

文章编号:1001-7372(2017)05-0122-10

## 基于移动监测的城市道路交通碳排放形成机理——以上海市为例

孙健<sup>1,2,3</sup>, 张颖<sup>3</sup>, 薛睿<sup>3,4</sup>, 张毅<sup>2,5</sup>

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 上海交通大学 中国城市治理研究院, 上海 200240; 3. 上海交通大学 智能交通与无人机应用研究中心, 上海 200240; 4. 福州市规划设计研究院, 福建 福州 350108; 5. 上海交通大学 可持续人居环境研究中心, 上海 200240)

**摘要:**为了探究不同维度下交通碳排放的形成机理,明确影响交通碳排放的主要因素,研究运用多维度移动监测设备,构建了城市交通碳排放移动监测体系,并选取典型路网采集了道路、交通、气象、交通碳排放及行驶特征等信息。在微观层面,运用皮尔逊相关分析和 Granger 因果检验,揭示了转速、比功率参数相较速度、加速度,与车辆碳排放间存在更明显的相关性。在中观层面,运用移动监测结果对 MOVES 机动车排放模型进行参数标定,并运用克隆巴赫系数验证了模型可靠性;运用敏感度分析考察道路等级对机动车排放因子的影响,结果显示道路等级显著影响排放因子,从而针对各等级道路分别计算平均排放因子。在此基础上,从宏观层面考虑了不同机动车类型在不同等级道路的行驶比例,针对已有机动车碳排放模型进行了修正。研究结果显示:2014年上海市小汽车 CO<sub>2</sub>, CO, HC 排放总量分别为 8 271.91, 76.95, 2.13 kt;其中,行驶里程占总里程 41%的城市主干路排放分担率超过 50%;道路等级是机动车排放因子的重要影响因素,城市主干路作为城市中最主要的碳排放线源,应当成为实施碳排放控制策略的重点区域。

**关键词:**交通工程;交通碳排放因子;移动监测;排放机理;MOVES 模型

**中图分类号:**U491.92 **文献标志码:**A

### Formation Mechanism of Urban Traffic Carbon Emissions Based on Mobile Monitoring: Case Study of Shanghai

SUN Jian<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Ying<sup>3</sup>, XUE Rui<sup>3,4</sup>, ZHANG Yi<sup>2,5</sup>

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China Institute of Urban Governance, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Center for ITS and UAV Applications Research, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Fuzhou Planning Design & Research Institute, Fuzhou 350108, Fujian, China; 5. Sustainable Residential Environment Research Center, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** To explore the formation mechanism of traffic carbon emissions under different dimensions and to clarify the main factors influencing traffic carbon emissions, multi-dimensional mobile monitoring equipment was used to construct a mobile monitoring system for urban traffic carbon emissions. Typical road networks were chosen to collect information about roads, traffic, meteorology, traffic carbon emissions and driving characteristics. At the microscopic level,

收稿日期:2016-10-15

基金项目:国家社会科学基金重大项目(16ZDA048);北京大学-林肯研究院城市发展与土地政策研究中心研究基金项目(FS05-20161101-SJ);上海市哲学社会科学“十二五”一般课题项目(2014BGL009)

作者简介:孙健(1977-),男,安徽芜湖人,研究员,博士研究生导师,工学博士,E-mail:danielsun@sjtu.edu.cn.

Pearson correlation analysis and Granger causality test were applied to reveal that rotation rate and specific power parameter, compared with velocity and acceleration, were more relevant to vehicle carbon emissions. At the mesoscopic level, the mobile monitoring results were used to calibrate the vehicle emission model of MOVES and Cronbach's alpha coefficient was used to validate the reliability of the model. The sensitivity analysis was conducted to investigate the influence of road grade on vehicle emission factors. As it turned out, road grades significantly affected the emission factors and the average emission factor of each grade was calculated. Then, at the macroscopic level, taking the ratio of different vehicle types at different road grades into consideration, the existing vehicle emission model was revised. The results show that the total CO<sub>2</sub>, CO and HC emissions of small passenger cars in Shanghai in 2014 are 8 271.91, 76.95 and 2.13 kt, respectively. Among them, urban arterials account for 41% of the total mileage and more than 50% of the emissions. Road grade is an important influencing factor of vehicle emission factor and urban arterials. As the most important emission line source in the urban areas, urban arterials should be the key subject to implement traffic emission control strategies.

**Key words:** traffic engineering; traffic carbon emission factor; mobile monitoring; emission mechanism; MOVES model

## 0 引言

21世纪以来,随着社会经济不断增长,机动车保有量持续增加,交通运输业的能源消耗与碳排放问题逐渐成为人们关注的热点。据世界能源组织预测,2010~2030年,全球城市交通碳排放将以1.7%的年增长率递增,发展中国家及经济转型国家的交通碳排放增长率将分别达3.4%和2.2%<sup>[1]</sup>。因此,发展低碳交通对于中国实现2020年碳减排40%~50%的目标<sup>[1]</sup>具有重要的现实意义。

目前,对于城市交通碳排放的监测缺乏便捷有效的手段,尚未形成针对道路、交通、排放及气象参数的综合监测体系,严重制约了低碳交通的研究和推进。移动监测作为一种快速、灵活、高精度的监测方法,可有效弥补现有交通碳排放监测在数据获取方面的局限性。Guo等<sup>[2]</sup>利用移动监测设备监测了杭州市机动车尾气排放情况,验证了移动监测方案在交通环境监测中的可行性,并基于移动监测结果建立了杭州市机动车排放清单。现有对于城市交通碳排放的研究主要在单一时空尺度下进行,宏观层面(区域、年度)研究主要利用统计数据建立交通碳排放清单<sup>[3]</sup>,缺乏对包括车流量、车型构成和道路等级在内的道路交通流特征的关注;中观层面(路网、小时)研究中,排放因子(单辆机动车行驶单位里程排放的污染物量,一般以 $g \cdot km^{-1}$ 为单位)计算主要借鉴国外排放模型<sup>[4-5]</sup>,与中国标准差异较大,模型选择方面缺乏有力依据;微观层面(单车、逐秒)则

主要通过交通仿真提取机动车行驶特征参数<sup>[6]</sup>,对实际道路交通流特征以及行驶特征引起的机动车碳排放浓度变化缺乏深入研究。与此同时,现有研究缺乏对不同层次下交通碳排放形成机理及层次间内在联系的深层解析,未能形成从微观到宏观的交通碳排放量化研究体系。Guo等<sup>[7]</sup>结合遥感监测及International Vehicle Emissions(IVE)模型进行了机动车排放研究,并利用遥感监测结果对IVE模型进行评价与校准。研究结果表明,通过综合利用移动监测及排放模型,构建多层次交通排放研究体系,能有效揭示城市交通排放的形成机理。

本文首先利用多种移动监测设备,构建交通碳排放移动监测体系,采集机动车碳排放及行驶特征、交通流、路况、气象等参数。其次,基于移动监测结果,从微观、中观、宏观3个时空尺度,选取不同评价参数,逐层分析不同维度交通碳排放的形成机理,明确影响碳排放的主要因素并量化其影响程度,解析不同维度碳排放之间的内在联系。最后,利用由美国环保署(Environmental Protection Agency, EPA)开发的基于排放因子的新一代综合移动源排放模型MOVES,结合机动车行驶里程,实现城市交通碳排放量化评价。研究结果将为构建城市交通碳排放综合研究体系,制定针对性的机动车碳排放控制策略提供科学依据。

## 1 交通碳排放移动监测体系构建

交通碳排放移动监测主要包括对机动车碳排

放、行驶特征、交通流、路况、气象等数据的获取。监测体系核心是机动车碳排放及行驶特征监测模块,主要监测与城市碳排放直接相关的CO,CO<sub>2</sub>,HC三类主要碳排放物的实时排放率(NO<sub>x</sub>未被列入研究对象),以及速度、加速度、发动机转速等行驶特征参数。

常规的基于发动机台架试验<sup>[8]</sup>、遥感监测<sup>[9]</sup>的排放监测方法成本较高,监测周期较长且无法实现对交通碳排放的实时动态监测。本文研究引入的车载尾气检测系统(Portable Emission Measurement System,PEMS)具有重量轻、体积小且方便安装的优点,能够获得各类车辆在不同路段、时段和交通状态下的尾气排放及车辆运行数据<sup>[10]</sup>。已有相关人员对其进行大量试验研究,如Defries等<sup>[11]</sup>通过对

比试验,发现PEMS检测数据与底盘测功机试验数据匹配度较高;同时,在交通流、路况、气象等碳排放相关因素监测中,Baldauf等<sup>[12]</sup>利用环境监测车采集机动车CO排放数据,同时结合移动气象站构建气象监测模块,以及摄像机、雷达测速仪等移动监测设备构建交通及路况信息采集模块,以较低成本,获得比定点监测更为准确的实时数据。

本文综合利用多种移动监测设备,构建交通碳排放监测体系,更为准确地获取城市道路行驶环境下,不同工况机动车的碳排放在不同时空尺度下的分布规律;同时,通过大规模监测获得第一手排放数据,标定排放模型,提高排放因子模型精度,避免简单借用国外模型而产生的结果偏差。研究主要采用移动监测设备如表1所示。

表1 交通碳排放移动监测设备

Tab.1 Mobile Monitoring Equipment of Traffic Carbon Emission

设备名称	型号	用途	具体参数
车载排放检测设备	OBEAS-3000	机动车碳排放及行驶特征监测	排放模块:ELD(Electrical Load Detector)排放专用分析仪、柴油烟度颗粒分析仪 运行参数模块:OBD(On-board Diagnostic) II 诊断仪 分析模块:主控 PC(Personal Computer) 传感器:NDIR(Nondispersive Infrared Detector)红外线传感器、电化学传感器
手持雷达测速仪	Bushnell 10-1921	车速监测	测速范围 0.1~321 km·h <sup>-1</sup> 测试距离 0~456 m;精度±1 km·h <sup>-1</sup>
移动气象监测仪	Kestrel NK4500	气象参数监测	测量参数:温度 29℃~70℃,湿度 0~100%,气压 300~1 100 hPa

碳排放移动监测体系及所采集数据如图1所示,主要从微观、中观、宏观3个层面分别收集单车碳排放及行驶特征,道路交通及路况信息以及相关区域气象信息。从而重点实现针对单车比功率(Vehicle Specific Power, VSP)分布区间和排放因子的研究。

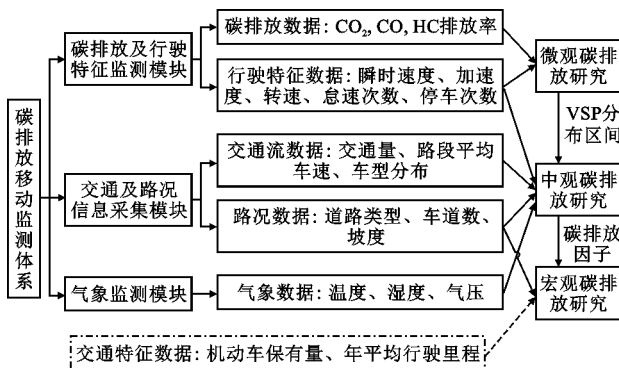


图1 碳排放移动监测体系

Fig.1 Mobile Monitoring System of Traffic Carbon Emission

参照国内外移动监测研究<sup>[5,11,13]</sup>,本文试验设计碳排放移动监测方案如下:

首先,机动车排放和行驶特征监测利用车载排

放监测设备 OBEAS-3000 完成。试验选用基于固定路线的循环测试法。在综合考虑道路等级、交通量大小、交通拥堵程度以及交通流时变特征等因素的基础上,设计了包含城市中各等级道路的环形测试路线,以保有量最多的小型载客汽车为试验车进行测试。图2给出了城市道路与高速公路的监测路网。城市道路监测路网位于上海市闵行区,试验车型为2010年产斯柯达昊锐(排量2.0L)。路网中东西向道路包括剑川路(2.5 km)、东川路(2.5 km),南北向道路包括沪闵路(1.3 km)、安宁路(1.3 km)、金平路(1.3 km)、瑞丽路(1.3 km)、碧江路(1.3 km)和华宁路(1.3 km),道路全长11.5 km。高速公路监测路网位于无锡市通锡高速顾山段,试验车型为2013年产别克新君威(排量2.0L)。

监测排放及行驶数据的同时,试验在路旁利用气象监测模块,监测温度、湿度、气压等气象数据;利用交通及路况信息采集模块,在道路旁以及试验车顶部和前、后、左、右4个方位架设摄像机,采集流量、车型比例、路况等数据,并利用雷达测速仪采集车速数据。对于试验中涉及的具体数据,将在后续章节从微观、中观以及宏观层面分别进行介绍。

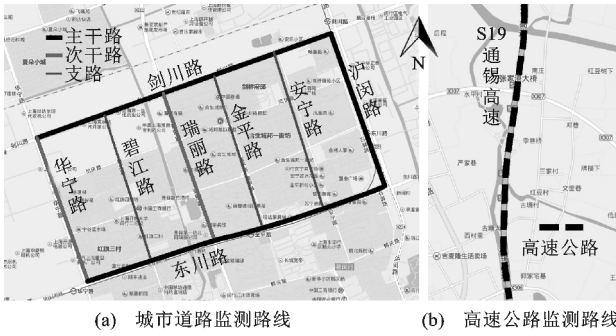


图 2 交通碳排放监测路线

Fig.2 Monitoring Routes of Traffic Carbon Emission

### 2 微观交通碳排放研究

微观层面,机动车碳排放除了受发动机排量、车辆排放标准等机动车排放特性影响外,主要受速度、加速度、发动机转速等机动车行驶状态影响<sup>[12,14]</sup>。因此,微观层面交通碳排放研究旨在以城市交通中保有量最多的典型车型为对象,通过单车、逐秒的微观碳排放监测及行驶状态监测,分析其排放率  $R$  随行驶状态的变化规律,研究不同排放物与行驶参数间的相关关系,同时为中观层面机动车排放模型选择提供依据。

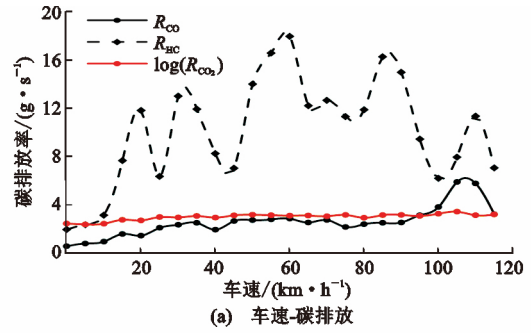
本文研究选取速度、加速度、发动机转速作为行驶状态监测对象,选取机动车主要碳排放物  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HC}$  作为排放监测对象,于 2013 年 11 月 25 日、26 日在上述监测路网中分别进行碳排放移动监测试验。试验以 1 s 为时间间隔,采集机动车运行及碳排放数据共计 12 740 条。引入比功率参数,与速度、加速度、发动机转速共同作为机动车行驶状态的表征参数,其定义为单位质量机动车的瞬时功率,已有研究认为比功率是表示机动车运行工况的重要参数<sup>[15]</sup>。典型小型载客汽车的比功率计算公式如下

$$P = v(1.1a + 0.132) + 0.000\ 302v^3 \quad (1)$$

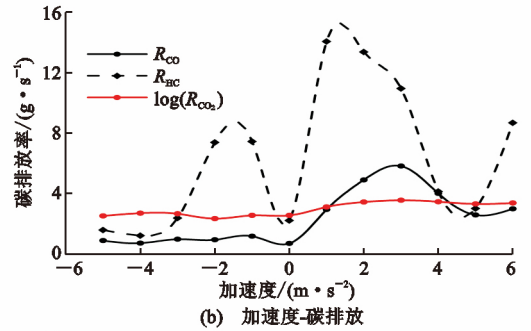
式中: $P$  为比功率; $v$  为机动车瞬时速度; $a$  为机动车瞬时加速度。

对移动监测体系采集的机动车行驶数据及碳排放数据中的缺失部分进行平滑处理,删除错误数据并运用插值法补齐。对加速度、速度、转速、比功率变量分别取较小区间,对区间内排放值取平均值,得到分布情况如图 3 所示。

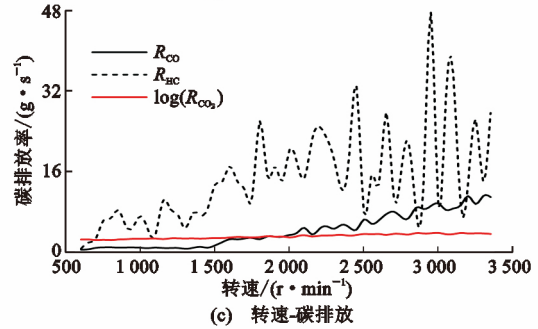
由图 3 可以看出:各项碳排放指标均与行驶状态参数间存在一定的正相关关系。采用皮尔逊相关系数量化各排放物与行驶参数的相关程度,计算公



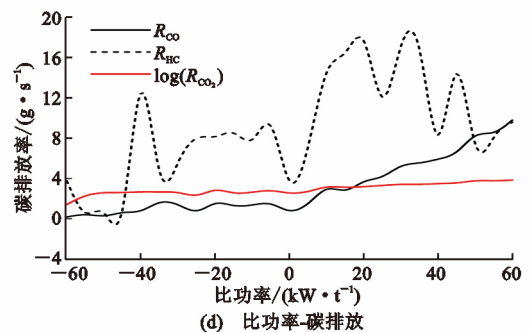
(a) 车速-碳排放



(b) 加速度-碳排放



(c) 转速-碳排放



(d) 比功率-碳排放

图 3 机动车碳排放随行驶参数变化规律

Fig.3 Change Rules of Vehicle Carbon Emissions with Running Parameters

式为

$$r = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{(n - 1)S_x S_y} \quad (2)$$

式中: $r$  为皮尔逊相关系数; $x, y$  为待检验变量,研究中分别为机动车行驶状态参数、碳排放量; $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  为变量均值; $n$  为样本量; $S_x$  和  $S_y$  为变量标准差。

皮尔逊相关分析结果如表 2 所示。各碳排放物与行驶参数均呈正相关,即行驶特征参数升高将导致碳排放上升,因此保持平稳的驾驶行为对于降低

表2 碳排放同机动车行驶参数的皮尔逊相关性

Tab.2 Pearson Correlation Coefficients Between Carbon Emissions and Vehicle Running Parameters

测定指标	不同物质排放率的皮尔逊相关性		
	CO 排放率	HC 排放率	CO <sub>2</sub> 排放率
速度	0.805	0.369	0.793
加速度	0.700	0.419	0.805
转速	0.959	0.640	0.902
比功率	0.913	0.609	0.847

碳排放具有积极作用。其中,CO、CO<sub>2</sub>排放与4种行驶参数均存在明显的线性关系,与转速相关性最高,比功率次之。这主要由于发动机转速与发动机进气量有关,驾驶人通过油门踏板来控制发动机进气量,从而控制发动机转速。转速越高,燃油消耗越多,碳排放量越大。比功率综合考虑了机动车速度及加速度的作用,与碳排放相关性优于单一的速度与加速度参数,更能有效地反映逐秒的碳排放动态变化。

相较CO与CO<sub>2</sub>排放,HC排放与行驶参数的皮尔逊相关性较弱,导致该结果的主要原因是HC排放过程较为复杂,发动机进气、做功、排气过程及曲轴箱窜气都会产生HC排放,而移动监测体系仅获得车辆尾气排放数据。因此,在排放因子计算过程中需选用合适的排放模型,综合考虑各排放过程对HC排放的影响。

对与碳排放相关性较高的转速和比功率进行Granger因果检验。检验结果显示,在95%置信水平下,转速对CO、HC及CO<sub>2</sub>的因果关系均显著,是引起碳排放变化的原因;比功率仅对CO、HC的因果关系显著,对CO<sub>2</sub>排放的因果关系不显著。因此,转速是引起微观交通碳排放的首要因素。但由于目前尚未开发出基于发动机转速的排放模型,在中观层面选择基于比功率的排放模型可获得较为精确的碳排放因子。

### 3 中观交通碳排放研究

中观层面交通碳排放研究旨在以路网交通流为对象,通过对交通流状况、机动车碳排放及相关道路、气象、燃油等参数<sup>[16]</sup>的监测,计算机动车在路网中的综合碳排放因子,分析交通流状况对机动车碳排放的影响,进一步为宏观层面区域交通碳排放量评价提供依据。本文在微观交通碳排放研究基础上,选用合理的机动车排放模型,聚焦道路等级交通碳排放的影响,确定不同等级道路对应的碳排放

因子。

常用机动车排放模型主要分为行驶周期模型和行驶工况模型。行驶周期模型主要基于对机动车加速、减速、怠速比例及车速变化的回归分析,划分对应的行驶特征片段,代表模型有MOBILE、EMFAC和COPERT等<sup>[17-18]</sup>;行驶工况模型主要考虑机动车在道路上的实际行驶状况,通过比功率分布情况(VSP-bin区间)反映机动车行驶状态并计算排放因子,代表模型有IVE和MOVES<sup>[19-20]</sup>。根据微观层面研究,比功率与相比速度、加速度,更能有效反映逐秒的碳排放动态变化,同时比功率的分布变化更能反映交通碳排在时空中的变化特征。因此,本文选择行驶工况模型进行中观层面碳排放研究。

在常用的基于行驶工况的机动车排放模型中,MOVES模型由EPA开发,是集宏观、中观、微观于一体的机动车排放量化模型。该模型利用VSP-bin区间分布来描述车辆在不同平均速度下的行驶状态,综合考虑道路、交通、气象等因素,利用分层回归树法(Hierarchical Tree-based Regression, HTBR)对指标细分程度以及不同VSP-bin区间下的排放差异度进行分析,计算该VSP-bin区间所对应机动车碳排放率和排放总量。该模型除计算尾气排放外,还考虑曲轴箱窜气、燃油泄漏蒸发等排放过程,计算结果更接近实际排放,能提高碳排放因子的计算精度。综上所述,本文选用MOVES模型进行中观层面的碳排放研究。其相关计算原理如下

$$E_{p,t} = \left( \sum R_{p,b} c_b \right) j_p \quad (3)$$

式中: $p$ 为排放过程; $t$ 为排放源类别; $b$ 为行驶运行工况区间; $E_{p,t}$ 为排放源类别 $t$ 在排放过程 $p$ 中的碳排放量; $R_{p,b}$ 为机动车行驶工况区间 $b$ 在排放过程 $p$ 中的碳排放速率; $c_b$ 为机动车运行工况区间 $b$ 对应的行驶特征参数; $j_p$ 为排放过程 $p$ 对应的碳排放调整因子。

根据试验车速度、加速度,计算比功率值,按车速将比功率划分为怠速、低速、中速和高速4个区间,确定每个速度区间中包含的VSP-bin区间,计算机动车在各VSP-bin区间的分布比例。各路段VSP-bin区间分布如表3所示,斜杠线表示此区间未分布有交通流。由表3可知,由于受交通流、交通信号控制及限速等因素影响,主干道上怠速工况比例较高,次干路和支路上工况主要分布在低速区间,通锡高速路不受以上因素影响,工况主要分布在高速区间。

现有研究由于受数据采集手段制约,排放因子

表 3 各路段工况分布比例

Tab.3 Distribution Ratios of Conditions in Each Segment

车速区间	VSP-bin 区间/ (kW · t <sup>-1</sup> )	不同路段的工况分布比例/%							
		通锡高速	沪闵路	剑川路	东川路	华宁路	安宁路	碧江路	瑞丽路
怠速 ( $v < 2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	刹车		0.76	0.49		1.23		1.56	
	怠速		19.34	32.88	48.47	19.26		15.63	
低速 ( $2 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v < 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	<0		13.23	14.92	15.95	14.75	17.65	23.44	8.05
	[0,3)	0.82	26.46	39.25	19.02	5.74	43.53	35.94	46.47
	[3,6)	0.94	9.41	9.62	12.27	4.92	15.00	17.19	18.93
	[6,9)	1.12	2.80	2.36	2.45	3.28	10.30	3.13	16.76
	[9,12)	1.01	1.02	0.38	1.84	2.87	2.35	1.56	4.33
	>12	0.58	0.51	0.10		0.82	0.00	1.55	0.00
中速 ( $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \leq v < 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	<0	10.54	3.56			7.38	5.29		2.21
	[0,3)	12.24	6.62			19.67	3.53		3.25
	[3,6)	0.41	11.70			8.20	2.35		
	[6,9)	1.00	2.29			6.56			
	[9,12)	1.94	2.29			5.32			
	[12,18)	2.65	0.01						
	[18,24)	2.30							
	[24,30)	2.24							
>30	3.29								
高速 ( $v \geq 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ )	<6	38.49							
	[6,12)	3.06							
	[12,18)	3.53							
	[18,24)	4.71							
	[24,30)	4.18							
	>30	4.95							

计算主要集中在 MOVES 的国家层级 (Country-level), 需选取气候、地理特征与研究区域相似的美国城市, 利用其相关统计数据及 MOVES 默认参数进行排放模拟, 因而计算结果与实际排放因子存在较大偏差<sup>[21]</sup>。为使模型更接近实际情况、提高模型精度, 笔者利用交通碳排放移动监测体系所采集的道路、交通及气象等数据进行参数标定。利用交通及路况信息采集模块获取道路类型、车道数、坡度等道路信息, 以及流量、平均车速、车型分布等交通流数据。利用气象监测模块, 在 1.5 m 高处架设监测仪器, 以 30 s 为时间间隔连续采样, 获取温度、湿度、气压等气象数据。

在 MOVES 项目层级下输入道路基本参数, 在数据管理器中将移动监测获取的气象数据、道路坡度、道路等级、车辆用途分类、车辆类型、速度分布及工况分布导入 MOVES 中进行参数标定; 同时, 根据《车用汽油国家标准》(GB 17930—2013) 中的燃油标准, 在 MOVES 燃油数据库中选择匹配的燃油标号, 并导入从交通管理部门获得的车辆分布数据,

计算机动车碳排放物综合排放因子。作为对照, 利用实测碳排放数据, 对每个 VSP-bin 区间内的碳排放率取平均值, 以不同 VSP-bin 区间所占比例为权重, 计算基于实测数据的碳排放因子。基于模型及实测数据的排放因子计算结果如表 4 所示。

表 4 MOVES 模型及实测数据计算的碳排放因子

Tab.4 Carbon Emission Factors Calculated by

MOVES Model and Measured Data  $\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$

道路名称	道路类型	不同物质的碳排放因子					
		CO <sub>2</sub>		CO		HC	
		模型	实测	模型	实测	模型	实测
通锡高速	高速路	198.62	192.28	1.22	1.06	0.03	0.03
沪闵路	主干路	206.03	204.32	1.65	1.63	0.04	0.04
剑川路	主干路	321.27	318.34	2.78	2.10	0.12	0.09
东川路	主干路	368.53	363.48	3.64	3.19	0.13	0.10
华宁路	次干路	188.44	183.29	2.01	1.84	0.04	0.03
瑞丽路	次干路	176.52	171.71	2.71	2.28	0.03	0.02
安宁路	支路	173.63	169.63	1.95	1.60	0.03	0.03
碧江路	支路	270.71	241.55	2.67	1.98	0.05	0.04

从计算结果可看出, 由于综合考虑机动车多种

排放过程, MOVES 模型计算的碳排放因子均略高于基于实测数据的计算值。为验证 MOVES 模型计算的可靠性, 本文引入克隆巴赫系数(Cronbach's Alpha)对 2 种排放因子计算结果进行一致性检验, 公式如下

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left[ 1 - \frac{\sum_{u=1}^k S_u^2}{S_T^2} \right] \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为信度系数;  $k$  为道路数;  $S_u^2$  为模型组和实测组的组内方差;  $S_T^2$  为总体方差。

信度系数  $\alpha$  应在 0~1 之间。若  $\alpha > 0.9$ , 表示数据一致性很好;  $0.8 \leq \alpha < 0.9$ , 表示数据一致性可接受;  $0.7 \leq \alpha < 0.8$ , 则表示排放因子需要修正;  $\alpha < 0.7$ , 表示所得排放因子不可靠。经计算,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $HC$  排放因子信度系数分别为 0.82, 0.95, 0.93, 导入移动监测数据的 MOVES 模型计算结果较为可靠, 无需进行修正, 模型计算的排放因子可用于建立宏观层次碳排放清单。

从表 4 还可看出, 不同道路等级下的机动车碳排放因子差异较大, 主干路排放因子明显高于其他道路, 需进一步考察道路等级对排放因子的影响。交通量和平均车速是道路等级划分的重要依据, 道路等级不同, 交通量及平均车速的分布区间差异较大。因此, 本文选取交通量和平均车速 2 个参数表示不同的道路等级, 并引入敏感度系数, 利用 MOVES 模型和碳排放移动监测数据对道路等级进行敏感性分析。敏感度系数计算如式(5)所示, 计算结果可见图 4。式(5)可表示为

$$Q = \left| \frac{(A_\theta - A_{\theta-1})P_{\theta-1}}{(F_\theta - F_{\theta-1})P_{\theta-1}} \right| \quad (5)$$

式中:  $Q$  为敏感度系数, 当  $Q > 1$  时, 该参数为敏感参数; 当  $0.1 \leq Q \leq 1$  时, 为一般敏感参数; 当  $Q < 0.1$  时, 为不敏感参数;  $\theta$  为参数序号;  $A_\theta$  为  $\theta$  号参数的排放因子;  $P_\theta$  为  $\theta$  号参数的比功率。

从敏感性分析结果可知, 速度低于  $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ , 交通量低于  $4\ 500 \text{ veh} \cdot \text{h}^{-1}$  时, 速度和交通量对于  $CO$ ,  $HC$  及  $CO_2$  均为敏感参数, 速度及交通量变化显著影响碳排放因子。因此, 在计算区域交通碳排放总量时, 需考虑道路等级对排放因子的影响, 根据不同道路等级选取合适的排放因子。排放因子选用 MOVES 模型的计算结果, 对各等级道路的排放因子取平均值, 如表 5 所示。

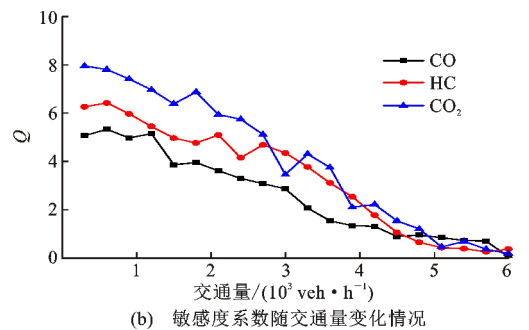
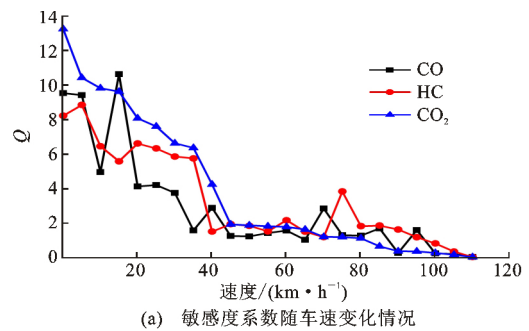


图 4 车速及交通量对排放因子的敏感性  
Fig.4 Sensitivity of Emission Factors with Speed and Traffic Volume

表 5 各等级道路碳排放因子  
Tab.5 Carbon Emission Factors on Urban Roads with Different Classes

道路等级	不同物质的碳排放因子		
	$CO_2$	$CO$	$HC$
快速路	198.62	1.22	0.03
主干路	298.61	2.69	0.10
次干路	182.48	2.36	0.04
支路	222.17	2.31	0.04

## 4 宏观交通碳排放研究

宏观层面交通碳排放研究旨在以城市为研究范围, 以年为研究周期, 分析城市机动车排放污染现状, 从宏观层面量化评估区域路网内机动车排放总量。在宏观层面, 交通碳排放量主要受车辆年均行驶里程以及机动车保有量影响<sup>[22]</sup>。目前, 宏观层面交通碳排放计算方法主要分为自上而下<sup>[23]</sup>和自下而上<sup>[24]</sup>2 类。自上而下方法主要基于交通燃料消耗统计数据, 计算精度较高, 但仅能计算所有交通碳排放总量。自下而上的方法则主要基于机动车行驶里程, 能对碳排放物进行分类量化, 但计算精度受排放因子及道路环境因素影响大。

根据中观层面研究成果, 不同等级道路下机动车排放因子差异较大, 因此宏观层面需考虑不同机动车类型在不同等级道路的行驶比例, 并按照道路

等级分别选取排放因子。本文针对《IPCC 国家温室气体清单指南》<sup>[25]</sup>中基于机动车行驶里程的碳排放模型进行修正,根据不同等级道路机动车排放因子、机动车保有量及机动车在不同等级道路的年均行驶里程等数据,计算宏观层面各类交通碳排放物的排放总量。修正后的计算公式如下

$$T_i = \frac{1}{1\ 000} \sum_j SCP_j E_{ij} \quad (6)$$

式中: $T_i$  为第  $i$  类碳排放物排放量; $S$  为小轿车保有量; $C$  为机动车年平均行驶里程; $P_j$  为机动车在  $j$  类道路上的行驶比例; $E_{ij}$  为机动车在  $j$  类道路行驶时第  $i$  类碳排放物排放因子。

据《上海统计年鉴》及城市运管部门统计,2014 年上海市小型轿车保有量为  $183.43 \times 10^4$  veh,年平均行驶里程约为  $1.86 \times 10^4$  km;机动车在各等级道路行驶比例参照《城市道路交通拥堵评价指标体系》(DB 11/T 785—2011)中的推荐值。综上,上海市宏观层面小型载客车辆交通碳排放情况如表 6 所示。由于试验数据限制,且上海城市统计年鉴及相关资料并未提供其他车型的数据,本文主要针对保有量最多的小型载客汽车进行研究。目前,笔者已筹划在未来研究中扩大试验范围,同时积极联系上海城市交通及车辆管理部门获得保有车型数据,针对不同车型的碳排放形成机理和交通碳排放在不同时段的变化情况展开研究,并进行相关碳排放总量计算。

表 6 宏观层面交通碳排放情况

Tab.6 Carbon Emission Situations at Macroscopic Level

道路类型	行驶比例/%	碳排放量/kt			排放总量/kt	排放分担率/%
		CO <sub>2</sub>	CO	HC		
快速路	20	1 355.30	8.32	0.20	1 363.82	16.32
主干路	41	4 177.07	37.63	1.40	4 216.10	50.49
次干路	16	996.14	12.88	0.22	1 009.24	12.09
支路	23	1 743.40	18.12	0.31	1 761.83	21.10
合计	100	8 271.91	76.95	2.13	8 350.99	100.00

从宏观层面碳排放情况可以看出:主干路是城市交通最主要碳排放源,其行驶里程占总里程的 41%,但 CO<sub>2</sub>,CO 及 HC 的排放分担率均在 50%以上,总分担率达 50.49%。结合微观及中观层面研究结果,交通碳排放在主干路的聚集主要由于主干路分担了城市中大部分交通流,高峰时段拥堵现象明显<sup>[26]</sup>,机动车工况大量分布在高排放区间。因此,减少主干路交通碳排放是城市低碳交通建设中的重要环节。主干路碳排放控制策略研究可从两方面入手,一方面以低碳为导向对干道交通进行疏导,促进

交通量在路网上合理分配,缓解干道交通压力;另一方面以减少碳排放为优化目标实施干道交通信号协调控制,使机动车运行工况分布在碳排放较低的区间。

## 5 结 语

(1)利用 PEMS、移动气象站等多种移动监测设备,构建了城市交通碳排放移动监测体系,有效弥补了定点碳排放监测效率低、成本高、获取数据量小的缺点,并以城市中保有量最多的小型载客汽车为试验车,选取典型城市道路开展了多维度监测。

(2)通过皮尔逊相关分析和 Granger 因果检验,确定了碳排放与速度、加速度、发动机转速、比功率等行驶特征参数间存在正相关关系,且与转速、比功率相关性较大。

(3)选取基于 VSP-bin 建模的 MOVES 模型并进行参数标定,通过敏感性分析,得出道路等级是影响排放因子的敏感参数。

(4)考虑道路等级对碳排放的影响,对基于机动车行驶里程的碳排放量化模型进行修正。结果显示,承担 41%小汽车行驶里程的主干路,分担了城市超过 50%的交通碳排放,未来应成为实施碳排放控制策略的重点区域。

(5)后续研究应进一步扩大试验车类型及碳排放监测时间段,研究不同车型的碳排放形成机理和交通碳排放在不同时段的变化情况,进一步完善中国城市交通碳排放研究体系。

## 参考文献:

### References:

- [1] 宋卫东,方 彤,王乾坤,等.2009 年《世界能源展望》要点综述[J].能源技术经济,2010,22(1):18-22.  
SONG Wei-dong, FANG Tong, WANG Qian-kun, et al.Summary of the Key Points of IEA World Energy Outlook 2009[J].Energy Technology and Economics, 2010, 22(1):18-22.
- [2] GUO H, ZHANG Q, SHI Y, et al. On-road Remote Sensing Measurements and Fuel-based Motor Vehicle Emission Inventory in Hangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(14):3095-3107.
- [3] 陆化普,王建伟,张 鹏.基于能源消耗的城市交通结构优化[J].清华大学学报:自然科学版,2004,44(3):383-386.  
LU Hua-pu, WANG Jian-wei, ZHANG Peng. Urban Transport Structure Optimization Based on Energy



- Consumption[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(3): 383-386.
- [4] MA J, HUANG S P, PATEURO K. Model Selection for Emission Models Based on Emission Factors[J]. Nature Environment and Pollution Technology, 2014, 13(4): 781-786.
- [5] 徐伟嘉, 黄建彰, 刘永红, 等. 基于 PEMS 与 COPERT 的机动车尾气排放特征分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(6N): 77-81.  
XU Wei-jia, HUANG Jian-zhang, LIU Yong-hong, et al. Study on the Characteristics of Traffic Emission with PEMS and COPERT[J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(6N): 77-81.
- [6] ABOU-SENNA H, RADWAN E. VISSIM/MOVES Integration to Investigate the Effect of Major Key Parameters on CO<sub>2</sub> Emissions[J]. Transportation Research Part D, 2013, 21(2): 39-46.
- [7] GUO H, ZHANG Q Y, SHI Y. Evaluation of the International Vehicle Emission (IVE) Model with On-road Remote Sensing Measurements [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(7): 818-826.
- [8] SCHAUER J J, KLEEMAN M J, CASS G R, et al. Measurement of Emission from Air Pollution Sources. 5. C<sub>1</sub>-C<sub>32</sub> Organic Compounds from Gasoline-powered Motor Vehicles[J]. Environmental Science & Technology, 2002, 36(6): 1169-1180.
- [9] 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.
- [10] 苏小芳, 范炳全, 黄远东, 等. 城市次干道路段机动车污染物排放因子的测定[J]. 上海理工大学学报, 2004, 26(4): 318-322.  
SU Xiao-fang, FAN Bing-quan, HUANG Yuan-dong, et al. Emission Factors of Pollutions from Motor Vehicles on Hypo-artery in Urban Road Net[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2004, 26(4): 318-322.
- [11] DEFRIES T H, SABISCH M, KISHAN S, et al. In-use Fuel Economy and CO<sub>2</sub> Emissions Measurement Using OBD Data on US Light-duty Vehicles[J]. SAE International Journal of Engines, 2014, 7(3): 1382-1396.
- [12] BALDAUF R W, HEIST D, ISAKOV V, et al. Air Quality Variability Near a Highway in a Complex Urban Environment [J]. Atmospheric Environment, 2013, 64: 169-178.
- [13] SUN D, ELEFTERIADOU L. Lane-changing Behavior on Urban Streets: An "In-vehicle" Field Experiment-based Study[J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2012, 27(7): 525-542.
- [14] RITNER M, WESTERLUND K K, COOPER C D, et al. Accounting for Acceleration and Deceleration Emissions in Intersection Dispersion Modeling Using MOVES and CAL3QHC[J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 2013, 63(6): 724-736.
- [15] 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.
- [16] YAO Z, WEI H, PERAGU H, et al. Sensitivity Analysis of Project Level MOVES Running Emission Rates for Light and Heavy Duty Vehicles [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering: English Edition, 2014, 1(2): 81-96.
- [17] 徐伟嘉, 李红霞, 黄建彰, 等. 佛山市机动车尾气颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 的排放特征研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(3): 152-158.  
XU Wei-jia, LI Hong-xia, HUANG Jian-zhang, et al. Characteristics of PM<sub>2.5</sub> Emission of Vehicles in Foshan City [J]. Environmental Science and Technology, 2014, 37(3): 152-158.
- [18] 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.
- [19] MISHRA D, GOYAL P. Estimation of Vehicular Emissions Using Dynamic Emission Factors: A Case Study of Delhi, India [J]. Atmospheric Environment, 2014, 98: 1-7.
- [20] XIE Y, CHOWDHURY M, BHAVSAR P, et al. An Integrated Modeling Approach for Facilitating Emission Estimations of Alternative Fueled Vehicles [J]. Transportation Research Part D, 2012, 17(1): 15-20.
- [21] 郭园园, 曹罡, 朱荣淑. 基于深圳本土化 MOVES 模

- 型微观层次敏感性分析[J].交通信息与安全,2015,33(2):116-123.
- GUO Yuan-yuan, CAO Gang, ZHU Rong-shu. A Micro Level Sensitivity Analysis of Shenzhen-localized MOVES Model[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2015, 33(2): 116-123.
- [22] 胥耀方, 于雷, 郝艳召, 等. 机动车尾气排放宏观模型开发与应用初探[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 9(2): 147-154.
- XU Yao-fang, YU Lei, HAO Yan-zhao, et al. Development and Application of Macroscopic Emission Model[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2008, 9(2): 147-154.
- [23] 李健, 李莹莹, 王秋圆. 区域机动车污染物总量排放特征与削减量分配[J]. 中国人口资源与环境, 2014, 24(8): 141-148.
- LI Jian, LI Ying-ying, WANG Qiu-yuan. Total Amount Characteristics of Regional Vehicular Emissions and Pollutant Reduction Allocation[J]. China Population Resources and Environment, 2014, 24(8): 141-148.
- [24] 刘欢, 贺克斌, 王岐东. 天津市机动车排放清单及影响要素研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2008, 48(3): 370-373.
- LIU Huan, HE Ke-bin, WANG Qi-dong. Vehicular Emissions Inventory and Influencing Factors in Tianjin[J]. Journal of Tsinghua University: Science & Technology, 2008, 48(3): 370-373.
- [25] LANZA R, MARTINSEN T, MOHAMMAD A, et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[M]. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.
- [26] 孙健, 张颖, 张纯. 基于驾驶人路径选择偏好的OD行程时间预测方法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(2): 143-149.
- SUN Jian, ZHANG Ying, ZHANG Chun. Prediction Method of OD Travel Time Based on Driver's Route Choice Preference[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(2): 143-149.
- ~~~~~
- (上接第121页)
- [15] WANG Xiu-ying, TAN Zhong-sheng, WANG Meng-shu, et al. Theoretical and Experimental Study of External Water Pressure on Tunnel Lining in Controlled Drainage Under High Water Level[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23: 552-560.
- [16] 张杰, 侯忠杰. 固-液耦合试验材料的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3157-3161.
- ZHANG Jie, HOU Zhong-jie. Experimental Study on Simulation Materials for Solid-liquid Coupling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3157-3161.
- [17] 李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128-1137.
- LI Shu-cai, ZHOU Yi, LI Li-ping, et al. Development and Application of a New Similar Material for Underground Engineering Fluid-solid Coupling Model Test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1128-1137.