

文章编号:1005-0523(2016)04-0130-07

基于隧道法的机动车 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子研究

吴 中¹, 侯新超¹, 徐辉¹, 张其龙², 殷永文²

(1.河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098; 2.淮安市交通运输局,江苏 淮安 223001)

摘要:选取典型城市隧道进行机动车排放因子测试,在南京市富贵山隧道进行监测,对隧道内的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、风速风向、交通量、车型、速度及气象条件进行采集分析、计数、分类、观察。建立守恒方程和多元线性回归求解 $\text{PM}_{2.5}$ 平均排放因子,分别得出出租车(天然气)、小汽车、公交车(天然气)、大客车(柴油)、大货车在 $35\sim 40\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $40\sim 45\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$, $45\sim 50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 范围内的平均排放因子;其中最大值为 $0.157\ 2\text{ g}\cdot(\text{km}\cdot\text{辆})^{-1}$,最小值为 $0.015\ 21\text{ g}\cdot(\text{km}\cdot\text{辆})^{-1}$,在相同速度范围内城市大货车的 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均排放因子明显高于其它,其次是大客车(柴油)、公交车(天然气)、小汽车、出租车(天然气)。

关键词: $\text{PM}_{2.5}$; 排放因子; 隧道实验

中图分类号: X513

文献标志码: A

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.04.020

$\text{PM}_{2.5}$ 对我国城市空气质量影响较大,在空气质量指数(air quality index, AQI)中占主要作用,我国大气污染已经从上世纪烟煤型污染演变为跨区域、复合型大气污染^[1]。超细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 对人体健康以及环境造成极大的危害^[2]。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^[3]。

从上世纪 70 年代起,先后出现了多种机动车尾气排放数据收集的试验方法,应用比较广泛的有机动车台架测试法,隧道测试法,感应检测法。通过机动车台架试验可以获得单台车的排放因子^[4],然而综合排放因子必须通过排放因子模式计算或现场测试获得^[5-6]。

而以往的隧道法存在着若干不足,其一是交通排放未能与通过隧道的交通流紧密结合,实验给出的交通流数据大多是长时间平均意义上的数据,成果分辨率相对较差;其二是隧道内外空气交换量的观测或研究较为薄弱,尤其是汽车引起的活塞风的影响考虑不足或者是比较粗糙;其三是因对流和活塞风的影响,隧道中排放物的浓度理论上呈现空间(沿隧道走向)非均匀分布的状况,这种分布需要在实验中观测,以提高实验数据的精度。以往方法存在的问题需要研究改进。而隧道内不同时段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^[7]。为此,通过富贵山隧道实验,在实测数据基础上得出南京市机动车不同车型、不同速度下的 $\text{PM}_{2.5}$ 综合排放因子,为交通运输企业的减排规划与工作提供理论依据和技术支撑。

1 实验方法

富贵山隧道位于南京市东北角紫金山余脉富贵山,全长 929.9 m,分为东、西两座隧道。东线隧道长 475 m,西线隧道长 454 m。两隧道由北往南中线间距 53~44 m。隧道北高南低,平面为直线,双车道路面宽 6.4 m,东、西线纵坡分别为 1.3%和 1.3%。隧道外线路北接岗子村路口,南入市区北安门路,是南京市政府规

收稿日期:2015-12-10

作者简介:吴中(1964—),教授,博士,研究方向为交通运输规划与管理、交通安全、交通污染。

划的城东干道重点项目。鉴于隧道北高南低,考虑到空气流动特性,选取东线隧道为实验隧道。

隧道实验的采样点在隧道出入口 10 m 处设置路测激光调查仪⑤、⑥,隧道入口处设置 PM_{2.5} 检测仪,在隧道设置①、②、③、④处分别设置 PM_{2.5} 检测仪,在距离入口 40 m、70 m 处分别设置点风速风向仪 1#、2#,在距离出口 15 m 处设置断面风速风向仪,设备纵断面布置图见图 1,其中车流方向由南向北。

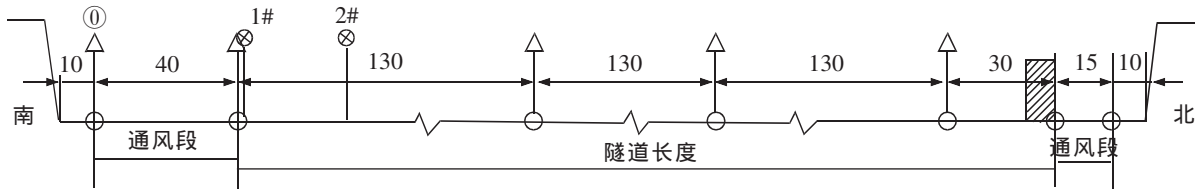


图1 仪器布置纵断面图(单位:m)

Fig.1 Instrument layout and vertical section

实验时间为 2015 年 6 月 20 日到 6 月 22 日,早上 6:00 到晚 22:30,交通量数据主要通过 Axlelight 便携式路测激光交通调查仪⑤、⑥,并结合交通量人工计数法,记录每 5 min 各种车辆的到达数,确定出实验时间内每 5 min 内的私家车、出租车(天然气)、公交车、大客车、大货车的交通量数据。①、②、③、④处采用微电脑激光粉尘仪测量每 5 min PM_{2.5} 浓度($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)。在隧道上游通风段结束位置设置 1# 号点风速风向仪,用以测量入口处风速风向,再距离 1# 号位置 30 m 处设置 2# 号点风速风向仪,测量隧道内风速风向,Kestrel Portable Vane Mount 4 500 点风速风向仪以 20 s 为时间间隔自动进行计数并保存。在隧道出口处设置 FLOWSIC 200 断面风速仪风向仪,测量隧道断面每 5 min 风速风向均值。

Axlelight 便携式路测激光交通调查仪安装在右侧路缘带,微电脑激光粉尘仪、点风速风向仪分别设置在机非分隔栏上,其中微电脑激光粉尘仪设置在距路面 1.5 m 处,点风速风向仪设置位置距路面 2.1 m,断面风速风向仪距离里面 3.6 m 处,横断面布置图如图 2 所示。

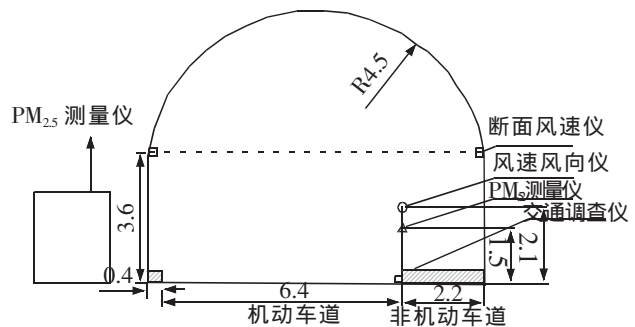


图2 仪器布置横断面图(单位:m)

Fig.2 Instrument layout cross section

2 观测数据处理

2.1 仪器布设方案说明

实验仪器布设方案见图 1 和图 2。隧道出入口大气相通,可以认为 0 号 PM_{2.5} 浓度计布设在南端入口处能够同时反映出隧道出入口处的浓度。隧道入口处有 40.0 m 长的通风过渡段,此段的 PM_{2.5} 微颗粒既可以随气流输运到隧道顶部与侧部通风口排出隧道,也可以随车辆活塞风进入隧道主干段,这种隧道构造形式使得隧道通风段气流能够多孔进出、微颗粒扩散流态流向复杂,不适于实验研究。设计入口通风段后的无通风孔隧道主干段起始处为实验设定入口,1 号 PM_{2.5} 浓度计布设在入口通风段后实验设定入口处,PM_{2.5} 浓度实验计算由 1 号传感器开始,1 号浓度值也成为计算区域上游边界的空气入流浓度。由于隧道主干段出口处 PM_{2.5} 浓度不仅受车辆排放、气流运动影响,还受到出口通风段浓度扩散作用影响。为避免计算域下游边界过分靠近出口,使 PM_{2.5} 细颗粒向低浓度方向扩散造成的边界处 PM_{2.5} 浓度下降,隧道最下游的 4 号浓度计布设在出口通风段上游前 30.0 m 处更为适宜。

根据空气动力学理论,当流体气流速度小于 0.3 马赫时,流体压缩性可以忽略不计^[8]。隧道中空气流动为小于 $10.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的低速流动,隧道中空气流为连续不可压缩气流。将断面风速仪布设在隧道主干段出口上游处,可以不受出口通风段多孔复杂气流流态影响,真实地测得通过整个隧道主干段的流动空气的气流量。

由于低速空气的不可压缩性,从隧道主干段流出的气流量必定是隧道主干段入口的流入量,从而可以准确计算随空气流出所带走的 $PM_{2.5}$ 总量。

2.2 隧道气流观测

隧道内 1#、2# 点风速风向仪以 20 s 为间隔记录着隧道内的风速风向,通过分析 1# 点风速范围为 $3.8 \sim 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均风速为 $1.702 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,2# 点处的风速范围为 $3.5 \sim 0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均风速为 $1.560 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,如表 1 所示。

表 1 点风速风向仪数据
Tab.1 Point wind speed and direction data $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

测试 点位	风速 WS		横向风速 HW		轴向风速 CW	
	风速范围	平均风速	风速范围	平均风速	风速范围	平均风速
1#	3.8~0	1.702	3.7~-2	1.325	3.3~0	0.793
2#	3.5~0	1.560	3.5~-1.9	1.046	3.1~0	0.866

通过分析轴向风速 HW 和横向风速 CW 轴向风速都大于 0、平均风速为 $0.829 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,横向风速的范围在 $3.7 \sim -2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、平均风速为 $1.185 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

这表明由于车辆的活塞运动,车头与车尾对横向气流有不同影响。当车头通过风速仪时,因车头车体的排开空气的作用,横向风向车道外侧为正;当车尾前进通过风速仪,车后形成空气低压区,横向风反向向车道中为负。但车头截面对空气的活塞推动作用以及车身因空气粘性对空气的拖曳作用始终使隧道中的风向由入口指向出口。实测 1#、2# 风速仪也反映出隧道中沿程各处的主要气流特性。此外,三天连续的隧道出口端通风段上游处的断面流速仪监测值呈现出某种统计周期性的特性(如图 3)。风速低谷段为车流量较少的夜间,风速峰值段为车流量较多的白天。上下午交通高峰期间风速虽有增大,但并不明显,这反映出隧道风速不仅与车流量有关,还与车速有关。实测数据表明无论白天黑夜,风向几乎全部是非负值,表明在隧道出口处在观测时间段上全部是气流流出,没有空气倒灌现象;点风速仪监测数据也表明隧道主干段入口处没有逆车流方向的空气回流(通风段在此方面也起到部分作用),全部是由通风段进入的气流。隧道主干段进出口风向一致,并且完全与行车方向相同。现场观测结论表明,经隧道出入口通风段的气流调节,并考虑到实际隧道两端距离短、高程一致,大气压强大致相等,隧道外一般强度的气流流动不会

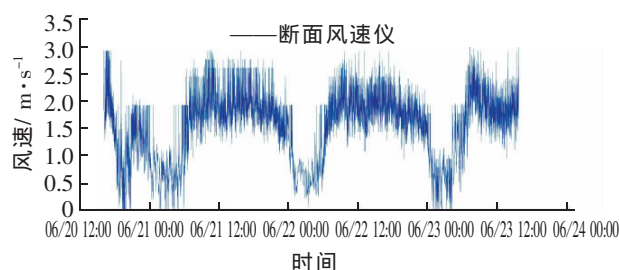


图 3 6月20日16:00~6月23日15:00断面风速图
Fig.3 Cross section wind velocities from 16:00, June 20 to 15:00, June 23

影响到隧道主干段内以活塞风为主的空气流向。实验时间段隧道空气流动状况的全程监测为汽车 $PM_{2.5}$ 排放研究提供了关键基础数据,实测风向的不变也决定了本项实验的守恒方程(2)式右端第二项恒取负号。

2.3 隧道交通流量与车速观测

富贵山隧道有 6 路、17 路、36 路、115 路、118 路、173 路和 190 路城市公交通过,它们大部分是 LNG 天然气公交,少量为柴油车公交。由于隧道北端连接到南京火车站、长途汽车站、红山动物园和玄武湖隧道等城市重要交通、娱乐、商业节点或交通通道,每天有大量的私家小汽车、出租车通过。出租车主要为液化天然气车,也有少量的纯电动车出租车。

2.4 隧道 $PM_{2.5}$ 浓度观测

隧道中 $PM_{2.5}$ 浓度从南至北依次由 1~4 号浓度传感器观测记录,分别对应图 3~图 5 中入口、上游、下游和出口传感器。6 月 20 日 06:30—22:35,6 月 21 日 07:35—22:35,6 月 22 日 06:50—22:10 连续的浓

度与对应的经过隧道的车流车速观测记录按每5 min 积分求均值整理,6月20日、21日和22日整理后的浓度观测值与空间平均车速的对应关系被表达在图4~图6中。

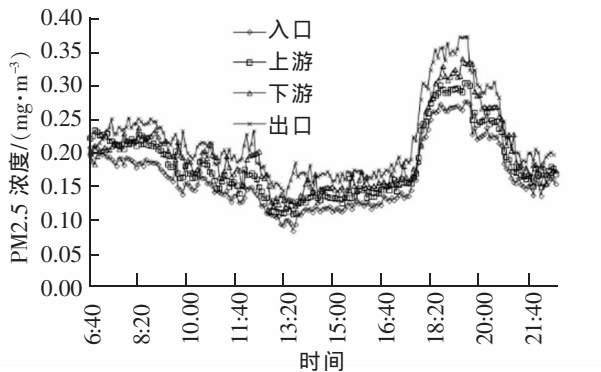


图4 6月20日06:30—22:35 PM_{2.5}浓度(5 min 平均)

Fig.4 PM_{2.5} concentration (average of 5 minutes) during 06:30—22:35, June 20

从数值图中可以看出,PM_{2.5}的5 min 均值浓度依时呈现不规则的变化。总体上,4个传感器测得浓度变化趋势大体一致,这表明:其一隧道内的微细颗粒浓度受背景浓度的控制,汽车排放是在背景上的浓度迭加;其二隧道内空气流动使微颗粒扩散运动加快,观测段前后浓度相差不大且变化趋势相同与PM_{2.5}随空气流动加速扩散有关。此外,隧道主干段出口处的浓度略大于入口处的现象表明,车流引起的活塞风使得隧道入口外低浓度空气涌入,推动出口处高浓度空气排出,使得隧道沿程浓度呈现梯度分布,这与隧道中空气气流由南入口向北出口运动相一致。

2.5 数据处理

对仪器观测和人工观测的数据进行处理,主要包括下列几个步骤:

1) 粗差剔除,对个别明显不合理数据进行人工删除,需要补齐的数值进行线性插值;

2) 数据拼接,对两台点风速仪进行计算机绘图整理,数据下载间隙数据进行拼接,查寻轴向风速是否存在?存在时间的长短,并进行合理性分析;对两路侧激光交通调查仪的时间重合段数据进行算术平均,求得平均速度。对下载数据间隙只有一台仪器观测的时段进行简单的数据拼接,整理出历时完整的车速数据;车流量数据用二台仪器观测数据进行比对,求得二台仪器在时间上的偏差,计算车辆通过隧道中点的时间与仪器的偏差,以出口处仪器记录为准,在时间轴上平移,得到完整的历时车辆车速数据;

3) 对四台PM_{2.5}浓度计观测数据进行5 min 平均浓度处理,将三天海量数据压缩到数百个5 min 平均浓度数据;

4) 对激光调查仪车型数据和人工记查车型数据进行同步性分类,以浓度数据时间标尺为准,进行5 min 求和,人工整理得到完整历时的以5 min 为单元的车辆分类数据;

5) 同步整理以5 min 为时间单元激光调查仪车速数据;

6) 同步按公式(2)整理以5 min 为时间积分单元激光断面流速仪数据。

2.6 守恒方程

根据物质流动输运原理,隧道内1号与4号浓度传感器之间隧道主干段计算空间内在T时间间隔内,车辆在速度变化不大或恒定车速条件下,PM_{2.5}输运质量守恒方程可以表达为:

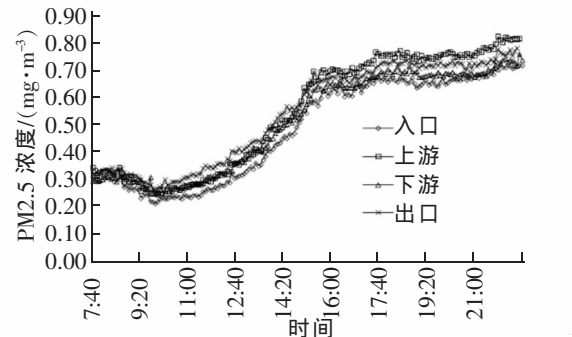


图5 6月21日07:35—22:35 PM_{2.5}浓度图(5 min 平均)

Fig.5 PM_{2.5} concentration (average of 5 minutes) during 07:35—22:35, June 21

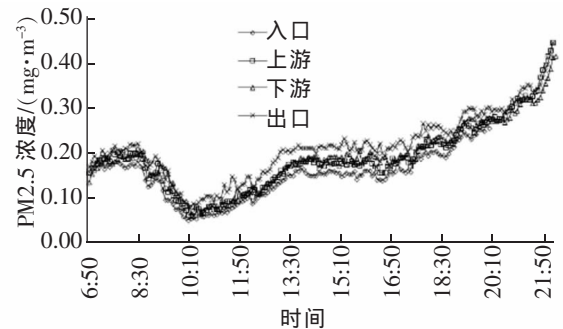


图6 6月22日06:50—22:10 PM_{2.5}浓度(5 min 平均)

Fig.6 PM_{2.5} concentration (average of 5 minutes) during 06:50—22:10, June 22

$$S \int_t^{t+T} \int_{x_0}^{x_0+\Delta x} c(x,t) dx dt = \Delta x \cdot \sum_{i=1}^N \alpha_i N_i m S \int_t^{t+T} v(t) [c_{\text{出}}(t) - c_{\text{入}}(t)] dt \quad (1)$$

式中, $c(x,t)$ 为随时间变化的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值; $v(t)$ 为出口处断面风速仪瞬时值; $c_{\text{出}}(t)$, $c_{\text{入}}(t)$ 分别为隧道主干计算段出、入口 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度计瞬时值; α_i 为排放因子 ($\text{g} \cdot \text{km}^{-1}$ 辆), 其下标 i 代表车辆种类; N_i 为 T 时段内驶过隧道的车辆总数, 其下标 i 代表车辆种类; S 为隧道空间横截面积; Δx 为隧道主干段计算区间的长度, 即首尾 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度计间隧道长度。

根据隧道实验的具体布置以及数据离散化的要求(图1), 方程(1)化简为

$$\left(\frac{c_1^n + c_4^n}{2} - \frac{c_1^{n-1} + c_4^{n-1}}{2} + c_2^n + c_3^n - c_2^{n-1} - c_3^{n-1} \right) = \frac{3}{S} \sum_{i=1}^N \alpha_i N_i m \frac{1}{2T\Delta x} (c_4^n + c_4^{n-1} - c_1^n - c_1^{n-1}) \int_0^T v(t) dt \quad (2)$$

式中: T 为计算时间单元, 考虑到交通流量、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值需要时间累积, T 取 5 min (300 s), 为方便计, 方程(2)中 Δx 为相邻浓度传感器间距, 按实际仪器布设取 130 m (计算区段全长为 $130 \times 3 = 390$ m); S 为隧道空间横截面积, 计算得到为 53.7 m^2 ; c_i 为 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值, 其下标为传感器号(1号为上游隧道主干段入口处浓度计, 2, 3, 4号分别为从入口至下游 390 m 处等距的 3 个传感器)。上标 n 为以 5 min 为单元的时序标号。

当隧道中空气流动方向与车流方向一致时, (1、2)式右端第二项取负, 表明隧道内空气从入口进、出口出, $\text{PM}_{2.5}$ 随空气流动按 c_1 浓度进、 c_4 浓度出。因空气进出残留在隧道主干计算区域中的 $\text{PM}_{2.5}$ 总量变化可以根据进出口浓度差计算求得。如果空气流动方向与车流方向不一致, 则方程右端第二项取正, 空气逆向流动会引起的 $\text{PM}_{2.5}$ 微颗粒不同的输运方向, 隧道主干计算段 $\text{PM}_{2.5}$ 总的存量上也会因气流进出方向相反而产生计算上的不同变化。

2.7 排放因子求解

$\text{PM}_{2.5}$ 守恒方程(2)可以改写成下列形式

$$\sum_{i=1}^N \alpha_i N_i = \frac{A}{6T\Delta x} (c_1^n + c_1^{n-1} - c_4^n - c_4^{n-1}) \int_0^T v(t) dt + \frac{3}{S} \left(\frac{c_1^n + c_4^n}{2} - \frac{c_1^{n-1} + c_4^{n-1}}{2} + c_2^n + c_3^n - c_2^{n-1} - c_3^{n-1} \right) \quad (3)$$

根据整理的 m 组离散实测数据, 划分成 5 种车型, 可以列出(3)式等价的方程组(4)式。式中 α 为排放因子未知数

$$\begin{cases} N_{11}\alpha_1 + N_{12}\alpha_2 + N_{13}\alpha_3 + N_{14}\alpha_4 + N_{15}\alpha_5 = f_1 \\ N_{21}\alpha_1 + N_{22}\alpha_2 + N_{23}\alpha_3 + N_{24}\alpha_4 + N_{25}\alpha_5 = f_2 \\ \dots\dots\dots \\ N_{m1}\alpha_1 + N_{m2}\alpha_2 + N_{m3}\alpha_3 + N_{m4}\alpha_4 + N_{m5}\alpha_5 = f_m \end{cases} \quad (4)$$

(4)式写成矩阵形式

$$N \cdot A = F \quad (5)$$

其中

$$N = \begin{pmatrix} N_{11} & N_{12} & \dots & N_{15} \\ N_{21} & N_{22} & \dots & N_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ N_{m1} & N_{m2} & \dots & N_{m5} \end{pmatrix}, \quad A = \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ M \\ \alpha_5 \end{pmatrix}, \quad F = \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \\ M \\ f_m \end{pmatrix}$$

利用 Householder 变换将 N 进行 QR 分解, 即 $NA = F$

$$\text{令} \quad RA = \begin{bmatrix} R_1 \\ O \end{bmatrix} X, \quad Q^T F = \begin{bmatrix} C \\ D \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: R_1 为 5×5 上三角方阵; C 为 5 维列向量; D 为 $m-5$ 维列向量, 则当 A 满足

$$R_1 A = C \quad (7)$$

时, $F - NA$ 的残差平方和最小, 上式 A 即为最小二乘所求解, 具有最优解的特性。

将统计的 5 min 平均数据按空间平均速度区间分类, 得到 $35 \sim 40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, $40 \sim 45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $45 \sim 50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 三类区间速度(典型的的城市行车速度, 更高或更低的速度没有实测数据)。分别按三类数据样本试算选择合适的样本数据个数和具体样本, 以寻求最小残方差为目标, 由(3)式至(7)计算出不同车型、车速的 $\text{PM}_{2.5}$ 排放因子(见表2)。

表2 富贵山隧道城市汽车PM_{2.5}的平均排放因子解算值(g·km⁻¹ 辆)Tab.2 The average emission factor (g·km⁻¹) of the vehicle PM_{2.5} in the Rich Mountain Tunnel

车速 km·h ⁻¹	出租车 (天然气)	小汽车 (汽油)	公交 (天然气)	柴油 大客车	城市 大货车	平均 误差
35~40	0.017 62	0.052 45	0.072 09	0.706 5	0.157 2	0.31
40~45	0.015 22	0.052 30	0.066 93	0.649 6	0.146 5	0.30
45~50	0.015 21	0.048 95	0.064 27	0.623 4	0.140 1	0.33

3 结论

1) 南京市隧道内不同时间段机动车平均排放因子随风速、交通量、速度、车辆类型的变化而变化,隧道中排放物的浓度呈现空间(沿隧道走向)非均匀分布。

2) 在相同速度范围内城市大货车的PM_{2.5}的平均排放因子明显高于其它,其次是大客车(柴油)、公交车(天然气)、小汽车、出租车(天然气)。车辆在不同的速度范围内,PM_{2.5}平均排放因子随着车速的变化而变化,得出出租车(天然气)、小汽车、公交车(天然气)、大客车、大货车在35~40 km·h⁻¹, 40~45 km·h⁻¹, 45~50 km·h⁻¹范围内的平均排放因子。

参考文献:

- [1] 曹军骥. PM_{2.5} 与环境[M]. 北京:科学出版社,2014:10-20.
- [2] 张卫凤,廖春玲. 我国超细颗粒物PM_{2.5}团聚科技研究进展[J]. 华东交通大学学报,2015,32(4):124-130.
- [3] 覃有均,陈鲁言. 汽车尾气污染[M]. 中山:中山大学出版社,1995:20-22.
- [4] 邓顺熙,董小林. 我国山岭汽车CO、HCs和NO_x排放系数[J]. 环境科学,2000,21(1):109-112.
- [5] CHAN L Y, ZENG LIMIN, Qin Y CO concentration inside the cross harbor tunnel in Hong Kong[J]. 1996,22(4):405-409.
- [6] JOHANNES STAEHEL IN, KURT SCHLAPFER. Toni Burgin Emission factor from road traffic from a tunnel study (Gubist Tunnel Switzerland) Part I: concept and first result[J]. 1998,32(6):999-1009.
- [7] 王伯光,张远航,祝昌健,等. 城市机动车排放因子隧道实验研究[J]. 环境科学,2001,22(3):55-59.
- [8] 袁勋. 箱式货车减阻研究[D]. 长沙:湖南大学,2013.

Study on PM_{2.5} Emission Factor of Motor Vehicle Based on Tunnel Method

Wu Zhong¹, Hou Xinchao¹, Xu Hui¹, Zhang Qilong², Ying Yongwen²

(1 College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing
210098, China; 2. Huai'an City Transportation Bureau, Huai'an 223001, China)

Abstract: Selecting typical urban tunnel for vehicle emission factor test, this study selected Rich Mountain Tunnel in Nanjing City to carry out 3D monitoring and data collection of PM_{2.5} concentration in the tunnel, wind speed and direction, traffic volume, vehicles, speed and meteorological conditions, and then made relevant analysis and classification. By establishing conservation equation and multiple linear regression to solve PM_{2.5} average emission factor, it obtained the average emission factors of taxi (natural gas), car, bus (natural gas), bus (diesel), large freight car in the range of 35~40 km·h⁻¹, 45~40 km·h⁻¹, 45~50 km·h⁻¹. The maximum value was 0.157 2 g·km⁻¹ car and the minimum value was 0.015 21 g/km car. It found out that in the same speed range the average emission factor of PM_{2.5} for the large truck was significantly higher than that in other cities, with the large passenger car (diesel), bus (natural gas), car, taxi (natural gas) followed.

Key words: PM_{2.5}; emission factor; tunnel test

(责任编辑 王建华)