

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.220

行程动力学参数与污染物排放特性的相关性分析

杨长志¹, 杜宝程^{1,2}, 李岳兵¹, 向 橄², 冉林尧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:为了探讨行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 和 RPA(relative positive acceleration)对轻型汽油车在实际行驶排放试验(RDE, real driving emission)中排放特性的影响,采用 OBS-ONE 便携式车载排放测试系统(PEMS, portable emission measure system)对3辆国VI轻型汽油车进行了平顺、正常和激烈3种驾驶行为的实际行驶排放试验,计算各路段的窗口行程动力学参数和法规规定的行程动力学参数,并与各污染物排放特性的相关性进行对比分析。结果表明:相比法规规定的行程动力学参数,窗口的行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 和 RPA 与3辆车的CO、PN排放因子有更强的相关性,在市区、市郊和高速路段下的相关系数波动幅度分别下降25%~44%、38%~64%和73%~96%,且NO_x排放因子只与窗口的RPA有较强的相关性。其结论是窗口的行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 和 RPA 与污染物排放因子的相关性更加明显,能更好地反映不同驾驶行为下各污染物的排放水平。

关键词:轻型汽油车;实际行驶排放;驾驶行为;行程动力学参数;相关性

中图分类号:U467.1

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2021)07-014-12

Correlation analysis of driving dynamic parameters and RDE characteristics

YANG Changzhi¹, DU Baocheng^{1,2}, LI Yuebing¹, XIANG Gan², RAN Linyao², 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: To explore the influence of $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ and relative positive acceleration(RPA) on emission characteristics of gasoline duty vehicles in the real driving emission (RDE) test, RDE emission tests are carried out on three China VI light gasoline vehicles using the OBS-ONE Portable Emission Measure System (PEMS) under smooth, normal and rough driving behaviors. Window travel dynamic parameters and section travel dynamic parameters are calculated and the correlation between the dynamic parameters and pollutant emission characteristics is analyzed. The results show that the fluctuation range of the window travel dynamic parameters $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ and RPA correlation coefficients with CO and PN emission factors of the three vehicles is significantly reduced compared with the travel dynamic parameters prescribed by the regulations. The fluctuation range is 25%-44%, 38%-64% and 73%-96% in urban, rural and

收稿日期:2019-08-08 网络出版日期:2019-10-17

基金项目:重庆市技术创新与应用发展专项面上项目(cstc2019jcsx-msxmX0016)。

Supported by Chongqing Technology Innovation and application development special support project (cstc2019jcsx-msxmX0016).

作者简介:杨长志(1992—),男,硕士研究生,主要从事轻型汽油车整车排放测试与控制研究,内燃机燃烧测试与控制研究。

通讯作者:张力,男,教授,博士生导师,(E-mail)cqucl@163.com。

motorway respectively. Moreover, the NO_x emission factor is only strongly correlated with the RPA of the window. Therefore, it can be concluded that the correlation between the window travel dynamic parameters $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ and RPA and pollutant emission factors is more obvious, which can better reflect the emission levels of pollutants under different driving behaviors.

Keywords: light duty gasoline vehicle; real driving emissions (RDE); driving style; dynamic parameters; correlation

随着中国经济的快速发展,全国机动车保有量至2019年已达2.07亿辆^[1],机动车尾气排放对城市空气质量带来了巨大压力^[2-4]。为此,中国将在2020年全面实施《轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)》排放法规。由于车辆单一的实验室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WLTC(world light duty test cycle)测试循环作为补充测试程序^[5]。

在实际行驶排放试验中,通过使用车载尾气检测装置(PEMS, portable emission measurement system)设备来测量车辆在实际道路的真实排放水平。但实际行驶排放结果受道路坡度^[6]、环境温度^[7]和驾驶员的驾驶行为^[8]等条件影响较大,其中驾驶员的驾驶行为和车辆的行程动力学参数对排放结果的影响最明显^[9]。目前国内学者对驾驶行为和行程动力学参数对排放结果的影响进行了相关研究,王勃等^[10]研究了驾驶行为对法规要求窗口的适应性并提出了实际驾驶需要满足的窗口条件的试验方案;程亮等^[11]研究了高海拔条件下不同驾驶行为的RPA(robotic process automation)对实际行驶污染物排放的影响,结果表明,CO和PN排放随RPA值的变化无明显变化规律, NO_x 和 CO_2 排放量与RPA值呈正相关;宋彬等^[12]研究在不同驾驶行为下 NO_x 、CO和PN污染物随 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ (车速大于 0.1 m/s^2 的正加速度的乘积的第95个百分位)和RPA的变化关系,结果表明, NO_x 和PN排放量与车辆行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 和RPA具有明显的相关性,而CO排放量与行程动力学参数之间相关性不明显;耿杨涛等^[13]利用动力学参数来量化不同驾驶行为,并对各动力学参数与车辆实际排放污染物的关系进行了相关性分析。国外学者Varella等^[14]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^[15]利用动力学参数来区分不同驾驶行为并利用WLTC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。目前国内外学者对驾驶行为和行程动力学参数的研究中,主要关注各个路段的动力学特性对污染物排放的影响,而不同路段下的动力学参数与污染物排放水平的相关性波动较大,无法真实反映污染物的排放水平的问题,为此,提出了从窗口层面分析动力学特性对各污染物排放的影响。

笔者在符合法规要求的测试路线上,采用日本HORIBA公司的PEMS测试系统对3辆国VI轻型汽油车在不同驾驶行为下进行9次实际行驶排放试验,并分别对各路段的窗口行程动力学参数和法规规定的行程动力学参数与污染物排放特性的相关性进行了深入的对比分析。

1 试验方案

1.1 试验车辆

本次试验按照国VI法规RDE(real driving emission)测试要求,使用3辆满足国VI排放法规的轻型汽油车,其排气后处理均配备三元催化器,车辆主要技术参数如表1所示。

表1 测试车辆主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of test vehicles

车辆序号	发动机排量/L	进气方式	最大功率/kW	供油方式	整备质量/kg	行驶里程/km
A	2.0	涡轮增压	180	缸内直喷	2 060	11 464
B	1.5	自然吸气	80	多点电喷	1 235	7 430
C	2.0	涡轮增压	137	歧管喷射+缸内直喷	1 685	9 863

1.2 试验设备

试验采用的设备为 HORIBA 公司的 OBS-ONE 便携式排放测试系统,主要由气体分析模块、颗粒物计数模块、排气流量计、全球定位系统(GPS, global positioning system)、气象站、与电控单元连接模块和电源组成。气体分析模块采用不分光红外线吸收型分析仪测量 CO 和 CO₂ 浓度,化学发光型分析仪测量 NO_x 浓度,颗粒物计数模块采用凝聚粒子计数法测量颗粒物的数量。排气流量计安装在排气管上测量排气体积流量,GPS 安装在车顶上用于测量汽车行驶速度和海拔高度,气象站同样安装在车顶上以测量环境温度、大气湿度和大气压力。测试系统在车辆上的布置示意图如图 1 所示。为了不影响车辆正常工作状态,保证测试结果的准确性,采用独立电源为主分析单元、排气流量计等设备供电。图 2 所示为装有 PEMS 的测试车辆和 RDE 测试车辆。

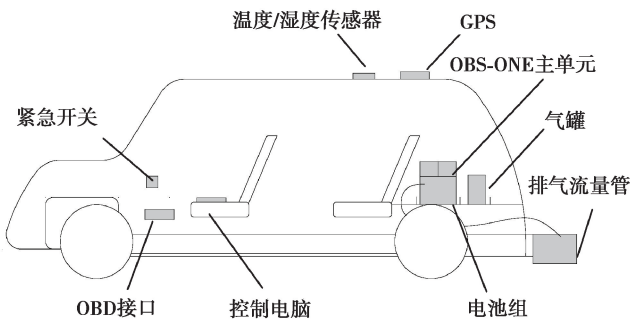


图 1 PEMS 在车辆上的布置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of PEMS on the vehicle arrangement



图 2 装有 PEMS 的 RDE 测试车辆

Fig. 2 RDE test vehicles with PEMS

1.3 试验路线

根据法规测试规程,在重庆市选择了符合 RDE 实验要求的测试路线,按照市区—市郊—高速路段的顺序连续进行。其中市区路段占总试验路程的 31.1%、市郊路段和高速路段都占总试验路程 31.3%和 37.6%。试验车辆在上述 3 个路段最小行驶距离均为 16 km,整个试验持续时间保持在 90~120 min,试验开始点和结束点之间的海拔高度差不超过 100 m,且累计正海拔高度增量为 613.1 m/100 km;海拔高度在 205.8 ~ 380.3 m,满足 RDE 法规要求(<700 m)。每个工况规定的行驶速度为:市区行驶车速在 60 km/h 以下;市郊行驶车速在 60 km/h 和 90 km/h 之间;高速路段行驶车速大于 90 km/h。

测试路线选择在重庆市双福新区和绕城高速进行,其中市区工况:双福大酒店—创业大道—祥福大道—双福北互通。市郊工况:双福北互通—重庆绕城高速。高速工况:重庆绕城高速—支坪—返回在适当位置停车,试验测试路线如图 3 所示。

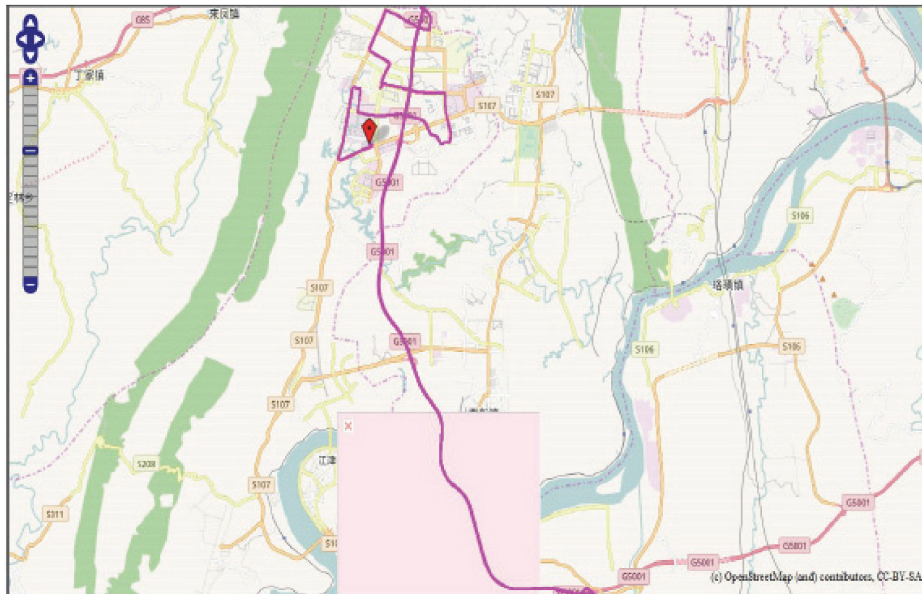


图3 RDE 试验路线图

Fig. 3 Routes for RDE test

2 数据处理

2.1 CO₂ 移动平均窗口法

2.1.1 数据预处理

由于试验用的 PEMS 设备 OBS-ONE 所附带软件具有时间校对功能,在数据输出时可以消除排气流量、污染物浓度、车速和其他瞬态数据等主要参数的时间延迟。同时,按法规要求,在使用移动平均窗口法对污染物的数据处理时需要将试验过程中的冷启动、车辆地面速度小于 1 km/h 和发动机熄火时的排放数据进行剔除。

2.1.2 窗口的划分

根据国 VI 法规规定,在用 CO₂ 移动平均窗口法对设备所得的瞬时排放数据进行 RDE 计算时,要对窗口进行划分,将所测得的瞬时排放数据分割成若干个数据窗口来计算各污染物的总排放量。其划分方法为:以车辆 WLTC 测试循环工况的 CO₂ 排放总质量的 1/2 为参照值,从前往后的数据点逐秒对 CO₂ 排放量依次进行累加,直至 CO₂ 排放量的累加值大于或等于参照值,此时记为第一个窗口,依次往后划分若干个窗口。

2.1.3 窗口完整性与正常性验证

在对窗口划分结束后,要对窗口进行完整性和正常性验证。完整性验证:市区、市郊和高速路段的窗口数量要占总窗口的 15% 以上,9 次 RDE 试验均满足完整性验证。正常性验证:以“CO₂ 特性曲线”的基本公差带作为对各窗口评判标准来验证其正常性,如图 4 所示, P_1 、 P_2 和 P_3 的参数相连即组成该车的 CO₂ 特性曲线,其不规则曲线为该车 RDE 试验在公差带内的 CO₂ 窗口。窗口平均速度小于 45 km/h 为市区窗口,介于 45 km/h 和 80 km/h 为市郊窗口,高于 80 km/h 为高速窗口。若市区、市郊和高速路段的窗口,其 50% 以上都在 CO₂ 特性曲线所定义的基本公差带 ($\pm 25\%$) 范围内时,则窗口满足正常性验证,9 次 RDE 试验均满足正常性验证。窗口完成验证后,通过各窗口的加权系数得到各路段各污染物的加权排放量,最后按照市区 0.34、市郊 0.33 以及高速 0.33 对每个路段的各污染物加权排放量进行加权计算后得到总行程的最终排放结果。

2.2 行程动力学参数校验及计算

2.2.1 行程动力学校验

根据法规要求,进行 RDE 试验时首先需要进行动力学校验,以评估市区、市郊和高速路段是否存在动力学不足或过度。其中,RPA 用来评价试验过程中是否存在动力学不足, $v \cdot a_{pos}[95](m^2/s^3)$ 用来评价试验过

程是否存在动力学特性过度。

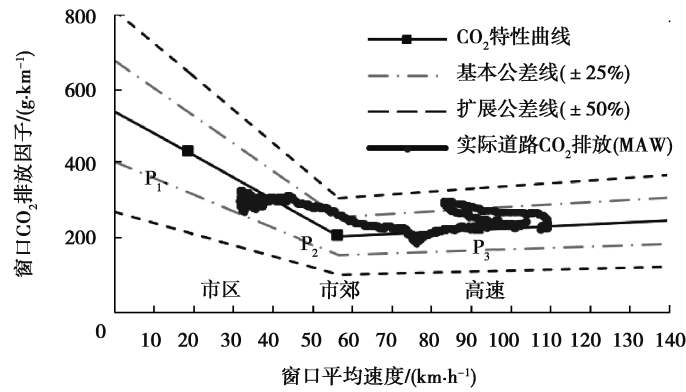


图4 CO₂特性曲线图

Fig. 4 CO₂ characteristic curve

RPA 用来衡量测试过程中驾驶行为的平顺程度。根据法规要求,评判标准如下:如果 $\bar{v}_k \leq 94.05$ km/h, $RPA_k < (-0.0016\bar{v}_k + 0.1775)$,行程无效;如果 $\bar{v}_k > 94.05$ km/h, $RPA_k < 0.025$,行程无效。

$v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 用来衡量试验过程中驾驶行为的激烈程度。其评判标准如下:如果 $\bar{v}_k \leq 74.6$ km/h, 并且 $v \cdot a_{\text{pos}}[95] > (0.136 \cdot \bar{v}_k + 14.44)$,行程无效;如果 $\bar{v}_k > 74.6$ km/h, 并 $(v \cdot a_{\text{pos}}[95]) > (0.0742 \cdot \bar{v}_k + 18.966)$,行程无效。如图5为试验中各路段的RPA和 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 验证图。由图5可知,9次RDE试验中各路段的RPA和 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 均满足法规要求,能够通过法规行程动力学校验。

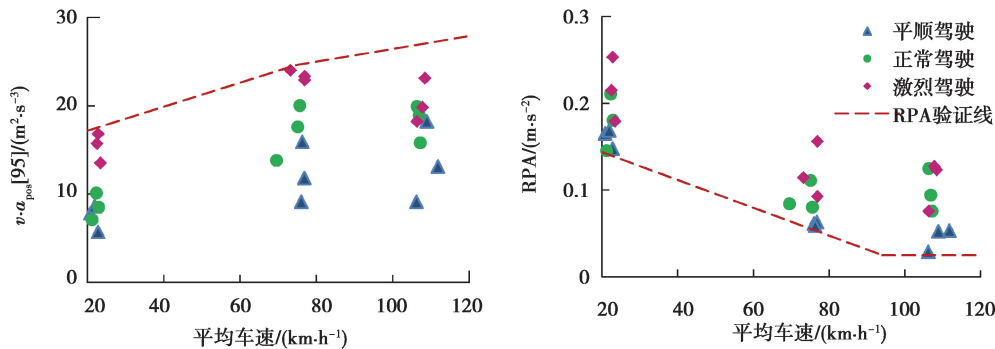


图5 动力学参数校验图

Fig. 5 Verification diagram of dynamic parameters

2.2.2 窗口行程动力学计算

由于法规规定的行程动力学参数在各路段的动力学参数的数据量不足,且与污染物排放相关性波动较大,不能较好地反映污染物的排放水平^[16]。因此,对各路段动力学参数进行窗口细化,从窗口层面来分析行程动力学参数对各污染物排放的影响。参照法规中行程动力学参数的计算方法计算出各窗口的动力学参数。利用python工具作为数据处理平台,按照法规计算 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 的方法计算出各窗口的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 值,然后对不同路段的上千个窗口数据均以 $2 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 为间隔进行分组,并计算出各组数据中各污染物的平均排放因子及平均 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 值。同时,按照相同方法计算出窗口的RPA,然后对不同路段下的上千个窗口数据均以 $0.01 \text{ m}/\text{s}^2$ 为间隔进行分组,计算出各组数据的污染物平均排放因子及平均RPA值。

3 RDE 试验结果与讨论

3.1 不同驾驶行为对动力学参数的影响

为了分析不同驾驶行为对行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 和 RPA 的影响,利用3辆满足国VI排放法规要求

的轻型汽油车分别进行平顺、正常和激烈驾驶行为,同时分别计算出不同驾驶行为下的 $v \cdot a_{pos}$ [95]和 RPA 值。由图 6 可见,行程动力学参数 $v \cdot a_{pos}$ [95]和 RPA 在不同的驾驶行为下有很明显的差异,即随着驾驶激烈程度的增加,行程动力学参数的数值逐渐增大。相比平顺驾驶,正常驾驶的 $v \cdot a_{pos}$ [95]和 RPA 平均增长幅度达 51%和 57%;激烈驾驶的 $v \cdot a_{pos}$ [95]和 RPA 平均增长幅度达 120%和 100%。

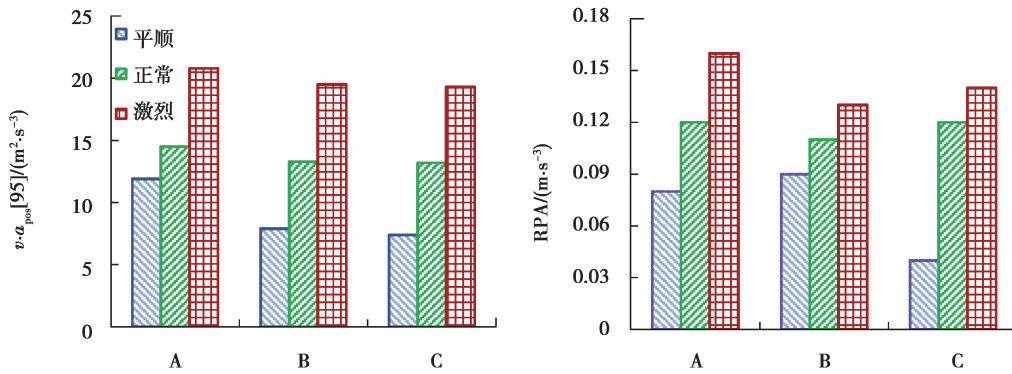


图 6 不同驾驶行为下的动力学参数

Fig. 6 Dynamic parameters under different driving behaviors

3.2 不同驾驶行为下的污染物排放结果

根据 RDE 法规排放要求,用 CO₂ 移动平均窗口法对不同驾驶行为的 3 辆车的 PN、NO_x 和 CO 排放进行计算,得到结果如图 7 所示。由国 VI 法规规定 RDE 试验结果的市区行程和总行程污染物排放均不得超过 I 型试验排放限值与符合性因子(conformity factor, CF)的乘积,其中 CF_(NO_x) = CF_(PN) = 2.1, CF(CO) 暂为待定项。由此可知,9 次 RDE 试验污染物排放水平均低于法规规定的排放限值。由图 7 可见,CO、NO_x (除了 B 车外)和 PN 排放量随驾驶的激烈程度越大,排放量越高。相比正常驾驶,激烈驾驶导致了 PN 排放量增加了 59%~382%,NO_x 的排放量增加了 10%~82%,CO 的排放量增加了 71%~504%。

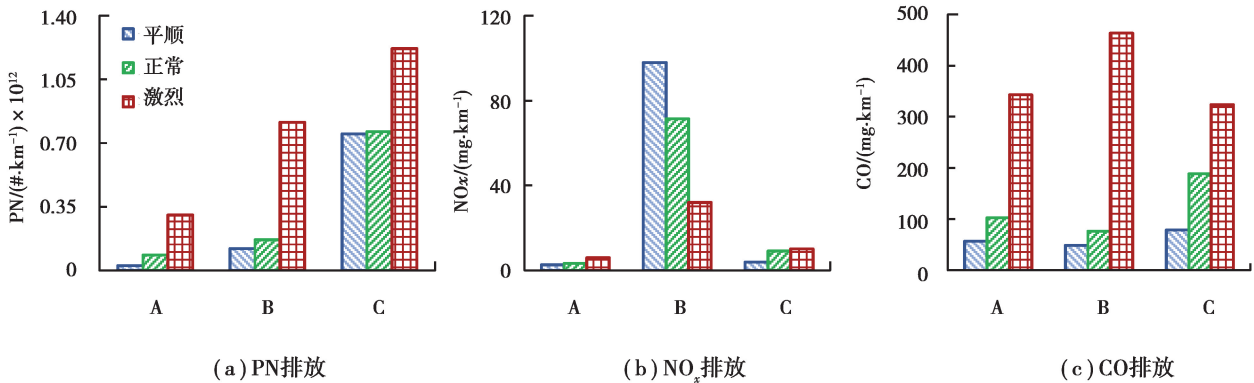


图 7 不同驾驶行为下各污染物排放结果

Fig. 7 Emission of pollutants under different driving behaviors

3.3 2 种 $v \cdot a_{pos}$ [95]与污染物排放相关性对比

3.3.1 2 种 $v \cdot a_{pos}$ [95]与 CO 排放相关性对比

为了分析窗口和路段的行程动力学与污染物排放的相关性,对 3 辆轻型汽油车进行不同驾驶行为的 RDE 试验,对比不同路段窗口行程动力学参数和法规的行程动力学参数与污染物排放因子的相关性。

图 8 为市区、市郊和高速路段下窗口和法规的 $v \cdot a_{pos}$ [95]与 CO 排放因子相关性对比分布图。

由图 8 可见,在市区路段下,C 车的 CO 排放因子与 2 种 $v \cdot a_{pos}$ [95]呈负相关性,都无法反应市区的 CO 排放水平。在市郊路段下,3 辆车的 CO 排放因子与窗口 $v \cdot a_{pos}$ [95]有较明显的相关性,平均相关系数达到 0.76;但与法规的 $v \cdot a_{pos}$ [95]相关性较差,其相关系数的波动幅度较大,不能较好地反映其相关性。在高速

路段下,3 辆车的 CO 排放因子与窗口 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 保持很好的正相关性;但路段的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 与 B 车的 CO 排放因子呈负相关,无法反应高速路段的排放水平。综上,对比法规的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$,窗口的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 能更好地反映 CO 的排放水平。

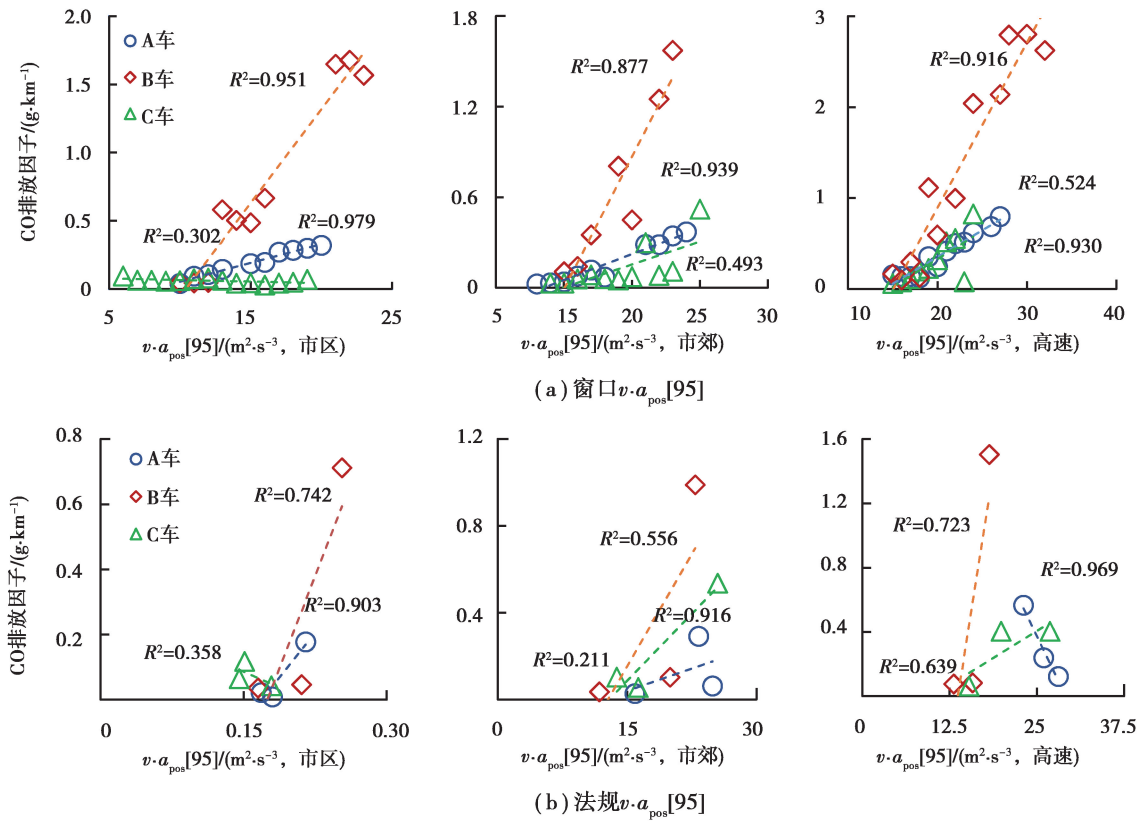
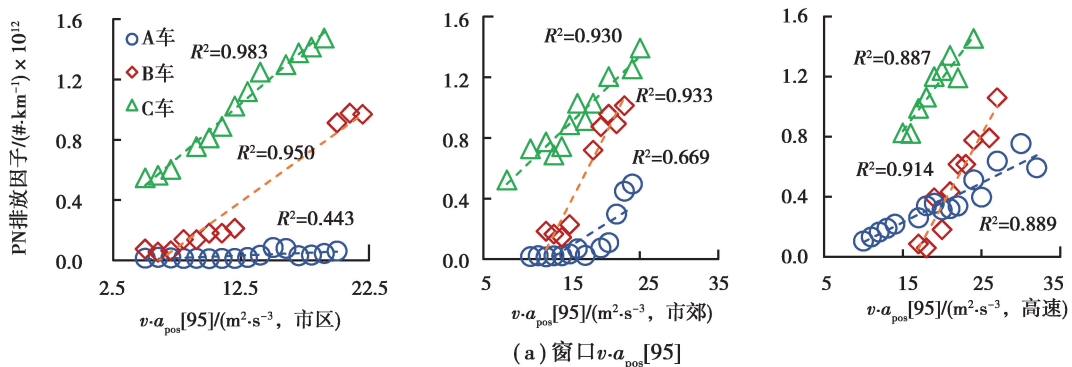


图 8 不同的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 与 CO 排放的相关性对比

Fig. 8 Comparison of the correlation between different $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ and CO emissions

3.3.2 2 种 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 与 PN 排放相关性对比

图 9 为市区、市郊和高速路段下窗口和法规的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 与 NO_x 排放因子相关性对比分布图。由图可知,在市区路段下,3 辆车的 PN 排放因子与窗口的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 正相关性较差,法规的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 与 3 辆车的 PN 排放相关性更明显。可能是由于在计算法规的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 时 A 车的数据量少,使其相关性表现更好。在市郊路段下,3 辆车的 PN 排放因子与窗口 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 正相关性稳定性有较明显提升,平均正相关系数达到 0.84;高速路段下,3 辆车的 PN 排放因子与窗口 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 正相关性稳定性有进一步提升,平均正相关系数达到 0.89,明显优于法规的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 与 PN 排放因子相关性。综上,对比法规的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$,窗口的 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 能更好地反映 PN 的排放水平。



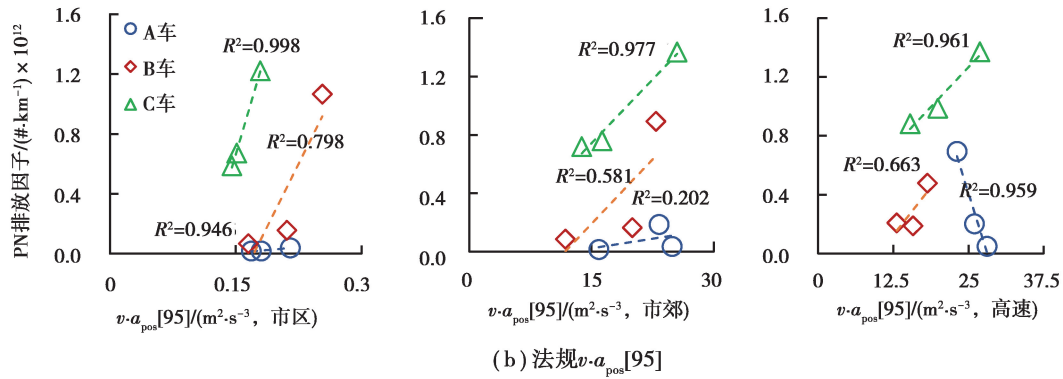


图 9 不同的 $v \cdot a_{pos}[95]$ 与 PN 排放相关性对比

Fig. 9 Comparison of the correlation between different $v \cdot a_{pos}[95]$ and PN emissions

3.3.3 2 种 $v \cdot a_{pos}[95]$ 与 NO_x 排放相关性对比

图 10 为市区、市郊和高速路段下窗口和法规的 $v \cdot a_{pos}[95]$ 与 NO_x 排放因子相关性对比分布图。由图可知,窗口和路段的 $v \cdot a_{pos}[95]$ 与 NO_x 排放因子相关性都不明显,原因可能是其他因素对 NO_x 的排放影响比驾驶激烈程度更大,如不同海拔^[17]、车辆后处理系统^[18]和设备操作规范^[19]等。

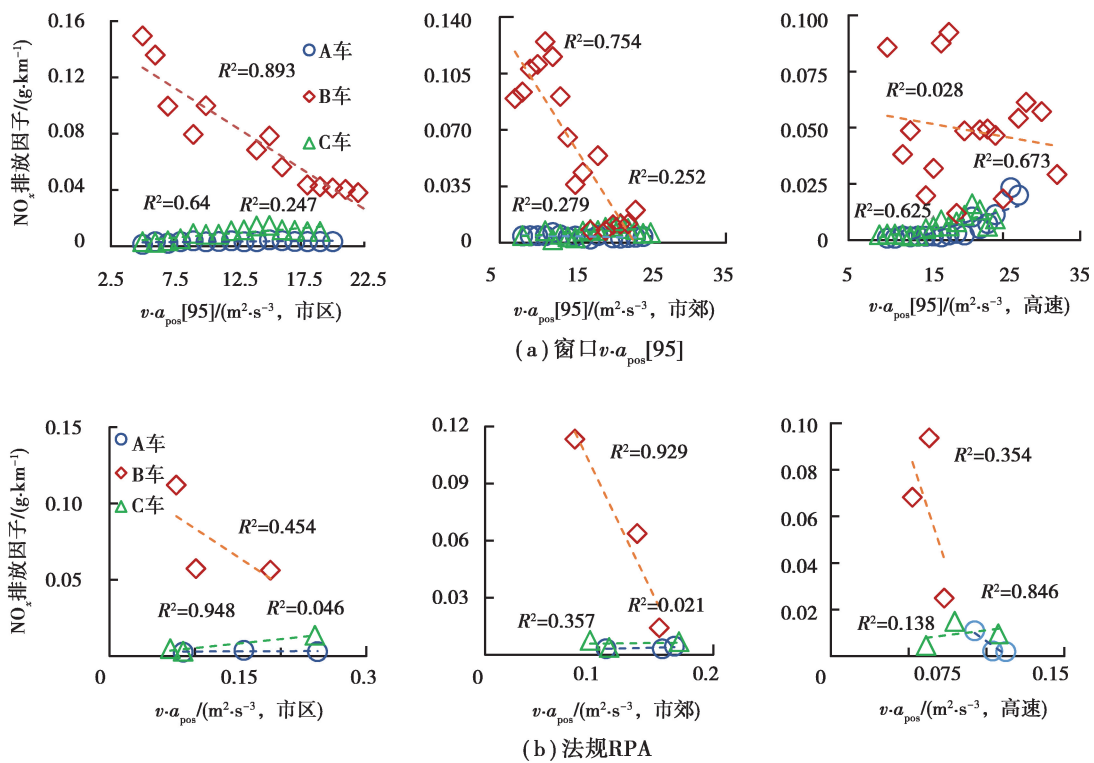


图 10 不同的 $v \cdot a_{pos}[95]$ 与 NO_x 排放相关性对比

Fig. 10 Comparison of the correlation between different $v \cdot a_{pos}[95]$ and NO_x emissions

3.4 2 种 RPA 与污染物排放的相关性对比

3.4.1 2 种 RPA 与 CO 排放相关性对比

图 11 为市区、市郊和高速路段下窗口和法规的 RPA 与 CO 排放因子相关性对比分布图。由图 11 可见,在市区路段下,窗口和法规的 RPA 与 CO 排放因子相关性都不稳定,3 辆车的相关系数的波动幅度都较大,不能反映市区的 CO 排放水平;在市郊路段下,窗口 RPA 与 CO 排放因子相关性更加明显,其中 3 辆车的

平均正相关系数达到 0.88;在高速路段下,窗口 RPA 与 CO 排放因子保持很好的正相关性,路段 RPA 与 CO 排放因子相关性波动幅度较大,无法维持稳定的相关性,无法评估高速的 CO 排放水平。综合考虑,窗口 RPA 比路段 RPA 能更好地反映 CO 排放水平。

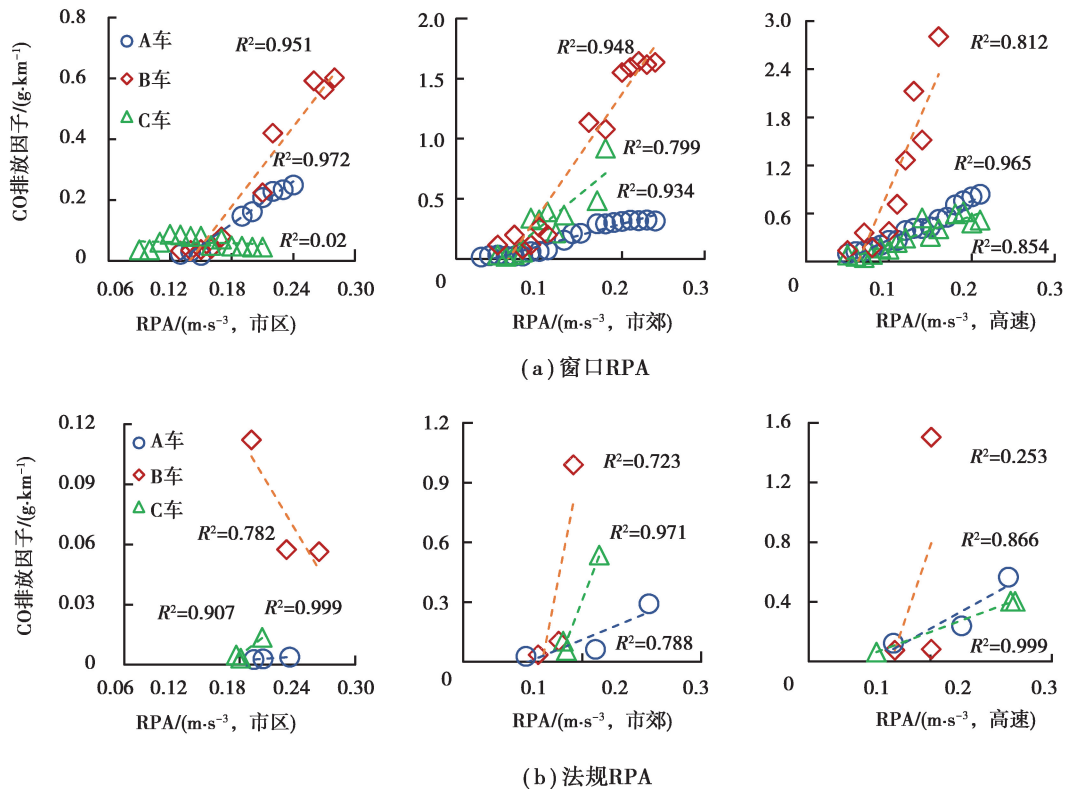


图 11 不同的 RPA 与 CO 排放相关性对比

Fig. 11 Comparison of the correlation between different RPA and CO emissions

3.4.2 2 种 RPA 与 PN 排放相关性对比

图 12 为市区、市郊和高速路段下窗口和法规的 RPA 与 PN 排放因子相关性对比分布图。由图 12 可见,在市区路段下,窗口和路段的 RPA 与 PN 排放因子都呈强相关性,但窗口 RPA 有更多的数据量,能更好地反映 PN 的排放水平;在市郊路段下,3 辆车 PN 排放与窗口 RPA 有强相关性较弱,相关系数波动幅度较大,不能反映市郊的 PN 排放水平;路段的 RPA 与 3 辆车 PN 的排放相关性较明显,能较好地反映市郊 PN 的排放水平;在高速路段下,窗口 RPA 与 PN 排放因子有强相关性,3 辆车的平均相关系数为 0.87;明显优于路段 RPA 与 PN 排放因子相关性。因此,窗口 RPA 能更好地反映 PN 排放水平。

3.4.3 2 种 RPA 与 NO_x 排放相关性对比

图 13 为市区、市郊和高速路段下窗口和法规的 RPA 与 NO_x 排放因子相关性对比分布图。由图 13 可见,在市区路段下,窗口 RPA 与 NO_x 排放因子有较明显的正相关性;路段 RPA 与 A 车 NO_x 排放因子呈负相关;在市郊路段下,窗口和路段的 RPA 与 NO_x 排放因子相关性都不明显;在高速路段下,窗口 RPA 与 NO_x 排放因子有强烈的正相关性,3 辆车平均相关系数达 0.86。因此,相比较法规的 RPA,窗口 RPA 能较好地反映 NO_x 的排放水平。

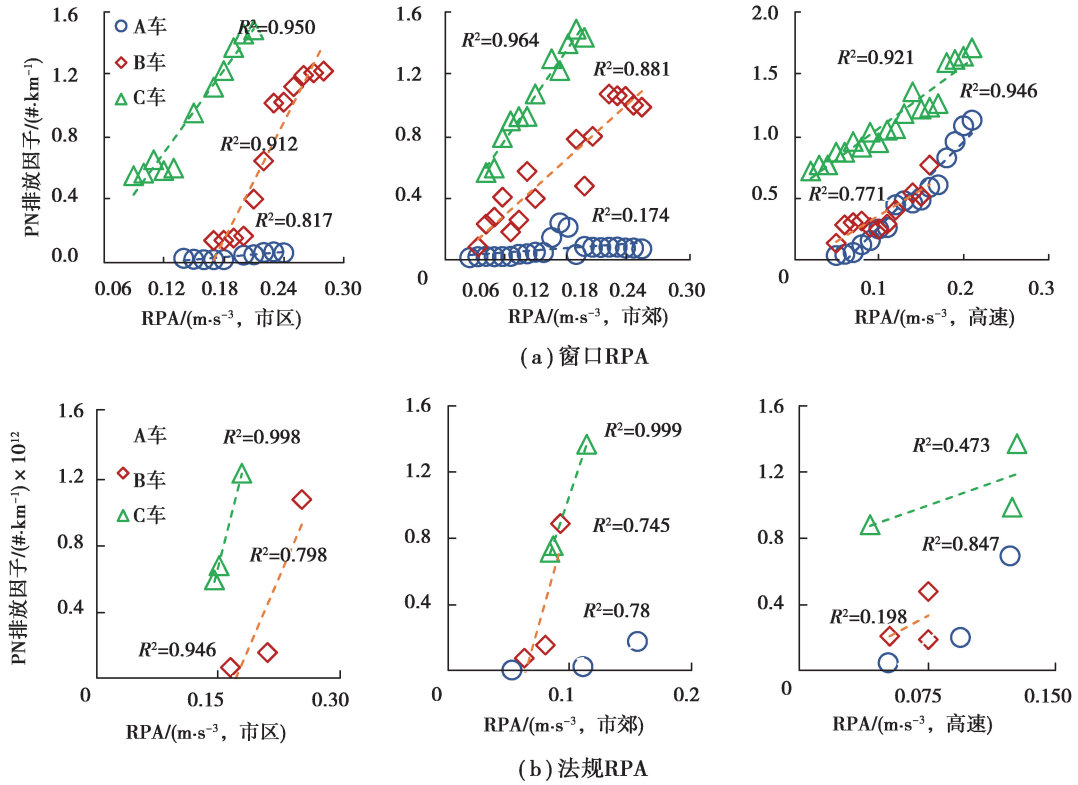


图 12 不同的 RPA 与 PN 排放相关性对比

Fig. 12 Comparison of the correlation between different RPA and PN emissions

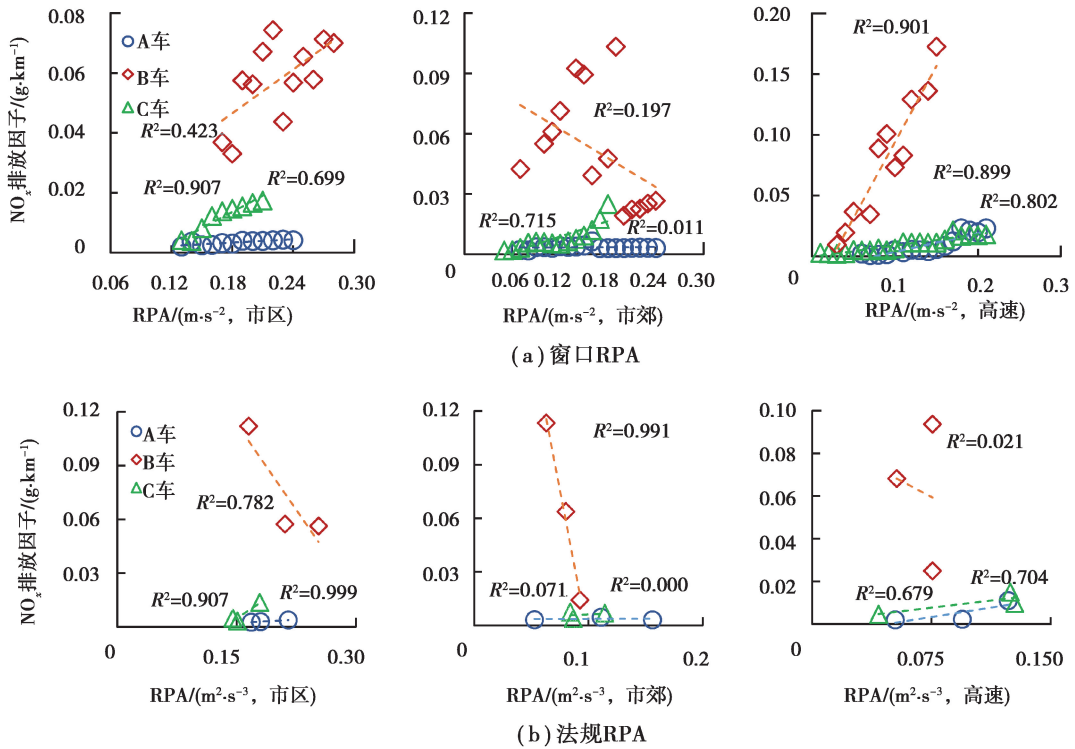


图 13 不同的 RPA 与 NO_x 排放相关系数

Fig. 13 Comparison of the correlation between different RPA and NO_x emissions

4 结 论

1) 计算各路段的窗口行程动力学参数和法规规定的行程动力学参数并与各污染物排放因子的相关性进行对比, 结果表明: 窗口的行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 和 RPA 与 CO、PN 排放因子的相关性更明显; NO_x 排放因子只与窗口动力学参数 RPA 有较强的相关性。

2) 在市区路段下, 相比法规规定的行程动力学参数, 窗口行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 和 RPA 与 CO、PN 排放因子的相关性更加明显, 3 辆车的相关系数波动幅度分别下降 25%~44%。

3) 在市郊路段下, CO 和 PN 污染物的排放因子随动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 和 RPA 增大依次增大, 但窗口行程动力学参数与 CO、PN 排放因子有更强的相关性, 3 辆车的相关性系数波动幅度分别下降 38%~64%。

4) 在高速路段下, 相比法规规定的行程动力学参数与污染物排放存在负相关性, 而窗口行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}[95]$ 和 RPA 与 3 辆车 CO、PN 排放因子有强烈的正相关性, 平均正相关系数达到 0.85。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
National Bureau of Statistics. China Statistical Year book 2018 [M]. Beijing: China Statistical Publishing House, 2018. (in Chinese)
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 中国机动车污染防治年报[R]. 2015.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Annual report on prevention and control of motor vehicle pollution [R]. 2015. (in Chinese)
- [3] Wang G H, Bai S, Ogden J M. Identifying contributions of on-road motor vehicles to urban air pollution using travel demand model data[J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2009, 14(3): 168-179.
- [4] 黄志辉, 汤大钢. 中国机动车有毒有害空气污染物排放估算[J]. 环境科学研究, 2008, 21(6): 166-170.
Huang Z H, Tang D G. Estimation of toxic and harmful air pollutants emission from motor vehicles in China [J]. Environmental Science Research, 2008, 21(6): 166-170. (in Chinese)
- [5] 国家环境保护部. GB18352.6-2016 轻型汽车污染物排放限值及测量方法(中国第六阶段)[S]. 2016.
State Ministry of Environmental Protection. GB18352.6-2016 Limit and measurement method of pollutant emission from light vehicles (China Stage 6) [S]. 2016. (in Chinese)
- [6] Liu J, Ge Y, Wang X, et al. On-board measurement of particle numbers and their size distribution from a light-duty diesel vehicle: Influences of VSP and altitude[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 57: 238-248.
- [7] Kwon S, Park Y, Park J, et al. Characteristics of on-road NO_x emissions from Euro 6 light-duty diesel vehicles using a portable emissions measurement system[J]. Science of the Total Environment, 2017, 576: 70-77.
- [8] 张开冉, 姚磊. 驾驶行为与尾气排放的关系研究[J]. 公路与汽运, 2014(1): 39-43.
Zhang K R, Yao L. Study on the relationship between driving behavior and exhaust emissions [J]. Highway and Motor Transport, 2014 (1): 39-43. (in Chinese)
- [9] Kumar Pathak S, Sood V, Singh Y, et al. Real world vehicle emissions: Their correlation with driving parameters [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016, 44: 157-176.
- [10] 王勃, 戴春蓓, 李菁元, 等. 轻型车 RDE 试验方法研究[J]. 汽车零部件, 2017(3): 6-9.
Wang B, Dai C B, Li J Y, et al. Research on RDE test methods for light vehicles [J]. Automotive components, 2017 (3): 6-9. (in Chinese)
- [11] 程亮, 徐志寅, 邹建化, 等. RPA 对 PFI 轻型汽油车 RDE 高原排放特性试验研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(12): 1398-1404.
Cheng L, Xu Z Y, Wu J H, et al. Experimental study on RDE plateau emission characteristics of PFI light gasoline vehicle by RPA [J]. Automotive Engineering, 2018, 40 (12): 1398-1404. (in Chinese)
- [12] 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(4): 389-395.

- Song B, Ge Y S, Yin H, et al. Study on the influence of driving dynamics parameters on RDE experimental results [J]. *Automotive Engineering*, 2018 (4): 389-395. (in Chinese)
- [13] 耿杨涛. 驾驶行为和冷启动工况对轻型车车载排放特性的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
Geng Y T. The influence of driving behavior and cold start conditions on on-board emission characteristics of light vehicles[D]. Chongqing: Chongqing University, 2018. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Gallus J, Kirchner U, Vogt R, et al. On-road particle number measurements using a portable emission measurement system (PEMS)[J]. *Atmospheric Environment*, 2016, 124: 37-45.
- [17] 倪红, 赵伟, 刘乐, 等. 不同海拔对汽油车排放与油耗影响的研究[J]. *汽车工程*, 2014(10): 1205-1209, 1179.
Ni H, Zhao W, Liu L, et al. Study on the influence of different altitudes on gasoline vehicle emissions and fuel consumption [J]. *Automobile Engineering*, 2014 (10): 1205-1209, 1179. (in Chinese)
- [18] Liu Z, Ge Y, Johnson K C, et al. Real-world operation conditions and on-road emissions of Beijing diesel buses measured by using portable emission measurement system and electric low-pressure impactor[J]. *Science of The Total Environment*, 2011, 409(8): 1476-1480.
- [19] 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.

(编辑 詹燕平)