

轻型汽油车与纯电动汽车碳排放量比较研究

王志红^{1,2}, 董阿山^{1,2}, 张远军³, 丁玲³

(1. 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室(武汉理工大学), 武汉 430070;

2. 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070;

3. 襄阳达安汽车检测中心有限公司, 湖北, 襄阳 441004)

摘要: 选取3辆国VI轻型汽油车和3辆轻型纯电动汽车在全球统一轻型车辆测试循环(World Light Vehicle Test Cycle, WLTC)、中国乘用车行驶工况(China Light-Duty Vehicle Test Cycle-Passenger, CLTC-P)及实际道路工况下进行能耗试验, 将电耗折算为电力生产端的CO₂排放量, 研究了两类车辆在不同测试工况下, 车速、加速度、车辆瞬时比功率(Vehicle Specific Power, VSP)、行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 和相对正加速度(Relative Positive Acceleration, RPA)对CO₂排放的影响及两类车辆CO₂排放特性的异同点。结果表明, 两类车辆CO₂排放因子均随车速的升高先下降后上升; 汽油车CO₂排放因子在 ≥ 30 km/h的车速区间随加速度增大波动较小, 0~30 km/h低速段均有很高的值, 且在 $> 1 \text{ m/s}^2$ 的低速急加速区间取得最大值, 低速段平均CO₂排放因子达到纯电动汽车的2.06~2.2倍; 纯电动汽车CO₂排放因子在减速区间维持稳定低值, 匀速及加速区间随加速度增大急剧上升; 汽油车CO₂排放率随VSP增大先下降后上升, 纯电动汽车CO₂排放率只在VSP > 0 时随VSP的增大呈近似线性增长, 且在VSP > 20 的高速急加速区间反超汽油车; $v \cdot a_{\text{pos}}$ 和RPA与两类车辆在各行驶路段的CO₂排放因子具有强正相关性。

关键词: 轻型汽油车; 轻型纯电动汽车; 能耗; 碳排放

中图分类号: U467.1

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2022.04.13

Comparative Study on Carbon Emissions of Light Gasoline Vehicles and Light Pure Electric Vehicles

WANG Zhihong^{1, 2}, DONG Ashan^{1, 2}, ZHANG Yuanjun³, DING Ling³

(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 430070, China;

3. Xiangyang Daan Automobile Test Center Limited Corporation, Xiangyang 441004, Hubei, China)

Abstract: Three light gasoline vehicles and three light pure electric vehicles that meet the national VI emission standards were selected for energy consumption tests under WLTC, CLTC-P and actual road conditions. The power consumption is converted into CO₂ emission at the power production end. The effects of vehicle speed, acceleration, the instantaneous vehicle instantaneous specific power (VSP), the stroke dynamics parameters $v \cdot a_{\text{pos}}$ and RPA on CO₂ emissions and the characteristics of CO₂ emissions characteristics

收稿日期: 2021-12-25 改稿日期: 2022-01-27

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)

参考文献引用格式:

王志红, 董阿山, 张远军, 等. 轻型汽油车与纯电动汽车碳排放量比较研究[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4): 495-505.

WANG Zhihong, DONG Ashan, ZHANG Yuanjun, et al. Comparative Study on Carbon Emissions of Light Gasoline Vehicles and Light Pure Electric Vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(4): 495-505. (in Chinese)



of the two types of vehicles under different test conditions are studied. The results show that the CO_2 emission factors of the two types of vehicles first decrease and then increase with the increase of vehicle speed.; The CO_2 emission factor of the gasoline vehicles fluctuates slightly with the increase of acceleration for speed in the speed range $\geq 30 \text{ km/h}$, and has a higher values in the low-speed range of $0 \sim 30 \text{ km/h}$, and the maximum value is obtained in the low-speed and rapid acceleration range ($> 1 \text{ m/s}^2$), and the average CO_2 emission factor in the low-speed section reaches 2.06~2.2 times that of the pure electric vehicles.; The CO_2 emission factor of the pure electric vehicles maintains a stable and low value during in the deceleration range, and increases sharply at in the constant speeds and during acceleration ranges with the increase of acceleration; The CO_2 emission rate of the gasoline vehicles first decreases and then increases with the increase of VSP; The CO_2 emission rate of the pure electric vehicles increases approximately linearly with the increase of VSP only when $\text{VSP} > 0$, and overtakes the gasoline vehicles in the high-speed and rapid acceleration range with of $\text{VSP} > 20$; $v \cdot a_{\text{pos}}$ and RPA have strong positive correlation with the CO_2 emission factors of the two types of vehicles in each driving section.

Keywords: light gasoline vehicle; light pure electric vehicle; energy consumption; carbon emission

随着全球温室气体的治理逐步加严,各主要经济体也制定并执行了碳达峰和碳中和时间表。我国已宣布力争2030年前实现碳达峰,力争2060年前实现碳中和。2020年,我国碳排放量为98.94亿吨,其中交通领域碳排放测算大概为23.18亿吨,约占碳排放总量的23.4%,其中,公路运输的占比最大,约为82%^[1]。机动车作为公路运输的主体,是碳排放的主要贡献者。因此,为实现碳达峰、碳中和目标,我国乃至全球都加紧对机动车能源结构进行调整,发展新能源汽车成为大家的共识。然而,新能源汽车在使用环节可以是零排放,但是发电过程产生的碳排放量却不容小觑。

纯电动汽车作为当前新能源汽车的主要发展方向,它的碳排放量主要和两个因素相关:一个是自身经济性,即百公里电耗的大小;另一个是电力清洁性,即发电所用一次能源的清洁性。目前,我国电力结构主要以火力发电为主,2020年,火力发电比例为70.19%。随着我国核电、风电、水电、太阳能等清洁能源的建设及大规模应用,到2030年,清洁能源比例会大幅提高,但是火力发电依然会有较高的占比^[2]。针对纯电动汽车是否比传统燃油汽车更有助于碳减排,国内外专家学者做过很多研究,但是得出的结论有很大不同。严军华等^[3]利用生命周期评价方法,对纯电动汽车和传统燃油汽

车的制造、使用、报废回收3个主要阶段进行了 CO_2 排放对比分析,结果表明,在生命周期内,纯电动汽车 CO_2 排放量只占传统燃油汽车的59.92%。严岩等^[4]通过发电端排放折算,研究发现纯电动汽车使用周期 CO_2 排放量较传统汽车减少37%。黎土煜等^[5]、RAHMAN等^[6]、MINGYUE等^[7]经过研究也得出纯电动汽车更有利于碳减排的结论。而冯超^[8]使用混合生命周期评价方法对乘用车进行了能耗和排放分析,发现在当前能源结构背景下,纯电动汽车碳排放量比传统燃油车高18%。哈宁宁^[9]用全生命周期法对某国产SUV的纯电动、混动和燃油动力3个版本的碳排放量进行计算,发现在燃料周期和车辆周期,纯电动版本均有最高的温室气体排放。REQUIA等^[10]、RUPP等^[11]、NIMESH等^[12]也有相似的结论。

为研究当下传统燃油车和电动汽车的实际碳排放,本文选取3辆国VI轻型汽油车和3辆轻型纯电动汽车,均分别在WLTC、CLTC-P和实际道路工况下进行能耗试验,将纯电动汽车行驶阶段的电耗折算为电力生产端的 CO_2 排放量,汽油车也只考虑行驶阶段燃油燃烧产生的 CO_2 排放量,研究分析了汽油车和纯电动汽车在不同测试工况下,车速、加速度、VSP、行程动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 和RPA对 CO_2 排放的影响及两类车辆 CO_2 排放特性的异同点。

1 电耗折算方法

本文使用的电动汽车电耗折算方法采用 GB/T 37340—2019《电动汽车能耗折算方法》中的 CO₂ 排放折算法，此方法通过与传统燃油车燃料燃烧产生的 CO₂ 进行换算，将电动汽车消耗的电量转化为发电阶段产生的 CO₂ 排放量。具体换算方法如下（均为 2020 年数据）。

当量燃油消耗量 FC_{CO₂} 的计算：

$$FC_{CO_2} = E \times F_{CO_2} \quad (1)$$

式中：FC_{CO₂} 为当量燃油消耗量，L/100 km；E 为车辆的电能消耗量，kWh/100 km；F_{CO₂} 为 CO₂ 折算因子，L/kWh，按式（2）计算得出。

CO₂ 折算因子 F_{CO₂} 的计算：

$$F_{CO_2} = \frac{T_E \times T_C \times \varphi}{T_F \times t_M \times i_{ch} \times (1 - i_{tr})} \quad (2)$$

式中：T_E 为火电供电标准煤耗，kg/kWh，取值为 0.306^[13]；T_C 为燃料煤的 CO₂ 排放因子：单位煤燃烧所产生的 CO₂ 排放量，kg/kg，取值为 2.53^[14]；φ 为火力发电比例：火力发电量与发电总量之比，取值为 70.19%^[2]；T_F 为燃料的 CO₂ 排放因子：单位燃料燃烧所产生的 CO₂ 排放量，汽油为 2.38 kg/L，柴油为 2.67 kg/L，本文是与汽油车进行对比，所以取值为 2.38 kg/L^[14]；t_M 为燃料煤与标准煤的折标系数，取值为 0.91^[15]；i_{ch} 为充电效率：输入动力电池的电能与来自电网的电能之比，取值为 100%；i_{tr} 为线损率：输送和分配（变压）电能过程中，损失的电量占供电量的百分比，取值为 5.62%^[16]。

将已知参数代入式（2），得到 CO₂ 折算因子：

$$F_{CO_2} = 0.27 \quad (3)$$

将 F_{CO₂} 的值代入式（1）中，得到当量燃油消耗量：

$$FC_{CO_2} = 0.27E \quad (4)$$

结合汽油的 CO₂ 排放因子以及试验时纯电动汽车的车速，便可以得到纯电动汽车的 CO₂ 排放因子（g/km）以及 CO₂ 瞬时排放率（g/s）。

2 试验方案

2.1 试验车辆

本文选取的试验车辆为 3 辆国 VI 轻型汽油车和 3 辆轻型纯电动汽车，6 辆车的整备质量非常接近，且在各测试工况下车辆的测试质量均保持相等，这样有利于碳排放对比的公平性。试验车辆具体的技术参数见表 1 和表 2。

表 1 轻型汽油车主要技术参数

参数	值		
	汽油车 1	汽油车 2	汽油车 3
环保标准	国 VI	国 VI	国 VI
供油方式	缸内直喷	缸内直喷	缸内直喷
驱动方式	后驱	后驱	后驱
发动机排量/L	2.0	2.0	2.0
发动机功率/kW	184	180	185
后处理方式	三元催化剂	三元催化剂	三元催化剂
整备质量/kg	2 000	1 985	1 990

表 2 后驱轻型纯电动汽车主要技术参数

参数	值		
	纯电动汽车 1	纯电动汽车 2	纯电动汽车 3
电机功率/kW	200	225	193
电机转矩/Nm	395	410	384
电池容量/kWh	88	100	83.4
整备质量/kg	2 010	2 030	1 995

2.2 试验设备

汽油车转毂能耗试验所用的排放检测设备为 HORIBA 公司的全流稀释定容取样系统 CVS-7400 和尾气分析仪 MEXA-7400DTR。排放检测原理如图 1 所示，通过尾气分析仪测出取样袋里稀释废气的 CO₂ 浓度，再乘以 CVS 测得的稀释废气总容积，便计算出 CO₂ 的总排放量。

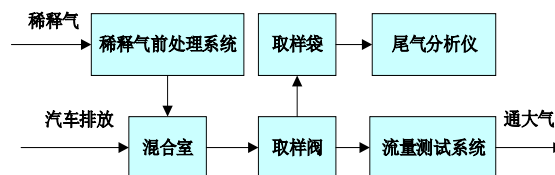


图 1 排放检测原理

汽油车实际道路能耗试验所用的排放检测设备为 HORIBA 公司的便携式排放测试系统 (PEMS) OBS-ONE-GS12, 用到的模块包括气体分析单元 (GA)、排气流量计以及包括主控电脑、全球定位系统 (GPS)、供电单元 (PS)、OBD 单元等在内的附件, CO₂ 浓度及排量分别由 GA 和排气流量计测出。试验车辆上 PEMS 设备的安装示意图如图 2 所示。

纯电动汽车转毂能耗试验和实际道路能耗试验

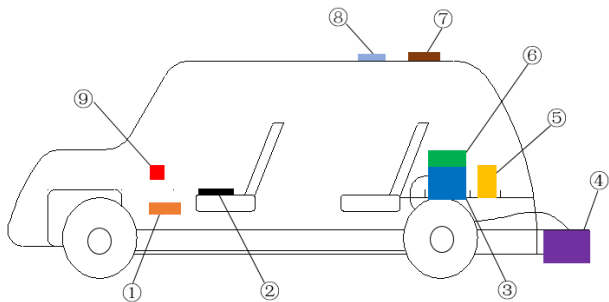


图 2 PEMS 设备安装示意图

1. OBD 单元;2. 主控电脑;3. 供电电池;4. 排气流量计;5. 气罐;
6. GAS 分析单元;7. GPS;8. 气象站;9. 急停开关

表 3 WLTC、CLTC-P 工况参数

测试工况	持续时长/s	行驶里程/km	最高速度/(km·h ⁻¹)	平均速度/(km·h ⁻¹)	怠速时间/%	最大加速度/(m·s ⁻²)
WLTC	1 800	23.27	131.3	46.5	13.2	1.67
CLTC-P	1 800	14.48	114	29	221	1.47

实际道路工况试验路段选择在襄阳市高新区, 测试路线如图 4 所示, 总里程 75.0 km, 其中市区里程 24.2 km、市郊里程 24.4 km、高速里程 26.4 km, 分别占比 32.23%、32.53% 和 35.2%; 测试路段累积正海拔增加量为 546.3 m/100 km; 测试中环境温度变化范围为 17.9℃~19.6℃, 低于 30℃; 测试路线海拔高度在 192.7 m~313.2 m, 以上数据均满足 RDE 法规要求。道路坡度在 -0.05~0.05 范围内变动, 接近于 0, 因此可以忽略其对 RDE 试验结果的影响。汽油车的实际道路工况曲线如图 5 所示。

3 试验数据分析

本文选取的 3 辆国 VI 轻型汽油车和 3 辆轻型纯电动汽车均分别在 WLTC、CLTC-P 和实际道路工况下进行了能耗试验, 经过同类车辆的对比分析发现, 汽油车或纯电动汽车在同一测试工况下, 碳排

测量的主要参数是动力电池和启动电池的电压及电流, 使用的电耗测试设备均为电流钳、电压钳、电压外接器、功率分析仪, 通过电压和电流可以算出电耗, 再通过第一节方法进行电耗折算, 便可得到电力生产端 CO₂ 的排放量。

2.3 WLTC、CLTC-P 及实际道路能耗试验

WLTC 分为低速段、中速段、高速段和超高速段 4 部分, CLTC-P 由低速、中速和高速 3 个速度区间组成, 两测试工况均为瞬态循环, 工况时长 1 800 s, 工况曲线如图 3 所示, 工况参数见表 3。

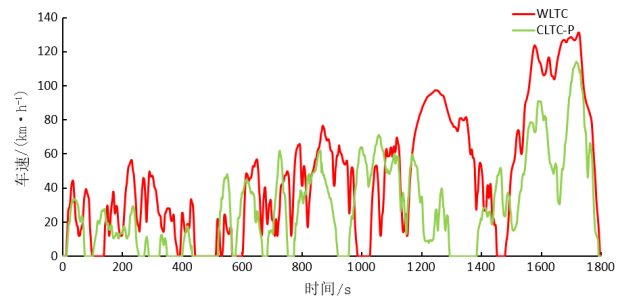


图 3 WLTC、CLTC-P 工况曲线

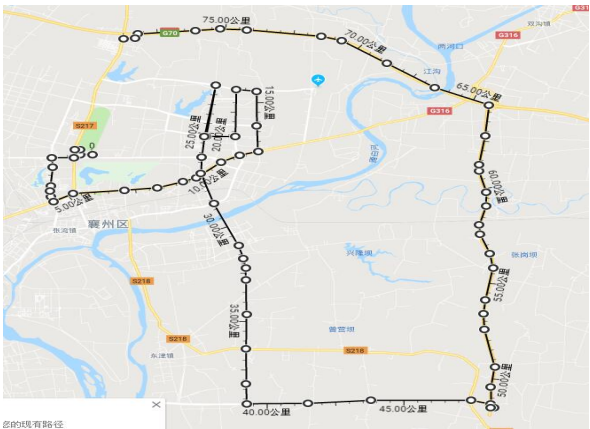


图 4 实际道路测试路线

放随车速、加速度、VSP 等参数的变化趋势是一致的, 只是数值上存在细微的差别。为了避免本文的图过于繁杂, 能够清晰表达变化趋势, 特选取 1 号汽油车与 1 号纯电动汽车作为例子来分析汽油车和纯电动汽车的碳排放特性。

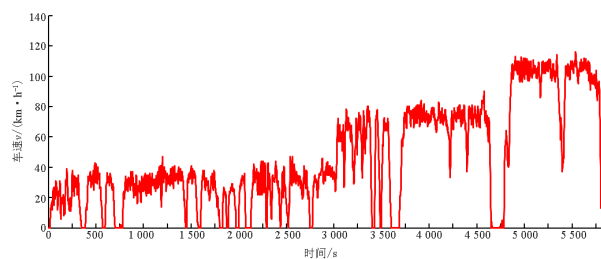
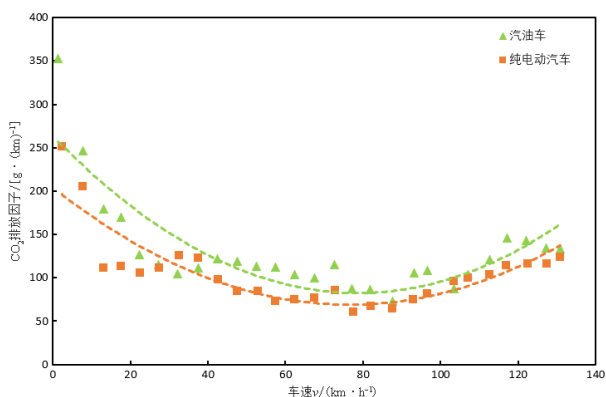
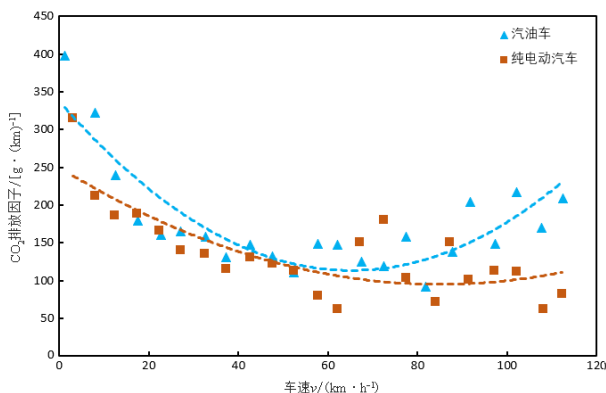
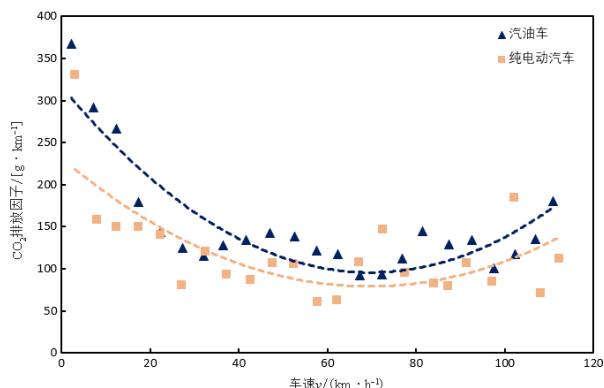


图5 汽油车实际道路工况曲线

3.1 速度对CO₂排放的影响

为分析速度对CO₂排放的影响,将WLTC测试工况的实际车速分为(0, 5), [5, 10), [10, 15), ..., [130, 135)共27组,CLTC-P测试工况的实际车速分为(0, 5), [5, 10), [10, 15), ..., [110, 115)共23组,实际道路工况的车速分为(0, 5), [5, 10), [10, 15), ..., [115, 120)共24组,对每组的车速和CO₂排放因子进行平均处理,得到CO₂排放因子随车速的变化关系,如图6~8所示。

图6 WLTC循环CO₂排放因子与车速关系图7 CLTC-P循环CO₂排放因子与车速关系图8 实际道路CO₂排放因子与车速关系

由图6~8可以清晰地看出, WLTC循环、CLTC-P循环和实际道路3种测试工况下,汽油车和纯电动汽车的CO₂排放因子与车速的关系呈相同的变化趋势,均随车速的升高先快速下降,随后下降速率减缓,在达到最小值后,随着车速的继续升高,CO₂排放因子又快速上升。整体而言,3种测试工况下,汽油车CO₂排放因子随车速的变化均更加激烈,而纯电动汽车相对平缓很多。同时也可以看到,3种测试工况下,两车均在车速为0~5 km/h的区间内有最大的排放因子,汽油车分别为352.436 g/km、398.212 g/km和367.537 g/km,纯电动汽车分别为251.443 g/km、319.294 g/km和330.468 g/km,前者分别是后者的1.4倍、1.25倍、1.11倍;而车速区间为60~90 km/h时,汽油车的发动机和纯电动汽车的电动机都处于最佳的经济运行状态,两车的平均CO₂排放因子均达到最小值,汽油车分别为104.236 g/km、129.932 g/km和114.958 g/km,纯电动汽车分别为84.863 g/km、120.073 g/km和95.711 g/km,前者分别为后者的1.23倍、1.08倍、1.2倍。

结合图9~11及以上的分析结果可以得出,单纯考虑车速的情况下,纯电动汽车在WLTC循环、CLTC-P循环和实际道路工况下的CO₂排放均比汽油车更具有优势,特别是在低速区间优势更加明显,所以,常年工作在低速市区工况的轻型特种作业车,如轻型物流车更适合使用纯电动汽车,这对减排能起到积极的作用。

3.2 加速度对CO₂排放的影响

为分析加速度对CO₂排放的影响, WLTC、CLTC-P和实际道路工况均取(0, 30)、[30, 60)、[60, 90)和[90, +∞) km/h的车速区间, 分别代表低速、中速、中高速和高速, 然后在每一个车速区间将加速度分成 $(-\infty, -1]$ 、 $(-1, -0.6]$ 、 $(-0.6, -0.3]$ 、 $(-0.3, -0.1]$ 、 $(-0.1, 0.1]$ 、 $(0.1, 0.3]$ 、 $(0.3, 0.6]$ 、 $(0.6, 1]$ 和 $(1, +\infty)$ m/s²共9个加速度区间, 分别计算各个区间内的平均排放因子。图9~11给出了3种测试工况下汽油车与纯电动汽车的CO₂排放因子与加速度的关系曲线。

从图9~11可以看出, WLTC循环和CLTC-P循环工况下, 汽油车和纯电动汽车CO₂排放因子与加速度的关系曲线呈现相同的变化趋势, 而实际道路工况下, 汽油车的变化趋势与前两种测试工况呈现较大的不同, 纯电动汽车与前两种测试工况变化趋势一致。

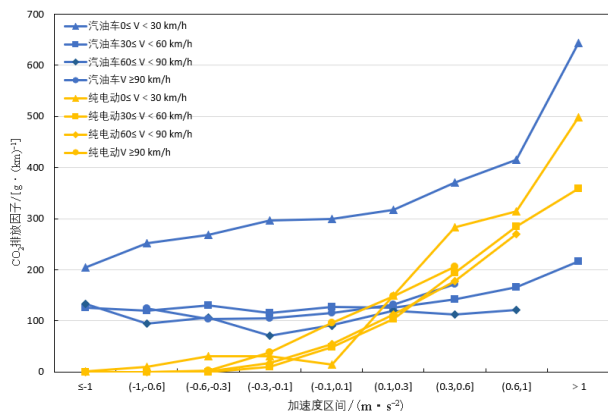


图9 WLTC循环CO₂排放因子与加速度关系

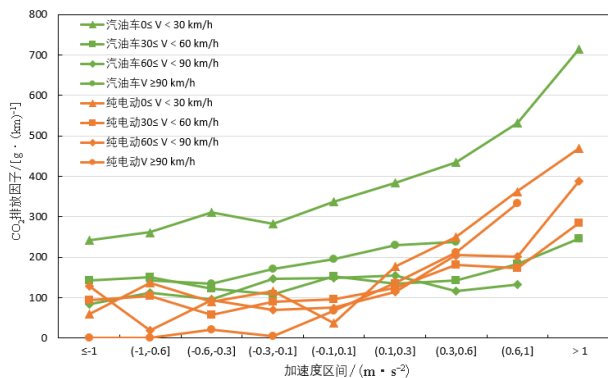


图10 CLTC-P循环CO₂排放因子与加速度关系

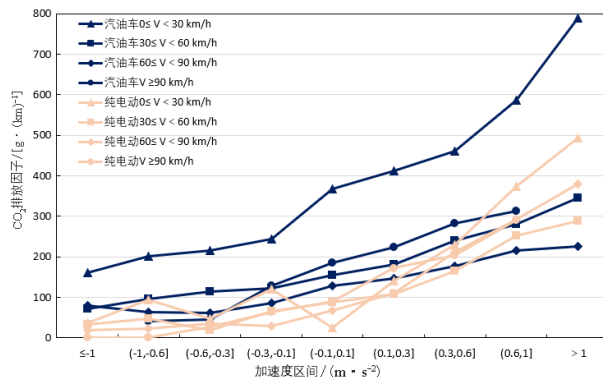


图11 实际道路CO₂排放因子与加速度关系

在WLTC循环和CLTC-P循环下, 汽油车在中速、中高速和高速的车速区间, CO₂排放因子随加速度的增大波动不大, 只在加速区间有略微增长; 而实际道路工况下, CO₂排放因子与加速度呈很强的正相关性, 这可能是由于实际道路工况存在较多的激烈驾驶行为造成的。3种测试工况下, 汽油车在低速时, CO₂排放因子随加速度的变化最为明显和激烈, 一方面, 随着加速度的增大, CO₂排放因子在减速区间缓慢上升, 在匀速和加速区间急剧上升; 另一方面, 低速时, CO₂排放因子普遍很高, 特别是在 >1 m/s²的急加速区间会达到最大值, 3种测试工况低速段的平均CO₂排放因子分别是340.633 g/km、388.728 g/km和382.104 g/km, 明显大于低速段纯电动汽车的161.063 g/km、188.831 g/km和173.293 g/km, 前者分别是后者的2.11倍、2.06倍和2.2倍, 这是因为汽油车在低速行驶时, 燃油燃烧不充分且发动机处于非常不利的低转速、低效率工作状态, 所以排放很高。而汽油车在低速急加速时, 必须通过增加燃油供给以提供足够的能量完成急加速过程, 此时发动机通常处于富燃状态, 因而CO₂排放因子会急剧升高。与汽油车不同的是, 纯电动汽车在3种测试工况的所有车速区间里, 减速状态下CO₂排放因子都会保持一个非常低的值且基本没有波动。产生这个现象的主要原因是纯电动汽车比汽油车多了制动能量回收系统, 在制动或减速时, 车辆的部分机械能会转换为电能进行回收, 用以补偿动力电池的电耗, 且随着动力电池电量的不断降低, 能量回收的效率会越来越高,

因而减速状态纯电动汽车的CO₂排放因子会一直处于一个稳定的低值。匀速和加速状态下,随着加速度的增大,CO₂排放因子呈现激烈的上升趋势,在加速度较大时,CO₂排放因子的值超过了同速度区间下的汽油车的值。

由以上分析可知,汽油车和纯电动汽车CO₂排放因子在加速时最高,匀速次之,减速最小。汽油车在低速尤其在低速急加速状态下CO₂排放因子很高;纯电动汽车在减速状态下CO₂排放因子处于稳定的低值,在急加速状态下CO₂排放因子急剧升高。因此,基于减排目的选择车辆,如果长期运行于车速较低且频繁启停的市区工况适合选用纯电动汽车,如果长期跑中高速和高速工况则选汽油车更有优势。

3.3 VSP对CO₂排放的影响

VSP是车辆瞬时功率和机动车质量的比值,为车速、加速度、风阻和坡度等参数的函数,单位为kW/t。VSP结合了瞬时速度和瞬时加速度,能够综合反映车辆的行驶工况,在轻型车排放特征分析上有广泛的应用。大量研究也证明了瞬时比功率与机动车的排放水平有较强的相关性^[17-20],所以本小节基于VSP,研究3种测试工况下的汽油车和纯电动汽车的CO₂排放情况。

对于轻型汽油车,VSP的计算公式^[21]为:

$$\text{VSP} = v \{ 1.1a + 9.81 [a \tan (\sin \theta)] + 0.132 \} + 0.000302v^3 \quad (5)$$

式中: v 为车速, m/s; a 为加速度, m/s²; θ 为道路坡度, 由于转毂能耗试验道路坡度恒为0, 实际道路能耗试验的道路坡度波动极小且接近于0, 可以忽略其对试验结果的影响, 所以此处 θ 统一取值为0。得到最终VSP计算公式为:

$$\text{VSP} = v(1.1a + 0.132) + 0.000302v^3 \quad (6)$$

基于试验数据算出VSP后对其进行由小到大排列, 并如表4所示按照等间距将其划分为模块1-10, 对应的VSP范围分别为VSP≤-20, -20<VSP≤-15, …, VSP>20。再者, 通过分析式(6)

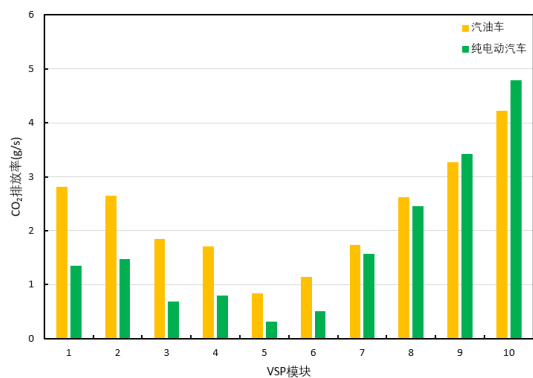
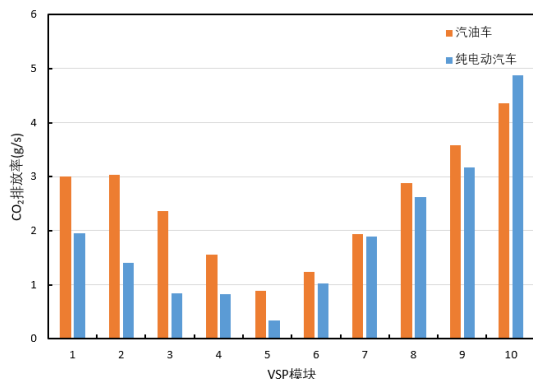
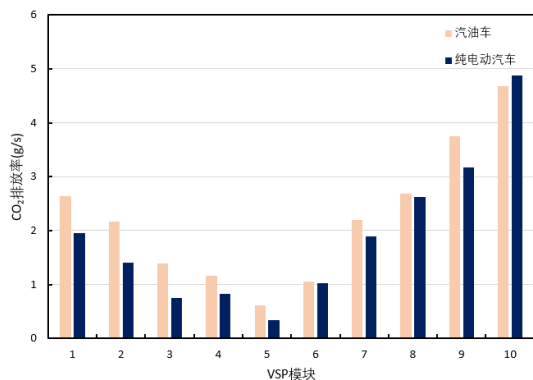
可知, VSP<0时, 车辆处于减速状态; VSP=0时, 车辆处于怠速状态; VSP>0时, 车辆处于匀速或加速状态。

表4 VSP区间划分

VSP模块	VSP范围/(kW·t ⁻¹)
1	VSP≤-20
2	-20<VSP≤-15
3	-15<VSP≤-10
4	-10<VSP≤-5
5	-5<VSP≤0
6	0<VSP≤5
7	5<VSP≤10
8	10<VSP≤15
9	15<VSP≤20
10	VSP>20

通过计算各个VSP区间的CO₂平均瞬时排放率, 得到3种测试工况下汽油车和纯电动汽车的CO₂排放率与VSP的变化关系, 如图12~14所示。

由图12~14可以看出, 汽油车和纯电动汽车在各自的WLTC循环、CLTC-P循环和实际道路3种测试工况下, CO₂排放率随VSP的变化趋势大致相同。在VSP≤0时, 对于汽油车, CO₂排放率随着VSP值的增大而降低, 在-5<VSP≤0时达到最小值, 3种测试工况下的数值分别为0.834 g/s、0.893 g/s和0.612 g/s。而对于纯电动汽车, CO₂排放率随VSP值的增加并未呈现严格单调递减的趋势, 但同一VSP区间CO₂排放率的值均比汽油车的低, 也是在-5<VSP≤0时有最小值, 分别为0.313 g/s、0.335 g/s和0.336 g/s, 前者分别是后者的2.66倍、2.67倍和1.82倍。在VSP>0时, 两车的CO₂排放率均随着VSP值的增大呈近似线性增长, 在VSP>20时达到最大值。还可以看出, 纯电动汽车在VSP≤20时CO₂排放率都比汽油车的低, 说明此VSP区间, 纯电动汽车的CO₂瞬时排放量更占优势, 但在VSP>20时, 纯电动汽车的CO₂排放率反超了汽油车, 说明在高速急加速状态, 汽油车的CO₂瞬时排放量更占优势。

图 12 WLTC 循环 CO₂ 排放率与 VSP 关系图 13 CLTC-P 循环 CO₂ 排放率与 VSP 关系图 14 实际道路 CO₂ 排放率与 VSP 关系

3.4 行程动力学参数对 CO₂ 排放的影响

实际道路能耗试验的排放水平与驾驶的激烈程度有很大关系，根据 GB 18352.6—2016《轻型汽车污染物排放限值及测量方法（中国第六阶段）》规定， $v \cdot a_{\text{pos}}.[95]$ （速度和加速度的乘积的第 95 百分位， m^2/s^3 ）和 RPA（ m/s^2 ）是表征实际道路驾驶激烈程度的核心参数，但是由于缺乏平顺驾驶和激烈驾驶作为对比，各行驶路段下的单个 $v \cdot a_{\text{pos}}.[95]$ 和 RPA 很难体现与 CO₂ 排放因子的变化关系，所以

本小节基于各行驶路段秒采 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 和 RPA 研究汽车行驶动力学特性与 CO₂ 排放因子的关系。

3.4.1 行程动力学参数校验

按照每秒瞬时车速大小将实际道路试验车速划分为市区（ $v \leq 60 \text{ km/h}$ ）、市郊（ $60 < v \leq 90 \text{ km/h}$ ）和高速（ $v > 90 \text{ km/h}$ ）3 个速度集合，各速度集合均需满足 $v \cdot a_{\text{pos}}.[95]$ 和 RPA 的验证，实际道路行程方为有效。在进行动力学参数校验时要求每个速度组中加速度值 $a_i \geq 0.1 \text{ m/s}^2$ 的数据集合数量不应小于 150 个，实际道路能耗试验中各路段 $a_i \geq 0.1 \text{ m/s}^2$ 数据集合数量见表 5。由表可知，实际道路能耗试验中各路段 $a_i \geq 0.1 \text{ m/s}^2$ 的数据个数均大于 150 个，通过验证。

表 5 实际道路能耗试验各路段 $a_i \geq 0.1 \text{ m/s}^2$ 的数据集合数量

测试车辆	市区	市郊	高速
汽油车	1259	468	398
纯电动汽车	1301	479	375

实际道路能耗试验对每个速度组中的 $v \cdot a_{\text{pos}}.[95]$ 进行验证的标准为：如果 $\bar{v}_k \leq 74.6 \text{ km/h}$ ，并且 $(v \cdot a_{\text{pos}})_k.[95] > (0.136 \cdot \bar{v}_k + 14.44)$ ，行程无效；如果 $\bar{v}_k > 74.6 \text{ km/h}$ ，并且 $(v \cdot a_{\text{pos}})_k.[95] > (0.0742 \cdot \bar{v}_k + 18.966)$ ，行程无效。对 RPA 进行验证的标准为：如果 $\bar{v}_k \leq 94.05 \text{ km/h}$ ，并且 $\text{RPA}_k < (-0.0016 \cdot \bar{v}_k + 0.1755)$ ，行程无效；如果 $\bar{v}_k > 94.05 \text{ km/h}$ ，并且 $\text{RPA}_k < 0.025$ ，行程无效。通过计算，实际道路能耗试验各路段的 $v \cdot a_{\text{pos}}.[95]$ 和 RPA 验证结果如表 6 和表 7 所示，汽油车和纯电动汽车各路段 $v \cdot a_{\text{pos}}.[95]$ 的实际值均小于括号内的参考值，RPA 的实际值均大于括号内的参考值，实际道路能耗试验汽油车和纯电动汽车的 $v \cdot a_{\text{pos}}.[95]$ 与 RPA 均通过验证。

3.4.2 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 和 RPA 对 CO₂ 排放的影响

基于各行驶路段 $v \cdot a_{\text{pos}}.[95]$ 与 RPA 均通过有效性验证的条件下，计算出各行驶路段的秒采 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 和 RPA，将 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 以每 $2.5 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 为增量划分为 $[0,$

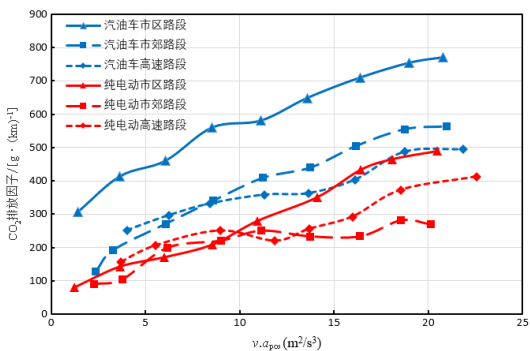
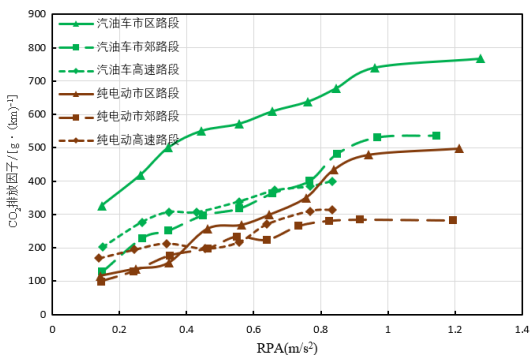
表6 实际道路能耗试验各路段 $v \cdot a_{\text{pos}}$ [95]验证

测试车辆	市区	市郊	高速	验证结果
汽油车	11.301 (17.82)	18.259 (24.282)	16.358 (26.656)	通过
纯电动 汽车	9.871 (17.804)	19.543 (24.260)	17.008 (26.650)	通过

表7 实际道路能耗试验各路段 RPA 验证

测试车辆	市区	市郊	高速	验证结果
汽油车	0.189 (0.136)	0.163 (0.06)	0.143 (0.025)	通过
纯电动 汽车	0.181 (0.135)	0.161 (0.059)	0.128 (0.025)	通过

2.5), [2.5, 5), [5, 7.5), ..., [20, +∞) 共9个区间, RPA 以每 0.1 m/s^2 为间隔划分为 (0.1, 0.2], (0.2, 0.3], (0.3, 0.4], ..., (1, +∞) 共10个区间, 并计算每个区间平均 CO_2 排放因子。图15和图16分别给出了汽油车、纯电动汽车在各行驶路段下的 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 和 RPA 与 CO_2 排放因子的关系。

图15 各路段 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 与 CO_2 排放因子的关系图16 各路段 RPA 与 CO_2 排放因子的关系

由图可知, 在各行驶路段, 汽油车和纯电动汽车 CO_2 排放因子总体上均随 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 和 RPA 的增大呈

先上升后趋于稳定的趋势, 具有很强的正相关性。同时也可以看出, 汽油车在各行驶路段的 CO_2 排放因子均比纯电动汽车高, 在市区路段尤为明显, 达到2倍之多。这是因为市区路段车速低、车辆频繁启停、激烈驾驶行为多, 汽油车的发动机一直工作于恶劣的燃烧环境, 导致 CO_2 排放居高不下, 而纯电动汽车有再生制动能量回收作为缓冲, CO_2 排放会维持较稳定的低值。

4 结论

(1) 在 WLTC、CLTC-P 和实际道路3种测试工况下, 汽油车和纯电动汽车的 CO_2 排放因子均随车速的升高先下降后上升, 且前者的变化相对后者更加激烈。同时, 单纯考虑车速的情况下, 纯电动汽车在3种测试工况下的 CO_2 排放均比汽油车更具有优势, 特别是在低速区间优势更加明显。

(2) 3种测试工况下, 汽油车在 $\geq 30 \text{ km/h}$ 的车速区间, CO_2 排放因子随加速度的增大波动较小; 在 $0 \sim 30 \text{ km/h}$ 的低速区间, CO_2 排放因子均有很高的值, 在 $> 1 \text{ m/s}^2$ 的低速急加速区间达到最大值, 整个低速段的平均 CO_2 排放因子达到纯电动汽车的 2.06~2.2 倍; 纯电动汽车在减速区间, CO_2 排放因子维持稳定的低值; 匀速及加速区间, 随加速度增大呈激烈上升趋势。

(3) 汽油车 CO_2 排放率在3种测试工况下均随 VSP 的增大先下降后上升。而纯电动汽车在 $\text{VSP} \leq 0$ 时, CO_2 排放率随 VSP 值的增加并未呈现严格单调递减的趋势; 在 $\text{VSP} > 0$ 时, 随 VSP 值的增大呈近似线性增长, 且在 $\text{VSP} > 20$ 的高速急加速区间 CO_2 排放率反超了汽油车, 此时汽油车的 CO_2 瞬时排放量更占优势。

(4) 动力学参数 $v \cdot a_{\text{pos}}$ 及 RPA 与汽油车和纯电动汽车在各行驶路段下的平均 CO_2 排放因子呈强正相关性, 且市区路段纯电动汽车平均 CO_2 排放因子只有汽油车的 50% 左右, 具有明显的排放优势。

参考文献 (References)

- [1] 刘雅文.《bp世界能源统计年鉴》2021年版发布:能源市场遭受巨大冲击[J].中国石油和化工,2021(8):32-33.
LIU Yawen.《bp World Energy Statistics Yearbook》Release in 2021: the Energy Market Has Suffered a Huge Impact [J].China Petroleum and Chemical Industry, 2021 (8): 32-33.(in Chinese)
- [2] 中国电力企业联合会.中电联发布《中国电力行业年度发展报告 2021》[EB/OL].(2021-07-08)[2021-11-10].
<https://news.bjx.com.cn/html/20210708/1162855.shtml>.
China Federation of Electric Power Enterprises. China Power Council Issued the Annual Development Report of China's Power Industry 2021 [EB/OL]. (2021-07-08) [2021-11-10]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210708/1162855.shtml>.(in Chinese)
- [3] 严军华,王舒笑,袁浩然,等.电动汽车能耗与气体排放分析及环境影响评价[J].华南理工大学学报(自然科学版),2018,46(6):137-144.
YAN Junhua, WANG Shuxiao, YUAN Haoran, et al. Analysis of Energy Consumption and Gas Emission of Electric Vehicles and Environmental Impact Assessment Price [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 46 (6): 137-144. (in Chinese)
- [4] 严岩,陈行.纯电动汽车和传统汽车使用周期效益比较研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(1):177-181.
YAN Kui, CHEN Xing. Comparative Study on Service Cycle Benefits of Pure Electric Vehicle and Traditional Vehicle [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2021, 45 (1): 177-181.(in Chinese)
- [5] 黎土煜,余大立,张洪申.基于GREET的纯电动公交车与传统公交车全生命周期评估[J].环境科学研究,2017,30(10):1653-1660.
LI Tuyu, YU Dali, ZHANG Hongshen. Life Cycle Assessment of Pure Electric Bus and Traditional Bus Based on GREET [J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(10):1653-1660.(in Chinese)
- [6] RAHMAN M M, ZHOU Yuan, ROGERS J, et al. A Comparative Assessment of CO₂ Emission Between Gasoline, Electric, and Hybrid Vehicles: A Well-to-Wheel Perspective Using Agent-Based Modeling [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 321: 128-144.
- [7] SHENG M S, SREENIVASAN A V, SHARP B, et al. Well-to-Wheel Analysis of Greenhouse Gas Emissions and Energy Consumption for Electric Vehicles: A Comparative Study in Oceania [J]. Energy Policy, 2021, 158: 112552.
- [8] 冯超.基于HLCA的电动汽车规模化发展对能耗及环境影响研究[D].北京:中国矿业大学,2017.
FENG Chao. Research on the Impact of Large-Scale Development of Electric Vehicles on Energy Consumption and Environment Based on HLCA [D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2017. (in Chinese).
- [9] 哈宁宁.电动汽车全生命周期碳排放评估及对环境的影响[D].北京:华北电力大学,2020.
HA Ningning. Life Cycle Carbon Emission Assessment of Electric Vehicles and Its Impact on the Environment [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020. (in Chinese)
- [10] REQUIA W J, ADAMS M D, ARAIN A, et al. Carbon Dioxide Emissions of Plug-in Hybrid Electric Vehicles: A Life-Cycle Analysis in Eight Canadian Cities [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 78: 1390-1396.
- [11] RUPP M, HANDSCHUH N, RIEKE C, et al. Contribution of Country-Specific Electricity Mix and Charging Time to Environmental Impact of Battery Electric Vehicles: A Case Study of Electric Buses in Germany [J]. Applied Energy, 2019, 237: 618-634.
- [12] NIMESH V, KUMARI R, SONI N, et al. Implication Viability Assessment of Electric Vehicles for Different Regions: An Approach of Life Cycle Assessment Considering Exergy Analysis and Battery Degradation [J]. Energy Conversion and Management, 2021, 237: 114104.
- [13] 国家能源局&中国电力企业联合会.国家能源局和中电联联合发布《2020年全国电力可靠性年度报告》[EB/OL].(2021-10-09)[2021-11-10].
<http://prpq.nea.gov.cn/ndbg/6425.html>.
China National Energy Administration & China Federation of Electric Power Enterprises. China National Energy Administration and China Power Council Jointly Issued the 2020 National Annual Report on Power Reliability [EB/OL]. (2021-10-09) [2021-11-10]. <http://prpq.nea.gov.cn/ndbg/6425.html>. (in Chinese)

- [14] 联合国政府间气候变化专门委员会 .IPCC-各种燃料 CO₂ 排放系数 [EB/OL]. (2006-10-23) [2021-11-10]. <https://www.doc88.com/p-1784636850310.html>.
United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC-CO₂ Emission Coefficient of Various Fuels [EB/OL]. (2006-10-23) [2021-11-10]. <https://www.doc88.com/p-1784636850310.html>. (in Chinese)
- [15] 联合国政府间气候变化专门委员会 .IPCC-各种能源与标准煤的参考折标系数 [EB/OL]. (2005-11-15) [2021-11-10]. <https://www.docin.com/p-2074137334.html>.
United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC-Reference Conversion Coefficient of Various Energy and Standard Coal [EB/OL]. (2005-11-15) [2021-11-10]. <https://www.docin.com/p-2074137334.html>. (in Chinese)
- [16] 国家能源局 . 国家能源局发布《2020年全国电力工业统计数据》 [EB/OL]. (2021-01-20) [2021-11-10]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210120/1131091.shtml>.
China National Energy Administration. China National Energy Administration Issued the 2020 National Power Industry Statistics [EB/OL]. (2021-01-20) [2021-11-10]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210120/1131091.shtml>. (in Chinese)
- [17] HUAI Tao, 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, 2006, 39 (24) : 9595-9600.
- [18] ZHAI Haibo, 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] 韩亚欣, 谭建伟, 杨佳, 等. WLTC循环下汽油车氨排放影响因素分析 [J]. 环境科学研究, 2019, 32(4): 654-661.
HANG Yaxin, TAN Jianwei, YANG Jia, et al. Analysis on Influencing Factors of Ammonia Emission from Gasoline Vehicles Under WLTC Cycle [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32 (4) : 654-661. (in Chinese)
- [20] 彭美春, 廖清睿, 黎育雷, 等. 驾驶激烈程度与载荷对柴油车 RDE 影响研究 [J]. 安全与环境学报, 2021, 21(2): 815-822.
PENG Meichun, LIAO Qingrui, LI Yulei, et al. Study on the Influence of Driving Intensity and Load on RDE of Diesel Vehicle [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(2) : 815-822. (in Chinese)
- [21] JIMÉNEZ-PALACIOS J L. Understanding and Quantifying Motor Vehicle Emissions with Vehicle Specific Power and TILDAS Remote Sensing [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1999.

作者简介



董阿山 (1995-), 男, 江西上饶人, 硕士, 主要研究方向为发动机排放。

Tel: 15072311478

E-mail: 1587551092@qq.com