

文章编号: 1005-0523(2022)04-0032-09



基于动力学参数的国Ⅵ重型天然气车实际道路排放特性研究

王志红^{1,2}, 黄钰焜^{1,2}, 张远军³, 丁玲³, 王志军³

(1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070; 2. 武汉理工大学汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430070; 3. 国家汽车质量监督检验中心(襄阳), 湖北 襄阳 441004)

摘要:为研究国Ⅵ重型天然气车道路排放特性,采用便携式排放测试系统(PEMS),对国Ⅵ天然气重型半挂牵引车进行实际道路排放试验,分析了污染物排放因子与车辆行驶参数之间的关系。结果表明,市区由于驾驶工况较差,频繁加减速,两个动力学参数最高,市郊高速路段行驶工况较好,动力学参数较低,CO,CO₂,NO_x,THC排放因子市区排放最高,市郊最低,与动力学参数正相关;随着车速的升高,污染物排放逐渐下降,且在中低速时下降迅速,车速从0~10 km/h升高到10~20 km/h,CO,CO₂,NO_x,THC排放因子分别下降了25%,69%,43%,60%;随着加速度的增加,污染物排放逐渐降低,并且在低速高加速度状态下($v \leq 30$ km/h, $a \geq 0.8$ m/s²)汽车污染物排放最高,建议驾驶员在驾驶该类型车辆时应尽量避免低速高加速状态行驶,以减少车辆排放;污染物排放因子和排放率与比功率VSP呈现良好的正相关性,作为车速加速度及道路等级的函数,VSP可以很好的量化国Ⅵ重型天然气车的排放,从而模拟出不同驾驶条件下的汽车排放特性。

关键词: 污染物排放;PEMS;重型天然气车;动力学参数;VSP

中图分类号:U461

文献标志码:A

本文引用格式:王志红,黄钰焜,张远军,等.基于动力学参数的国Ⅵ重型天然气车实际道路排放特性研究[J].华东交通大学学报,2022,39(4):32-40.

Study on Real Road Emission Characteristics of National Ⅵ Heavy Natural Gas Vehicle Based on Dynamic Parameters

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.20220727.006

Wang Zhihong^{1,2}, Huang Yukun^{1,2}, Zhang Yuanjun³, Ding Ling³, Wang Zhijun³

(1. Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 3. National Automobile Quality Supervision and Test Center(Xiangyang), Xiangyang 441004, China)

Abstract: In order to study the road emission characteristics of national Ⅵ natural gas heavy-duty vehicle, the portable emission test system (PEMS) was used to carry out the actual road emission test of national Ⅵ natural gas heavy-duty semi-trailer tractor, and the relationship between pollutant emission factors and vehicle driving parameters was analyzed. The results show that due to the poor driving conditions in the urban area and frequent acceleration and deceleration, the two dynamic parameters are the highest. The driving conditions of the suburban expressway section are better, and the dynamic parameters are low. and the emission factors of CO, CO₂, NO_x and THC are the highest in the urban area and the lowest in the suburbs, which are positively correlated with the dynamic parameters. With the increase of vehicle speed, pollutant emissions gradually decreased, and the decline was relatively rapid at low and medium speeds. As the vehicle speed increased from 0~10 km/h to 10~20 km/h, and the emission factors of CO, CO₂, NO_x, and THC decreased by 25%, 69%, 43%, and 60% respectively; With

收稿日期:2021-12-23

基金项目:高等学校学科创新引智计划(B17034);教育部创新团队发展计划(IRT_17R83)

the increase of acceleration, the pollutant emission gradually decreased, the emission factors are highest in the low-speed and high-acceleration range ($v \leq 30$ km/h, $a \geq 0.8$ m/s²). It is recommended that the driver should avoid driving at low speed and high acceleration when driving this type of vehicle to reduce vehicle emissions. At the same time, the emission rates as well as the emission factors exhibited a strong positive correlation with the vehicle specific power (VSP). As a function of vehicle speed acceleration and road grade, VSP can quantify the emissions of China VI natural gas heavy vehicles, and thus model bus emission under the different driving conditions.

Key words: pollutant emission; PEMS; emission regulation; LNG heavy-duty vehicle; dynamics parameters; VSP

Citation format: WANG Z H, HUANG Y K, ZHANG Y J, et al. Study on real road emission characteristics of National VI heavy natural gas vehicle based on dynamic parameters[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(4): 32-40.

随着中国汽车保有量的不断增加,汽车尾气污染物排放总量也逐年上升,2020年,全国机动车4项污染物排放总量为1593万t。其中,在各类型汽车中,重型车是氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)排放的主要贡献者^[1]。为了降低城市污染、改善空气,我国接连实施了一系列排放标准,2021年7月1日,重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)标准(以下简称为国VI标准)全面实施,相较于国V排放标准,国VI对重型车排放测试方法和限值要求更加严格,污染物排放限值大幅降低。并且,与国V标准相比,国VI标准新增了整车车载法(PEMS)试验,与传统的转毂试验相比,整车车载法(PEMS)试验可更真实可靠的反映由于汽车位置、驾驶模式、驾驶行为变化所导致的汽车油耗和排放的变化^[2]。

天然气燃烧清洁度高、燃烧热值高、且燃烧产物主要是H₂O和CO₂,并且在装有SCR/TWC等后处理装置时二氧化碳(CO₂)、氮氧化物(NO_x)和颗粒物(PM)的排放很低,是很好的柴油发动机替代能源^[3-6]。相较于氢气、甲醇以及其他生物质燃料汽车,天然气储量大、成本低、稳定性高且技术较为成熟,与电动汽车相比,电动汽车所需要的能源(电)的生产、传输、转化等阶段产生的NO_x、SO_x和PM排放量分别是天然气车的1.2、3.5及7.5倍,天然气车是我国推广清洁能源汽车、尽快达到碳达峰和碳中和、实现交通减排的现实选择^[7]。天然气发动机早期是无尾气后处理装置的稀薄燃烧发动机的形式,用于降低PM的排放^[8],后来加装了氧化催化转化器(OC)进一步降低了CO和THC的排放^[9],随后为解

决稀薄燃烧发动机功率小和NO_x排放控制问题,电控喷射天然气发动机应运而生,同时,加装TWC/SCR可进一步降低污染物排放,满足法规的要求^[9]。

国内外学者对重型天然气车实际道路排放特性研究已经取得一定的成果,Mccaffery等^[10]分析比较了加利福尼亚州50辆不同用途,不同发动机技术的重型车NO_x实际道路排放特性,发现相较于柴油车,LPG车、CNG车和柴电混和车NO_x排放均有大幅度的降低,并且怠速阶段车辆排放最高,低速其次。Wang等^[9]对两辆满足国V标准的LNG重型清洁车分析了其实际道路排放特性,结果表明,在中等车速激烈驾驶会导致THC大幅度增加。Lyu等^[11]分析比较了中国北方6辆分别满足国V或国IV排放标准,使用LNG或柴油的半挂牵引车实际道路排放特性,结果表明,频繁加减速会导致NO_x排放增加。Zhang^[12]分析比较了分别满足欧V,欧IV标准的柴油、柴混、CNG和LNG公交车实际道路排放特性,并研究了VSP和车速对车辆NO_x排放的影响,研究发现,相较于柴油车,CNG和LNG以及混电车的污染物排放显著降低,NO_x平均排放率与比功率VSP呈现良好的正相关,NO_x相对排放因子与车速成反比。Guo等^[13]分析比较了13辆分别满足欧III,欧IV、欧V排放标准的柴油、天然气公交车的实际道路排放特性,结果表明:CNG公交车的PM和PN排放较柴油车有大幅降低,并且,各污染物排放因子与VSP成正比。

相较于压缩天然气(CNG),液化天然气(LNG)易运输、易储存、密度大,相较于CNG车辆,LNG车

辆有更小的油箱,更少的加油频率以及更长的行驶距离^[14]。LNG 发动机可更广泛的应用于长距离运输车辆上,如大型客车,货车,半挂牵引车等,在各类运输车辆中,半挂牵引车由于运输量大,经济效益高的特点,广泛应用于公路货运中^[15],降低半挂牵引车的排放对我国环境控制具有显著意义。然而目前多为对小型公交车等城市车辆的研究,对 LNG 半挂牵引车的排放特性研究较少,并且都是对满足旧标准排放法规车辆的排放特性分析,本文使用 PEMS 研究国 VI 天然气半挂牵引车(N3 类型)的车载排放特性,分析了动力学参数、行驶路段、行驶速度、加速度、冷启动以及汽车比功率对车辆排放的影响。为重型车排放控制和城市空气质量的提高提供科学的数据支持。同时也为日后开发国 VI 重型天然气车的排放模型提供数据参考和支撑以便更加科学有效的控制排放。

1 试验和数据处理

1.1 试验主要仪器设备

本次试验使用 PEMS 对国 VI 重型天然气车进行实际道路排放试验,本研究使用的车载排放测量装置是日本 HORIBA 公司的 OBS-ONE 设备,该系统主要由 4 个模块组成,分别是 CC 模块(中央控制单元);用于接受外部信号(GPS,气象站,OBID 信息等),PE 模块:用于市电和电瓶之间电源切换,气体分析模块(GA)。其中,气体分析模块(GA)包括测量 THC 浓度的加热火焰离子检测器(FID),读取精度为 $\pm 0.5\%$,测量 CO,CO₂ 的不分光红外分析仪(NDIR),其中 CO 的读取精度为 3%,CO₂ 的读取精度为 2%,测定 NO_x 浓度的化学发光探测分析仪(CLD),读取精度为 1%。

1.2 试验车辆和试验方法

1.2.1 试验车辆

本文选取满足国 VI 重型车排放标准的 N3 类天然气半挂牵引车,后处理装置为 TWC+ASC,更多车辆详细参数见表 1。

1.2.2 试验路线

本试验选择的路线覆盖了襄阳天然气半挂牵引车辆的典型道路类型,根据速度大小分为市区路,市郊路和高速路,其中,按照国 VI 标准,N3 类型车辆市区路占 20%,市郊路占 25%,高速路 55%,实际道路测试时间应保证发动机做功大于发动机

WHTC 循环功的 4~7 倍,即试验时间应在 2.5 h,本次车辆试验时间为 9 072 s(即 2.52 h),满足试验要求。图 1 为测试车辆的速度分布图,表 2 为各路段实际占比和平均速度。

表 1 试验车辆信息

Table.1 Information about the tested vehicle

Parameter	Value
GVWR /kg	18 000
Maximum speed/(km/h)	89
After-treatment	TWC(1 pcs)+ASC(1 pcs)
Engine power/kW	221
Type	N3
Emission standard	China VI
Fuel	LNG

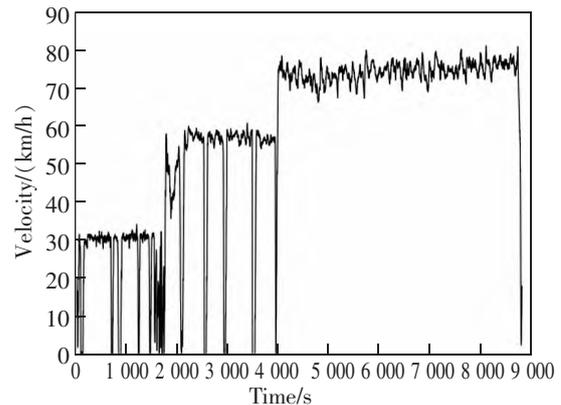


图 1 速度分布图

Fig.1 Velocity profile

表 2 速度占比和平均速度

Table.2 Speed proportion and average speed

Road section	Urban	Suburb	Highway
Actual time proportion/%	20.34	25.19	54.47
Required time proportion/%	20 \pm 5	25 \pm 5	55 \pm 5
Actual average speed/(km/h)	24.50	49.36	73.96
Required averag speed/(km/h)	15~30	45~70	\geq 70

1.3 数据处理

根据 PEMS 试验要求^[16],首先将冷启动数据、停车数据等无效数据删除,将由于仪器零点漂移导致的污染物排放数据负值归零,由于本次研究车辆测试时间地点位于湖北襄阳夏季,测试海拔高度在 100 m 左右,温度在 30 $^{\circ}$ C 左右,满足 PEMS 试验要求,

将无效数据剔除后,剩余 8 796 组数据,然后根据 GB 17691-2018《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》规定的公式(1)计算各气体排气质量

$$m_{\text{gas}}=u_{\text{gas}}C_{\text{gas}}m_{\text{exl}} \quad (1)$$

式中: m_{gas} 为整个循环的总稀释排气质量,kg; u_{gas} 为 GB 17691-2018 中表 CA.2 排气组分密度和稀释排气密度比; C_{gas} 为背景修正后的排气组分平均浓度,ppm; m_{exl} 为整个循环当量稀释排气质量,kg。

接下来依据 GB 17691-2018 规定将数据进行对齐,并将试验所得的数据分为3类:①分析仪测得的尾气排放物质浓度(CO,CO₂,NO_x,THC);②排气流量计测得的数据:排气质量流量和排气温度;③发动机测得的数据:扭矩、速度、温度、燃油消耗率、ECU测得的车速。

需要将三类数据彼此对齐,选取每两类数据中相关性系数最高的两个参数进行对齐,平移每一类别所有数据使得数据相关性最高。具体步骤如下:

- 1) 三类数据的时间对齐:GPS测得的车速与ECU获取的车速对齐;
- 2) 一类与二类数据的时间对齐:CO₂浓度和排气质量对齐;
- 3) 二类和三类数据的时间对齐:CO₂浓度和发动机燃油消耗量。

为了直观的展示,本文选取 $t=300\sim 700$ s 内 CO₂ 浓度与燃油消耗率对齐进行可视化,计算二者之间的相关系数,选取相关系数最大时的平移时间进行平移,数据显示,CO₂ 浓度和燃油消耗率相关性较好,相关系数为 0.950 7(图 2)。

1.4 排放因子的计算

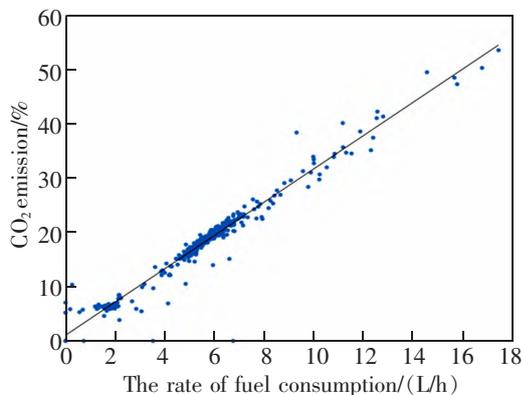


图 2 CO₂ 浓度与燃油消耗率数据相关性

Fig.2 The correlation between CO₂ concentration and fuel consumption rate data

如式(2),首先将气体污染物的瞬时排放率依据行驶工况模式求取平均排放率

$$\overline{ER}_{jk}=\frac{1}{T_k}\sum_1^{T_k}ER_j \quad (2)$$

式中:Bin k 是某时间范围内的汽车行驶工况。 \overline{ER}_{jk} 为行驶工况 Bin k 下的污染物 j 的平均排放率,g/s; T_k 为每个行驶工况模式的时间,s; ER_j 为污染物 j 的瞬时排放率,g/s;

在给定的驾驶循环中的基于距离的 THC,CO,CO₂,NO_x 排放因子可通过平均排放因子和驾驶工况的时间分配推导,如下

$$ER_{\text{dis},j}=\frac{3\ 600\sum_k(\overline{ER}_{jk}P_kT_k)}{\sum_1^T v} \quad (3)$$

式中: $ER_{\text{dis},j}$ 为污染物的排放因子,g/km; \overline{ER}_{jk} 为式(2)求解的平均排放率,g/s; P_k 为行驶工况 Bin k 的驾驶循环的时间占比; T 为驾驶循环总时间,s; v 为瞬时车速,km/h。

1.5 VSP 工况分类

车辆瞬时功率和机动车质量的比值称为瞬时比功率(vehicle specific power,VSP),表征汽车对自身和货物乘客的牵引力,是车速、加速度、风阻和坡度等的函数,考虑了空气阻力,滚动阻力和道路等级等参数,可以很好的展现汽车实际行驶工况,大量研究表明瞬时比功率与机动车的排放有很好的相关性^[17-18],被广泛用于开发新的汽车排放模型中^[9],故本文基于瞬时比功率,研究国VI重型天然气车排放情况。

本次试验参考 MOVES 模型^[20]推导 VSP 公式如下

$$VSP=0.064v+0.000\ 279v^3+av+9.81v\sin\theta \quad (4)$$

式中: v 为车速,m/s; a 为加速度,m/s²; θ 为坡度; VSP ,kW/t。

汽车 VSP 相关参数如表 3 所示,为确保分布均衡,使得计算更为精确,现将分为 12 个区间,区间 Bin1 表示 $VSP<0$ 的工况区间,由于 VSP 比较集中于[0,4]区间,故将该区间细分为 Bin2~9 共 8 个工况区间,Bin10~12VSP 分布略微松散,图 3 展现了车辆各个 VSP 区间的时间占比,可以看到,整体 VSP 区间分布较为均衡。然后通过计算各个 VSP 区

间的各污染物排放因子来分析 VSP 对汽车排放影响。

表 3 VSP 相关参数

Tab.3 Vehicle specific power (VSP) related parameters
kW/t

Maximum VSP	Minimum VSP	Average VSP	Negative average VSP	Positive average VSP
55.50	-21.12	2.65	1.60	3.16

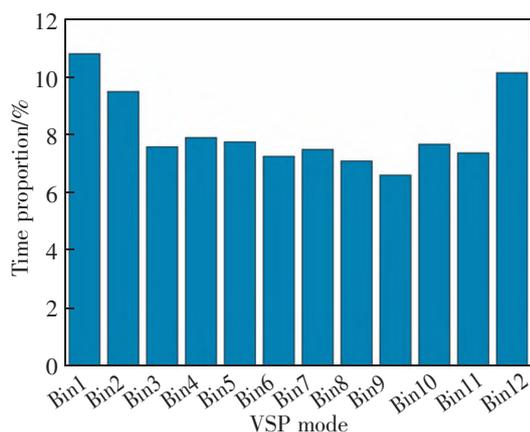


图 3 VSP 区间时间占比

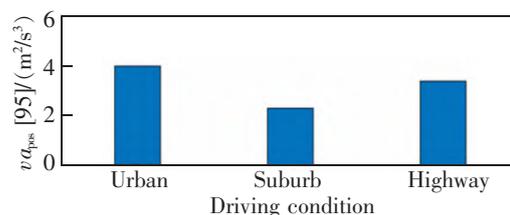
Fig.3 Allocation of time of each operating mode bin to total time

2 结果与讨论

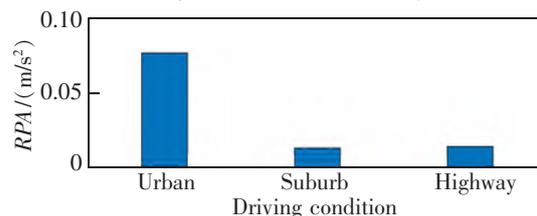
2.1 行驶动力学参数与驾驶路段排放分析

相对正加速度(RPA)和速度与大于 0.1 m/s^2 正加速度的乘积的第 95 百分位 ($v \cdot a_{\text{pos}}[95]$) 分别可以表示车辆的加速加载情况和驾驶的激烈程度。本小节采用汽车行驶动力学特性参数研究汽车行驶动力学特性与汽车尾气排放因子的关系。分析了不同驾驶路段排放的特性。

图 4 为不同行驶路段的动力学参数,可以看到市区的 RPA 和 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 最大,分别为 3.9709 W/kg 和 0.07602 m/s^2 ,市郊最低,分别为 2.2840 W/kg 和 0.01253 m/s^2 ,由于市区激烈驾驶行为较多,故市区两个行驶动力学参数最高,高速时车速很高,故 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 略微增加,图 5 是不同行驶路段污染物排放因子,可以看出,CO,CO₂,NO_x,THC 排放因子市区排放最高,市郊最低,与动力学参数正相关,4 种污染物市区排放因子分别为市郊的 4.072 倍,1.931 倍,2.47 倍,3.834 倍。结果表明,市郊路段频繁启停动力学参数 RPA 和 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 最高,并且动力学参数与车辆的 4 类污染物排放因子呈正相关,市区动力学参数高,排放也较高。



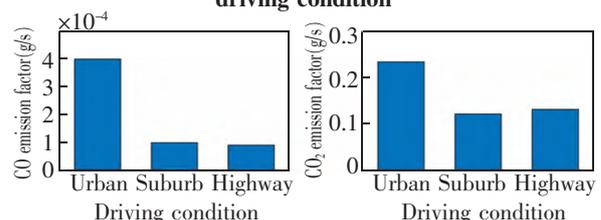
(a) $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ of different driving condition



(b) RPA of different driving condition

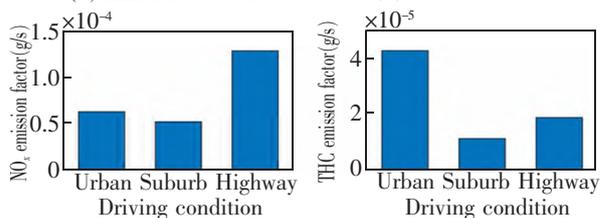
图 4 各路段行驶动力学参数

Fig.4 Vehicle dynamics parameters under different driving condition



(a) Emission factor of CO

(b) Emission factor of CO₂



(c) Emission factor of NO_x

(d) Emission factor of THC

图 5 不同路段污染物排放因子

Fig.5 Vehicle emission factors under different driving conditions

2.2 车速与排放的关系

图 6 是 PEMS 试验中汽车污染物 (CO,CO₂,NO_x,THC) 的排放随车速的变化情况,从图中可清晰的看出,随着车速的升高,污染物排放因子逐渐下降,且在中低速时下降比较迅速,后来随着车速的继续上升排放下降趋势逐渐减缓,同时可以看到,四类污染物排放因子在车速 $0 \sim 10 \text{ km/h}$ 区间内排放最高,平均车速是 8.10 km/h 时 CO 排放因子高达 5.29 g/km ,而平均车速为 75.63 km/h 时的 CO 排放因子仅为 0.146 g/km ,前者是后者的 35 倍,随着车速从 $0 \sim 10 \text{ km/h}$ 升高到 $10 \sim 20 \text{ km/h}$,CO,CO₂,NO_x,THC 排放因子分别下降了 25%,69%,43%,60%,随后,下降趋势变缓,结果显示,汽车低速行驶

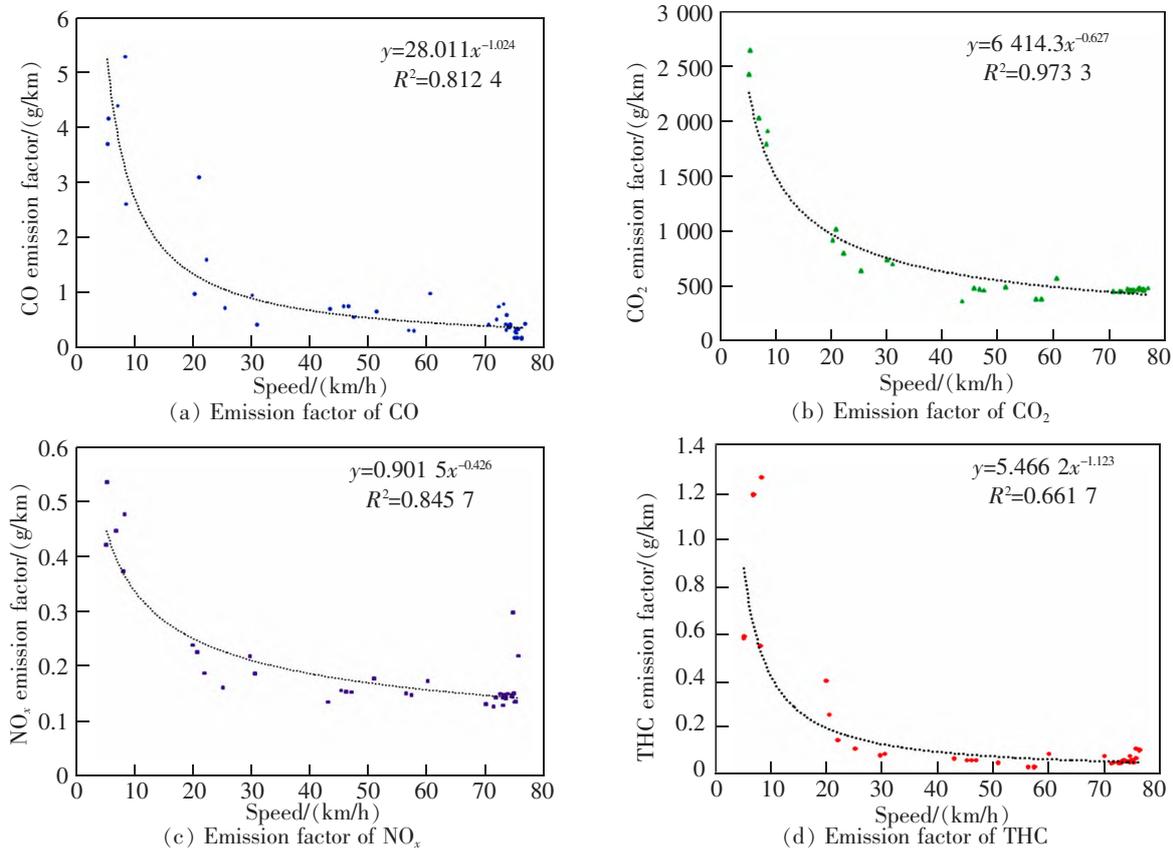


图6 车速对污染物排放的影响

Fig.6 Effect of speed on pollutant emissions

时会导致较高的排放因子。这是因为低速时发动机缸内温度较低,燃料燃烧不充分,并且在低速时车辆单位行驶距离短,导致CO和THC排放因子较高,同时,在低速区间,发动机温度较低,所以排放控制装置效率较低,故NO_x排放较高。低速时,发动机处于低速小负荷阶段,根据发动机万有特性曲线,此时燃油消耗率较高,CO₂排放因子较大。

2.3 加速度与排放的关系

根据被测车辆车速分布和加速度分布,将车速分为低速(0~30 km/h),中速(30~50 km/h),中高速(50~70 km/h)和高速(>70 km/h),分析在不同速度区间内加速度对汽车污染物排放的影响。图7说明了在同一车速下随着加速度的升高,车辆各排放因子的变化情况,从图中可以看出,汽车加速,尤其是急剧加速时,会显著增加汽车污染物的排放,而汽车减速对汽车排放的影响较小,在同一车速范围下,车辆减速时的排放最低并且数值波动不大,从减速阶段到巡航阶段再到加速阶段,汽车污染物排放因子随着加速度的增大而增大,并且可以看到,

同一加速度,车速升高,排放降低,低速高加速状态下($v \leq 30$ km/h, $a \geq 0.8$ m/s²)汽车污染物排放最高,CO,CO₂,NO_x,THC排放因子最高值分别是11.0238, 2988.3154,0.6200,0.7166 g/km,分别是同一车速汽车巡航($-0.1 \leq a < 0.1$ m/s²)时的9.0倍,2.65倍,2.73倍,2.55倍,是同一车速减速时的($a < -0.8$ m/s²)10.65倍,5.50倍,4.53倍,2.33倍。这主要是由于车辆低速行驶时,发动机温度较低,燃料燃烧不充分,并且低速车辆单位行驶距离较低,故THC和CO排放因子较高,此时排放后处理装置效率较低,NO_x排放因子也较高,急剧加速时,发动机大量供油,容易导致供油过量,混合气过浓,一部分燃油燃烧不充分,故而进一步导致CO和THC排放因子增大,大量供油也导致CO₂排放因子的升高,而在急剧加速阶段,发动机温度很高,气缸氧浓度高,故而NO_x排放因子增加,减速阶段,油门关闭,停止供油,发动机温度降低,污染物排放因子略有升高,因此,驾驶员在驾驶车辆时应尽量避免低速高加速状态行驶,以减少车辆排放。

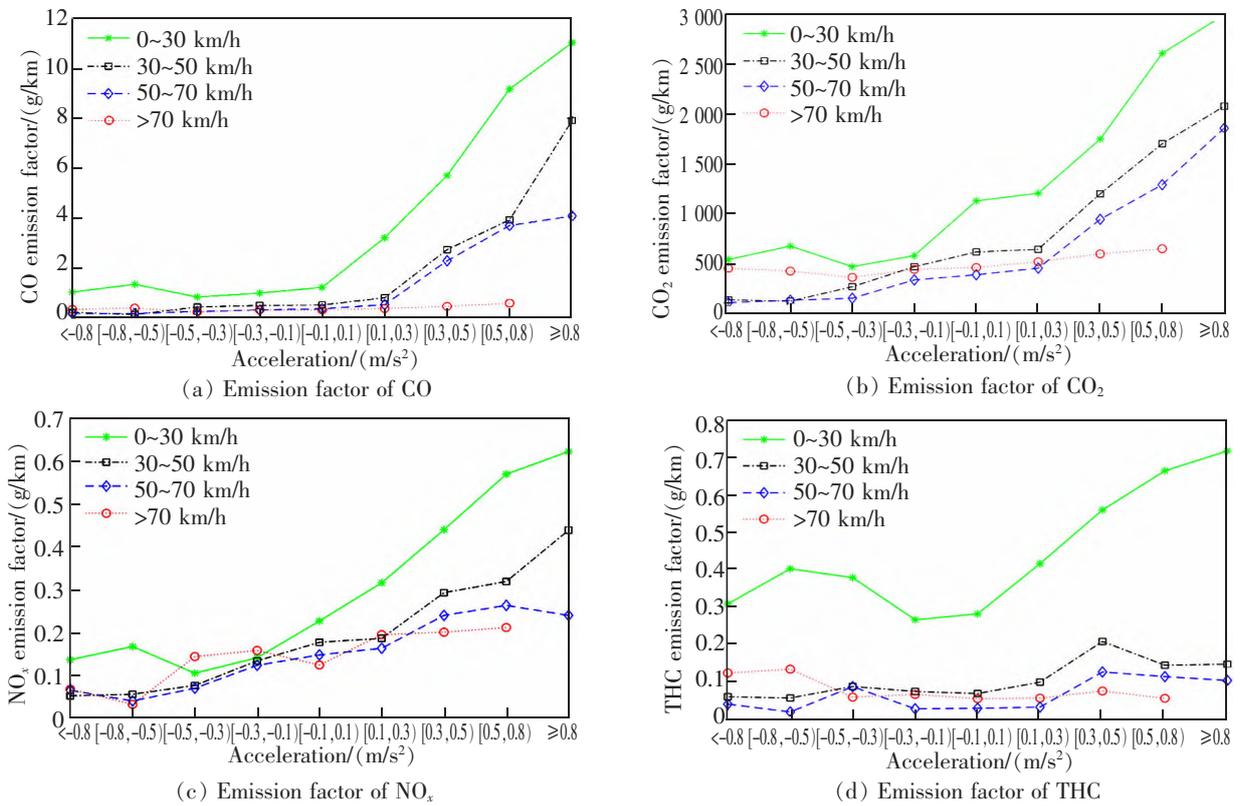


图7 加速度对污染物排放的影响

Fig.7 Effect of acceleration on pollutant emissions in each speed range

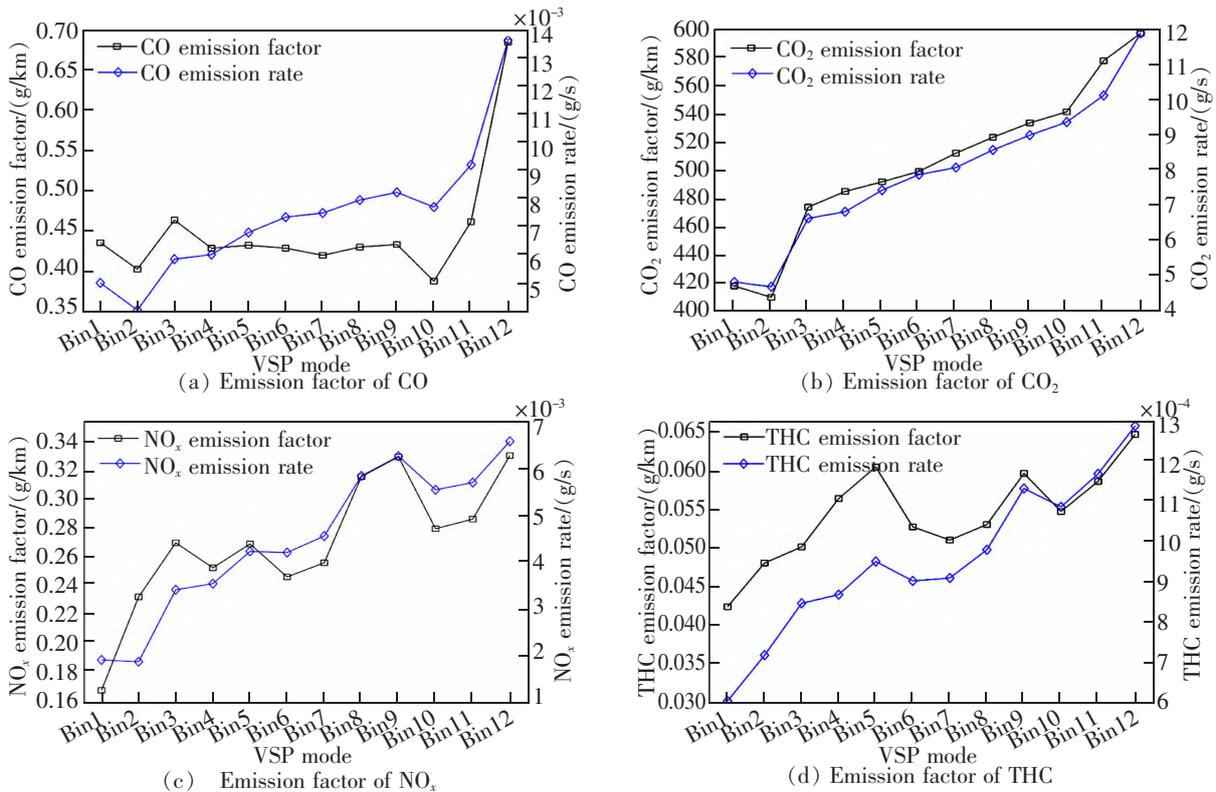


图8 驾驶模式与污染物排放的关系

Fig.8 Correlations between gaseous pollutants emission factors and operating mode

2.4 VSP与排放的关系

图8是不同驾驶模式下CO,CO₂,NO_x,THC排放因子和排放率的变化,从图中可以看出,汽车污染物排放因子与排放率都与驾驶模式成正相关,随VSP的增大而增大,排放因子和排放率整体趋势相同,并且可以发现污染物排放因子和排放率均在VSP<0时较小,在VSP>6时较大。这是由于汽车驱动过程中需要更大的动力从而燃料消耗增加进而导致排放增加,相较于排放因子,平均排放率与VSP的线性趋势更好,这是由于排放因子考虑了行驶距离这一参数,当汽车在某一区间排放较高,而行驶距离也较高(如高速超车时),这时,平均排放率较高,而排放因子会变小,整体上,污染物排放率和排放因子与VSP有较好的相关性。

3 结论

1) 市区路段车辆的RPA和 $v \cdot a_{pos}$ [95]最大,分别为3.970 9 m/s²和0.076 02 m²/s³,市郊最低,分别为2.284 0 m/s²和0.012 53 m²/s³,CO,CO₂,NO_x,THC排放因子市区排放最高,市郊最低,与相对正加速度和速度和加速度的乘积的第95百分位正相关。

2) 污染物排放因子和加速度,车速有很好的相关性,提高车速可显著降低污染物排放;汽车加速,特别是大幅加速时,汽车污染物排放显著增加,而减速对汽车排放影响较小;在车速较低加速度较高时,污染物排放会达到峰值,这种情况主要发生在城市拥堵路段行车时,为改善车辆污染物排放,政府应采取相关措施改善城市交通拥堵。

3) 污染物的排放因子和排放率均与比功率VSP成正相关。VSP在0附近时,污染物排放因子和排放率最低,随着VSP的增大,排放因子和排放率逐渐增大,VSP>6时,污染物排放因子和排放率达到峰值。

参考文献:

[1] 中华人民共和国生态环境部. 2021年中国移动源环境管理年报(摘录一)[J]. 环境保护,2021,49(Z2):82-88.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. China Mobile Source Environmental Man-

agement Annual Report in 2021 (Excerpt 1)[J]. Environmental Protection,2021,49(Z2):82-88.

[2] ASAD N S. On-road pollutant emission and fuel consumption characteristics of buses in Beijing[J]. Journal of Environmental Sciences,2011,23(3):419-426.

[3] 蒋德明,黄佐华. 内燃机替代燃料燃烧学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2007.
JIANG D M,HUANG Z H. Alternative Fuel Combustion for Internal Combustion Engines[M]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University Press,2007.

[4] 潘永亮. 天然气发动机市场优势解析及技术特点研究[J]. 时代汽车,2020(6):49-50.
PAN Y L. Analysis of natural gas engine market advantages and research on technical features[J]. Auto Time,2020(6):49-50.

[5] QUIROS D C,SMITH J,THIRUVENGADAM A,et al. Greenhouse gas emissions from heavy-duty natural gas, hybrid,and conventional diesel on-road trucks during freight transport[J]. Atmospheric Environment,2017,168:36-45.

[6] HESTERBERG T W,LAPIN C A,BUNN W B. A comparison of emissions from vehicles fueled with diesel or compressed natural gas[J]. Environmental Science & Technology,2008,42(17):6437-6445.

[7] 程昊,付子航. 中国汽车燃料全生命周期能耗和排放研究[J]. 国际石油经济,2017,25(12):82-89.
CHENG H,FU Z H. Study on full life circle of energy consumption and emission of vehicle fuel in China[J]. International Petroleum Economics,2017,25(12):82-89.

[8] AYALA A,KADO N Y,OKAMOTO R A,et al. Diesel and CNG heavy-duty transit bus emissions over multiple driving schedules:Regulated pollutants and project overview[J]. SAE Transactions,2002,111:735-747.

[9] WANG J,GUI H,YANG Z,et al. Real-world gaseous emission characteristics of natural gas heavy-duty sanitation trucks[J]. Journal of Environmental Sciences,2022,115:319-329.

[10] MCCAFFERY C,ZHU H,TANG T,et al. Real-world NOx emissions from heavy-duty diesel,natural gas,and diesel hybrid electric vehicles of different vocations on California roadways[J]. Science of The Total Environment,2021,784:147224.

[11] LYU L,GE Y,JI Z,et al. Regulated emission characteristics of in-use LNG and diesel semi-trailer towing vehicles under real driving conditions using PEMS[J]. Journal of Environmental Sciences,2020,88:155-164.

[12] ZHANG S,WU Y,HU J,et al. Can Euro V heavy-duty

- diesel engines, diesel hybrid and alternative fuel technologies mitigate NO_x emissions new evidence from on-road tests of buses in China[J]. *Applied Energy*, 2014, 132(1): 118–126.
- [13] GUO J, GE Y, HAO L, et al. On-road measurement of regulated pollutants from diesel and CNG buses with urea selective catalytic reduction systems[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, 99: 1–9.
- [14] KUMAR S, KWON H, CHOI K, et al. LNG: An eco-friendly cryogenic fuel for sustainable development[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(12): 4264–4273.
- [15] 李艳灿. 半挂汽车列车高速行驶侧向稳定性仿真分析与控制研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
LI Y C. Analyze and control on lateral stability for tractor semi-trailer at high speed[D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.
- [16] 吕立群, 尹航, 王军方, 等. 基于功基窗口法的国六重型柴油车实际道路排放研究[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(8): 3539–3545.
LYU L Q, YIN H, WANG J F, et al. Research on real driving emissions from China-VI heavy-duty diesel vehicles based on work-based window method[J]. *China Environmental Science*, 2021, 41(8): 3539–3545.
- [17] HUAI T, DURBIN T D, YOUNGLOVE T, et al. Vehicle specific power approach to estimating on-road NH₃ emissions from light-duty vehicles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(24): 9595–9600.
- [18] ZHAI H, FREY H C, ROUPHAIL N M. A vehicle-specific power approach to speed- and facility-specific emissions estimates for diesel transit buses[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(21): 7985–7991.
- [19] 郭佳栋. 重型车实际道路车载排放测试及排放特性研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
GUO J D. Research on real-world emission performance of heavy-duty vehicles based on portable emission measurement systems[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [20] WU Y, ZHANG S J, LI M L, et al. The challenge to NO_x emission control for heavy-duty diesel vehicles in China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(19): 9365–9379.



第一作者: 王志红(1980—)男, 博士, 讲师, 研究方向为发动机排放控制及新能源汽车。Email: wangzhihong@whut.edu.cn。

(责任编辑: 李 根 姜红贵)