

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.010

驾驶行为对重型柴油车实际道路行驶排放测试的影响

岳大俊¹, 杜宝程^{1,2}, 邹杰¹, 徐划龙², 向橄², 张力¹

(1.重庆大学汽车工程学院,重庆400044;2.中国汽车工程研究院股份有限公司,重庆401122)

摘要:为探究驾驶行为对重型柴油车实际行驶污染物排放的影响,利用车载便携式排放测试系统(PMES, portable emissions measurement system)对3辆车分别进行了平稳驾驶、正常驾驶和激烈驾驶共9次PEMS试验。对每辆车前后3次试验的市区、市郊、高速路段和总行程路段动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95]和比排放进行了计算,并利用动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95]对污染物排放特性影响进行了深入分析。结果表明:相较于平稳驾驶,正常驾驶和激烈驾驶行为下3辆车 NO_x 比排放增加33.73%~621.10%,PN比排放增加21.26%~122.40%;同时CO比排放与车辆动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95]之间无明显影响关系,市郊、高速路段 NO_x 比排放和PN比排放与车辆动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95]存在较强的相关性,可见其驾驶行为对车辆排放的影响不容忽视。

关键词:驾驶行为;实际行驶排放;重型柴油车;行程动力学参数

中图分类号:U467.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2021)06-021-10

Impact of driving behavior on real driving emissions from heavy-duty vehicles equipped with diesel engines

YUE Dajun¹, DU Baocheng^{1,2}, ZOU Jie¹, XU Hualong², XIANG Gan², ZHANG Li¹

(1. School of Automotive Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, P. R. China)

Abstract: In order to investigate the impact of driving behavior on real driving emissions (RDE) of heavy-duty diesel vehicles, a total of 9 times of smooth driving, normal driving and rough driving were carried out on three vehicles using the portable emissions measurement system (PMES). The dynamic parameters $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95] and emission factors of the urban, rural, motorway section and total travel distance of each vehicle were calculated before and after the three tests, and the dynamic parameters $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95] were used to analyze the effects of pollutant emission characteristics. The results show that compared with smooth driving, the NO_x emission factors of the three vehicles under normal driving and rough driving behavior increase by 33.73%–621.10% and the PN emission factors increase by 21.26%–122.40%. At the same

收稿日期:2020-02-18 网络出版日期:2020-04-28

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项资助面上项目(CSTC2019JSCX-MSXMX0016)。

Supported by Chongqing Technology Innovation and Application Development Special Support Project (CSTC2019JSCX-MSXMX0016).

作者简介:岳大俊(1993—),男,重庆大学硕士研究生,主要从事整车排放测试与控制、内燃机燃烧测试与控制研究,
(E-mail)dajun_yue@cqu.edu.cn。

通讯作者:杜宝程,男,正高级工程师,(E-mail)dubaocheng@caeri.com.cn。

time, the correlation between CO emission factors and the dynamic parameters $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95] is not obvious, but the NO_x emission factors and PN emission factors of suburbs and high-speed sections have a strong correlation with the dynamics parameters $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95]. It can be seen that the impact of driving styles on vehicle emissions cannot be ignored.

Keywords: driving style; RDE; heavy-duty diesel vehicle; dynamics parameters

随着中国经济的高速发展和国民生活水平的提高,截至 2018 年底中国汽车保有量达到了 2.32 亿辆,其中重型车保有量达到 2 657.82 万辆^[1]。研究发现重型车 NO_x 和 PN 实际道路排放并没有达到预期效果,甚至被认为至少低估 50%^[2-4]。在《重型柴油车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》(国六)排放法规即将全面实施背景和条件下^[5],由于实验室认证测试循环排放结果不能真实反映实际行驶污染物排放状况,因此国六排放法规将实际行驶污染物排放试验作为 WHTC(world high-duty test cycle)测试循环补充测试程序^[6]。

国内外学者进行了大量 PMES 试验研究。但大部分仅仅分析外部因素(环境温度^[7]、道路坡度^[8]及海拔高度^[9])对轻型车 RDE(real drive emissions)试验排放结果的影响,以及重型车实验室认证循环和 PEMS 试验排放结果进行对比分析。葛蕴珊等^[4]应用车载排放测试系统,测试了城市车辆在实际道路上的污染物排放特征。宋彬等^[10]研究了不同驾驶行为对轻型车实际道路车辆排放的影响,发现 NO_x 和 PN 排放量与车辆的动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95](车速与大于 0.1 m/s^2 的正加速度乘积的第 95 个百分位)和 RPA(relative positive acceleration)具有明显的相关性。杜宝程等^[11-12]研究了 MPA 和驾驶行为等对轻型车排放的影响,发现其 CO 和 PN 均有随着驾驶风格的激烈程度和 MPA 的增加而增加,而 NO_x 的排放与驾驶风格之间无明显规律。李岳兵等^[13]对轻型车的动力学参数有效性进行了分析,发现利用窗口 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95] 对车辆进行动力学校验更加合理。杨长志等^[14]已经深入到轻型车的窗口去研究行程动力学参数对车辆比排放的相关性。Luján 等^[15]研究了欧洲轻型柴油车实际道路排放,发现相比于恒定的高速行驶,低速和频繁的加减速导致 NO_x 比排放大大增加。Varella 等^[16]对 2 位驾驶员和 5 辆轻型车来分析不同驾驶行为对实际行驶污染排放物的影响。Gallus 等^[17]利用动力学参数来区分不同驾驶行为,并利用 WLTC(world light-duty test cycle)工况和 FOT(field operational test)工况作为正常驾驶的参考值,从而分析不同驾驶行为对污染排放的影响。目前国内学者主要关注轻型车驾驶行为和行程动力学参数对比排放的影响以及排放相关性,并未研究重型车驾驶行为对比排放的影响和相关性,且国六排放法规中也未对重型车驾驶行为进行校验和约束。

笔者研究发现重型车在正常驾驶和激烈驾驶行为下其比排放有很大差异,因此严格按照现有国六法规要求对 3 辆重型车(N2、N3、M3 城市车辆)分别进行了平稳驾驶、正常驾驶和激烈驾驶 3 种驾驶行为总共 9 次 PEMS 试验,对行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95] 与污染物(CO、 NO_x 、PN)排放特性的关系进行深入的对比分析。

1 试验设备和车辆

1.1 试验路线

国六排放法规中对于重型车 PEMS 试验路线有着严格的要求。其中要求试验车辆累积正海拔高度增加量小于 $1\ 200 \text{ m}/100 \text{ km}$ 、试验开始点和结束点之间的海拔差小于 100 m 以及对 N2、N3 和 M3 城市类车辆市区、市郊、高速路段比例做出了相应要求。同时为减少道路等条件对试验结果造成影响,同一辆车在同一条路线上进行前后 3 次试验。每个类型车辆实际行驶特征如表 1,从表 1 中可以看出 9 次试验全部符合国六排放法规的要求。车辆行驶路线如图 1 所示,图中 A 点到 E 点为车辆 RDE 试验时的行驶顺序,A 点为试验起始点,E 点为试验结束点。

表 1 路线特征

Table 1 Routes characteristics

试验编号	线路总里程/ km	平均海拔高度/ m	始终点海拔高差/ m	累积正海拔增量/ (m·(100 km) ⁻¹)	
A 车	Test 1	132.7	283.9	1.9	780.3
	Test 2	128.1	278.0	-1.9	865.8
	Test 3	127.0	281.4	18.8	843.6
B 车	Test 4	123.3	304.4	-69.2	1 132.9
	Test 5	121.0	309.7	-82.6	1 143.9
	Test 6	131.7	309.0	-66.9	694.8
C 车	Test 7	112.0	286.7	33.3	1 064.5
	Test 8	136.9	279.2	2.3	834.6
	Test 9	108.9	287.4	33.8	1 115.4

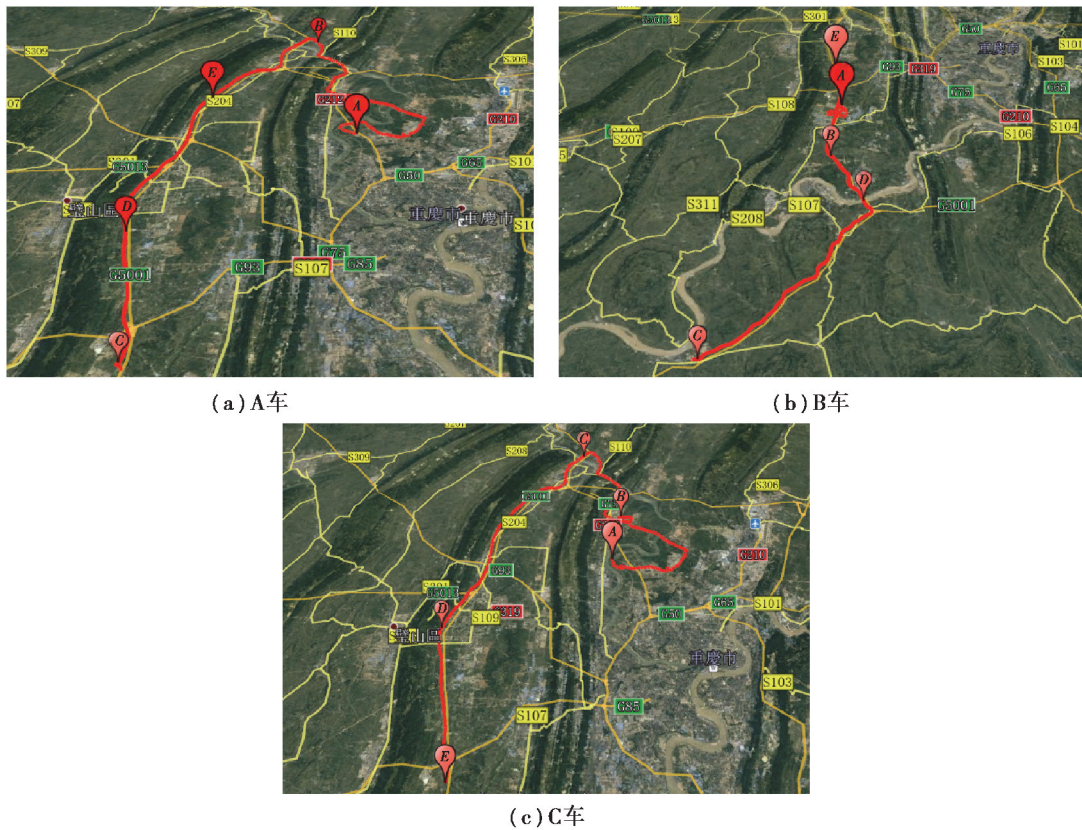


图 1 车辆行驶路线

Fig. 1 Vehicle driving routes

1.2 试验设备

本研究 9 次试验排放测试均采用日本 HORIBA 公司 OBS-ONE 系列便携式排放测试系统(PEMS),该系统主要有七大部分组成。测试部分主要有气体模块(OBS-ONE GS)测量 CO,CO₂,NO_x 的排放量;PN 模块则主要测量 PN 数量。其中 CO 采用不分光红外线吸收型分析仪(nondispersive infrared analyzer, NDIR),NO_x 测量采用化学发光型分析仪(chemiluminescent detector, CLD),PN 采用激光散射凝聚离子计数法测量,其设备组成见图 2。

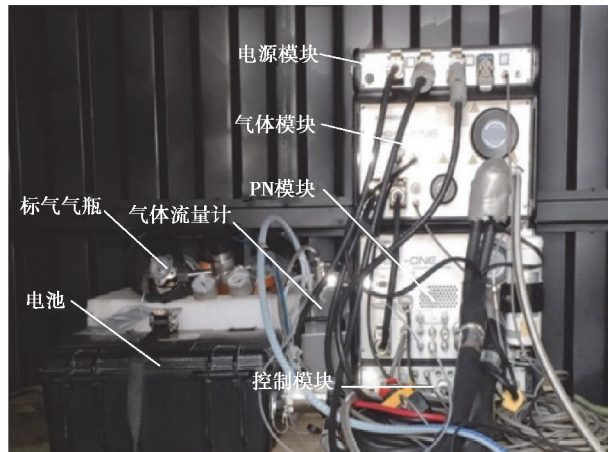


图 2 排放测试设备

Fig. 2 Emissions test equipment

1.3 试验车辆

分别对 1 辆 N2 非城市类、1 辆 N3 非城市类和 1 辆 M3 城市类客车进行 3 次 PEMS 实验,其车辆全部属于新车(总里程 $<10\,000$ km),而且每辆车都配备了满足最新国六要求后处理系统(SCR, DOC, DPF, ASC),车辆信息见表 2。

表 2 车辆信息

Table 2 Vehicles information

车辆编号	车辆类型	试验质量/t	最大功率/kW	车辆行驶里程/km	后处理方式
A 车	N2 非城市	3.6	110	5 859	SCR+DOC+DPF+ASC
B 车	N3 非城市	15.1	278	2 852	SCR+DOC+DPF+ASC
C 车	M3 城市	12.0	162	4 406	SCR+DOC+DPF+ASC

2 试验方法和排放计算

所有重型车污染物的比排放均以发动机工作输出的每千瓦时的污染物排放质量给出,与轻型车车辆覆盖的每公里的排放质量有所差异。此外,对路线不同部分的污染物(市区、市郊和高速路段)排放进行了分解,并提供了相应的比排放数据。

2.1 试验方法

车辆载荷都是采取国六法规 b 阶段车辆最大设计载荷的 10%;且在试验之前车辆已经在环境中浸车 18 h 以上,从 OBD 读取发动机冷却液温度不超过环境温度 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。利用备好的试验车辆、设备以及选择好的试验道路,在严格按照国六法规上面要求的前提下进行试验。其中包括:试验前后设备检查(设备标定)、测试最短时间要求(WHTC 循环功的 4~7 倍)、ECU 数据流要求、发动机停车采样要求等。且同一类车辆在同一道路同一时间段进行试验。

在试验过程中,同一驾驶员在满足该类型车辆的道路上前后分别进行 3 次试验:平稳驾驶、正常驾驶和激烈驾驶。其中正常驾驶表示该次试验驾驶员与平时驾驶习惯无异;平稳驾驶表示该次试验驾驶员较正常驾驶更加温和平稳;激烈驾驶表示该次试验驾驶员以更加激进的驾驶方式来驱动车辆,更多的急加速、急减速操作。

2.2 功基窗口法

在计算最终比排放时,为减少其所造成的误差,应对试验数据进行预处理。首先,要排除车辆在冷启动

阶段的数据;其次,对其不同信道的数据进行时间对齐,降低各信号之间的时间偏移。最后,对数据进行一致性检查,燃油相关性系数 R^2 必须大于等于 0.9。

功基窗口法不是对所有数据进行排放质量计算,而是对数据子集进行计算,利用 WHTC 循环功和基准试验室瞬态循环的相应结果来确定车辆的窗口。功基窗口划分完成后,对窗口有效性进行检验。有效窗口:该窗口的平均功率大于发动机最大功率的 20%,同时要求有效窗口数占总窗口的 50.00%以上,若不满足这一条件,则降低功率阈值,直到功率阈值降低到 10%。最后对各种污染物进行比排放 e_p ($g/(kW \cdot h)$ 或 $\#/(kW \cdot h)$) 计算,最后利用窗口比排放计算得出最终排放结果,与标准限值相比较来确定车辆排放是否通过。9 次试验窗口信息如表 3 所示。

表 3 车辆窗口信息

Table 3 Vehicle windows information

试验编号	循环功倍数	相关性系数 R^2	功率阈值/%	有效窗口比例/%	
A 车	Test 1	5.3	0.98	16	50.36
	Test 2	4.6	0.97	14	50.21
	Test 3	4.8	0.94	16	51.74
B 车	Test 4	5.1	0.95	20	66.18
	Test 5	5.3	0.95	20	68.33
	Test 6	4.3	0.96	20	59.43
C 车	Test 7	5.1	0.95	10	55.32
	Test 8	6.2	0.90	18	52.77
	Test 9	6.0	0.93	13	66.57

3 PEMS 试验结果分析

3.1 不同驾驶行对动力学参数的影响

为了分析驾驶行为对重型车比排放的影响,对 3 辆车分别进行了平稳、正常和激烈驾驶,并对 3 种驾驶行为下分路段和总行程的动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 进行计算。如图 3 所示,相较于平稳驾驶,A,B,C 车正常驾驶行为下动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 分别增加 8.98%,13.19%,31.69%;激烈驾驶行为下动力学参数分别增加 36.22%,43.62%,47.26%。同时从图中可以看出 N3 类车辆动力学参数分布最广泛,N2 次之,城市类车辆最小;这与 3 类车辆市区、市郊和高速路段比例有很大关系。通过对 3 辆车不同驾驶行为下行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 计算可知其试验有效,达到了区分正常驾驶和激烈驾驶行为的要求。

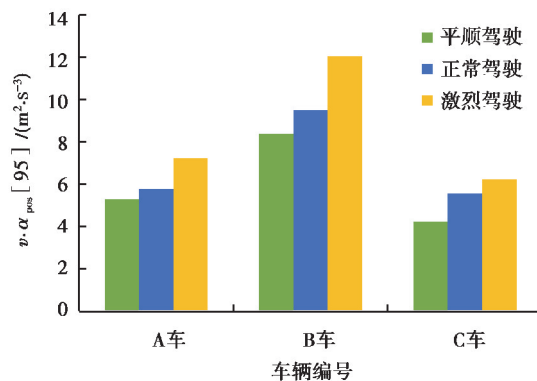


图 3 不同驾驶行为下的动力学参数

Fig. 3 Dynamic parameters under different driving behaviors

3.2 不同驾驶行为下的比排放

利用功基窗口法对每辆车比排放进行计算,如图 4 所示。从图中可以看出所试验车辆 CO 比排放与动力学参数无明显影响关系,C 车 CO 比排放反而是平稳驾驶行为下最高。但是 3 辆车的 NO_x 和 PN 排放与驾驶行为存在一定的相关性,随着驾驶行为逐渐激烈,其比排放也有一定的升高。同一辆车 3 次 PEMS 试验其每种排放物的比排放存在较大的差异,可见驾驶行为对重型车排放具有很大影响。

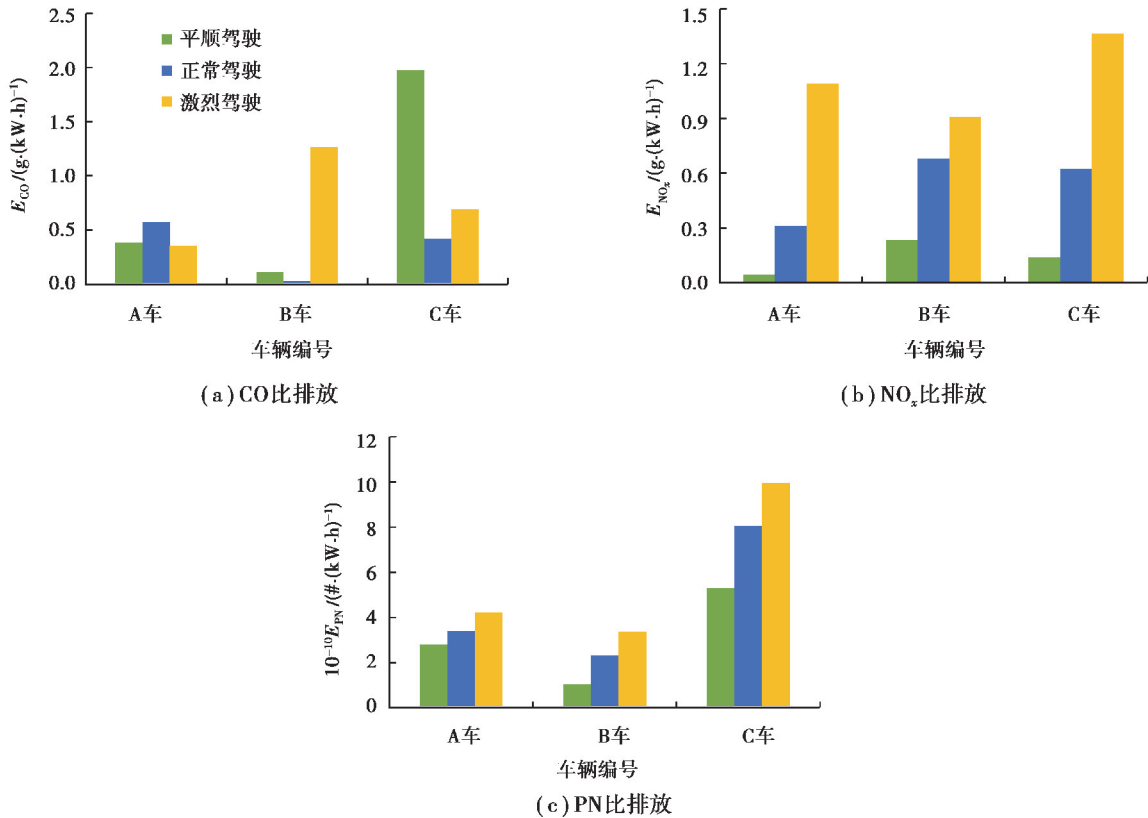


图 4 车辆比排放

Fig. 4 Emission factors of vehicles

由图 4(a)可知,Test7 试验 CO 排放最高为 $1.976 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,Test5 试验 CO 排放最低为 $0.029 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;CO 排放与车辆动力学参数无明显相关性。A 车正常驾驶较平稳驾驶、激烈驾驶较正常驾驶 CO 排放分别增加 50.41% , -37.87% ;同理 B 车分别增加 -74.05% , 42.44% ;C 车分别增加 -78.68% , 64.16% 。3 辆车 9 次试验 CO 的比排放均低于重型车国六排放限值 $6 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。由图 4(b)可知,Test9 试验 NO_x 排放最高为 $1.364 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,Test1 排放最低为 $0.043 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。其中 A 车正常驾驶较平稳驾驶、激烈驾驶较正常驾驶 NO_x 排放分别增加 621.10% , 250.70% ,同理 B 车分别增加 191.40% , 33.73% ,C 车分别增加 350.50% , 119.20% 。由图 4(c)可知,Test9 试验 PN 排放最高为 $9.95 \times 10^{10} \# /(\text{kW} \cdot \text{h})$,Test3 试验最小为 $1.04 \times 10^{10} \# /(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。A 车正常驾驶较平稳驾驶、激烈驾驶较正常驾驶 PN 排放分别增加 21.26% , 24.84% ;同理 B 车分别增加 122.40% , 45.34% ;C 车分别增加 52.46% , 23.60% 。9 次试验 PN 比排放均低于国六标准限值 $1.2 \times 10^{12} \# /(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

3.3 行程动力学参数与比排放的相关性

3.3.1 CO 随 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95] 变化关系

CO 分路段和总行程的比排放随 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95] 变化关系如图 5 所示,图中小图标为车辆的各个分路段的排放数据,大图标为每辆车 3 次总行程的排放数据。由图 5 可知,B 车、C 车不管是正常驾驶还是激烈驾驶,其

CO 和 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 相关性均不明显,线性相关系数 R^2 均在 0.227 7 以下。A 车线性相关系数较 B 车、C 车好,为 0.635 1,但是 3 辆车总体上 CO 与动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 相关性不明显。

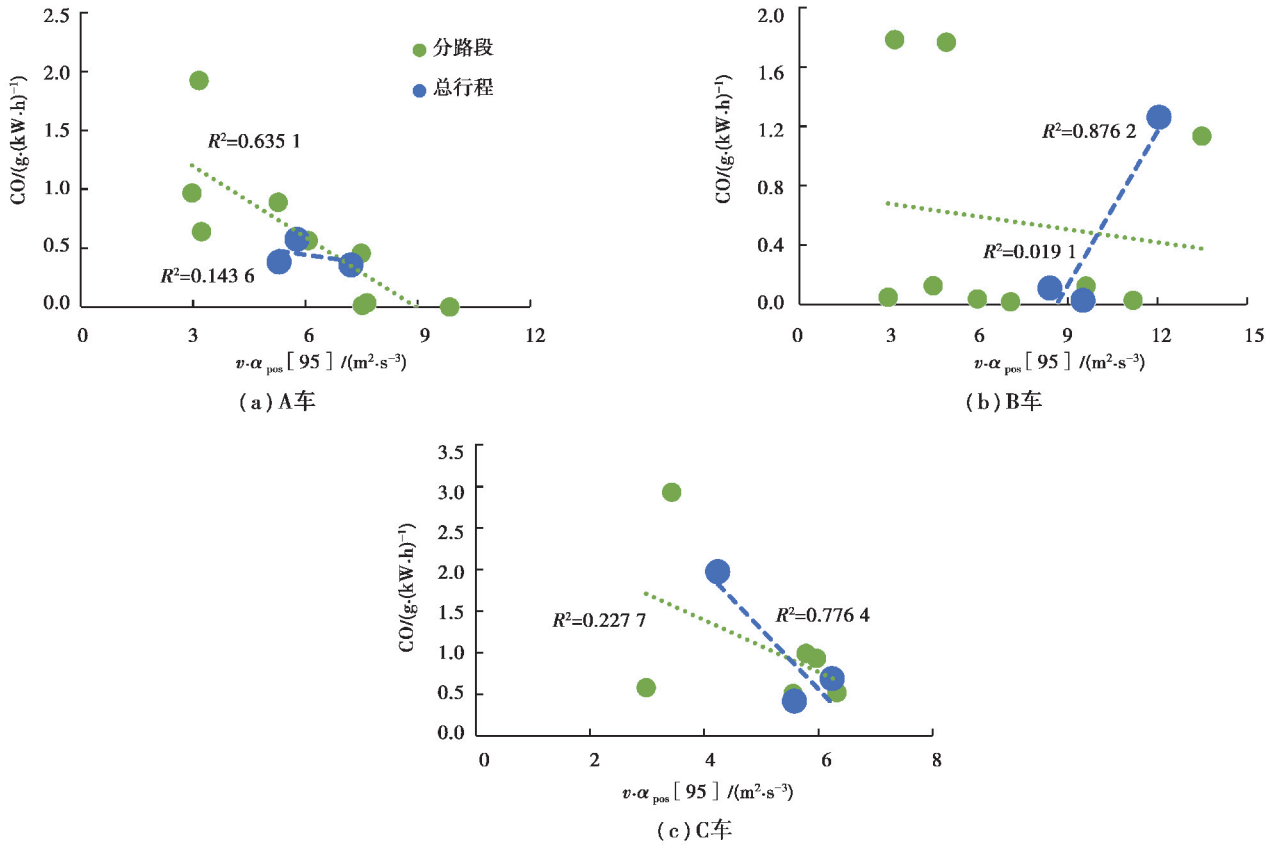


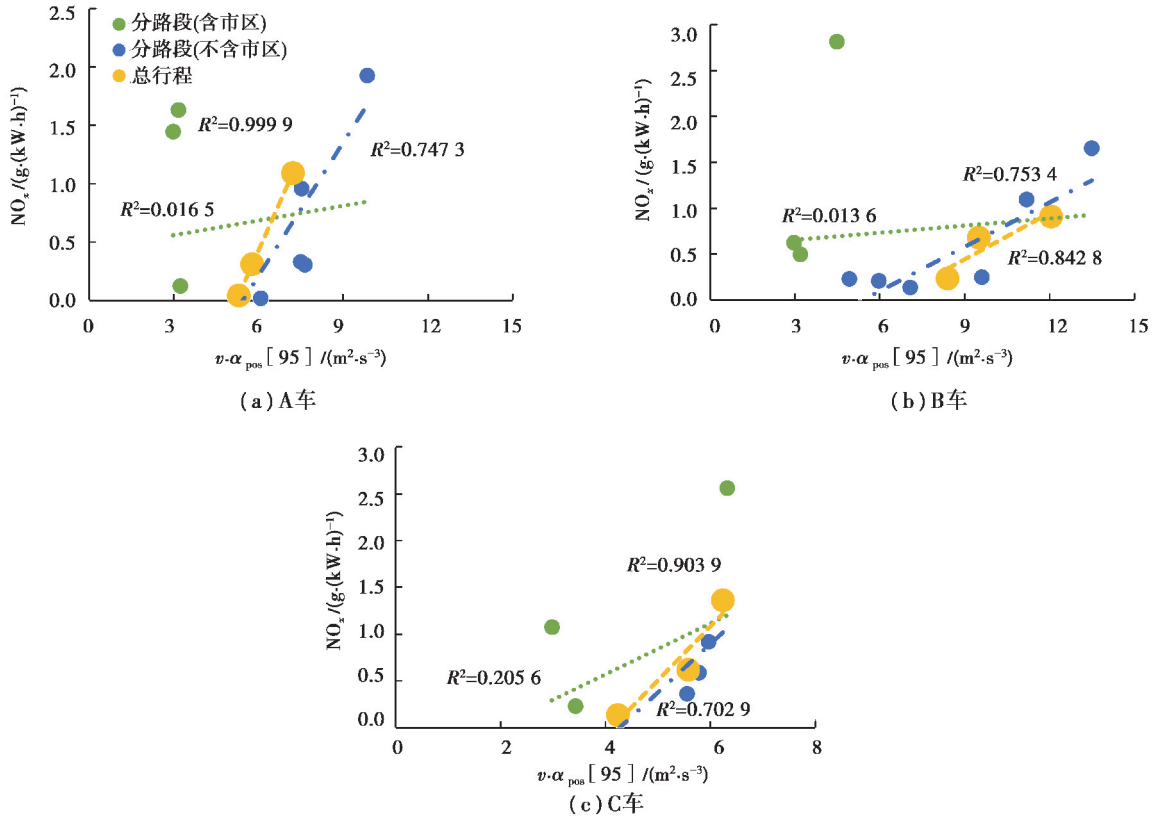
图 5 CO 随 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 变化关系

Fig. 5 Relationship between CO and $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$

由图 5(a)可知,A 车各个路段相关系数为 0.635 1,总体上呈现 CO 随着动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 增大而减小,但是其相关性并不明显。图 5(b)可知,在平稳驾驶、正常驾驶时 CO 呈现较低的排放量,但是激烈驾驶时 CO 排放迅速增加;且 B 车 CO 随 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 的一致性最差,其相关系数为 0.019 1。由图 5(c)可知,C 车 CO 比排放随 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 还具有一定的连续性。不管是正常驾驶还是激烈驾驶,CO 随着 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 增加而下降。从平稳到激烈驾驶总行程比排放也有所下降,但是其相关系数仅为 0.227 7。产生这种现象的原因与 CO 产生机理和柴油机的燃烧方式有关,柴油机多是富氧燃烧,而 CO 产生多为缺氧环境,所以其导致 CO 排放与动力学参数相关不明显。

3.3.2 NO_x 随 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 变化关系

计算得到总行程和各个分路段的 NO_x 比排放随 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 变化关系如图 6 所示。由图可知,3 车辆 NO_x 比排放在包含市区路段的情况下其分路段没有明显的相关性,但是在排除市区路段数据后其相关性上升迅速,均有较强的相关性。同一车辆在不同驾驶行为下试验时 NO_x 随 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 变化相关性都很好,相关性最低的 C 车正常驾驶行为下也达到了 0.702 9。总体上,3 辆车随着动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 增加,NO_x 都呈现增加趋势;NO_x 对 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 的敏感性由高到低依次为 C 车、A 车、B 车。同时 3 辆车总行程的 NO_x 比排放随 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 增加而增加的趋势同不含市区的分路段相近,而包含市区路段与总行程则没有明显的相关性。

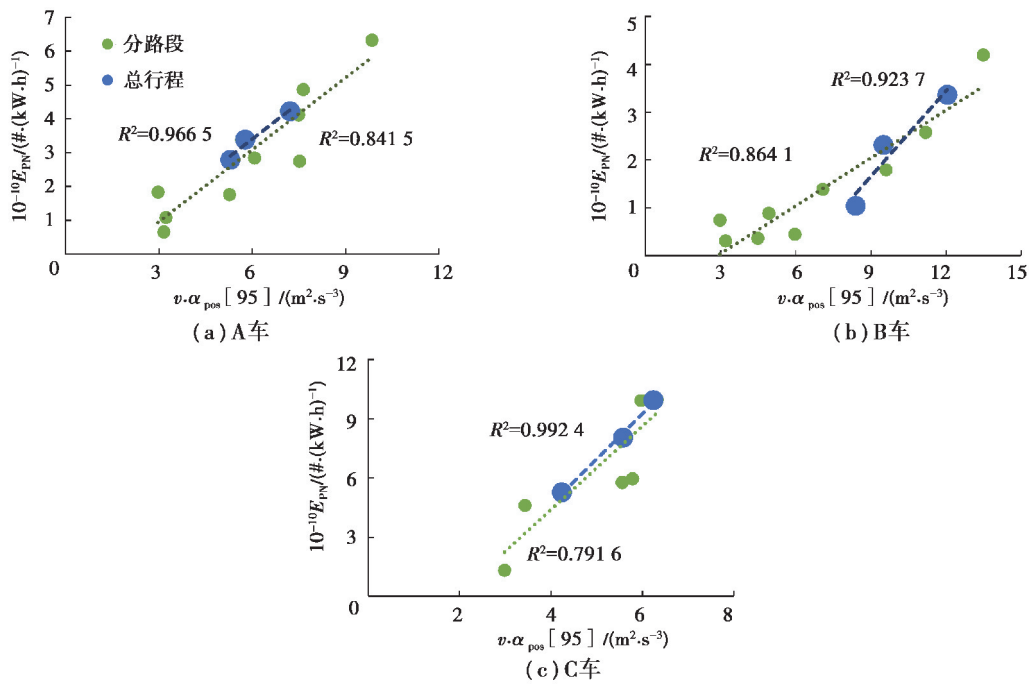
图 6 NO_x 随 $v \cdot a_{pos} [95]$ 变化关系Fig. 6 Relationship between NO_x and $v \cdot a_{pos} [95]$

由图 6(a)可知,A 车不含市区分路段 NO_x 比排放与 $v \cdot a_{pos} [95]$ 相关性为 0.747 3,总路段相关性更是达到 0.999 9,但是包含市区路段其相关性仅为 0.016 5。由图 6(b)可知,B 车不含市区分路段 NO_x 与动力学参数 $v \cdot a_{pos} [95]$ 相关性为 0.753 4,总行程相关性更是达到了 0.842 8,但是包含市区分路段相关性不明显。由图 6(c)可知,C 车不含市区分路段 NO_x 排放与动力学参数 $v \cdot a_{pos} [95]$ 相关性为 0.702 9,总行程相关性更是达到 0.903 9,但是包含市区路段相关性仅为 0.205 6。 NO_x 和 PN 比排放是重型车排放物里最难控制的两类污染物^[18-20]。出现市区路段 NO_x 排放明显高于市郊、高速路段的情况,因此怎样减小 NO_x 的排放和优化后处理控制策略,给开发和标定工作增加了一定的难度。

3.3.3 PN 随 $v \cdot a_{pos} [95]$ 变化关系

计算得到总行程和各个分路段 PN 比排放随动力学参数 $v \cdot a_{pos} [95]$ 变化关系如图 7 所示。由图中可知,3 辆车在不同驾驶行为下试验时 PN 随 $v \cdot a_{pos} [95]$ 变化具有强相关性;最低的 C 车为 0.791 6,B 车相关性最高为 0.864 1,A 车次之为 0.841 5。A,B,C 车在 3 种驾驶行为下 PN 均随着 $v \cdot a_{pos} [95]$ 增加而增加。

由图 7(a)可知,A 车总行程 PN 排放随动力学参数 $v \cdot a_{pos} [95]$ 相关性系数为 0.966 5,分路段的相关性系数为 0.841 5。由图 7(b)可知,B 车总行程 PN 排放随 $v \cdot a_{pos} [95]$ 相关性系数为 0.923 7,分路段相关性系数为 0.864 1。由图 7(c)可知,C 车总行程 PN 排放随 $v \cdot a_{pos} [95]$ 相关性系数为 0.992 4,分路段相关性系数为 0.791 6。由此可知,重型车 PN 排放与 $v \cdot a_{pos} [95]$ 具有明显强相关性,且总行程和分路段 PN 比排放对 $v \cdot a_{pos} [95]$ 敏感性相近。

图 7 PN 随 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 变化关系Fig. 7 Relationship between PN and $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$

4 结 论

严格按照国六重型车排放标准,对 3 辆重型车分别进行了平稳驾驶、正常驾驶和激烈驾驶 9 次实验,通过计算得出以下结论:

1)相较于平稳驾驶,正常驾驶和激烈驾驶行为使得总行程 NO_x 排放 A 车分别增加 621.10%,250.70%,B 车分别增加 191.40%,33.73%,C 车分别增加 350.50%,119.20%;总行程 PN 排放 A 车分别增加 21.26%,24.84%,B 车分别增加 122.40%,45.34%,C 车分别增加 52.46%,23.60%。

2)CO 比排放与车辆动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 明显不相关;相关性最好的 A 车其相关系数仅为 0.635 1,最差的 B 车相关系数为 0.019 1,其次 C 车相关性为 0.227 7。

3)包含市区路段 NO_x 比排放与车辆动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 相关性不明显,但在市郊和高速路段 NO_x 排放存在较强相关性,相关性从高到低依次为 B 车 0.753 4,A 车 0.747 3,C 车 0.702 9。

4)PN 比排放与车辆动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}} [95]$ 存在强相关性,相关性最好的 B 车其相关系数为 0.864 1,A 车次之为 0.841 5,C 车相关性最差为 0.791 6。

当前国六重型车排放法规中并未对其行程动力学进行一定的规范和校验。通过对 3 种驾驶行为下实际道路排放物的分析可知,其行程动力学对重型车排放尤其是 NO_x 和 PN 的影响不容忽视。故在下一步法规修订过程中,应该充分考虑车辆行程动力学参数对试验结果的影响。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2019[M]. 北京: 中国统计出版社, 2019.
National Bureau of Statistics.China Statistical Yearbook 2019[M]. Beijing: China Statistics Press, 2019. (in Chinese)
- [2] Ligterink N E, Tavasszy L A, de Lange R. A velocity and payload dependent emission model for heavy-duty road freight transportation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012, 17(6): 487-491.
- [3] Velders G J M, Geilenkirchen G P, de Lange R. Higher than expected NO_x emission from trucks may affect attainability of NO_2 limit values in the Netherlands[J]. Atmospheric Environment, 2011, 45(18): 3025-3033.
- [4] 葛蕴珊, 王爱娟, 王猛, 等. PEMS 用于城市车辆实际道路气体排放测试[J]. 汽车安全与节能学报, 2010, 1(2): 141-145.
Ge Y S, Wang A J, Wang M, et al. Application of portable emission measurement system (PEMS) on the emission

- measurements of urban vehicles on-road[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2010, 1(2): 141-145. (in Chinese)
- [5] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 中华人民共和国国家标准: 重型柴油车污染物排放限值及测量方法 GB 17691—2018[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. National Standard (Mandatory) of the People's Republic of China: Limits and measurement methods for emissions from diesel fuelled heavy-duty vehicles (CHINA VI). GB 17691—2018[S]. Beijing: China Environment Science Press, 2018. (in Chinese)
- [6] 葛蕴珊, 丁焰, 尹航. 机动车实际行驶排放测试系统研究现状[J]. *汽车安全与节能学报*, 2017, 8(2): 111-121.
Ge Y S, Ding Y, Yin H. Research status of real driving emission measurement system for vehicles[J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2017, 8(2): 111-121. (in Chinese)
- [7] 郭勇, 李博, 颜燕, 等. 环境温度对重型柴油车整车排放影响研究[J]. *小型内燃机与车辆技术*, 2019, 48(3): 64-67.
Guo Y, Li B, Yan Y, et al. Research on the influence of ambient temperature on heavy duty diesel vehicles emission[J]. *Small Internal Combustion Engine and Vehicle Technique*, 2019, 48(3): 64-67. (in Chinese)
- [8] Chong H S, Park Y, Kwon S, et al. Analysis of real driving gaseous emissions from light-duty diesel vehicles[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, 65: 485-499.
- [9] 马志成, 付铁强, 戴春蓓, 等. 海拔对轻型柴油车实际驾驶排放的影响[J]. *车用发动机*, 2017(4): 84-87, 92.
Ma Z C, Fu T Q, Dai C B, et al. Effects of altitude on real driving emission of light-duty diesel vehicle[J]. *Vehicle Engine*, 2017(4): 84-87, 92. (in Chinese)
- [10] 宋彬, 葛蕴珊, 尹航, 等. 行驶动力学参数对 RDE 实验结果的影响研究[J]. *汽车工程*, 2018, 40(4): 389-395, 442.
Song B, Ge Y S, Yin H, et al. A study on the effects of driving dynamics parameters on the results of RDE test[J]. *Automotive Engineering*, 2018, 40(4): 389-395, 442. (in Chinese)
- [11] 杜宝程, 张运, 耿杨涛, 等. 驾驶风格对轻型汽油车实际行驶污染物排放的影响研究[J]. *内燃机与配件*, 2019 (17): 13-15.
Du B C, Zhang Y, Geng Y T, et al. Study on the influence of driving style on the real driving emissions of light-duty gasoline vehicles[J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2019 (17): 13-15. (in Chinese)
- [12] 杜宝程, 张运, 耿杨涛, 等. 平均正加速度对轻型汽油车实际行驶污染物排放的影响研究[J]. *节能*, 2019, 38(9): 152-154.
Du B C, Zhang Y, Geng Y T, et al. Study on the effect of average positive acceleration on the emission of pollutants from light-duty gasoline vehicles[J]. *Energy Conservation*, 2019, 38(9): 152-154. (in Chinese)
- [13] 李岳兵, 杜宝程, 张运, 等. 国六排放法规对 RDE 试验中驾驶行为激烈程度评判的有效性分析[J]. *重庆大学学报*, 2019, 42(6): 26-33.
Li Y B, Du B C, Zhang Y, et al. Validity analysis of China-6 emission regulation on judging the fierceness of driving behavior in RDE test[J]. *Journal of Chongqing University*, 2019, 42(6): 26-33. (in Chinese)
- [14] 杨长志, 杜宝程, 李岳兵, 等. 行程动力学参数与污染物排放特性的相关性分析[J/OL]. *重庆大学学报*, 2019: 1-13 [2020-01-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20191017.1330.002.html>.
Yang C Z, Du B C, Li Y B, et al. Correlation analysis of driving dynamics parameters and RDE characteristics[J/OL]. *Journal of Chongqing University*, 2019: 1-13. (in Chinese)
- [15] Luján J M, Bermúdez V, Dolz V, et al. An assessment of the real-world driving gaseous emissions from a Euro 6 light-duty diesel vehicle using a portable emissions measurement system (PEMS)[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, 174: 112-121.
- [16] Varella R A, Faria M V, Mendoza-Villafuerte P, et al. Assessing the influence of boundary conditions, driving behavior and data analysis methods on real driving CO₂ and NO_x emissions[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 658: 879-894.
- [17] Gallus J, Kirchner U, Vogt R, et al. Impact of driving style and road grade on gaseous exhaust emissions of passenger vehicles measured by a Portable Emission Measurement System (PEMS)[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 52: 215-226.
- [18] Grigoratos T, Fontaras G, Giechaskiel B, et al. Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, 201: 348-359.
- [19] Bishop J D K, Molden N, Boies A M. Using portable emissions measurement systems (PEMS) to derive more accurate estimates of fuel use and nitrogen oxides emissions from modern Euro 6 passenger cars under real-world driving conditions[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 942-973.
- [20] Guo J D, Ge Y S, Hao L J, 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.