研讨,论文修改。
叶建红:数据分析指导,论文撰写指导及修改。

参考文献:

[1] 黄冠涛,宋国华,于雷,等.综合移动源排放模型—MOVES [J]. 交通信息与安全,2010,28(4):49.
HUANG Guantao, SONG Guohua, YU Lei, *et al.* Overview of the comprehensive mobile source emissions model: MOVES [J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2010, 28 (4): 49.

[2] 岳园圆,宋国华,黄冠涛,等. MOVES 在微观层次交通排放评价中的应用研究 [J]. 交通信息与安全,2013,31(6):47.
YUE Yuanyuan, SONG Guohua, HUANG Guantao, *et al.* Application of MOVES in the microscopic evaluation of traffic emissions [J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2013, 31(6): 47.

[3] 张广昕,孙晋伟.基于 MOVES 的机动车排放分析及控制措施研究 [J]. 交通节能与环保,2013,1:24.
ZHANG Guangxin, SUN Jinwei. Research on analysis of vehicle emission based on MOVES and control measures [J]. Energy Conversion & Environmental Protection in Transportation, 2013, 1: 24.

[4] LIU H, CHEN X, WANG Y, *et al.* Vehicle emission and near-road air quality modeling for Shanghai, China based on global positioning system data from taxis and revised MOVES emission inventory [J]. Transportation Research Record, 2013, 2340: 38.

[5] 曹杨,郭园园,曹罡,等. MOVES 模型微观层次参数的深圳本土化研究 [J]. 交通信息与安全,2017,35(2):100.
CAO Yang, GUO Yuanyuan, CAO Gang, *et al.* A study on localization of project-level parameters of MOVES model in Shenzhen [J]. Journal of Transportation Information and Safety, 2017, 35(2): 100.

[6] SHAN X, CHEN X, JIA W, *et al.* Evaluating urban bus emission characteristics based on localized MOVES using sparse GPS data in Shanghai, China [J]. Sustainability, 2019, 11: No.2936.

[7] 胡明伟,王守峰,黄文柯,等.基于车牌识别数据的行驶轨迹重构和排放测算 [J]. 深圳大学学报理工版,2020,37(2):111.
HU Mingwei, WANG Shoufeng, HUANG Wenke, *et al.* Vehicle trajectory reconstruction and emission estimation based on license Plate recognition data [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(2): 111.

[8] 郝艳召,邓顺熙,邱兆文,等.基于 MOVES 的轻型车颗粒物排放来源和特征分析 [J]. 环境工程学报,2015,9(8):3915.
HAO Yanzhao, DENG Shunxi, QIU Zhaowen, *et al.* Particle sources and characteristics of light duty vehicle Based on MOVES model [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(8): 3915.