

# 机动车排放因子的隧道测试 ——以西安市为例

田鹏山<sup>1,2</sup>, 曹军骥<sup>1</sup>, 韩永明<sup>1</sup>, 张宁宁<sup>1</sup>, 周雅清<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院地球环境研究所气溶胶化学与物理重点实验室, 西安 710061
2. 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为深入了解西安市机动车污染物的排放特征, 选取代表性城区隧道进行机动车污染物排放浓度及排放因子的测试实验, 获得了隧道入口和出口的PM<sub>2.5</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、HC和VOCs等污染物的质量浓度, 并结合气象数据和交通参数, 计算了各污染物平均排放因子。结果表明: PM<sub>2.5</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、HC和VOCs的平均排放因子分别为(0.016±0.005)、(1.097±0.398)、(0.159±0.092)、(0.179±0.089)、(0.317±0.172) g/(km·辆)。不同时段的排放因子存在一定差异, 并且PM<sub>2.5</sub>的排放因子显著小于气态污染物。此外, 本次实验测得的排放因子小于国内先前多数研究结果, 这可能与燃料品质、发动机效率、尾气排放控制技术和城市管理水平的提高有关。

**关键词** 隧道实验; 机动车污染物排放; 排放因子

**中图分类号** X51

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.06.009

## A tunnel test for emission factors of motor vehicles in Xi'an

TIAN Pengshan<sup>1,2</sup>, CAO Junji<sup>1</sup>, HAN Yongming<sup>1</sup>, ZHANG Ningning<sup>1</sup>, ZHOU Yaqing<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Aerosol Chemistry and Physics, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** In order to study the characteristics of major pollutants emitted by motor vehicles, a tunnel test was carried out in a representative tunnel in downtown Xi'an. Through continuous online monitoring at both entrance and exit of the tunnel, meteorological data, traffic parameters and mass concentration data of PM<sub>2.5</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC and VOCs were obtained. By calculating the emission factors of motor vehicles, it was found that the average emission factors of PM<sub>2.5</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, HC and VOCs were (0.016±0.005), (1.097±0.398), (0.159±0.092), (0.179±0.089) and (0.317±0.172) g/(km·veh), respectively. The emission factors varied with time during the day, and the emission factors of PM<sub>2.5</sub> were obviously smaller than gaseous pollutants. In addition, the emission factors declined dramatically as compared to the previous study in China, which might owe to the improvement of fuel quality, engine efficiency, exhaust control technology and urban management.

**Keywords** tunnel test; pollutants emitted by motor vehicles; emission factors

随着机动车保有量的持续增长, 机动车排放的污染物已成为城市大气污染的重要来源之一<sup>[1-5]</sup>。研究表明, 机动车尾气排放的气态和颗粒态污染物对人体的呼吸系统、心血管系统、神经系统等均会造成较大伤害<sup>[6-8]</sup>。因此, 了解机动车污染物排放特征, 定量测定机动车排放因子有着十分重要的

意义。

目前, 机动车污染物排放的研究方法主要有4种, 即隧道测试法、台架模拟法、遥感监测法和车载测试法, 其中前两种方法更为成熟, 应用也更为普遍。与台架模拟法相比, 隧道测试法可以更真实地反映机动车的道路行驶情况, 其包含了

收稿日期: 2014-12-23; 修回日期: 2015-01-22

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41473119); 科学技术部科技基础性工作专项(Y31Z021018); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05100402)

作者简介: 田鹏山, 硕士研究生, 研究方向为大气颗粒物污染化学, 电子信箱: tianps@ieecas.cn; 曹军骥(通信作者), 研究员, 研究方向为气溶胶与环境、PM<sub>2.5</sub>研究与控制等, 电子信箱: cao@loess.llqg.ac.cn

引用格式: 田鹏山, 曹军骥, 韩永明, 等. 机动车排放因子的隧道测试——以西安市为例[J]. 科技导报, 2015, 33(6): 59-63.

当地机动车构成、交通状况和气象条件的影响,可以获得更加可靠的排放因子<sup>[9-11]</sup>。中国关于机动车隧道测试实验的研究多开展于20世纪90年代中后期至21世纪初期<sup>[12-21]</sup>,不同研究者在不同地区测得了相应机动车污染物的排放数据,这些研究为当时认识机动车污染物的排放特征提供了重要理论依据。然而随着燃料品质、发动机效率、尾气处理和机动车管理水平的提升,机动车排放因子会发生什么样的变化,目前还没有系统的研究。因此有必要针对当前机动车污染物排放状况进行相关研究,重新认识机动车污染物的排放特征,为当前中国大气污染防治提供数据支持和理论依据。

西安市作为中国西北地区的中心城市,随着经济的快速发展,机动车数量迅速增长,保有量已超过160万辆<sup>[22]</sup>。庞大的机动车数量使得机动车尾气排放成为大气污染的重要来源之一,因此深入研究机动车污染物的排放特征对西安市的大气污染防治有着重要意义。本研究选取西安市城区代表

性的隧道进行相关实验,获取机动车PM<sub>2.5</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、HC和VOCs的质量浓度排放水平和平均排放因子,以期认识城区机动车污染物的排放特征和今后开展机动车污染物排放清单研究提供科学依据。

## 1 实验方法

### 1.1 采样地点和采样时间

采样点位于西安市文昌门一和平门隧道。该隧道位于西安市环城南路,为下穿型隧道,长915 m,隧道内双向4车道,两个方向之间隔离不通风。隧道进出口附近均有风机通风,在采样期间,为保持自然状态,风机均关闭。采样时,选择其中一个方向的车道,在入口和出口附近各设置一个采样点,分别标记为1号和2号,采样高度1.5 m。具体采样位置如图1所示。

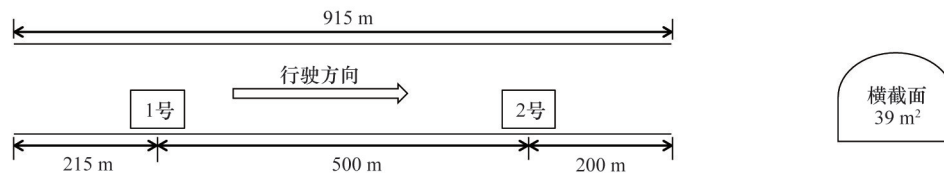


图1 文昌门-和平门隧道结构及采样点示意

Fig. 1 Structure and sampling sites of Wenchangmen-Hepingmen tunnel

采样时间为2014年7月18日至7月28日,共11天,包含7个工作日和4个非工作日(19日、20日、26日和27日)。每天分4个时段进行采样,即07:00~10:00(早晨),13:00~16:00(下午),17:00~20:00(傍晚),22:00~次日01:00(夜间)。

### 1.2 采样仪器和采样方法

在1号和2号采样点同时进行采样。采用Q-Trak和V-Trak 7575型便携式仪器(美国TSI公司)在线监测隧道内的温度、相对湿度、气压和风速。两点各架设一台摄像头,通过影像记载,统计观测时间段内的车辆信息,包括机动车类型、数量和车速。采用E-BAM颗粒物分析仪(美国Met One公司)对PM<sub>2.5</sub>进行在线监测,该仪器利用β射线衰减法,可以实现PM<sub>2.5</sub>的连续监测。采用EC 9830型一氧化碳分析仪(澳大利亚Ecotech公司)对CO进行在线监测,该仪器利用非色散红外气体过滤相关光度测定法,精确稳定地测定CO的实时浓度。采用EC9841B型氮氧化物分析仪(澳大利亚Ecotech公司)对NO<sub>x</sub>进行在线监测,该仪器利用化学发光法,可精确测量空气中的NO<sub>x</sub>。采用55i甲烷-非甲烷碳氢化合物分析仪(美国Thermo公司)对甲烷和非甲烷HC进行在线监测。分析过程中,甲烷分子先从色谱柱上解析出来,并被载气带回检测器中由火焰离子化检测器(FID)测量,随后非甲烷HC被反吹到检测器中并被FID检测。采用ppbRAE 3000型挥发性有机物分析仪(美国RAE公司)对VOCs进行实时在线监测,与55i甲烷-非甲烷碳氢化合物分析仪不同的是,该仪器利用光离子化检测器(PID)快速地测定出VOCs的含量。HC和

VOCs在某些组分上存在交叉,但本次测量选用的仪器分别关注总的HC和VOCs,因此HC和VOCs可以作为测量参数单独使用。采样期间同步获得气象参数、交通特征以及PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、HC和VOCs浓度。

## 2 监测结果分析

### 2.1 气象参数

采样期间利用Q-Trak和V-Trak记录每天隧道内温度、相对湿度、气压和风速的变化,将每天各采样时间段的气象参数分别做平均值,进而统计出各气象参数的变化范围,结果见表1。除7月22日夜间有降雨,温度略低,湿度较大外,其余时间隧道温度基本在30~40℃,相对湿度基本在30%~50%,气压变化很小,基本在96 kPa左右,风速基本在2~3 m/s。由此可知,隧道内环境相对稳定,有利于污染物的监测与采集。

表1 观测期间主要气象参数统计

Table 1 Major meteorological parameters during the test

时间段	温度/℃	相对湿度/%	气压/kPa	风速/(m·s <sup>-1</sup> )
早晨	29.0~35.9	39.7~54.8	96.0~96.8	2.50~3.09
下午	30.5~39.2	33.3~53.9	95.8~96.6	2.24~3.00
傍晚	31.5~40.0	25.7~46.0	95.5~96.5	2.06~2.98
夜间	29.0~35.9	38.2~83.4	95.7~96.6	2.27~2.80

## 2.2 交通特征

表2为观测时间段内隧道的车辆统计信息。可以看出,通过隧道的车辆主要以小客车为主,其次为出租车,二者每日所占比例在95%以上。由于西安市在07:00~22:00禁止货车进入二环以内,所以货车数量很少。另外,工作日的小客车和总车辆数均高于非工作日,而非工作日的出租车数量更高。由车速统计可以看出,观测期间平均车速一般在40~60 km/h,由于工作日车流量更多,车速低于非工作日。各时间段车流量统计(图2)显示,机动车日内高峰一般出现在晚上,即晚高峰期;低谷均出现在夜间。工作日早晨、下午和傍晚的机动车数量一般高于非工作日,而夜间差别不大。

表2 观测期间隧道车辆统计信息  
Table 2 Vehicle statistics during the test

日期	车流量/辆						车速/ (km·h <sup>-1</sup> )
	小客车	出租 车	中大型 客车	货车	其他	合计	
2014-07-18	13326	2115	358	85	131	16015	39.67
2014-07-19	11312	2204	260	111	110	13997	59.34
2014-07-20	10035	2165	218	106	112	12636	62.86
2014-07-21	11136	1750	319	86	116	13407	57.40
2014-07-22	12468	1453	325	59	43	14348	55.43
2014-07-23	12762	1711	351	101	68	14993	52.38
2014-07-24	12714	1746	380	68	40	14948	48.91
2014-07-25	12982	1756	360	125	55	15278	46.77
2014-07-26	11124	2503	448	90	39	14204	58.21
2014-07-27	9766	2176	388	115	26	12471	64.81
2014-07-28	12402	2022	583	105	19	15131	46.79
工作日平均	12541	1793	382	90	67	14874	49.62
非工作日平均	10559	2262	329	106	72	13327	61.31

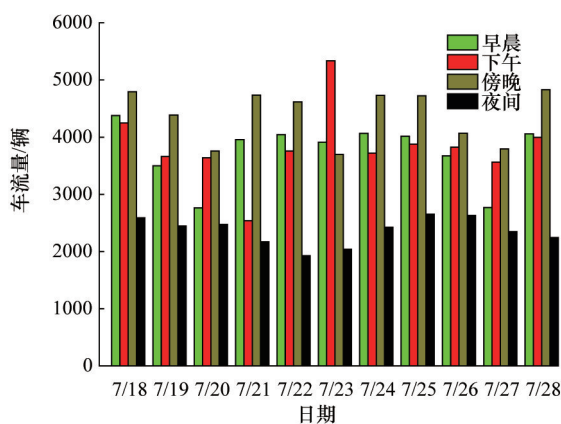


图2 分时段车流量统计

Fig. 2 Traffic flow statistics in different dayparts

## 2.3 污染物浓度变化

表3为本次观测期间隧道内机动车污染物的统计信息。可以看出,隧道内PM<sub>2.5</sub>的平均质量浓度略高于中国《GB

3095—2012环境空气质量标准》二级限值(0.075 mg/m<sup>3</sup>),CO的平均质量浓度小于相应限值(4 mg/m<sup>3</sup>),而NO<sub>x</sub>则远高于相应限值(0.1 mg/m<sup>3</sup>)。对于监测的5种污染物,2号点的平均浓度均高于1号点,说明机动车排放的污染物在隧道内有一定的累积,符合机动车隧道观测实验的预期效果。其中,PM<sub>2.5</sub>、HC的增长幅度不大;而CO、NO<sub>x</sub>和VOCs的增长幅度较大,其2号点的平均浓度分别约是1号点的2.0倍、1.5倍和1.7倍。

表3 观测期间机动车污染物质量浓度统计

Table 3 Mass concentrations of vehicle pollutants during the test

污染物	采样点	样品 数/个	浓度范围/ (mg·m <sup>-3</sup> )	浓度平均值/ (mg·m <sup>-3</sup> )
PM <sub>2.5</sub>	1号	1061	0.010~0.220	0.084±0.053
	2号	1612	0.010~0.241	0.096±0.047
CO	1号	2667	0.008~11.463	1.804±1.054
	2号	2667	0.101~26.724	3.588±2.357
NO <sub>x</sub>	1号	2466	0.212~0.869	0.454±0.111
	2号	2466	0.388~1.131	0.691±0.130
HC	1号	188	3.391~5.399	4.815±0.277
	2号	188	4.638~6.322	5.107±0.309
VOCs	1号	252	0.044~4.526	1.262±0.043
	2号	253	0.011~46.859	2.138±0.011

## 3 机动车污染物排放因子计算

### 3.1 计算方法

质量平衡模型是计算隧道内机动车排放因子的一种有效方法。基于质量守恒原理,将隧道看作一个理想的柱状活塞,活塞两个断面间的污染物质量之差为机动车在两断面之间排放的污染物总质量,再结合机动车数量及隧道参数,即可求得机动车平均排放因子,其计算公式<sup>[13]</sup>为

$$EF = (C_2V_2 - C_1V_1) / (N \cdot L) \quad (1)$$

式中,EF为采样时间段内混合机动车的平均排放因子,g/(km·辆);N为采样时间段内通过隧道的机动车总量,辆;L为隧道内两个采样点之间的距离,km;C<sub>1</sub>,C<sub>2</sub>为隧道入口和出口采样点处污染物的浓度,g/m<sup>3</sup>;V<sub>1</sub>,V<sub>2</sub>为隧道入口和出口采样点处的通风量,m<sup>3</sup>,由隧道横截面积、平均风速和采样时间相乘得出。

平均排放因子反映了采样时间段内经过隧道的所有机动车排放污染物的平均水平,它可以基本代表某种平均机动车行驶速度、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。

### 3.2 平均排放因子

根据监测结果,选取其中的有效数据利用式(1)计算各污染物不同时段的排放因子,计算结果如表4所示。

表4中,CO的平均排放因子最大,平均值为(1.097±0.398) g/(km·辆),PM<sub>2.5</sub>的平均排放因子最小,平均值为(0.016±0.005) g/(km·辆),其他气态污染物的排放因子处于二者之间,表明本次观测期间,机动车排放的气态污染物比颗粒物具有更高的排放因子。这提示政府和企业和管理和控制机动车尾气排放时,更应该注重气态污染物的减排。

此外,对比不同时段机动车各污染物的排放因子发现,

机动车排放因子在各个时段高低不同。值得注意的是,虽然晚高峰时段车流量最大,但除了CO在该时段的排放因子最大外,其他污染物的排放因子最大值均出现在夜间,与车流量变化不一致。通过查阅采样期间的通过车型,发现夜间隧道内通过的大型车辆,特别是大货车和拉土车明显增多,这些大型车辆主要以柴油为燃料,与小型车辆相比,其CO的排放因子并不是很高,而颗粒物和NO<sub>x</sub>等则明显高于小型车辆<sup>[23]</sup>。

表4 机动车污染物分时段排放因子

Table 4 Vehicle emission factors of different dayparts

(g·km<sup>-1</sup>·辆<sup>-1</sup>)

污染物	早晨	下午	傍晚	夜间	平均
PM <sub>2.5</sub>	0.014±0.004	0.016±0.004	0.015±0.003	0.018±0.010	0.016±0.005
CO	1.042±0.152	1.041±0.472	1.260±0.678	1.043±0.197	1.097±0.398
NO <sub>x</sub>	0.122±0.078	0.143±0.070	0.137±0.067	0.236±0.115	0.159±0.092
HC	0.213±0.145	0.135±0.030	0.153±0.066	0.224±0.101	0.179±0.089
VOCs	0.365±0.092	0.199±0.050	0.265±0.077	0.607±0.184	0.317±0.172

### 3.3 排放因子对比

表5总结了国内不同地区隧道机动车排放因子的研究结果。与国内其他地区的研究结果对比发现,各污染物的平均排放因子与香港城门隧道和台北隧道处于一个数量级<sup>[16,20]</sup>;而与内地一些城市的研究结果相比,各污染物的排放因子均小了一个数量级左右,如本研究中CO、NO<sub>x</sub>和HC的排放因子分别为1.097、0.159、0.179 g/(km·辆),而广州珠江隧道2001年对应污染物的排放因子则分别为15.40、1.38、1.86 g/(km·辆)<sup>[13]</sup>,1996年同在西安的研究结果更高,其对应污染物的排放因子分别为33.279、4.605、3.577 g/(km·辆)<sup>[12]</sup>。这种较大的差异

可能与研究开展的时间有关,先前的研究多为10年前甚至将近20年前开展的,当时在燃料品质、发动机效率、尾气排放控制技术以及城市对机动车的管理等方面均与现在有很大差距,因此当时的机动车排放因子均较高。随着社会经济和科学技术的进步,现在机动车排放因子明显下降。这也提示,在降低机动车污染物排放的过程中,仍需继续从燃料品质、发动机效率、尾气处理和机动车管理上着手,推广更高品质的燃料,严格监管不合格车辆,加大发动机和尾气处理的技术投入,采取有效措施提升交通状况,从而将机动车污染物的排放降到最低。

表5 不同隧道研究机动车污染物排放因子

Table 5 Vehicle emission factors of different tunnel tests

(g·km<sup>-1</sup>·辆<sup>-1</sup>)

隧道	测试年	车型	PM <sub>2.5</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	HC	VOCs
西安文昌门一和平门隧道(本研究)	2014	混合	0.016	1.097	0.159	0.179	0.317
深圳隧道 <sup>[21]</sup>	2010	混合	0.064	—	—	—	—
厦门仙岳山隧道 <sup>[18]</sup>	2005	轿车	—	14.2	2.21	0.67	—
		出租车	—	19.7	4.15	0.96	—
广州珠江隧道 <sup>[17]</sup>	2004	混合	—	—	—	—	0.52
		轻型车	—	—	—	—	0.32
香港城门隧道 <sup>[20]</sup>	2003	重型车	—	—	—	—	0.26
		混合	—	1.90	—	—	0.115
广州珠江隧道 <sup>[13]</sup>	2001	混合	—	15.40	1.38	1.86	—
		小客车	—	12.51	0.42	4.70	—
台北隧道 <sup>[16]</sup>	2000	出租车	—	16.64	2.00	0.54	—
		混合	—	3.64	0.90	0.44	0.24
北京潭裕沟隧道 <sup>[14]</sup>	1997	混合	—	23.467	1.290	—	—
北京潭裕沟隧道 <sup>[15]</sup>	1997	混合	—	—	—	—	6.817
西安环城北线隧道 <sup>[12]</sup>	1996	混合	—	33.279	4.605	3.577	—

#### 4 结论

1) 西安市城区机动车 PM<sub>2.5</sub>、CO、NO<sub>x</sub>、HC 和 VOCs 的平均排放因子分别为 (0.016±0.005)、(1.097±0.398)、(0.159±0.092)、(0.179±0.089)、(0.317±0.172) g/(km·辆)。

2) 不同时段排放因子并不恒定,除了 CO 的最大值出现在晚上外,其他污染物的最大值均出现在夜间。对比 PM<sub>2.5</sub> 和各气态污染物的排放因子可知,机动车细颗粒物的排放因子显著小于气态污染物。

3) 与先前国内的研究相比,本研究测得的机动车排放因子明显较小,表明燃料品质、发动机效率、尾气处理技术及机动车管理方面的进步对机动车尾气排放的治理有明显帮助。

**致谢:** 在实验过程中得到中国科学院地球环境研究所隧道观测小组、西安市环境保护科学研究院的大力支持。

#### 参考文献(References)

- [1] Song Y, Zhang Y H, Xie S D, et al. Source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in Beijing by positivematrix factorization[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(8): 1526-1537.
- [2] 宋翔宇, 谢邵东. 中国机动车排放清单的建立[J]. 环境科学, 2006, 27(6): 1041-1045.  
Song Xiangyu, Xie Shaodong. Development of vehicular emission inventory in China[J]. Environmental Science, 2006, 27(6): 1041-1045.
- [3] Liu Y, Shao M, Lu S H, et al. Source apportionment of ambient volatile organic compounds in the Pearl River Delta, China: Part II[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(25): 6261-6274.
- [4] 叶文波. 宁波市大气可吸入颗粒物 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的源解析研究[J]. 环境污染与防治, 2011, 33(9): 66-69.  
Ye Wenbo. Study on source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> in ambient air of Ningbo[J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(9): 66-69.
- [5] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区 PM<sub>2.5</sub> 季节污染特征及来源解析[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 2947-2952.  
Zhang Zhisheng, Tao Jun, Xie Shaodong, et al. Seasonal variations and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> at urban area of Chengdu[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(11): 2947-2952.
- [6] Ye S H, Zhou W, Song J, et al. Toxicity and health effects of vehicle emissions in Shanghai[J]. Atmospheric Environment, 2000, 34(3): 419-429.
- [7] McDonald J D, Eide I, Seagrave J C, et al. Relationship between composition and toxicity of motor vehicle emission samples[J]. Environmental Health Perspectives, 2004, 112(15): 1527-1538.
- [8] Cao J J, Xu H M, Xu Q, et al. Fine particulate matter constituents and cardiopulmonary mortality in a heavily-polluted Chinese city[J]. Environmental Health Perspectives, 2012, 120(3): 373-378.
- [9] El-Fadel M, Hashisho Z. Vehicular emissions and air quality assessment in roadway tunnels: The Salim Slam tunnel[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2000, 5(5): 355-372.
- [10] El-Fadel M, Hashisho Z. Vehicular emissions in roadway tunnels: A critical review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2001, 31(2): 125-174.
- [11] 曹军骥. PM<sub>2.5</sub> 与环境[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 216-218.
- [12] 邓顺熙, 陈洁, 李百川. 中国城市道路机动车 CO、HC 和 NO<sub>x</sub> 排放因子的测定[J]. 中国环境科学, 2000, 20(1): 82-85.  
Deng Shunxi, Chen Jie, Li Baichuan. Emission factors of CO, HC and NO<sub>x</sub> from motor vehicles on urban main road in China[J]. China Environmental Science, 2000, 20(1): 82-85.
- [13] 王伯光, 张远航, 祝昌健, 等. 城市机动车排放因子隧道试验研究[J]. 环境科学, 2001, 22(2): 55-59.  
Wang Boguang, Zhang Yuanhang, Zhu Changjian, et al. A study on city motor vehicle emission factors by tunnel test[J]. Environmental Science, 2001, 22(2): 55-59.
- [14] 王玮, 叶慧海, 李玉华, 等. 谭裕沟隧道 CO、SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 排放因子研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(4): 5-8.  
Wang Wei, Ye Huihai, Li Yuhua, et al. Study on emission factors of CO, SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> in Tanyugou highway tunnel[J]. Research of Environmental Sciences, 2001, 14(4): 5-8.
- [15] 王玮, 梁宝生, 曾凡刚, 等. 谭裕沟隧道 VOCs 污染特征和排放因子研究[J]. 环境科学研究, 2001, 14(4): 9-12.  
Wang Wei, Liang Baosheng, Zeng Fangang, et al. Study on pollution characteristics and emission factors of volatile organic compounds (VOCs) in Tanyugou highway tunnel[J]. Research of Environmental Science, 2001, 14(4): 9-12.
- [16] Hwa M Y, Hsieh C C, Wu T C, et al. Real-world vehicle emissions and VOCs profile in the Taipei tunnel located at Taiwan Taipei area [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(12): 1993-2002.
- [17] 付琳琳, 邵敏, 刘源, 等. 机动车 VOCs 排放特征和排放因子的隧道测试研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(7): 879-885.  
Fu Linlin, Shao Min, Liu Yuan, et al. Tunnel experimental study on the emission factors of volatile organic compounds (VOCs) from vehicles[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(7): 879-885.
- [18] 王坚. 厦门市机动车排放因子研究[J]. 现代科学仪器, 2005(6): 61-64.  
Wang Jian. Research on the discharging factor of vehicles in Xiamen [J]. Modern Scientific Instruments, 2005(6): 61-64.
- [19] He L Y, Hu M, Huang X F, et al. Chemical characterization of fine particles from on-road vehicles in the Wutong tunnel in Shenzhen, China[J]. Chemosphere, 2006, 62(10): 1565-1573.
- [20] Ho K F, Lee S C, Ho W K, et al. Vehicular emission of volatile organic compounds (VOCs) from a tunnel study in Hong Kong[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, 9(19): 7491-7504.
- [21] 刘川, 黄晓锋, 兰紫娟, 等. 深圳市机动车 PM<sub>2.5</sub> 排放因子隧道测试研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(12): 150-153.  
Liu Chuan, Huang Xiaofeng, Lan Zijuan, et al. A tunnel test for PM<sub>2.5</sub> emission factors of motor vehicles in Shenzhen[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(12): 150-153.
- [22] 西安市统计局. 西安统计年鉴[J]. 北京: 中国统计出版社, 2013: 465.  
Xi'an Municipal Bureau of Statistics. Xi'an statistical yearbook[J]. Beijing: China Statistics Press, 2013: 465.
- [23] 廖瀚博, 余志, 周兵, 等. 广州市机动车尾气排放特征研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(1): 134-138.  
Liao Hanbo, Yu Zhi, Zhou Bing, et al. Characteristics of motor vehicle exhaust emission in Guangzhou[J]. Environmental Science & Technology, 2012, 35(1): 134-138.

(编辑 田恬)