

# 城市机动车排放因子隧道试验研究

王伯光<sup>1</sup>, 张远航<sup>1</sup>, 祝昌健<sup>2</sup>, 俞开衡<sup>2</sup>, 陈鲁言<sup>3</sup>, 陈尊裕<sup>3</sup> (1. 北京大学环境科学中心, 北京 100871, E-mail: wbg@epic.com.cn; 2. 广州市环境科学研究所, 广州 510620; 3. 香港理工大学土木工程系, 香港)

**摘要:** 选取典型城市隧道进行机动车排放因子测试, 应用隧道试验原理, 通过连续 48h 的现场采样监测, 获得了隧道内机动车排放污染物 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub>、VOC 和 HC 浓度、交通参数(车型、车速、交通流量)和气象参数(如风速、风量、温度、湿度)等实测数据, 通过质量平衡计算出隧道内机动车 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 和 HC 的平均排放因子分别为 1.379、15.404、0.142、0.637、1.857g·(km·辆)<sup>-1</sup>. 并在此基础上应用多元回归方法计算出 8 大类机动车各种排放污染物的单车排放因子. 结果反映目前中国城市机动车污染物排放水平及各污染物排放特征.

**关键词:** 城市隧道; 机动车排放因子; 平均排放因子; 综合排放因子; 多元回归

中图分类号: X734.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2001)02-05-0055

## A Study on City Motor Vehicle Emission Factors by Tunnel Test

Wang Boguang<sup>1</sup>, Zhang Yuanhang<sup>1</sup>, Zhu Changjian<sup>2</sup>, Yu Kaiheng<sup>2</sup>, Chan Luyan<sup>3</sup>, Chan Zunyu<sup>3</sup> (1. Center for Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China Email: wbg@epic.com.cn; 2. Guangzhou Research Institute of Environmental Protection, Guangzhou 510620, China; 3. Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract** Applying the principle of tunnel test to run a typical across-river tunnel test in Guangzhou city, 48h-online-monitor data include pollutant concentration, traffic activity and meteorological data were gained. The average motor vehicle emission factors of NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub> and HC were calculated using mass balance which are 1.379, 15.404, 0.142, 0.637, 1.857g/km·vehicle respectively. Based on that, combined emission factors of 8 types of city vehicles were calculated using linear regression. The result basically showed the character and level of motor vehicle emission in Chinese city.

**Keywords:** city tunnel; emission factors; average emission factors; combined emission factors; polybasic regression

科学准确地建立机动车污染源排放清单是进行机动车排放控制的重要依据, 而获取准确的机动车排放因子是其关键<sup>[1]</sup>. 利用机动车台架试验进行排放测试, 可以获得单车排放因子, 但是建立排放清单更需要各种车型的综合排放因子<sup>[1,2]</sup>. 通过 Mobile、MVEI、COPERT 等排放因子模型可以估算机动车的综合排放因子, 但利用隧道试验、遥感技术和 OBD 技术等方法能够测试综合排放因子<sup>3,5]</sup>. 许多研究表明, 应选取尽可能长、平坦且直、单向通车、具可控式射流式风机、通风口少、交通流量大、有代表性机动车组成、各车型所占比例及车速变化幅度大的隧道进行试验<sup>5]</sup>. 城市隧道包括地面

隧道、水下隧道和公路高架隧道 3 种, 通常地面隧道和 水下隧道 适合测试 机动车排放因子<sup>4,5]</sup>. 然而由于实际操作困难, 许多隧道试验只测得平均排放因子, 而得不到机动车综合排放因子<sup>[1,2,5]</sup>. 因此, 本文同时研究了城市机动车的平均排放因子和 8 种不同车型的综合排放因子.

### 1 样品采集和分析

广州市珠江隧道是城市水下隧道, 为解决

基金项目: UNDP 援助项目(CPR/96/305/A/01/99)  
作者简介: 王伯光(1970~), 男, 博士生, 工程师  
收稿日期: 2000-06-12

市中心区与芳村区及进出西南方向各地的交通问题而设计,隧道进出的车辆组成能够代表广州市区实际情况.选取自黄沙至芳村段进行测试,该隧道线路全长 1130m,有效隧管总长 710m,沉管段长 420m.有效隧管横截面积为  $42\text{m}^2$ .隧管内较平直,隧管外进出口均有一平缓斜坡,其最大纵坡为 3.5% (引道敞开 4.5%).该段隧道为 3 车道单向通道.采用可控式射流式风机纵向通风,没有新风通入口.隧道单孔通行能力为 1800 辆/h,设计最高车速为 50km/h,最低不少于 15km/h.

根据隧道活塞机理和质量守恒原理的研究结果<sup>[1-3]</sup>,在隧道进、出口两端内部的内侧,距隧道口 10m 处,布设采样点,安装 TE 公司 Model 48 型 CO 监测仪器、Model 43C 型 SO<sub>2</sub> 监测仪器和 Model 42C 型 NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> 监测仪器进行连续自动监测,同时利用摄像机、激光枪、三杯风向风速仪和温湿度计监测隧道机动车种类和数量、机动车车速分布、风速风向和温度湿度的变化.另外,使用容积为 6L 的采样罐采集 VOC 和总碳氢气体样品,流量为 400L/min 的 PM<sub>10</sub> 采样器采集颗粒物.污染物 CO、

SO<sub>2</sub>、NO-NO<sub>2</sub>-NO<sub>x</sub> 自动监测每 5min 采集 1 次数据,机动车的类型、流量、车速为每 1min 采集 1 次数据,PM<sub>10</sub>、VOC 和总碳氢为每 2h 采集 1 次数据,气象参数则每 1h 采集 1 次数据.全部样品采集时间为 2d.采用预浓缩-气相色谱-质谱联用仪器 (Entech700/GC/MS/FID) 分析气体样品中的 VOC 和总碳氢,使用电子天平称重法测量颗粒物中的 PM<sub>10</sub>.

## 2 监测结果分析

监测结果分析表明(表 1,表 2),隧道内机动车的流量、各种机动车类型的比例、污染物的浓度差、风速等随时间有较大幅度的变化.这些特征有利于进行排放因子的计算.其中,隧道进口采样点 CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>和总碳氢浓度范围分别在 0.050 ~ 13.850mg/m<sup>3</sup>、0.002 ~ 0.128mg/m<sup>3</sup>、0.0005 ~ 1.662mg/m<sup>3</sup>、0.143 ~ 0.404mg/m<sup>3</sup>、2.644 ~ 4.368mg/m<sup>3</sup> 之间,隧道出口采样点 CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、PM<sub>10</sub>和总碳氢浓度范围分别在 0.775 ~ 62.113mg/m<sup>3</sup>、0.004 ~ 0.656mg/m<sup>3</sup>、0.046 ~ 4.409mg/m<sup>3</sup>、0.473 ~ 1.482mg/m<sup>3</sup>、3.670 ~ 5.562mg/m<sup>3</sup> 之间.

表 1 隧道试验监测数据统计分析结果

污染物	采样点	样品数/个	浓度范围/mg·m <sup>-3</sup>	平均值/mg·m <sup>-3</sup>	标准偏差
CO	隧道进口	576	0.050~13.850	2.137	1.584
	隧道出口	576	0.775~62.112	22.299	2.401
HC	隧道进口	48	2.644~4.368	2.859	0.199
	隧道出口	48	3.670~5.562	4.165	0.278
NO <sub>x</sub>	隧道进口	576	0.0005~1.662	0.136	0.038
	隧道出口	576	0.046~4.409	1.917	0.237
SO <sub>2</sub>	隧道进口	576	0.002~0.128	0.029	0.021
	隧道出口	576	0.004~0.656	0.213	0.022
PM <sub>10</sub>	隧道进口	24	0.143~0.404	0.339	0.051
	隧道出口	24	0.473~1.482	1.105	0.197

表 2 监测期间隧道内进出口气象参数监测值

风速/m·s <sup>-1</sup>			温度/°C	大气压/kPa	相对湿度/%
隧道进口	隧道出口	平均值			
2.81~3.60	3.33~4.50	3.59	28.5~32.2	100.96~101.40	73~89

观测期间通过隧道的各类机动车流量大致比例为:公交车 13.0%、大客车 0.6%、大货车 3.2%、小货车 10.4%、小客车 31.1%、出租车

8.8%、摩托车 32.0%、重型车 0.8%.机动车平均速度范围在 5km/h ~ 58km/h 之间,平均车速为 49km/h.整个采样期间,隧道内平均风

速 3.59m/s.

监测结果反映出不利于机动车排放因子计算的一些情况,包括①每天 22:00~3:00 之间进行隧道清洁卫生,会封闭其他隧道而让该隧道双向行车,车速减慢,进出口风速发生较大变化,进出口污染物浓度也出现反常情况;②隧道内机动车速度高,速度变化范围分布窄;③各种机动车的比例变化范围在 0~0.5 之间,高比例的机动车很少.因此,要选取合适的时段作为事例进行分析才能够达到计算出各类机动车排放因子的目的.

### 3 城市机动车排放因子的计算

#### 3.1 计算排放因子的基本原理

##### 3.1.1 质量平衡

为计算机动车的排放因子,首先对拟选取事例时段进出隧道的污染物进行质量平衡.质量平衡原理是将隧道看成是一个理想的圆柱状活塞,在一定时间内活塞进出口的污染物浓度差与通风量的乘积等于通过隧道的机动车污染物的总排放质量<sup>[1,6]</sup>.其计算公式如下:

$$M = \sum_i (c_{out} \times V_{out})_i - \sum_j (c_{in} \times V_{in})_j$$

式中,  $M$  为隧道运行事例中所有机动车污染物的总排放质量(g);  $c_{out i}$  为  $i$  隧道出口污染物的浓度 ( $g/m^3$ );  $c_{in j}$  为  $j$  隧道进口污染物的浓度 ( $g/m^3$ );  $V_{out i}$  为  $i$  隧道出口通风量 ( $m^3$ );  $V_{in j}$  为  $j$  隧道进口通风量 ( $m^3$ ).

本研究选取的隧道除隧道内设置的射流式风机可以加速隧道内的风速外,只有进口和出口 2 个通风口,没有其它新风进风口和排风口.因此,公式中  $i$  和  $j$  均为 1.

##### 3.1.2 平均排放因子计算方法

由质量平衡计算得到某选取事例中隧道机动车排放的污染物总质量  $M$  后,可以通过下面公式简单计算得到事例中所有机动车组成的车组的平均排放因子.

$$E = \frac{M}{N \times L}$$

式中,  $E$  为分析事例中机动车车组的平均排放

因子 [ $g/(km \cdot 辆)$ ];  $N$  为分析事例中通过隧道的机动车总数量 (辆);  $L$  为隧道内进出口两采样监测点之间的实际长度 (km).

平均排放因子反映不同采样时间内经过隧道的所有机动车的污染物排放水平,它可以基本代表某种平均机动车行驶速度、机动车类型组合、车龄分布和行驶里程分布情况下的综合排放因子.如果选取的隧道内行驶的机动车反映了本地区和城市的机动车和交通的实际状况,那么计算得到的平均排放因子也能够代表该地区的机动车排放因子.

#### 3.1.3 应用多元回归分析法计算各类车的综合排放因子

将试验按每小时监测时段作为 1 个事例分析,由于各事例的隧道平均排放因子和各类机动车所占百分比并不相同,而各类机动车综合排放因子为相对稳定值,因此可以应用多元回归分析方法得到各类机动车的综合排放因子.如果知道各种机动车的车龄和行驶里程等数据,那么还可以计算出各类机动车不同车龄和行驶里程的排放因子.本文根据隧道实测结果和广州市机动车实际情况,将机动车分为小客车、出租车、小货车、大客车、大货车、公交车、重型车和摩托车 8 大类,进行下述多元回归分析,多元回归的方程如下:

$$E_j = \sum_i^8 \text{Frac}_i \times m_i + b$$

式中,  $E_j$  为事例  $j$  的隧道平均排放因子 [ $g/(km \cdot 辆)$ ];  $m_i$  为事例中隧道内  $i$  类机动车所占百分比 (%);  $\text{Frac}_i$  为第  $i$  类机动车的综合排放因子 [ $g/(km \cdot 辆)$ ];  $b$  为多元回归方程的常数项.

解此方程即可求解出第  $i$  类机动车的综合排放因子即方程的回归系数  $\text{Frac}_i$ ,同时还可以得到回归方程常数项  $b$ .据分析可知,常数项  $b$  一般不为 0,因为①隧道试验测试会受到许多因素干扰,影响隧道内污染物质量平衡的计算;②尽管从整体来说,各类机动车具有相对稳定的综合排放因子,但是车群组成对它也会有影响,导致机动车综合排放因子并不为唯一的恒值.另外,判定系数  $r^2$  是反映回归分析结果与

变量间关系程度的标志,它跟残差平方和与总平方和的比值成反比例.每一点的  $y$  值的估计值和实际值的平方差之和称为残差平方和,而  $y$  的实际值和平均值的平方差之和称为总平方和.因此一般多元回归分析要求给出  $r^2$  值.

### 3.2 排放因子计算结果

#### 3.2.1 平均排放因子

根据上述监测结果分析,为减少不利于排放因子计算的特殊监测时段影响,选取 1999-06-30 7:00~17:00 时间段共 10h 进行事例分析,按前面介绍的方法和公式计算各事例的平

均排放因子,计算结果参见表 3.  $\text{NO}_x$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{PM}_{10}$  和  $\text{HC}$  的单车平均排放因子分别为 1.379、15.404、0.142、0.637、1.857  $\text{g}/(\text{km} \cdot \text{辆})$ . 从表 3 的计算结果可以看出,隧道内不同运行时段的机动车平均排放因子并不是一个恒定的系数,而是随着机动车车群组成、交通特征和状况发生变化.平均排放因子只能大致反映机动车排放状况,具体的情况需要对平均排放因子包含的信息进行进一步的提取和分析.标准偏差越大,表明所选取的数据组越有利于下面进行各类机动车排放因子的回归计算.

表 3 城市隧道机动车排放污染物平均排放因子统计结果/ $\text{g} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$

统计量	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	TCH	PM <sub>10</sub>
范围	6.03~21.16	0.06~0.20	0.52~1.87	0.39~6.11	0.19~1.36
平均值	15.40	0.140	1.38	1.86	0.64
标准偏差	6.63	0.05	0.48	1.76	0.36
统计样品数(组)	120	120	120	10	10

#### 3.2.2 各类机动车的排放因子

根据前面介绍的方法,对选取的全部 10 个小时事例进行多元回归分析,得到各类机动车综合排放因子,表 4 列出了计算结果与相应的判定系数  $r^2$  值.由表 4 可见,重型车的污染物排放因子大大高于其它车型的排放水平,公交车和大货车次之,其次是小货车、出租车和小客车.摩托车数量占了 32% 的比例,但是除 THC 排放因子与小型车排放水平相近外,其它污染物排放因子并不高.另外,所有机动车的  $\text{SO}_2$  排放因子较为稳定,为 0.1~0.33 之间,这反映机动车的  $\text{SO}_2$  排放特别低,而且主要与燃料的质量相关.

多元回归对  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$  排放因子计算结果有很好的相关性,对  $\text{CO}$  排放因子有较好的相关性,但是对总碳氢(THC)和颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )的计算结果相关性较差.可能的原因有:① THC 和  $\text{PM}_{10}$  不是连续自动监测,采样时间长,特别是  $\text{PM}_{10}$  需要约 2h 才有 1 个数据.故计算平均排放因子较好,而计算各类机动车综合排放因子较差.② THC 和  $\text{PM}_{10}$  的排放过程比较复杂,与  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$  不完全相同. $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$  的排放只与机动车数量、类型和工况有关,而 THC 和  $\text{PM}_{10}$  还有其它影响因素,如燃料蒸发、地面扬尘等.

### 3.3 与国内外机动车排放因子的比较

表 4 隧道各类机动车的综合排放因子/ $\text{g} \cdot (\text{km} \cdot \text{辆})^{-1}$

机动车污染物	判定系数( $r^2$ )	出租车	小货车	大货车	小客车	大客车	公交车	重型车	摩托车
NO <sub>x</sub>	0.89	2.00	2.60	4.27	0.42	1.56	2.54	3.36	0.30
CO	0.56	16.64	13.20	25.75	12.51	23.39	15.41	191.00	2.82
SO <sub>2</sub>	0.93	0.10	0.32	0.33	0.09	0.10	0.22	0.13	0.03
THC	0.47	0.54	3.19	6.02	4.70	6.17	11.20	23.00	2.47
PM <sub>10</sub>	0.44	2.40	2.44	4.67	0.72	2.24	2.94	13.46	1.55

目前为止,隧道试验测试各类机动车综合排放因子的文献较少,故对本文的研究结果只能作初步比较.由表 4 和表 5 可见,中国城市机

动车的污染物排放因子明显高出欧洲和美国等发达国家机动车排放水平.由于城市道路的机动车行驶工况不同于高速公路,特别是车速相

差大,因此城市道路机动车的 HC、CO 排放因子要高于高速公路机动车,而 NO<sub>x</sub> 排放因子却低于高速公路机动车的排放水平.重型车的污染物排放因子要高出轻型车许多.另外,广州市

道路工况下的轻型车台架测试结果与本次隧道试验的研究结果具有可比性,这表明利用典型城市隧道试验测试机动车排放因子是一种有效可行的方法.

表 5 国内外机动车排放因子<sup>1)</sup>/g°(km°辆)<sup>-1</sup>

数据来源	车型	单车排放因子			道路工况
		CO	HC	NO <sub>x</sub>	
Gubrist Tunnel	轻型车	4.087	0.432	1.137	高速道路隧道
	重型车	4.173	0.213	15.017	
Van Nuys(1987)	混合交通(轻型车为主)	13.049	1.678	0.988	城市道路隧道
Van Nuys(1995)	混合交通(轻型车为主)	8.373	0.646	0.777	城市道路隧道
Fort McHenry(1992)	轻型车	3.780	0.38	0.503	高速公路隧道
	重型车	6.11	0.96	8.94	
Tuscarora(1992)	轻型车	3.045	0.180	0.242	高速公路隧道
	重型车	3.75	0.42	11.86	
西安北路隧道	混合交通	33.279	3.577	4.605	城市道路隧道
七道梁隧道	混合交通	41.861	5.367	3.883	高海拔山岭隧道
广州台架试验	小轿车	12.30	1.03	1.13	广州市工况测试
	面包车	6.78	0.78	1.00	

1) 台架试验为 45km/h; 其它隧道试验在 40~50km/h 之间.

#### 4 小结

(1)隧道内不同时间段的机动车平均排放因子不是一恒定系数,而是随机动车车群组成、交通特征和状况发生变化.城市机动车 NO<sub>x</sub>、CO、SO<sub>2</sub>、PM<sub>10</sub> 和 HC 的平均排放因子分别为 1.379、15.404、0.142、0.637、1.857 g°(km°辆)<sup>-1</sup>.

(2)选取合适的城市隧道进行测试,并应用多元回归分析可以得到城市各类机动车综合排放因子.目前中国城市机动车的排放水平表现为重型车的污染物排放因子大大高于其它车型的排放水平,公交车和大货车次之,其次是小货车、出租车和小客车.摩托车除 THC 排放因子与小型车排放水平相近外,其它污染物排放因子并不高.而 SO<sub>2</sub> 排放因子变化幅度比较小,主要与燃料的质量相关,变化范围在 0.1~

0.33 之间.

(3)国内外研究结果分析表明,中国城市机动车排放因子明显高出欧洲和美国等发达国家机动车排放水平.城市高于高速公路机动车 HC、CO 排放因子,但 NO<sub>x</sub> 排放因子却偏低.

参考文献:

- 1 覃有钧,陈鲁言.汽车尾气污染.广州:中山大学出版社,1995.20~22.
- 2 邓顺熙,董小林.我国山岭汽车 CO、HCs 和 NO<sub>x</sub> 排放系数.环境科学,2000,21(1):109~112.
- 3 L Y Chan, Limin Zeng, Y Qin, S C Lee. CO Concentration Inside The Cross Harbor Tunnel In Hong Kong. Environmental International, 1996, 22(4): 405~409.
- 4 Johannes Staehelin et al. Modelling Emission Factors of Road Traffic From A Tunnel Study. Environmetrics, 1997, 8: 219~239.
- 5 Johannes Staehelin et al. Emission Factors From Road Traffic From A Tunnel Study (Gubrist Tunnel, Switzerland). Atmospheric Environment, 1998, 32(6), 999~1009.