

国内外移动源实际工况排放测试研究现状

刘明*, 马毅, 伍晨波, 胡君, 徐划龙, 张志辉, 秦金龙, 陈磊

中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆

Email: *13982336581@163.com

收稿日期: 2021年4月27日; 录用日期: 2021年5月28日; 发布日期: 2021年6月4日

摘要

本文分析了国内外实际工况排放测试研究现状, 实验室的标准测试循环不能较好地反应移动源的真实排放情况, 实际工况排放测试实验依据真实的驾驶情况进行试验, 能够较好地反应移动源真实排放情况, 并针对目前的测试法规提出进一步完善的建议。

关键词

排放, 测试, 实际道路

Current Research Status of Emission Testing of Mobile Sources at Home and Abroad

Ming Liu*, Yi Ma, Chenbo Wu, Jun Hu, Hualong Xu, Zhihui Zhang, Jinlong Qing, Lei Chen

China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing

Email: *13982336581@163.com

Received: Apr. 27th, 2021; accepted: May 28th, 2021; published: Jun. 4th, 2021

Abstract

This paper analyzes the current research status of emission test under actual operating conditions at home and abroad. The standard test cycle of the laboratory cannot better reflect the real emissions of mobile sources. The emission test experiment under actual operating conditions is based on real driving conditions and can respond well. At the same time, some suggestions are put forward to improve the current testing regulations.

*通讯作者。

Keywords

Emissions, Testing, Actual Roads

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着汽车和非道路移动源的普及,极大地方便了人们的生活,但同时,一氧化碳(CO)、碳氢化合物(HC)的排放,氮氧化物(NO_x)和颗粒物(particulate matter, PM)等污染物对人类和环境的影响越来越大,逐渐引起人们的广泛关注[1] [2] [3]。

实验室的标准试验循环只能反映车辆在特定条件下的排放水平,通过标准试验循环得到的污染物排放量与实际道路排放量相差很大[4] [5] [6]。新发布的国六排放法规和非道路四阶段排放法规引入了实际道路排放测试,并采用车载便携式排放测试设备对车辆在实际道路行驶条件下的排放进行测试[7]。本文通过对汽车和非道路移动源实际排放的研究,总结了国内外实际排放试验的研究现状,并对实际道路排放提出了意见和建议。

2. 轻型车实际道路排放研究现状

同类工况下,汽车实际道路排放一般较实验室认证排放高。目前实施的轻型汽车污染物排放限制及测量方法中国第五阶段标准暂未规定道路排放试验,但为了进一步限制轻型汽车的污染物排放,在已发布的中国第六阶段标准中已明确了实际行驶污染物试验,即 II 型试验的方法及要求,给定了实际道路行驶时 CO、THC、NMHC、NO_x、N₂O、PM 与 PN 的排放限值,并将在 2020 年后开始实施。

欧盟委员会在《2020 年汽车行动计划》和《欧洲清洁空气计划》中提出,欧 VI 标准将增加轻型汽车的实际行驶排放量排放(RDE)实验对实验室的补充,并规定实际道路排放试验采用便携式排放设备(PEMS)进行,试验结果采用功率级分组法和 CO₂ 窗口法进行处理[8]。

May 等对符合欧 V 标准的汽油车和符合欧 VI 标准的柴油车进行了 I 型试验和 RDE 试验的比较。结果表明,RDE 试验结果与 I 型试验结果有一定差异,但并不意味着 RDE 污染物的排放量超过规定限值。两辆车的 CO 和 HC 排放均低于排放限值,但柴油车的 NO_x 排放远远超过排放限值,两辆车的 RDE CO₂ 排放超过了实验室的 CO₂ 排放量[9]。位于波兹的南方理工大学的 Merkisz 等人使用 SEMTECH-DS 测试了 150 辆汽油和柴油车辆的实际道路排放量。结果表明,对于汽油车,满足欧 V 标准的车辆道路排放低于限值。满足欧 6 标准的车辆 PN 排放超过实验室。对于柴油车,CO 和 HC 排放均低于限值,但大多数车辆的 NO_x 排放均超标[10]。萨卡里亚大学的 Seref S 等人在恒速和频繁加速条件下对混合动力电动客车进行了 PN 试验。在恒定转速下,PN 和发动机功率之间有很好的相关性。由于加速过程中涡轮迟滞,进气流量非常小,PN 产生与发动机功率之间没有一定的相关性[11]。欧洲联合研究中心的 Weiss 等人使用最新的 PEMS 设备来测试汽油和柴油车辆的实际道路排放。发现汽油车的气态污染物低于标准限值,符合欧 V 标准的柴油车 NO_x 排放超过标准限值的 2.3~4.2 倍,CO 排放超过标准限值的 0.12~1.3 倍[12]。Gierczak 等人对便携式排放测量系统(semtechg)、实验室常规模态分析系统进行了大量对比试验,发现 PEMS 设备与传统模态分析仪具有良好的一致性。PEMS 装置的试验结果令人信服,可用于实际道路排放试验[13]。

北京理工大学的付秉正等人利用 Sensor 的 Semtech-LDV 便携式汽车排放分析仪, 对符合国 V 排放标准的汽油车实际道路排放进行了检测。结果表明, 轻型汽油车实际道路排放较高, CO 和 NO_x 的瞬时排放量随加速度的增大而增大。CO 值高时, 转速高, 负载大。此时, 排放量对污染物排放系数的计算贡献最大[14]。

3. 重型车实际道路排放研究现状

任何一部传统的型式认证排放法规, 其排放限值对车辆和发动机的控制都建立在相应的测试循环基础上。因此, 排放法规的加严能否对车辆的实际排放起到有效的降低, 在很大程度上取决于测试循环是否能代表实际道路工况。同时, 排放测试循环也经历了很大的变化和发展, 以欧洲法规为例, 从稳态的 ECE R49、ECS 工况到瞬态的 ETC 工况, 测试循环越来越接近发动机转速、负荷连续变化的实际情况; 而 WHTC 循环则更加接近重型车车速、负荷低的实际运行条件, 同时也变为冷启动测试。但是重型车的型式认证工况毕竟是一个固定的、在测功机上运行的工况, 其对发动机的实际工况代表性有限, 并且更新和发展该工况要很长的周期, 不能及时表达实际道路工况的变化。

在欧 III 阶段以后, 重型发动机普遍采用电子控制, 因此制造商可以对发动机进行标定, 以使其在型式认证工况的排放较低, 以满足型式认证的要求。而在型式认证工况没有覆盖、或者覆盖较少的工况区域, 则可以使其排放较高以得到较好的经济性。这就要求型式认证工况必须有效地代表发动机的实际运行工况, 否则会失去加严法规的意义。

在欧 IV 和欧 V 阶段, 型式认证工况与实际工况的差异, 正是重型车在实际道路上排放很高的根本原因。

重型车辆在实际道路上行驶时, NO_x 和 PM 的排放相对较高。自 2007 年起, 美国环保局开始使用便携式排放设备(PEMS)设备对重型车实际道路排放进行测试, 并使用 NTE (Not-To-Exceed)方法对重型车辆的车载符合性进行检查[15]。在欧洲, 主要使用功基窗口法处理重型车辆的实际道路排放数据。窗口法根据发动机的台架循环功(WHTEC 或 ETC)将车辆的实际道路排放数据划分为不同的窗口进行计算、处理和分析[16]。国外西弗吉尼亚大学的 Benjamin C. Shade 等人使用便携式排放设备(PEMS)对重型车进行了实际道路排放测试, 并采用 NTE 法和功基窗口法进行数据处理, 结果发现功基窗口法 NO_x 计算结果更高。功基窗口法是针对发动机的所有工作区域, 而 NTE 法是针对发动机的大负载区域[17]。加州大学的 Durbin 等人将车辆 FTP-75 的测试结果与实际道路排放进行了对比, 发现两者的测试结果存在一定的偏差[18]。Velders 指出, 实际道路排放的氮氧化物被低估了, 但法规加严并没有达到减排的目标[19]。

对于重型车辆的实际道路排放情况, 国内一些高校和科研院所进行了相关研究, 如北京理工大学、清华大学、中国汽车技术研究中心等机构。北京理工大学葛蕴珊等提出, 重型柴油车实际道路 NO_x 排放量远高于实验室认证条件下的排放量, 实际道路排放试验对控制重型柴油车实际排放具有重要意义[20]。北京理工大学郭佳栋等人利用 ELPI 和 SEMTECH-DS 对重型车辆的实际道路排放进行了测试, 并采用 CO₂ 窗法、比功率(VSP 分析法)、NTE 等方法进行了分析。结果表明, CO₂ 窗法、功基窗口法结合比功率分析法对重型车辆实际道路排放的评价更为全面[21]。中国环境科学院胡京南等研究了重型车辆在用合规性的车载测试方法, 并采用 NTE 方法和功基窗口法处理测试数据。结果表明, NTE 区间能较好地识别柴油机的高负荷工作区, 而低负荷工作区的识别程度相对较低。功基窗口法可以充分利用所获得的排放数据, 但与 NTE 区间有相似的缺陷, 对柴油机小负荷排放的识别能力不强[22]。中国汽车技术中心刘双喜对重型车辆的发动机台架试验与实际道路排放试验和底盘测功机试验进行了对比, 发现底盘测功机试验具有良好的稳定性和准确性。建议今后应以底盘测功机试验为主, 辅以实际道路排放试验[23]。上海市机动车检测中心张宇灏等人对两辆不同技术路线的国 V 重型车进行了实际道路排放试验。试验数据

分析采用了 NTE 法和功基窗口法。结果表明, 重型车辆在行驶过程中不易发生 NTE 事件, 试验失败率高。功基窗口法能更好地反映实验车辆实际排放水平的真实情况[24]。

4. 非道路移动源实际工况排放研究现状

拖拉机是现代农业机械化生产中重要的动力机械, 可通过动力输出装置(power take-off, PTO)配备不同的作业机械完成耕、耙、播、收、排灌、施肥、喷药、农副产品加工以及开沟、挖掘、推土和运输等作业[25]。拖拉机一般以柴油机为动力源, 是 NO_x 和 PM 排放的重要来源, 其排放测试一般归为非道路用柴油机类。非道路柴油机械排放研究的测试方法主要分为实验室测试和实际运行测试。前者在实验室发动机台架上利用测功机模拟机械在实际工况下的排放状况, 世界各国大多数采用该方法进行非道路柴油机械法规测试。该方法的优点是可以获得任意工况下的测试, 便于控制, 可重复性强, 测试的结果常常被作为排放因子模型的基础数据进行模型的校验, 美国 EPA 及欧洲的非道路排放模型都是基于实验室测试数据发展起来的。该方法不足之处在于反映发动机的瞬时排放较弱, 特别是颗粒物瞬时排放。研究表明台架测试无法全面反映发动机在实际状况下的工况以及排放水平[25] [26] [27]。

实际运行测试主要包括车载排放测试, 即将便携式排放测试系(PEMS)直接固定在实际运行的非道路机械上, 逐秒采集行驶工况和污染物排放结果[28]。近年来, 随着测试技术的不断改进, PEMS 仪器设备种类不断丰富[26] [29]。PEMS 技术不需要将发动机从被测机械上拆卸下来进行实验室检测, 而是直接将测试仪器固定在被测机械上进行实际工作条件下的测试。这样做既省时省钱, 可获得非道路机械实际运行的排放数据。随着 PEMS 技术的广泛应用, 非道路机械排放将从单一的台架测试向台架与 PEMS 技术相结合的方向发展[30]。加州大学河边分校利用挂式流动排放实验室对非道路机械进行了排放测试, 得到其实际工作的排放因子并与道路机动车进行了对比[31]。北京理工大学付明亮、葛蕴珊等人利用 PEMS 研究了农用拖拉机在怠速、行走和耕作三种作业模式下的实际排放特性[32]。

目前国内非道路移动机械实测排放因子数据较少, 在建立国内农机排放清单时仅能利用国外测试数据[33] [34], 尚无法对农用拖拉机的排放因子进行系统化更新校正, 因此急需加强农用拖拉机排放因子的实测研究, 从而建立可反映我国非道路移动机械实际排放水平的本地化排放因子数据库[35] [36] [37]。

5. 高原地区移动源实际工况排放研究现状

中国的高原非常广阔, 海拔 1000 米以上的地区占 58%, 海拔 2000 米以上的地区占 33%。国内高原按地域划分主要有四大高原, 分别为青藏高原、云贵高原、黄土高原和内蒙古高原。除内蒙古高原地区起伏和缓外, 多数高原地区为山峦起伏、地势变化较大的山地, 以云南省尤为明显, 其山地总面积约占全省总面积的 84%, 其中海拔在 1000~3000 米的山地数量最大[38]。

由于高海拔地区对实验条件要求的特殊性, 目前国内外有关柴油机在高海拔地区的排放特性的实验研究进行的并不多, 有报道的研究主要集中在少数几个研究机构, 多数报道以车用柴油机为研究对象。西南研究院在八十年代末建设完成了能够模拟海拔高度的 CVS 系统, 并利用该实验系统研究了一台自然吸气 Caterpillar 3208 柴油机和一台涡轮增压 Cummins NTCC-350 柴油机的排放特性, 研究结果发现在高海拔地区, NO_x 排放减少 10% 左右, 而 CO、HC 和 PM 的排放则分别是低海拔地区的 2 到 4 倍[25]。美国加州空气资源局选择了 170 辆重型柴油车在 5800 ft (约为 1768 m) 的海拔高度下进行了烟度实验, 并选择其中的 85 辆进行了低海拔地区(125 ft, 约为 38 m)的烟度测试, 通过实验数据统计他们发现在高海拔地区, 柴油机的烟度平均增加 23% [39]。美国西南研究院进行的另外一项高原排放实验, 他们利用一台 60 系列增压中冷电控柴油机上分别进行了低海拔和模拟高海拔的稳态和瞬态排放实验。他们的研究结果表明, 无论是在瞬态和稳态工况下, 实验柴油机的 HC、CO、 CO_2 、PM 和烟度排放均随海拔高度的增加明显增加, 而 NO_x 排在瞬态工况下的变化不明显, 但是在稳态工况下则随海拔高度的增加而减少[40]。

Teresa 等人研究了不同硫含量的柴油对柴油机在高海拔地区(海拔高度 1609 m)的排放影响, 结果他们发现在高海拔地区柴油机的 PM 排放明显增加[41]。该研究小组还仔细研究了在高海拔地区, 燃料特性对柴油机排放的影响, 他们的研究基于在高海拔的 Colorado 实验室中进行, 有关海平面高度的试验数据则是参考他人的实验结果[42]。

国内学者早期的研究注重增压柴油机在高原的动力性能[43] [44], 近年来开始进行了高原排放的模拟研究。昆明理工大学的申立中教授在利用昆明市高海拔(海拔高度 1900 m 左右)的特点, 建立了微机控制的大气模拟综合控制系统, 并在此基础上分别开展了非增压柴油机、增压柴油机在不同海拔高度的综合性能研究(包括燃烧过程和排放过程), 研究的最高海拔高度为当地海拔高度(80 kPa), 利用微机控制系统完成对低海拔的高度大气环境的模拟。申立中教授等人的研究表明增压中冷柴油机的 CO、NO_x、HC、PM 的排放随海拔高度的增加而增加[45] [46] [47]。军事交通学院的刘瑞林教授在天津市建立了高海拔发动机性能模拟试验台, 其模拟海拔高度可以达 5000 米以上, 刘瑞林教授利用该模拟系统重点研究了柴油机在不同海拔高度条件下的增压柴油机动力性和燃油经济性[44]。何超等人在模拟高原试验台架上, 对一台重型柴油机利用进排气模拟装置, 进行了 3 个模拟海拔高度的排放特性研究。他们的研究表明, 随着模拟海拔高度的增加 HC、CO 和烟度均显著下降, 但 NO_x 随着发动机工况的不同呈现不同的变化规律[40]。Hang Yin 等人研究了一辆轻型柴油车在不同海拔条件下怠速的排放状况, 结果发现随着海拔的增加, CO 排放、颗粒物排放逐渐增加, NO_x 排放没有较明显的变化; 当海拔低于 2400 m 时, NO_x 随海拔增加, 而海拔到 3200 m 时, NO_x 有所下降[48]。北京理工大学的丁焰在博士论文研究中选择典型的柴油车和汽油车各两辆基于车载排放测试设备(PEMS)开展了海拔高度对机动车的排放性能影响的实际道路排放特性研究, 其实验的海拔高度覆盖了 50~3400 m 的范围, 实际行车距离达到 5000 公里, 获得有效实验数据 12 万条, 通过对实验数据的处理解析, 研究得到了不同海拔高度与车辆污染物排放之间的初步相关关系[49]。北京理工大学的赵伟在硕士论文中研究了一台欧 III 标准的柴油机在模拟高原环境实验室进行了排放实验, 结果表明: 随海拔增加 CO、THC、PM 比排放量逐渐增加, NO_x 随海拔增加平均排放量呈现先增加后减小的变化趋势[50]。

可知, 目前国内与国外关于高原地区机动车、发动机的排放特性的研究并不深入, 有限的研究结果主要针对重型柴油机的台架试验, 而对在不同海拔高度的研究采用的研究方法都是以环境模拟为主。同时, 车载排放测量系统(PEMS)的技术进步使得对高海拔地区的机动车的排放特性的定量研究成为可能, 相关实验设备的精度已经达到和试验室设备相媲美的程度。

6. 实际工况排放的思考与建议

6.1. 关于实际工况排放的思考

- 1) 混合动力汽车与传统燃油车有较大的区别, 混合动力汽车的实际道路试验与传统燃油车尚无明显区别, 法规没有建立一套针对混合动力的实际道路试验方案。
- 2) 实际工况测试试验规定了较多的边界条件, 这些边界条件等于去除了一部分高排放工况不利于反应移动源的实际排放。
- 3) 非道路移动源具有保量小排放高的特征, 国内针对其实际工况排放测试研究较少。

6.2. 关于实际工况排放的建议

- 1) 开展混合动力实际道路试验, 收集分析试验数据, 建立一套针对混合动力汽车的实际道路试验方案。
- 2) 建议进一步拓展实际工况排放测试试验的边界条件, 使其能更好的反应移动源的实际排放情况。

3) 进一步加强非道路移动源的实际工况测试研究, 收集分析数据, 建立一套更加完善的针对非道路移动源的试验方案。

7. 结论

实验室的标准测试循环不能较好地反应移动源的真实排放情况, 实际工况排放测试实验依据真实的驾驶情况进行试验, 能够较好地反应移动源真实排放情况。国外针对移动源的实际工况排放测试的研究相对较早, 中国稍有落后, 国内应该进一步加强对移动源实际工况排放测试的研究, 开展相关试验, 收集分析试验数据, 完善相应的法规和监管制度, 使得实际工况排放试验能够更好地反应移动源的真实排放情况。

基金项目

基于中国工况的轻型车燃料消耗量的比对测试研究(MS-03-03)。

参考文献

- [1] 丁焰. 2018 蓝天保卫战主攻重型货车, 30%分布在京津冀及周边[EB/OL]. <http://www.yicai.com/news/5390918.html>, 2018-07-28.
- [2] 郭佳栋, 葛蕴珊, 郝利君, 等. SCR 系统对公交车 NO_x 排放降低效果的研究[J]. 汽车工程, 2015, 37(11): 1227-1231.
- [3] 谭丕强, 周舟, 胡志远, 楼狄明. 柴油轿车颗粒多环芳烃的排放特性[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 1150-1155.
- [4] Vojtíšek-Lom, I., Beránek, V., Klír, V., Jindra, P., *et al.* (2017) On-Road and Laboratory Emissions of NO, NO₂, NH₃, N₂O and CH₄ from Late-Model EU Light Utility Vehicles: Comparison of Diesel and CNG. *Science of the Total Environment*, **616-617**, 774-784. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.248>
- [5] 陈燕涛. 车辆道路排放测试技术的研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [6] 李佳徽, 李道华. 我国汽车尾气污染的危害及其防治[J]. 内江师范学院学报, 2009, 24(8): 70-75.
- [7] 李滨丹, 吴宁. 探讨汽车尾气污染危害与对策[J]. 环境科学与管理, 2009, 34(7): 174-177.
- [8] Commission Regulation (EU) No. 2016/427 “Commission Regulation (EU) 2016/427 of March 10, 2016 Amending Regulation (EC) No. 692/2008 as Regards Emissions from Light Passenger and Commercial Vehicles (Euro 6)”.
- [9] May, J., Bosteels, D. and Favre, C. (2014) An Assessment of Emissions from Light-Duty Vehicles Using PEMS and Chassis Dynamometer Testing. *SAE International Journal of Engines*, **7**, 1326-1335. <https://doi.org/10.4271/2014-01-1581>
- [10] Merkisz, J., Pielecha, J., Bielaczyc, P., *et al.* (2016) Analysis of Emission Factors in RDE Tests as Well as in NEDC and WLTC Chassis Dynamometer Tests. *SAE 2016 World Congress and Exhibition*, Detroit, 12-14 April 2016. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0980>
- [11] Soyulu, S. (2015) Development of PN Emission Factors for the Real World Urban Driving Conditions of a Hybrid City Bus. *Applied Energy*, **138**, 488-495. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.11.001>
- [12] Weiss, M., Bonnel, P., Hummel, R., *et al.* (2011) On-Road Emissions of Light-Duty Vehicles in Europe. *Environmental Science & Technology*, **45**, 8575. <https://doi.org/10.1021/es2008424>
- [13] Gierczak, C.A., Korniski, T.J., Wallington, T.J., *et al.* (2006) Laboratory Evaluation of the SEMTECH-G® Portable Emissions Measurement System (PEMS) for Gasoline Fueled Vehicles. <https://doi.org/10.4271/2006-01-1081>
- [14] 付秉正, 杨正军, 尹航, 等. 轻型汽油车实际行驶污染物排放特性的研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(4): 376-380.
- [15] Dieselnets. Heavy-Duty Onroad Engines. <https://dieselnets.com/standards/cycles/nte.php>
- [16] Commission Regulation (EU) No 582/2011. Implementing and Amending Regulation (EC) No 595/2009 of the European Parliament and of the Council with Respect to Emissions from Heavy Duty Vehicles (Euro VI) and Amending Annexes I and III to Directive 2007/46/EC of the European Parliament and of the Council.
- [17] Shade, B.C., Carder, D.K., Thompson, G.J. and Gautam, M. (2008) A Work-Based Window Method for Calculating In-Use Brake-Specific NO_x Emissions of Heavy-Duty Diesel Engines. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2008-01-1301>
- [18] Durbin, T.D., Johnson, K., Rd, C.D., *et al.* (2007) Evaluation and Comparison of Portable Emissions Measurement

- Systems and Federal Reference Methods for Emissions from a Back-Up Generator and a Diesel Truck Operated on a Chassis Dynamometer. *Environmental Science & Technology*, **41**, 6199-6204.
- [19] Velders, G.J.M., Geilenkirchen, G.P. and Lange, R.D. (2011) Higher than Expected NO_x Emission from Trucks May Affect Attainability of NO₂ Limit Values in the Netherlands. *Atmospheric Environment*, **45**, 3025-3033. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.023>
- [20] 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.
- [21] 郭佳栋. 重型车实际道路车载排放测试及排放特性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [22] 郭兴, 胡京南, 鲍晓峰, 李振华, 吴焯, 杨洪强, 帅石金. 重型车在用符合性的车载测试方法研究[J]. 环境工程技术学报, 2011(3): 232-236.
- [23] 刘双喜. 重型车排放测试方法的研究[C]//中国汽车工程学会. 2010 中国汽车工程学会年会论文集, 2010: 5.
- [24] 张宇灏. 重型车车载排放测试方法适应性分析[J]. 质量与标准化, 2015(12): 48-51.
- [25] 周一鸣. 拖拉机理论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1993: 6.
- [26] De Vlieger, I., De Keukeleere, D. and Kretzschmar, J.G. (2000) Environmental Effects of Driving Behavior and Congestion Related to Passenger Cars. *Atmospheric Environment*, **34**, 4649-4655. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00217-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00217-X)
- [27] Huo, H., Yao, Z.L., Zhang, Y.Z., et al. (2012) On-Board Measurements of Emissions from Diesel Trucks in Five Cities in China. *Atmospheric Environment*, **54**, 159-167. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.068>
- [28] Armas, O., Lapuerta, M. and Mata, C. (2009) Online Emissions from a Vibrating Roller Using an Ethanol-Diesel Blend during a Railway Construction. *Energy & Fuels*, **23**, 2989-2996. <https://doi.org/10.1021/ef900148c>
- [29] Unal, A. (2002) On-Board Measurement and Analysis of On-Road Vehicle Emission. North Carolina State University, Raleigh.
- [30] Wang, F., Li, Z., Zhang, K.S., et al. (2016) An Overview of Non-Road Equipment Emissions in China. *Atmospheric Environment*, **132**, 283-289. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.02.046>
- [31] Samarasa, Z. and Zierock, K.-H. (1995) Off-Road Vehicles: A Comparison of Emissions with Those from Road Transport. *Science of the Total Environment*, **169**, 249-255. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(95\)98123-Z](https://doi.org/10.1016/0048-9697(95)98123-Z)
- [32] 付明亮, 丁焰, 尹航, 等. 实际作业工况下农用拖拉机排放的研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 42-48.
- [33] Lindgren, M. and Hansson, P. (2002) Effects of Engine Control Strategies and Transmission Characteristics on the Exhaust Gas Emissions from an Agricultural Tractor. *Biosystems Engineering*, **83**, 55-65. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0099>
- [34] Janulevicius, A., Juostas, A. and Pupinis, G. (2013) Tractor's Engine Performance and Emission Characteristics in the Process of Ploughing. *Energy Conversion and Management*, **75**, 498-508. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.06.052>
- [35] 张礼俊, 郑君瑜, 尹沙沙, 等. 珠江三角洲非道路移动源排放清单开发[J]. 环境科学, 2010, 31(4): 886-891.
- [36] 樊守彬, 聂磊, 阚睿斌, 等. 基于燃油消耗的北京农用机械排放清单建立[J]. 安全与环境学报, 2011(1): 145-148.
- [37] 鲁君, 黄成, 胡馨遥, 杨强, 井宝莉, 夏阳, 卢滨, 唐伟, 楼晟荣, 陶士康, 李莉. 长三角地区典型城市非道路移动机械大气污染物排放清单[J]. 环境科学, 2017(7): 1-14.
- [38] 云南统计局. 云南统计年鉴 2015[B]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [39] Chernich, D.J., Jacobs, P.E. and Kowalski, J.D. (1991) A Comparison of Heavy-Duty Diesel Truck Engine Smoke Opacities at High Altitude and at Sea Level. SAE Technical Papers Ser. No. 911671. <https://doi.org/10.4271/911671>
- [40] He, C., Ge, Y.S., Ma, C.C., Yu, L.X., et al. (2011) Emission Characteristics of a Heavy-Duty Diesel Engine at Simulated High Altitudes. *The Science of the Total Environment*, **409**, 3138-3143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.01.029>
- [41] Daniels, T.L., McCormick, R.L., Graboski, M.S., et al. (1996) The Effect of Diesel Sulfur Content and Oxidation Catalysts on Transient Emissions at High Altitude from a 1995 Detroit Diesel Series 50 Urban Bus Engine. SAE Technical Paper 961974.
- [42] Graboski, M.S. and McCormick, R.L. (1996) Effect of Diesel Fuel Chemistry on Regulated Emissions at High Altitude. SAE Technical Paper 961947.
- [43] 沈颖刚, 何保红, 申立中, 等. 大气压力对涡轮增压柴油机燃烧过程影响的试验研究[J]. 内燃机, 2002(3): 29-31.
- [44] 刘瑞林, 刘宏威, 秦德. 涡轮增压柴油机高海拔(低气压)性能试验研究[J]. 内燃机学报, 2003(3): 213-216.
- [45] 申立中, 杨永忠, 雷基林, 等. 不同海拔地区下增压中冷柴油机的性能研究[J]. 汽车工程, 2005, 27(6): 674-677.

- [46] 申立中, 毕玉华, 张伟, 等. 不同海拔下增压及增压中冷柴油机的燃烧过程[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(6): 524-529.
- [47] 申立中, 杨永忠, 雷基林, 等. 不同海拔下增压中冷柴油机性能和排放的研究[J]. 内燃机学报, 2006, 24(3): 250-255.
- [48] Yin, H., Ge, Y., Wang, X., *et al.* (2013) Idle Emission Characteristics of a Light-Duty Diesel van at Various Altitudes. *Atmospheric Environment*, **70**, 117-122. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.01.012>
- [49] 丁焰. 中国机动车排放因子模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2009.
- [50] 赵伟. 柴油机在不同海拔高度下燃烧与排放特性研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京理工大学, 2012.