

宋宁, 张凯山, 李媛, 等. 2011. 不同城市机动车尾气排放比较及数据可分享性评价[J]. 环境科学学报, 31(12): 2774-2784

Song N, Zhang K S, Li Y, et al. 2011. Vehicle emissions comparisons among different cities and a simple emission estimation approach [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 31(12): 2774-2784

不同城市机动车尾气排放比较及数据可分享性评价

宋宁 张凯山* 李媛 陈琳

四川大学建筑与环境学院 成都 610065

收稿日期: 2011-01-24

修回日期: 2011-06-02

录用日期: 2011-06-21

摘要: 针对我国绝大多数城市缺乏机动车相关基础数据的实际国情, 探讨一种基础数据共享的可能性, 用于城市机动车尾气排放清单的计算. 以北京、上海、天津及成都 4 个城市为例, 通过综合这些城市现有的机动车相关的基础数据(如机动车保有量、车龄分布、基于驾驶特征的发动机比功率(VSP)、外界环境等), 运用模型预测他们的机动车尾气排放并和相应城市已公布的预测值进行比较. 结果表明, 这几个城市的尾气排放因子有很强的相似性. 而且, 以成都市为例, 预测的尾气排放总量与当地环保局公布的数值相比, 就 NO_x 和 CO 而言分别相差 10.4% 和 1.4%; 但就 HC 而言, 相差较大, 可达 52.6%. 尽管如此, 分析表明在缺乏机动车相关的基础数据的条件下, 现有的其他城市的基础数据可以用来粗略预测一般城市的机动车尾气排放的总体水平.

关键词: 机动车尾气; 尾气排放因子; 排放模型

文章编号: 0253-2468(2011)12-2774-11

中图分类号: X701

文献标识码: A

Vehicle emissions comparisons among different cities and a simple emission estimation approach

SONG Ning, ZHANG Kaishan*, LI Yuan, CHEN Lin

College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065

Received 24 January 2011;

received in revised form 2 June 2011;

accepted 21 June 2011

Abstract: The objectives of this paper are to compare the vehicle emissions among different cities in China, and to develop a simple vehicle emission estimation approach for cities without adequate resources for emission inventory development. Four metropolitan cities including Beijing, Shanghai, Tianjin and Chengdu, were chosen for this study. Vehicle emissions in these four cities were estimated using the International Vehicle Emissions (IVE) model and the corresponding vehicle related data for each city. The vehicle related data included vehicle population, age distributions, vehicle-specific power (VSP) based driving characteristics, ambient conditions, and others. The averages of the vehicle related data were also used to derive a composite emission factor (CEF). The comparison results showed that the emission factors among different cities in China were comparable due to similar vehicle techniques, driving cycles and others. Furthermore, the CEF could be used as a useful surrogate for vehicle emission inventory development for cities in China when there were not adequate information/resources available. For example, comparing the emission inventory using the CEF and the publicized data for Chengdu, the differences were only 1.4% and 10.4% for CO and NO_x , respectively, although the difference was as high as 52.6% for HC due to some reasons.

Keywords: vehicle emissions; vehicle emission factors; emission estimation models

1 引言(Introduction)

近年来, 随着中国经济的高速发展和城市机动车的急剧增加, 机动车尾气排放已经成为中国空气污染的重要来源(何春玉等, 2006). 在一些大城市,

如北京、上海等, 甚至是主要来源(申卫国等, 2010; 蔡皓, 2010). 以北京市为例, 据估算, 每年从机动车排放至大气的 NO_x 、VOC 及 CO 分别占总排放的 70%、46%、76% (郝吉明等, 2005). 所以, 准确的预测机动车尾气排放清单, 为制定城市环境空气质量

基金项目: 四川大学引进人才启动基金(No. JS20100324507093); 教育部新世纪人才支持计划(No. NCET-10-0578)

Supported by the New Faculty Start-up Funds of Sichuan University (No. JS20100324507093) and the New Century Talent Support Program of the Ministry of Education of China(No. NCET-10-0578)

作者简介: 宋宁(1987—), 女, E-mail: sn_315@126.com; * 通讯作者(责任作者), E-mail: kaishanzhang@yahoo.com

Biography: SONG Ning(1987—), female, E-mail: sn_315@126.com; * **Corresponding author**, E-mail: kaishanzhang@yahoo.com

政策提供基础数据,意义重大。

目前,城市机动车尾气排放清单一般采用排放因子模型来确定(霍红等,2006),如美国环保局(USEPA)的MOBILE6(USEPA,2001),美国加州空气资源局(CARB)的EMFAC(USCARB,2003),以及欧盟环保署(EEA)的COPERT(Ntziachristos *et al.*, 2000)等。这些模型之所以称之为排放因子模型,是因为他们都是通过尾气排放因子($g \cdot km^{-1}$),车辆的行驶公里数(km)及机动车保有量三者的乘积来计算排放清单的(毕晔等,2007;毕索阳等,2010)。在发达国家,这些模型还有些共性,但在其他发展中国家由于车辆技术、驾驶工况等因素不同,模型开发时得到的各项校正参数也不尽相同,从而导致模型计算的不精确性。李伟(2003)、祝昌建(1997)等利用MOBILE模型预测了北京、广州等城市的排放因子,结果得出1996年广州市的尾气排放水平很高,还停留在美国、欧洲20世纪60、70年代未控制或初控制时的排放水平,但其准确度有待验证。

IVE(International Vehicle Emission)模型是另外一个由美国环保局(USEPA)出资,国际可持续发展研究中心(ISSRC)和加州大学河畔分校(UCR)联合开发的主要用于测量发展中国家机动车尾气排放因子的模型(ISSRC,2008)。在国外,已有大量关于利用IVE模型测量城市的排放因子的研究(Lents *et al.*, 2004; Davis *et al.*, 2004),在中国,也有学者开始运用IVE模型进行排放因子的计算(王海鲲等,2006;姚志良等,2006;叶身赋等,2007;王景楠等,2009;张清宇等,2010),但这些研究仅限于一些经济和科研条件较好的城市如北京、上海、天津等,并且研究主要侧重于计算城市单一(类)汽车尾气排放,或者将计算值与不同模型的计算值进行比较,但却未曾比较过国内不同城市间的排放因子,也未曾分析过不同城市间机动车基础数据的异同以评价其可否具有共享性,因此,本文将在此基础上展开相关研究。

又由于在中国早期,机动车等移动源的污染一直不是最主要的污染源,因此,对机动车的污染研究和控制起步较晚。除了少部分有条件的城市和地区正相继开展相关的研究外,大部分的地区还处于粗略估算的阶段。其主要原因是缺乏本地机动车的基础统计数据,例如,各类机动车保有量、年驾驶里程数及平均速度,机动车技术分布,车龄分布以及VSP分布情况等。由于历史和责任归属问题等原因,

即使这些数据存在,却也没能进行统计、分析等。由于机动车尾气排放存在极大的变化性(Frey *et al.*, 2009),对于那些尚无条件开展相关研究的城市而言,有一个既经济又相对准确预测排放清单的方法,对于制定保护城市空气质量的环境政策及城市未来的规划发展,有着重大的意义。这也正是本研究的动力之所在。

本文最主要的研究目的是针对我国绝大多数城市缺乏机动车相关基础数据的实际国情,探讨一种基础数据共享的可能性,用于城市机动车尾气排放清单的计算。

2 数据与方法(Data and methodology)

本研究通过综合分析已有的较发达地区城市机动车相关的基础数据,运用IVE模型计算尾气排放清单,并将预测值与公布的污染物排放的数值做比较,以此来评价这些数据相互之间的可共享性。具体的做法包括:①基础数据的收集和分析;②IVE模型的运行;③排放清单的比较。现详述如下。

2.1 所需的基础数据

运行IVE所需的基础数据包括各类机动车的比例分数、技术分布、平均速度、热浸时间、温湿度等。其中,各类机动车的技术分布是一个比较关键的参数。因为不同的机动车技术在一定程度上决定了不同污染气体的排放因子的大小(Davis *et al.*, 2005)。

2.2 IVE模型的运行

IVE模型预测的基本原理是对不同的机动车技术所对应的基本排放率(B_x)用一系列的校正因子修正,最终得到修正后的排放率(Q_x)。如公式(1)所示(ISSRC,2008)。IVE模型可计算两种不同类型的排放率,即行驶排放率(Q_{running})和启动排放率(Q_{start})。其运算过程如公式(2)所示,等式中的各种计算参数如下所示(ISSRC,2008)。

$$Q_x = B_x \times K_{\text{Base } x} \times K_{\text{Tmp } x} \times K_{\text{Hmd } x} \times K_{\text{IM } x} \times K_{\text{Fuel } x} \times K_{\text{Alt } x} \times K_{\text{Cntry } x} \quad (1)$$

$$Q_{\text{running}} = U_{\text{FTP}} \times \frac{D}{U_c} \times \sum_x \{f_x \times Q_x \times \sum_d [f_{dx} \times K_{dx}]\} \quad (2)$$

$$Q_{\text{start}} = \sum_x \{f_x \times Q_x \times \sum_d [f_{dx} \times K_{dx}]\} \quad (3)$$

式中, x 为各种机动车技术; dx 为 x 技术的机动车车辆处于驾驶或热浸的状态; B_x 为各种机动车技术相对应的基本排放率($g \cdot km^{-1}$); Q_x 为各种机动车技

术相对应的修正排放率($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$); f_x 为一种特定的机动车技术所占的比例; f_{dx} 为一种特定的机动车行驶或热浸所占比例; U_{FTP} 为 FTP 驾驶循环下的平均速度($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$); D 为本地模拟试验中的驾驶里程数(km); U_c 为本地模拟试验的平均速度($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$); $K_{\text{Tmp},x}$ 为温度修正系数; $K_{\text{Base},x}$ 为基本排放率的修正系数; $K_{\text{Hmd},x}$ 为湿度修正系数; $K_{\text{IM},x}$ 为 I/M 修正系数; $K_{\text{Fuel},x}$ 为燃料修正系数; $K_{\text{Alt},x}$ 为当地海拔修正系数; $K_{\text{Cntry},x}$ 为不同国家的修正系数; K_{dx} 为行驶或处于热浸状态下的修正系数.

公式(1)、(2)、(3)中的部分参数如 f_x 、 f_{dx} 、 D 及 U_c 可通过本地模拟实验测得, U_{FTP} 是指机动车在 FTP 驾驶循环下测得的平均速度,为定值(王海鲲等 2006); B_i 直接由 IVE 模型给出,车辆在 LA4 驾驶循环下测得的排放率(ISSRC 2008);其他修正参数的取值主要由车辆类型、技术分布以及尾气排放控制技术决定(ISSRC 2008).

需要指出的是,计算排放因子并不需要逐一输入这些参数,而只需要输入运行 IVE 模型所需的基础数据.而且 IVE 模型中有着单独的模块可分别计算北京、上海、天津市 1 d 内不同时间段、针对不同车辆类型、道路等级的排放因子.每种道路等级的平均排放因子取的是 24 个时段对应排放因子的算术平均值.

本文收集北京、上海、天津、成都市机动车的基础数据用于运行 IVE 模型,并以成都市为例,就 2007 年进行比较.表 1 列出了北京、上海、天津、及成都市各类在路机动车保有量比例的分布情况.

这 4 个城市的载客车的保有量均占主导地位,尤其是北京市和成都市,所占的比例分别达到了 70% 和 85%.北京、上海及天津市的出租车比例较相近,在 20% 上下.北京市的车辆主要以载客车和出租车为主,两者的保有量占总数的 94%;而上海市和天津市,结构较为相似,除载客车占大多数外,其它 3 种车辆都占有相当的比例;成都市的机动车结构则主要以载客车及载货车为主,约占总数的 97.5%,出租车和公交车的比例相对较少.

表 1 北京、上海、天津及成都各类在路机动车所占比例分数(2004 年统计)

Table 1 Vehicle class distributions in Beijing, Shanghai, Tianjin, and Chengdu

机动车类型 ¹⁾	所占数量百分比				
	北京 ²⁾	上海 ²⁾	天津 ³⁾	成都 ⁴⁾	算术平均值
载客车	70%	47%	64%	80%	67%
出租车	24%	25%	18%	1.6%	17%
公交车	4%	11%	10%	0.8%	6%
载货车	2%	15%	8%	17.6%	9%
合计	100%	100%	100%	100%	100%

注:1) 机动车类型的划分,按 IVE 模型机动车分类标准(ISSRC, 2008);2) 北京、上海市机动车数量所占比例数参考文献(ISSRC, 2008);3) 参考文献(叶身斌等 2007);4) 参考 2004 年统计资料(成都市统计局 2004).

如前文所述,各类机动车的技术分布、车龄分布(以平均行驶里程表示)比例、平均速度是利用 IVE 模型计算机动车尾气排放因子的重要参数.表 2 至表 4 分别集中列出了北京、上海、天津、成都 4 个城市各类机动车的基本参数.

表 2 北京、上海、天津、成都市各类机动车的技术分布分数

Table 2 Vehicle technologies distributions in Beijing, Shanghai, and Tianjin

机动车类型	各类机动车技术	所占数量比例				
		北京 ¹⁾	上海 ¹⁾	天津 ¹⁾	成都 ²⁾	算术平均值
载客车	燃汽油,化油器,不带催化剂	7.2%	5.0%	13.2%	20.3%	11.4%
	燃汽油,化油器,2 元催化剂	3.7%	0.1%	—	—	1.0%
	燃汽油,单点喷射,2 元催化剂	0.1%	9.4%	—	—	2.4%
	燃汽油,单点喷射,3 元催化剂	1.9%	7.0%	—	—	2.2%
	燃汽油,多点喷射,不带催化剂	0.3%	0.7%	0.1%	—	0.3%
	燃汽油,多点喷射,3 元催化剂	86.8%	77.8%	86.7%	79.0%	82.6%
	其他	—	—	—	0.7%	0.2%
出租车	燃汽油,化油器,不带催化剂	15.8%	2.2%	35.4%	0.2%	13.4%
	燃汽油,单点喷射,无催化剂	7.0%	—	—	—	1.8%
	燃汽油,单点喷射,3 元催化剂	—	54.0%	—	—	13.5%
	燃汽油,多点喷射,3 元催化剂	—	17.3%	64.6%	0.4%	20.6%
	燃汽油,多点喷射,欧 2 控制标准	71.9%	—	—	—	18.0%
	燃汽油,直接喷射,3 元催化剂	—	26.5%	—	—	6.6%
	天然气,化油器,无催化剂	5.3%	—	—	99.4%	26.2%

续表 2

机动车类型	各类机动车技术	所占数量比例				
		北京 ¹⁾	上海 ¹⁾	天津 ¹⁾	成都 ²⁾	算术平均值
公交车	燃汽油,化油器,不带催化剂	8.2%	6.0%	13.7%	—	7.0%
	燃汽油,化油器,欧1控制标准	—	18.1%	—	—	4.5%
	燃汽油,化油器,2元催化剂	11.6%	—	—	—	2.9%
	燃汽油,燃料喷射,3元催化剂	26.0%	—	—	—	6.5%
	燃汽油,直接喷射,欧1控制标准	3.3%	—	—	—	0.8%
	燃汽油,直接喷射,欧2控制标准	5.0%	—	—	—	1.3%
	燃柴油,直接喷射,改良催化剂	6.0%	21.5%	86.3%	—	28.5%
	燃柴油,直接喷射,欧2控制标准	—	—	—	15.3%	0.0%
	燃柴油,直接喷射,欧1控制标准	10.2%	54.4%	—	—	20.0%
	燃柴油,直接喷射,欧3控制标准	3.5%	—	—	—	0.9%
	燃天然气,燃料喷射,三元催化剂	16.8%	—	—	—	4.2%
	燃天然气,化油器,不带催化剂	2.7%	—	—	—	0.7%
	燃LPG,燃料喷射,三元催化剂	6.8%	—	—	—	1.7%
	燃天然气	—	—	—	84.7%	21.2%
载货车	燃汽油,化油器,不带催化剂	25.7%	27.0%	2.3%	0.1%	13.8%
	燃汽油,燃料喷射,欧1控制标准	—	3.0%	—	0.1%	0.8%
	燃汽油,直接喷射,三元催化剂	—	—	2.3%	0.1%	0.6%
	燃柴油,直接喷射,改良催化剂	50.5%	63.0%	95.4%	99.7%	77.2%
	燃柴油,燃料喷射,欧1控制标准	9.9%	7.0%	—	—	4.2%
	燃柴油,燃料喷射,欧2控制标准	13.9%	—	—	—	3.5%

注: 1) 参考文献(ISSRC 2008); 2) 参考(李从庆 2011) , 由于文献中对成都市机动车技术分布的归类不能与本文中其他城市的分类一一对应, 因此, 本文作了一些处理, 如后文所述.

如表 2 所示, 北京、上海、天津 3 个城市的绝大多数载客汽车, 采用的是燃汽油多点喷射汽车技术以及三元催化剂尾气控制技术, 其保有量分别占所有载客汽车总数的 86.7%、77.7% 和 86.8%. 如前所述, 由于载客汽车保有量占据主导地位, 这在一定程度上决定了整个城市机动车污染物的排放水平.

在表 3 中, 成都市载客车及载货车的车龄分布范围和本文的分布范围有差别, 在应用成都市的数据时, 假设每一个车龄分布范围的车辆数量是均匀分布的. 假如, 在车龄分布范围为 $(100 \sim 150) \times 10^3$ km 的区域内, 每 10^3 km 内的数量分布是一样的, 即车龄为 $(100 \sim 101) \times 10^3$ km 和 $(149 \sim 150) \times 10^3$ km 的车辆数量是一样的. 并以此来根据本文的车龄分布范围重新调整成都市的车辆分布. 由于李从庆等(2001) 未给出成都市燃气出租车的的技术分布, 本文在没有数据的情况下, 做了如下假设, 假设占成都市 99.7% 的燃气出租车共有两种技术分布, 化油器加三元催化剂及直接喷射油加三元催化剂, 按两种车型的 3 种不同车龄比例平均分配, 得到成都市燃气出租车的技术分布.

如表 3 所示, 就载客车而言, 4 个城市 70% 以上

的载客车的累计里程数都小于 7.9×10^4 km. 只有 10% 左右的机动车累计里程数在 16×10^4 km 以上. 这 4 个城市呈现较为类似的年龄结构, 这可能跟载客车在中国城市里行驶的里程数大致类似, 而且超过里程数汽车强制报废的政策有关.

就出租车而言, 4 个城市呈现出来的特点恰恰跟载客车相反. 大多数(56% 以上) 的出租车的累计里程数都在 16×10^4 km 以上. 上海和天津的情况颇为类似. 累计里程数在 7.9×10^4 km 以下和 $(8 \sim 16) \times 10^4$ km 之间的比例大致相同, 在 20% 左右. 而对北京而言, 累计里程数在 $(8 \sim 16) \times 10^4$ km 的出租车是 7.9×10^4 km 以下的出租车数量的 3 倍左右. 这从另一侧面表明北京市的出租车每年行驶的里程较其他两个城市大. 而成都市出租车的累计里程数超过 16×10^4 km 的比例高达 83.6, 其余也多分布在 $(8 \sim 16) \times 10^4$ km 里程数的范围, 分析表明成都市出租车每年行驶的里程数是 4 个城市中最高的.

就公共汽车而言, 上海市基本淘汰了累计里程数在 16 万 km 以上的公共汽车, 而且绝大多数(约 2/3) 的公共汽车的里程数在 7.9×10^4 km 以下. 对天津市来说, 和上海市的情况恰恰相反, 约 80% 的公共汽车累计里程数在 16×10^4 km 公里以上, 只有

56% 的公共汽车累计里程数在 7.9×10^4 km 以下. 北京市的情况居于上海和天津两者之间. 但大多数的公共汽车的累计里程数在 16 万 km 以上. 7.9 万 km 以下和 $(8 \sim 16) \times 10^4$ km 之间的数量相当. 而对于成都市而言, 累计里程数在 $(8 \sim 16) \times 10^4$ km 之间的数量却较少, 60% 以上的公交车累计里程数超过了 16×10^4 km, 累计里程数小于 7.9×10^4 km 里程数所占的比例与北京市相当.

就载货车而言, 按城市不同, 有 53.5% ~

69.8% 的载货车的累计里程数在 16×10^4 km 以上, 尤以天津最大, 上海、北京次之, 成都最小. 里程数在 7.9×10^4 km 以下的载货车的数量比例则以成都最多(达 60.3%), 北京次之, 而上海和天津几乎相同.

这些区别, 很大程度上是社会经济发展, 当地政策的一种综合反映. 因此, 当地社会经济的发达程度、政策取向以及居民的生活习惯共同决定了该地区机动车的结构.

表 3 北京、上海、天津市各类机动车的车龄分布(以行驶里程数表示)
Table 3 Vehicle age distributions in Beijing, Shanghai, and Tianjin(by mileages)

机动车类型	车龄范围 (以里程数 10^3 km 表示)	所占数量比例				
		北京 ¹⁾	上海 ¹⁾	天津 ¹⁾	成都 ²⁾	算术平均值
载客车	< 79	71.8%	71.1%	82.0%	57.8%	70.7%
	80 ~ 161	18.8%	18.2%	8.8%	30.2%	19.0%
	> 161	9.4%	10.8%	9.3%	12.0%	10.3%
出租车	< 79	8.8%	22.9%	22.9%	3.0%	14.4%
	80 ~ 161	28.1%	20.8%	20.8%	13.4%	20.8%
	> 161	63.2%	56.3%	56.2%	83.6%	64.8%
公共汽车	< 79	29.1%	75.8%	5.6%	23.8%	33.6%
	80 ~ 161	25.3%	24.2%	14.5%	12.2%	19.1%
	> 161	45.6%	—	79.9%	64.0%	47.3%
载货车	< 79	27.7%	19.0%	18.6%	60.3%	31.4%
	80 ~ 161	18.8%	18.0%	11.6%	30.8%	19.8%
	> 161	53.5%	63.0%	69.8%	8.9%	48.8%

注: 1) 参考(ISSRC 2008) ; 2) 参考(李从庆等 2011) .

如表 4 所示, 北京、上海和天津这 3 个城市各类机动车的平均行驶速度基本相似, 平均值最大值和

最小值相差在 $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 以内.

表 4 北京、上海、天津市机动车的平均速度
Table 4 Vehicle average speeds in Beijing, Shanghai, and Tianjin

机动车类型	车辆行驶的平均速度 ¹⁾ / ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)			
	北京 ²⁾	上海 ²⁾	天津 ²⁾	算术平均值
载客车	快速路 ³⁾ : 37.4	快速路: 37.12	快速路: 37.4	快速路: 37.3
	主干道 ³⁾ : 17.8	主干道: 17.8	主干道: 17.8	主干道: 17.8
	乡村路 ³⁾ : 15.9	乡村路: 18.3	乡村路: 15.9	乡村路: 16.7
出租车	25.1	22.4	25.1	24.2
公交车	18.3	17.3	18.3	18.0
载货车	21.4	20.5	21.4	21.1

注: 1) IVE 模型中有着单独的模块可分别计算北京、上海、天津市不同时间段的排放因子, 因此也存在 24 个不同的速度. 每个时段的长度为 1 h; 2) 参考(ISSRC 2008) ; 3) 我国根据道路的功能、用途将道路按设计时速分为了 4 类(马健育等 2003) . IVE 模型中, 北京、上海、天津都按照相同的标准将道路分为了 3 类.

在 IVE 模型中, VSP 及热浸(Hot Soak) 时间分布是重要的计算参数. 在本文所收集的 VSP 和热浸时间分布数据主要来自于 Liu (2005) 和 Huang (2005) 等的研究. 该研究使用载客车, 通过道路实

测得到的北京、上海市部分机动车每秒钟的行驶速度及加速度, 并根据 VSP 的计算公式分别推算出两个城市载客车, 出租车, 公交车及载货车的 VSP 分布. 在 VSP 的计算过程中, 基于中国城市道路设计

和建设的特点,假设道路的坡度为零.而且,该研究表明,载客汽车在北京和上海两个城市里的快速路上行驶的 VSP 数值区间分布基本相同,比如有将近 40% 的时间, VSP 的数值主要分布在区间 [11, 13] 内,这说明两个城市的载客车整体行驶特征相似.当载客车在主干道上行驶时,有将近 60% 的时间 VSP 主要分布在区间 11 内,而且两个城市的情况基本相同.由于乡村路和主干道的设计速度有很大的交叉,使得载客车在乡村路上的情况和在主干道上

的 VSP 分布情况类似. Liu(2005) 和 Huang(2005) 等利用 VOCE (Vehicle Occupancy Characteristics Enumerator) 来测量汽车的热浸时间.他们的研究结果表明北京、上海、天津 3 个城市的热浸时间分布基本相同,且最常见的热浸时间主要有 15 min, 720 min, 以及 1100 min.

表 5 列出的是北京、上海、天津、成都 4 个城市用于计算 IVE 模型修正因子的基础信息.除温、湿度和海拔外,其他因素都是一样的.

表 5 北京、上海、天津、成都市用于计算本地修正因子的基础信息

Table 5 Basic information used for deriving vehicle emissions correction factors for Beijing, Shanghai, Tianjin, and Chengdu

城市	本地变量				燃料质量变量						车辆行驶变量	
	环境温度 /℃	环境湿度	海拔高度 /m	修理/维护制度	汽油					柴油	道路坡度	空调使用率
					概况	含硫量	含铅量	含苯量	含氧量			
北京市 ¹⁾	七月最高气温 38	42.0%	35	无	适度/预先混合	中等 (0.03%)	无	中等 (1.5%)	0%	中等	0	80%
上海市 ¹⁾	六月最高气温 30	42.0%	20	无	适度/预先混合	中等 (0.03%)	无	中等 (1.5%)	0%	中等	0	80%
天津市 ¹⁾	八月最高气温 38	42.0%	35	无	适度/预先混合	中等 (0.03%)	无	中等 (1.5%)	0%	中等	0	80%
成都市 ²⁾	七月最高气温 38	80.0%	500	无	适度/预先混合	中等 (0.03%)	无	中等 (1.5%)	0%	中等	0	80%

注: 1) 参考(ISSRC 2008); 2) 成都市本地变量参数值, 参考(成都市气象局 2009) 燃料质量变量采用我国的标准值(ISSRC 2008), 车辆行驶变量假设与北京、上海、天津市相同.

比较北京、上海、天津市机动车的基础数据,可观察到 3 个城市存在着较强的共性.因此,本研究假设成都市的机动车结构也与以上 3 个城市基本类似.

2.3 排放清单估算方法

排放清单的估算用公式(4)来计算:

$$M_i = Q_i \times S \times C \times 10^{-6} \quad (4)$$

式中 μ 为某种污染物; M_i 为某种污染物的排放总量 (t); Q_i 为某种污染物的排放因子 (g·km⁻¹); S 为年驾驶里程数 (km); C 为机动车保有量.

本文用 IVE 模型根据不同的基础数据分别计算不同城市的尾气排放因子,然后结合机动车的保有量和行驶里程数运用上述公式计算排放清单并相互比较.

3 结果与讨论(Results and discussion)

3.1 运行 IVE 模型

本研究在运行 IVE 模型时对所用的数据进行如下处理: 当所研究城市有可用的数据时,采用的是该城市的数据; 当所研究城市没有可用的数据时,采用的是其他城市数据的平均值.同时为了评

价不同城市间的基础数据是否具有共享性,模型的运行分两种情况进行.一种是使用所研究城市特有的基础数据.另一种是使用所有城市基础数据的平均值来运行,所得的结果在本文里称之为综合排放因子.表 6 给出这 4 个城市两种不同的模型运行结果.

如表 6 所示,比较北京、上海、天津、成都及 4 个城市载客车的综合排放因子,对 CO 排放因子而言,不同的道路类型所呈现出来的排放水平不一样,以乡村路最大而快速路最小.这主要是由于乡村路的设计时速较小,而且停-走(Stop-and-Go) 的次数较多造成的.就平均值而言,上海市相对较小,大约为 10 g·km⁻¹而其他 3 个城市均大于 10 g·km⁻¹,且北京市与天津市最为接近; 对于 HC 及 NO_x 排放因子而言,由于道路类型不同而造成的排放与 CO 类似.分别以排放因子最小的为基准,污染物的排放因子差距范围分别在 29% ~ 89%, 23% ~ 110%. 北京、上海及天津市载客车的排放因子差距较小,这反过来证实了这 3 个城市载客车的车队结构及车用技术相似.

对于北京市而言,载客车的 3 种污染物的平均

排放因子的大小依次为: 乡村路 > 主干道 > 快速路, 乡村路的排放因子明显较高。4 个城市的综合排放因子也遵循着相同的规律, 原因如上所述。北京市出租车 CO、HC 排放因子均比载客车高, HC 排放因子甚至是载客车的 2 倍, 与综合排放因子相比, 以北京市的排放因子为基准, CO、HC、NO_x 分别相差 31.6%、-13.3%、19.7%。北京市公交车 CO、HC 排放因子明显高于其他 3 种车型, 公交车 CO 排放因子是出租车的 2.3 倍, HC 排放因子也高出出租车 47.0%; 与综合排放因子相比, 分别相差 40.0%、29.0%。公交车的 NO_x 排放因子与载客车及出租车

相比, 也明显较高, 但与公交车综合排放因子相比, 仅为综合排放因子的 55.2%。北京市载货车的 3 种排放因子均较高, CO、HC 排放因子仅次于公交车, 而 NO_x 排放因子甚至大于公交车, 以综合排放因子为基准, 误差分别为 69.5%、60%、-37.5%。如表 2 所示, 北京市近 82% 的载客车及 72% 的出租车装有三元催化剂, 重型车技术相对较差, 近 78% 的公交车及 76% 的载货车未达欧 1 标准。比较结果证实, 车辆技术在一定程度上, 决定了不同类型车辆排放因子的大小。

表 6 北京、上海、天津、成都市及综合排放因子

Table 6 City-specific emission factors and the composite emission factor for Beijing, Shanghai, Tianjin, and Chengdu

机动车 类型	道路 类型	排放因子/(g·km ⁻¹)														
		北京市			上海市			天津市			成都市			综合排放因子 ¹⁾		
		CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x
载客车	快速路	11.58	0.61	1.03	7.68	0.51	1.14	11.32	0.79	0.90	11.84	0.88	0.57	9.24	0.67	0.69
	主干道	17.21	1.14	1.42	10.42	0.93	1.45	17.56	1.54	1.22	15.35	1.75	0.68	11.77	1.27	0.81
	乡村路	19.99	1.30	1.72	10.60	0.93	1.53	20.68	1.74	1.45	17.94	1.87	0.75	13.70	1.88	0.92
	平均值 ²⁾	16.26	1.02	1.39	9.57	0.79	1.37	16.52	1.36	1.19	15.25	1.50	0.66	11.57	1.27	0.81
出租车		19.68	2.18	0.76	27.55	1.94	2.11	41.44	3.27	1.44	35.83	0.61	0.62	25.89	1.89	0.91
公交车		45.72	3.21	4.76	28.28	2.41	9.89	17.78	2.35	17.92	10.33	0.26	1.38	27.42	2.27	8.63
载货车		39.72	3.00	9.63	39.46	2.94	9.04	4.33	0.80	19.04	3.67	0.74	23.74	23.43	1.88	15.42

注: 1) 使用所有城市基础数据的平均值来运行得到的结果。

对于上海市而言, 与北京市相比, 载客车的 3 种排放因子均偏小, 尤其是 CO, 仅为北京市的 1/2。与载客车的综合排放因子平均值相比, CO、CH、NO_x 3 种排放因子的误差分别为, -17.3%、-37.8%、69.1%。上海市出租车的排放因子与载客车相比, CO 是载客车的 3 倍, HC 及 NO_x 是载客车的 2 倍左右。与出租车综合排放因子相比, 误差分别为: 1.5%、3.7%、101.1%。由表 2 可知, 上海市近 30% 的公交车、约 90% 的载货车没有达到欧 1 标准。由于技术水平较低, 公交车及载货车的排放因子均较大, 尤其是 NO_x, 几乎为载客车 NO_x 排放因子的 7 倍。而计算综合排放因子值, 输入的公交车及载货车技术参数显示, 近 35% 的公交车及 90% 的载货车未达欧 1 标准。公交车排放的 3 种污染物的综合排放因子值与上海市相差不大, CO、HC、NO_x 分别相差 3.1%、6.2%、14.6%。而上海市载货车 CO 及 HC 排放因子比综合排放因子分别高出 68.4%、56.4%, 而 NO_x 误差为 -41.4%。

对于天津市而言, 载客车在 3 种不同类型道路上行驶时的排放情况与北京、上海市情况相同, 排

放因子的大小同样为: 乡村路 > 主干道 > 快速路。天津市出租车 CO、HC 排放因子均比其它 3 种车型都高, CO 超过了 40 g·km⁻¹, HC 排放因子大于 3 g·km⁻¹, 主要原因同样归咎于, 天津市近 35% 的出租车未装三元催化剂, 因此, 与综合排放因子相比, CO、HC 及 NO_x 分别高出 37.5%、42.2%、36.8%。天津市公交车及载货车的 NO_x 排放因子非常高, 相当于载客车及出租车的 17 倍左右。与公交车及载货车的综合排放因子相比, 分别高出 52%、19.0%。天津市载货车 CO 及 HC 排放因子却相对较小, CO 仅为载客车的 1/4, 为综合排放因子的 28%。主要原因是天津市将近 86% 的公交车、95% 的载货车的动力燃料为柴油, 排放因子的大小与燃料类型也有关系。

对于成都市而言, 载客车的排放因子的大小与综合排放因子的大小较为相似, 载货车重型车辆的 NO_x 排放因子远大于载客车等轻型车辆, 最大高出 20 倍。成都市的排放因子与综合排放因子值差异较小, 这主要是因为成都市缺乏大量的基础数据, 计算成都市排放因子时, 对于缺乏的基础数据, 均采

用北京、上海、天津市的平均值替代。除了在成都市已有数据的一些参数上,如机动车车龄分布、各种车型技术分布、温湿度等有差别之外,其他的数值和计算综合排放因子时所用的基础数据基本一样。以载客车综合排放因子为基准,比较成都市载客车 CO、HC 及 NO_x 排放因子,误差分别为: 31.8%, 18.1%, -18.5%。将成都市出租车的排放因子与综合排放因子相比,成都市 CO 排放因子高于综合排放因子 38.8%,主要原因是成都市出租车车龄较大,将近 85% 的出租车累计里程数超过了 16.1 万 km,导致测量得到的排放因子偏大。成都市公交车 3 种污染物 CO、HC 及 NO_x 与综合排放因子相比,分别偏低 62.7%, 88.5%, 84.2%, 原因是成都市 84% 以上的公交车以天然气为燃料,见表 2。排放气体相对较清洁。成都市载货车 CO 及 HC 排放因子与综合排放因子相比,均偏小 85.8%, 61.7%, NO_x 却偏高 54.0%。

本研究为了验证 IVE 模型运算结果的准确性,将本文针对北京和上海两市载客车的排放因子预测值及 4 个城市的综合排放因子分别与姚志良 (2006), Huang (2005) 等针对相应城市的研究结果 (下文记为参考值) 进行比较,以参考值为基准,结果如表 7 所示。比较本研究对特定城市北京市的预测值与参考值,就载客车而言,本研究与参考值均取的是载客车在 3 种不同类型道路上行驶的平均排放因子,CO、HC、 NO_x 的排放因子与相应的参考值相比,分别相差 -1%、13% 和 26%;出租车的 3 种排放因子与参考值相比,分别相差 -17%、0.9%、-16%;本研究对公交车 3 种排放因子,即 CO、HC、 NO_x 的预测值与参考值相比,误差为 9%、2%、-22%;载货车的预测值与参考值相比,分别相差 -13%、-21%、-33%。再将综合排放因子与相应的参考值相比,对载客车而言,CO、HC、 NO_x 分别相差 -8%、17%、18%;对出租车而言,与参考值相比,本文预测的北京市排放因子和综合排放因子的差异程度随污染物的不同而不同,以 HC 最小, NO_x 次之,而 CO 最大;对公交车而言,与参考值相比,CO 及 HC 的综合排放因子差距较小,分别为 14%、2%,而 NO_x 差距较大,为 75%。主要原因见表 2,计算综合排放因子时,输入的公交车的技术参数,将近 60% 的机动车以柴油为燃料,而柴油车 NO_x 排放因子较高导致的 (傅立新等, 2000)。对载货车而言,3 种综合排放因子和相对应的参考值相比均偏小,误

差范围为 -36% ~ -12%。

本文预测的北京市排放因子和参考值相比,存在较大的差异。其主要原因是由于本文输入 IVE 模型计算的 VSP 分布值及平均速度的不同造成的。IVE 模型中有单独的模块用于计算北京市各类机动车的排放因子 (ISSRC 2008)。但由于受交通状况和其他原因的影响,机动车在不同时间段有着不同的行驶工况,从而导致不同的平均速度及 VSP 分布。为了能更全面地反映北京市整体的平均排放水平,本研究将 IVE 模型中给出的各个时间段的平均速度及 VSP 分布值分别求了算术平均值,并将得到的新数据作为北京市的特定参数用于计算,从而导致计算结果的不同。

对上海市的载客车而言,本研究针对上海市的预测值与相对应的参考值相比,CO、HC、 NO_x 分别相差 20%、26%、6.1%。造成差异的原因与北京市的情况相似。把综合排放因子与上海市的参考值相比,CO、HC、 NO_x 分别相差 26%、1.8%、11%。尽管本文的预测值和相对应的参考值相比有一定的差异,但从总体上看,和机动车尾气排放因子巨大的变化性相比而言 (例如,不同驾驶工况可有量级上的差异 (Frey *et al.* 2009)) 差异则相对较小。因而,在所研究城市没有可用的数据情况下,采用其他城市数据的平均值来预测尾气排放是可以接受的。

3.2 排放清单比较及分析

如前文所述,本研究将成都市缺乏的基础数据,如:各类机动车的技术分布、车龄分布、平均速度、VSP 分布区间值、热浸时间等统计数据,分别用北京、上海、天津等城市相应的算术平均值来替代,运行 IVE 模型,并计算成都市机动车的排放因子,如表 6 所示。关于各类机动车的活动情况,由于没有获得可用的数据,本文采用随机问卷调查的形式统计相关的数据。调查的地点主要集中在成都市市区,一环至三环道路上交通较为集中的地点,如:学校、停车场、公交车车站、车管所以及加油站等 (具体见表 8 注释)。根据前文公式 (4) 和问卷调查结果,计算成都市机动车尾气排放清单,将计算出的排放总量与 2007 年成都市污染白皮书 (成都市环保局 2009) 作比较,并同时与成都市环境科学院利用 IVE 模型计算的排放结果 (李从庆等 2011) 做比较,结果如表 8 所示。对污染物 CO 而言,IVE 模型预测出的载客车的排放总量与污染物白皮书相差 1.4%,IVE 模型计算的总排放量值与李从庆等计算

排放量值相差 11.2%;对污染物 NO_x而言,排放总量预测值与污染物白皮书相差 10.4%,与李从庆等计算的相差 -8.2%.由以上分析证明,IVE 模型计算出的成都市各类机动车 CO、NO_x排放因子较准确.但对污染物 HC 而言,IVE 模型预测的排放总量

仅为污染物白皮书的 52.6%,与李从庆等计算的相差 29.8%,相差均较大.这很可能是由于污染物白皮书所采用的 HC 的排放因子和本文所得的排放因子有很大的区别而造成的.详细的原因,还需要做进一步的研究.

表 7 污染物排放因子比较
Table 7 Comparison of emission factors

机动车类型	城市	排放因子/(g·km ⁻¹)			参考文献
		CO	HC	NO _x	
载客车	北京	16.50	0.90	1.10	姚志良 2006
		16.26	1.02	1.39	本研究 ¹⁾
	上海	12.01	1.07	1.45	黄成 2005
		9.57	0.79	1.37	本研究 ²⁾
	综合	15.23	1.05	1.30	本研究 ³⁾
	相对误差范围 ⁴⁾	-8% ~ -1%	13% ~ 17%	18% ~ 26%	—
出租车	北京	32.20	2.20	0.90	姚志良 2006
		19.68	2.18	0.76	本研究 ¹⁾
	综合	26.63	2.37	1.15	本研究 ³⁾
	相对误差范围 ⁴⁾	-17% ~ -4%	0.9% ~ 8%	-16% ~ 28%	—
公交车	北京	41.90	2.60	6.10	姚志良 2006
		45.72	3.21	4.76	本研究 ¹⁾
	综合	35.88	2.66	10.66	本研究 ³⁾
	相对误差范围 ⁴⁾	-14% ~ 9%	2% ~ 23%	-22% ~ 75%	—
载货车	北京	45.40	3.80	14.30	姚志良 2006
		39.72	3.00	9.63	本研究 ¹⁾
	综合	29.27	2.21	12.65	本研究 ³⁾
	相对误差范围 ⁴⁾	-36% ~ -13%	-42% ~ -21%	-33% ~ -12%	—

注: 1) 本研究对北京特定城市排放因子的预测值; 2) 本研究对上海市特定城市载客车排放因子的预测值; 3) 本研究计算的综合排放因子, “—”表示没有数据; 4) 相对于北京市由姚志良(2006)所得的排放因子的误差.

表 8 成都市机动车尾气排放总量
Table 8 Comparison of vehicle emission inventory for Chengdu

机动车类型	年驾驶里程数 ¹⁾ /万 km	保有量 ²⁾ /万辆	IVE 模型 /万 t			成都市污染白皮书 ³⁾ /万 t			成都市 IVE 模型 预测结果 ⁴⁾ /万 t		
			CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x	CO	HC	NO _x
载客车	2	68.13	20.78	2.04	0.90	21.08	—	—	14.05 ⁵⁾	1.12 ⁵⁾	1.85 ⁵⁾
出租车	12	1.2	5.18	0.088	0.089	—	—	2.3	1.86	0.01	0.10
公交车	8	0.7	0.57	0.015	0.076	—	—	—	0.47	0.01	0.12
载货车	1	10.1	3.36	0.73	2.39	—	—	1.55	3.79 ⁶⁾	0.26 ⁶⁾	0.54 ⁶⁾
合计	—	—	29.89	2.87	3.45	34.52	6.06	3.85	33.67 ⁷⁾	4.09 ⁷⁾	3.19 ⁷⁾

注: 1) 由于缺乏基础数据, 本文作者采取问卷调查及统计的方法推算成都市各类机动车的年驾驶里程数; 2) 参考 2007 年统计资料(成都市统计局 2007), “—”表示没有数据; 3) 参考文献(成都市环保局 2009); 4) 参考文献(李从庆等 2011); 5) 本文将参考文献中的轻型客车及大型客车的排放量统计为载客车的排放量; 6) 本文将参考文献中的重型货车及中型货车的排放量统计为载货车的排放量; 7) 合计排放量统计的是李从庆等 2008 年利用 IVE 模型预测成都市各类机动车排放总量的和.

4 结论(Conclusions)

- 1) 通过比较北京、上海、天津市机动车相关的基础数据,发现这些城市的数据在车辆技术分布、车龄结构以及整体的驾驶特征等方面非常相似.
- 2) 利用北京、上海、天津等城市基础数据的平

均值模拟得到的成都市的汽车尾气排放清单和公布的数值整体一致.这说明针对我国大部分城市缺乏机动车相关基础数据的现状,借鉴其他城市的基础数据计算某一地区的排放因子,不失为一种较经济的方法.一方面节省了大量的人力物力,另一方面同样可获得该城市相对较准确的排放清单.

3) 为了增强本方法的通用性,还需要用其他城市的实际数值做进一步的验证。

责任作者简介: 张凯山,男,博士,教授,毕业于美国北卡罗莱纳州立大学。长期从事大气污染相关方面的研究,特别是在城市机动车的尾气排放预测和建模等方面有较丰富的经验。

E-mail: kaishanzhang@yahoo.com.

参考文献(References):

- 毕晔,葛蕴珊,韩秀坤. 2007. 基于 MOBILE6.2 的北京市出租车排放污染物分析[J]. 安全与环境学报, 7(2): 61-64
- Bi Y, Ge Y S, Han X K. 2007. Analysis of emission pollutants from Beijing taxi based on MOBILE 6.2 [J]. Journal of Safety and Environment, 7(2): 61-64 (in Chinese)
- 毕索阳,刘永红,蔡铭,等. 2010. 佛山禅城区机动车尾气排放特征及分布[J]. 安全与环境学报, 10(3): 69-72
- Bi S Y, Liu Y H, Cai M, et al. 2010. Gas emission characteristics and distribution in the central areas of Foshan City [J]. Journal of Safety and Environment, 10(3): 69-72 (in Chinese)
- 成都市统计局. 2004. 成都统计年鉴 2004 [M]. 北京: 中国统计出版社
- Chengdu Bureau of Statistics. 2004. Chengdu Statistical Yearbook (2004) [M]. Beijing: China Statistical Press (in Chinese)
- 成都市气象局. 2009. 成都气候 [OL]. 2010-11-20. <http://www.cdmb.gov.cn/detail.asp?ID=4183>
- Chengdu Meteorological Bureau. 2009. Chengdu Climate [OL]. 2010-11-20. <http://www.cdmb.gov.cn/detail.asp?ID=4183> (in Chinese)
- 成都市环保局. 2009. 城市空气污染白皮书 [OL]. 2010-11-20. http://cd.qq.com/a/20090701/002004_1.htm
- Chengdu Environmental Protection Bureau. 2009. White Paper on urban air pollution [OL]. 2010-11-20. http://cd.qq.com/a/20090701/002004_1.htm
- 蔡皓,谢绍东. 2010. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J]. 北京大学学报(自然科学版), 46(3): 319-326
- Cai H, Xie S D. 2010. Determination of emission factors from motor vehicles under different emission standards in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 46(3): 319-326 (in Chinese)
- Davis N, Lents J, Osses M, et al. 2005. Development and application of an international vehicle emissions model [A]. Transportation Research Board 81st Annual Meeting [C]. Washington D C
- Davis N, Lents J, Nikkila N, et al. 2004. Mexico City Vehicle Activity Study [OL]. 2011-04-27. <http://www.issrc.org/ive/downloaddata.html>
- 傅立新,贺克斌,何东全,等. 1997. MOBILE 汽车源排放因子模式研究[J]. 环境科学学报, 17(4): 474-479
- Fu L X, He K B, He D Q, et al. 1997. A study on models of MOBILE source emission factors [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 17(4): 474-479 (in Chinese)
- 傅立新,郝吉明,何东全,等. 2000. 北京市机动车污染物排放特征[J]. 环境科学, 21(3): 68-70
- Fu L X, Hao J M, He D Q, et al. 2000. The emission characteristics of pollutants from motor vehicles in Beijing [J]. Environmental Science, 21(3): 68-70 (in Chinese)
- Frey H C, Zhang K S, Roupail N, et al. 2009. Fuel use and emissions comparisons for alternative routes, time of day, road grade, and vehicles based on in-use measurements [J]. Environ Sci Technol, 42(7): 2483-2489
- 何春玉,王歧东. 2006. 运用 CMEM 模型计算北京市机动车排放因子[J]. 环境科学研究, 19(1): 109-112
- He C Y, Wang Q D. 2006. Vehicle emission factors determination using CMEM in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences, 19(1): 109-112 (in Chinese)
- 霍红,贺克斌,王歧东. 2006. 机动车污染排放模型研究综述[J]. 环境污染与防治, 18(7): 526-530
- Huo H, He K B, Wang Q D. 2006. A review of vehicle emission models [J]. Environmental Pollution and Control, 18(7): 526-530 (in Chinese)
- 郝吉明,王丽涛,李林,等. 2005. 北京市能源相关大气污染源的贡献率和调控对策分析[J]. 中国科学(D 辑地球科学), 35(增刊 1): 115-122
- Hao J M, Wang L T, Li L, et al. 2005. Contribution of major energy sources to air pollution in Beijing and countermeasure analysis [J]. China Science (D: Earth Sciences), 35 (additional 1): 115-122 (in Chinese)
- Huang C, Pan H S, Lents J, et al. 2005. Shanghai Vehicle Activity Study [OL]. 2010-11-18. <http://www.issrc.org/ive/downloaddata.html>
- International Suburban Sustainable Research Center (ISSRC). 2008. IVE model user's manual version 2.0 [OL]. 2010-11-18. <http://www.issrc.org/ive/downloadmodel.html>
- Lents J, Davis N, Nikkila N, et al. 2004. São Paulo Vehicle Activity Study [OL]. 2011-04-27. <http://www.issrc.org/ive/downloaddata.html>
- 李伟,傅立新,郝吉明,等. 2003. 中国道路机动车 10 种污染物的排放量[J]. 城市环境与城市生态, 6(2): 36-38
- Li W, Fu L X, Hao J M, et al. 2003. Emissions inventory of 10 kinds of air pollutants for road traffic vehicles in China [J]. Urban Environmental & Urban Ecology, 6(2): 36-38 (in Chinese)
- 李从庆,张普,陈红琳,等. 2011. 利用 IVE 模型测量成都市机动车排气污染负荷研究 [A]. 成都市科技年分会分会场——世界现代田园城市空气环境污染防治学术交流论文集 [C]. 成都: 中国学术期刊电子出版社. 123-133
- Li C Q, Zhang P, Chen H L, et al. Measuring vehicle emission load by IVE model in Chengdu [A]. Chengdu Science and Technology Annual Meeting at the venue-the world of modern garden city air pollution prevention Symposium [C]. 123-133
- Liu H, He C Y, Lents J, et al. 2005. Beijing Vehicle Activity Study [OL]. 2010-11-18. <http://www.issrc.org/ive/downloaddata.html>
- 马健霄,许家忠,张伟. 2003. 城市道路网信息管理系统研究[J]. 森

- 林工程, 19(2): 51-53
- Ma J X, Xu J Z, Zhang W. 2003. City road nets information management system research [J]. Forest Engineering, 19(2): 51-53(in Chinese)
- Ntziachristos L, Samaras Z. 2000. COPERT III, Computer program to calculate emissions from road transport, Methodology and emission factors(Version 2.1) [R]. Technical Report No 49. Copenhagen: European Environmental Agency
- 申卫国, 孙德智, 王辉. 2010. 北京市道路空气中 NO_x 现状监测及控制对策[J]. 环境科学研究 23(5): 591-595
- Shen W G, Sun D Z, Wang H. 2010. Study on the Status and NO_x Control Strategy in Beijing Urban Traffic [J]. Research of Environmental Sciences 23(5): 591-595(in Chinese)
- US Environmental Protection Agency (USEPA). 2001. User's Guild to Mobile 6 (Mobile Source Emission Factor Model) [R]. EPA20-D-01-002a, U. S. EPA: Office of Transportation and Air Quality. 1-10
- US California Air Resources Board (USCARB). 2003. EMTAC2002-Transmittal of On-Road Emission Model to USEPA[OL]. 2010-11-20. <http://www.arb.ca.gov/planning/sip/emfac2002/emfac2002.Htm>
- 王海鲲, 陈长虹, 黄成, 等. 2006. 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 26(1): 1-9
- Wang H K, Chen C H, Huang C, et al. 2006. Application of the International Vehicle Emission model for estimating of vehicle emissions in Shanghai [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 26(1): 1-9(in Chinese)
- 王景楠, 宋国华, 王宏图, 等. 2009. 基于 PEMS 技术的重型柴油客车排放实测与 IVE 模型预测对比分析[J]. 公路, 12: 90-95
- Wang J N, Song G H, Wang H T, et al. 2009. Comparative analysis of real-world emissions and IVE prediction from a heavy-duty diesel bus based on FEMS [J]. High Way, 12: 90-95(in Chinese)
- 姚志良, 贺克斌, 王岐东, 等. 2006. IVE 机动车排放模型应用研究[J]. 环境科学 27(10): 1928-1933
- Yao Z L, He K B, Wang Q D, et al. 2006. Application study of IVE vehicle emission model [J]. Environmental Science, 27(10): 1928-1933(in Chinese)
- 叶身斌, 王岐东, 贺新. 2007. 天津在路机动车活动水平调查研究[J]. 北京工商大学学报(自然科学版) 25(2): 28-30
- Ye S B, Wang Q D, He X. 2007. On-road vehicle activity level investigation and research in Tianjin [J]. Journal of Beijing Technology and Business University(Natural Science Edition), 25(2): 28-30(in Chinese)
- 张清宇, 魏玉梅, 田伟利. 2010. 机动车排放控制标准对污染物排放因子的影响[J]. 环境科学研究 23(5): 607-612
- Zhang Q Y, Wei Y M, Tian W L. 2010. Impact of National Vehicle Emission Standards on Vehicle Pollution Emission Factors [J]. Research of Environmental Sciences, 23(5): 607-612(in Chinese)
- 祝昌健. 1997. 广州市机动车尾气排放系数及污染趋势探讨[J]. 中国环境科学, 17(3): 216-219
- Zhu C J. 1997. Coefficient of vehicle emission discussion and trend of pollution in Guangzhou City [J]. China Environmental Science, 17(3): 216-219(in Chinese)