DOI: 10.16236/j.cnki.nrjxb.202502016

高原地区混合动力汽车污染物排放特性与燃油经济性

姚杨雨[1,2]，李加强[1,2]，赵龙庆[1,2]，何 超[1,2]

（1. 西南林业大学机械与交通学院，昆明 650224；
2. 云南省高校高原山区机动车环保与安全重点实验室，昆明 650224）

摘要：为探究混合动力汽车在高原地区是否实现节能减排，在两个城市使用便携式车载排放测试系统对符合国Ⅵ标准的增程式混合动力汽车（E-REV）、插电式混合动力汽车（PHEV）和汽油车开展实际行驶排放（RDE）试验，分析混合动力汽车在高原地区的实际排放和燃油经济性. 结果表明：冷却液温度越低、速度与加速度的乘积越大，CO、NO_x 瞬时排放越大；剔除冷起动排放后，冷起动阶段的 CO、NO_x 排放降低比例大于 CO_2 排放，混合动力汽车的污染物排放受高原环境的影响较小；随着海拔升高，PHEV 和汽油车的 CO 排放上升，而 E-REV 的 CO 排放下降，E-REV、PHEV 和汽油车的 CO_2 排放增加，NO_x 排放下降. 与汽油车相比，E-REV 和 PHEV 在高原地区的 NO_x 减排体现在市郊、高速工况. E-REV 的燃油消耗量随着海拔升高而升高，相比 E-REV，PHEV 具有良好的燃油经济性.

关键词：混合动力汽车；实际行驶排放；燃油经济性；排放

中图分类号：TK417　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1000-0909（2025）02-0136-08

Pollutant emission and fuel economy of hybrid electric vehicles in plateau regions

Yao Yangyu[1,2]，Li Jiaqiang[1,2]，Zhao Longqing[1,2]，He Chao[1,2]

（1. College of Mechanics and Transportation，Southwest Forestry University，Kunming 650224，China；2. Key Laboratory of Vehicle Environment Protection and Safety in Plateau Mountain Area of Yunnan Provincial Colleges，Kunming 650224，China）

Abstract：To investigate whether hybrid electric vehicles can achieve energy savings and emissions reduction in plateau regions，real driving emissions（RDE）tests were conducted using a portable onboard emissions measurement system in two cities on extended-range electric vehicles（E-REV），plug-in hybrid electric vehicles（PHEV），and gasoline vehicles compliant with China Ⅵ emission standards. The study analyzed the actual emission characteristics and fuel economy of hybrid electric vehicles in plateau regions. The results indicate that lower coolant temperatures and higher values of the product of speed and acceleration（$v \cdot a$）result in higher instantaneous emissions of carbon monoxide（CO）and nitrogen oxides（NO_x）. After excluding cold start emissions，the reduction proportions of CO and NO_x emissions during the cold start phase are greater than those of carbon dioxide（CO_2）emissions. The pollutant emissions of hybrid electric vehicles are less affected by plateau environments. As the altitude increases，CO emissions rise for PHEVs and gasoline vehicles，while CO emissions decrease for E-REV. The CO_2 emissions for E-REVs，PHEVs，and gasoline vehicles increase，and NO_x emissions decrease. Compared to gasoline vehicles，the NO_x reduction of E-REV and PHEV in plateau regions is mainly observed in suburban and highway conditions. The fuel consumption（FC）of E-REV increases with altitude，and PHEVs demonstrate better fuel economy compared to E-REV.

Keywords：hybrid electric vehicle；real driving emissions；fuel economy；emission

收稿日期：2024-04-11；**修回日期**：2024-07-02.
基金项目：国家自然科学基金资助项目（51968065）；云南省教育厅科学研究基金资助项目（2023Y0770）.
作者简介：姚杨雨，硕士研究生，yyangyu@swfu.edu.cn.
通信作者：赵龙庆，博士，教授，zlqcar@aliyun.com.

天然气、石油和煤炭等能源燃烧产生的污染物进入大气，导致温室效应加剧、生态环境恶化[1]，危害人体健康[2]. 数据[3]显示，2022 年中国机动车的 CO、NO_x 排放分别为 743.0×10^7 kg 和 526.7×10^7 kg，排放超过移动源污染物排放的 90%. 在双碳背景下，混合动力汽车是应对环境恶化的重要车型，中国混合动力汽车保有量逐步增长[4-5]，其发展对推动汽车行业的绿色发展具有重要意义[6]. 在Ⅱ型试验中规定采用便携式排放测试系统(PEMS)测量车辆在道路驾驶过程中的实际行驶道路排放(RDE)[7].

靖春胜[8]对混合动力汽车进行等速燃油消耗试验，平均速度越高其燃油消耗量 b 越大，且 b 随加速度的增加整体呈先增加后降低趋势，混合动力汽车的最佳经济车速为 60 ~ 80 km/h. Huang 等[9]在全球轻型车统一测试循环(WLTC)和新欧洲驾驶循环(NEDC)工况下发现，与汽油车相比，混合动力汽车的 b、NO_x 和 CO_2 排放更低. 禹文林等[10]选择汽油车和混合动力汽车进行 RDE 试验，CO 和 NO_x 排放比同排量汽油车低 56.24% 和 45.91%，当混合动力汽车发动机负荷增大时，NO_x 排放出现峰值.

中国陆地海拔 1 000 m 以上的面积约占全国陆地总面积的 57.9%. 在世界范围内，还有德干高原、安托利亚高原等人口密集的高原地区. 然而，在海拔较高的地区，空气密度降低，导致发动机内燃油-空气混合气变浓，进而引起燃烧不完全，最终使混合动力汽车的实际排放与燃油经济性恶化[11]. Yan 等[12]研究了车辆在高海拔条件下的排放，发现 RDE 测试方法能揭示汽车在高原环境的实际排放特性. 郑丰等[13]在昆明和北京开展了 RDE 试验，结果表明：混合动力汽车的 CO 排放因子在昆明增加 85%，NO_x 排放因子下降 37%. 靖春胜[8]认为，混合动力汽车的 CO、NO_x 排放因子随海拔变化无明显波动，但 CO 排放随着车速增加而增大，NO_x 排放随着车速增加先增大后减小；随着加速度的增加，CO、NO_x 排放总体呈上升趋势；混合动力汽车在发动机冷起动阶段污染物排放较为严重. 由于汽车在冷起动阶段的发动机、后处理系统未达到理想工作温度，其 CO、NO_x 排放贡献显著高于热机运行阶段[14]. Liu 等[15]研究了重型汽车的 NO_x 排放特性，冷起动时间仅占整个测试时长 4% ~ 6% 左右，但 NO_x 排放的贡献超过 30%. 以往的研究多聚焦于平原地区及实验室转毂循环工况下的相关分析，而对于高原地区混合动力汽车在实际行驶过程中的排放及燃油经济性则鲜见报道.

基于此，笔者选择两辆不同类型的混合动力汽车和一辆汽油车，分别在高原地区和低海拔地区进行 RDE 测试. 基于试验数据，与低海拔地区对比，分析混合动力汽车在高原地区的实际污染物排放特性、实际燃油经济性，以期为混合动力汽车技术适应国内多样化的应用环境提供参考.

1　试验方案

1.1　试验车辆及设备

RDE 试验选用 3 辆满足国Ⅵ排放标准的轻型汽车，分别为增程式混合动力汽车(E-REV)、插电式混合动力汽车(PHEV)和汽油车，3 辆车供油方式均为缸内直喷，进气形式均为涡轮增压，主要参数见表 1. E-REV 和 PHEV 的试验开始前起始电量均为 10%，每次试验开始前进行浸车处理(12 h 以上).

表 1　车辆主要参数

Tab.1　Main parameters of the vehicles

参数	E-REV	PHEV	汽油车
燃油	95 号	95 号	92 号
排量/L	1.5	1.4	1.5
排放标准	国Ⅵ	国Ⅵ	国Ⅵ
供油方式	缸内直喷	缸内直喷	缸内直喷
进气形式	涡轮增压	涡轮增压	涡轮增压

图 1 为试验车辆及设备安装示意. 便携式车载排放测试系统采用 Horbia 公司生产的 OBS-ONE，能真实反映车辆实际道路行驶中的污染物排放水平. 该设备使用不分光红外分析(NDIR)测试 CO 和 CO_2 浓度，化学发光法(CLD)测量 NO_x 浓度. OBS-ONE 的数据记录仪与车载诊断系统(OBD)连接以收集发动机转速、冷却液温度和进气温度等发动机运行参数. 全球定位系统(GPS)用于记录经度、纬度、海拔及车速等参数，气象站用于确定试验过程中的环境温度、环境相对湿度等参数. 测试设备均由 24 V 电压供电，每次测试开始前将 PEMS 预热之后进行泄漏检查和功能检查，对每个分析仪进行零点和量程校准.

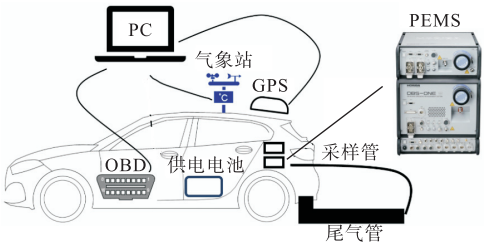


图 1　试验设备示意

Fig.1　Schematic of experimental equipment

1.2　试验环境及路线

为探究混合动力汽车在高原地区的污染物排放

特性和燃油经济性，在云南省昆明市（城市 1，平均海拔为 1 920 ± 50 m）和云南省红河哈尼族彝族自治州河口瑶族自治县（城市 2，平均海拔为 145 ± 50 m）选定路线. 其中，城市 1 的平均温度、环境相对湿度分别为 16 ℃和 54.18%，城市 2 的平均温度、环境相对湿度分别为 20 ℃和 45.04%. 根据 RDE 规定占比划分整个行驶路程为市区（速度 $v \leqslant 60$ km/h，占比为 34% ）、市郊（$60 < v \leqslant 90$ km/h，占比为 33% ）和高速路段（$v \geqslant 90$ km/h，占比为 33% ），各路段行驶比例误差控制为 10% 以内. 试验过程中按照市区、市郊及高速路段连续行驶，持续时间为 90 ~ 120 min，各路段最小行驶距离为 16 km.

1.3 数据处理

以固定频率（1 Hz）记录 RDE 试验中的污染物浓度、排气质量流量和车速等瞬时数据，利用反向移位法实现数据对正. 所有试验均通过行程动力学特性验证. 数据处理时剔除发动机熄火数据. 根据污染物瞬时浓度、瞬时排气质量流量与响应污染物的密度，确定瞬时质量排放速率为

$$m_{\mathrm{gas},i} = \rho_{\mathrm{gas},i} / \rho_{\mathrm{gas,e}} \times c_{\mathrm{gas},i} \times q_{\mathrm{mew},i} \times 10^{-3} \tag{1}$$

式中：$m_{\mathrm{gas},i}$ 为气体污染物瞬时质量排放速率；$\rho_{\mathrm{gas},i}$ 为气体污染物组分密度；$\rho_{\mathrm{gas,e}}$ 为排气密度；$c_{\mathrm{gas},i}$ 为排气中气体污染物体积分数；$q_{\mathrm{mew},i}$ 为排气质量流量；gas 为相应污染物；i 为测量值的编号.

$v \cdot a$ 是实际车速与加速度的乘积，用于表征车辆瞬时动力学状态，有

$$a_i = (v_{i+1} - v_{i-1}) / (2 \times 3.6) \quad (i = 1 \sim N_t) \tag{2}$$

$$(v \cdot a)_i = v_i a_i / 3.6 \quad (i = 1 \sim N_t) \tag{3}$$

式中：a_i 为编号 i 对应的加速度，$i = 1$ 时，$v_{i-1} = 0$，$i = N_t$ 时，$v_{i+1} = 0$；$(v \cdot a)_i$ 为编号 i 对应的实际车速与加速度的乘积.

使用累积平均法计算污染物排放因子 $\mathrm{EF}_{R,k}$，即

$$\mathrm{EF}_{R,k} = \sum_{i=1}^{m} m_{\mathrm{gas},i} \Big/ D_k \tag{4}$$

式中：R 为污染物排放类别，分别为 CO、CO_2、NO_x 排放；k 为市区、市郊、高速或总行程路段；D_k 为行驶距离.

利用碳平衡法计算汽车的燃油消耗量 F，对于装备汽油机的车辆，有

$$F = (0.115\,5/D)[(0.429 \times m_{\mathrm{CO}}) + (0.273 \times m_{\mathrm{CO_2}})] \tag{5}$$

式中：m_{CO} 和 $m_{\mathrm{CO_2}}$ 分别为 CO、CO_2 的排放质量；D 为 288 K（15 ℃）下试验燃料的密度.

计算 3 辆车在高原地区不同工况下的燃油消耗量增长率，有

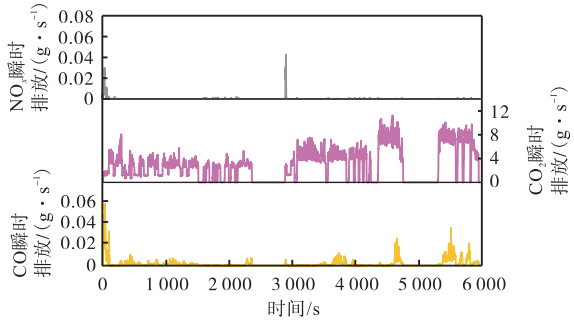
$$f = (F_{n,k,1} - F_{n,k,2}) / F_{n,k,2} \tag{6}$$

式中：n 为相应的车型.

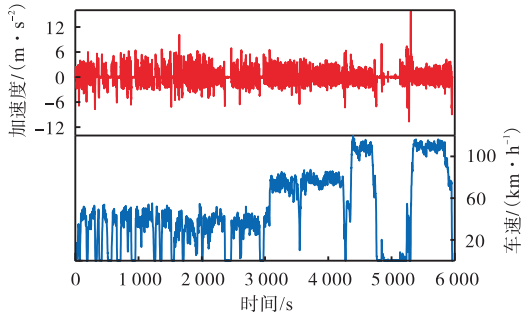
2 结果与讨论

2.1 瞬时排放

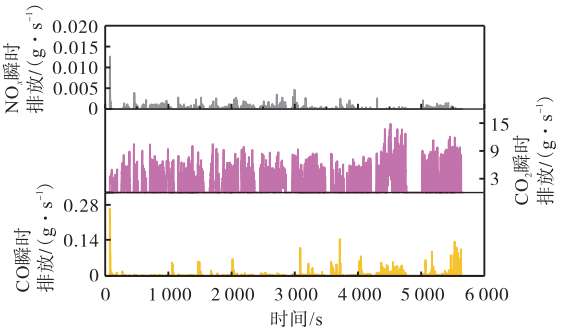
选取 E-REV 和 PHEV 在城市 1 中行驶的污染物瞬时排放数据进行分析，结果如图 2 所示. 在不同工



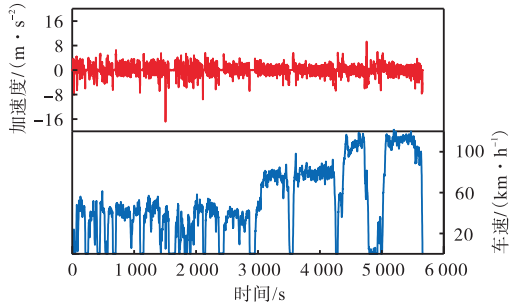
（a）污染物排放（E-REV）



（b）加速度和速度（E-REV）



（c）污染物排放（PHEV）



（d）加速度和速度（PHEV）

图 2 混合动力汽车污染物瞬时排放

Fig.2 Instantaneous emission of pollutants of hybrid electric vehicle

况下，E-REV 和 PHEV 的 CO、CO_2 及 NO_x 瞬时排放均出现明显波动，CO 和 CO_2 瞬时排放在高速工况下增大，NO_x 瞬时排放未出现明显增大. 当加速度出现极大值时，发动机负荷随着汽车加速而增大，此时使用浓混合气，导致燃油不完全燃烧，CO、CO_2 瞬时排放出现极大值. E-REV 和 PHEV 的 CO 瞬时排放峰值出现在冷起动阶段，分别为 0.059 g/s、0.282 g/s，NO_x 瞬时排放峰值出现在市区和冷起动阶段，分别为 0.043 g/s、0.013 g/s.

图 2 中，E-REV 和 PHEV 的 CO_2 和 NO_x 瞬时排放差异很大. E-REV 和 PHEV 的起始电量为 10%，电池电量几乎耗尽. E-REV 的发动机作为增程器在低电量时起动，始终保持高效的工作状态给电动机供电，再由电动机驱动汽车行驶，同时为动力电池补充电能[16]，因而 E-REV 在部分行驶区间 CO_2 瞬时排放稳定. 当电池电量充足时切换为纯电驱动模式，即在 2 365 ~ 2 887 s、4 758 ~ 5 307 s 等区间，CO_2 瞬时排放为 0 g/s，车速不为 0. PHEV 在电池电量不足且处于中、高负荷时电机停止运行，由发动机直接提供动力[17]. 因此，PHEV 的 CO_2 瞬时排放随着车速出现频繁波动，且纯电运行时段较少. 发动机起动是产生 NO_x 排放的关键因素，E-REV 和 PHEV 的发动机起动时出现 NO_x 瞬时排放，与 E-REV 相比，PHEV 的发动机起动更加频繁，所以 NO_x 瞬时排放出现频繁波动. 此外，所选 E-REV 和 PHEV 的电池容量分别为 42.8 kW/h 和 13.0 kW/h，可能是造成 CO_2 和 NO_x 瞬时排放不同的重要因素.

2.2　冷起动排放

根据 RDE 要求，冷却液温度 T_c 达到 70 ℃且不晚于发动机初始起动后 5 min，判定冷起动结束. E-REV、PHEV 和汽油车在城市 1 冷却液达到 70 ℃的时间分别为 378、672 和 278 s，在城市 2 为 331、982 和 222 s. 混合动力汽车的驱动制策略在一定程度上延长了冷起动时间，该期间污染物排放速率较高.

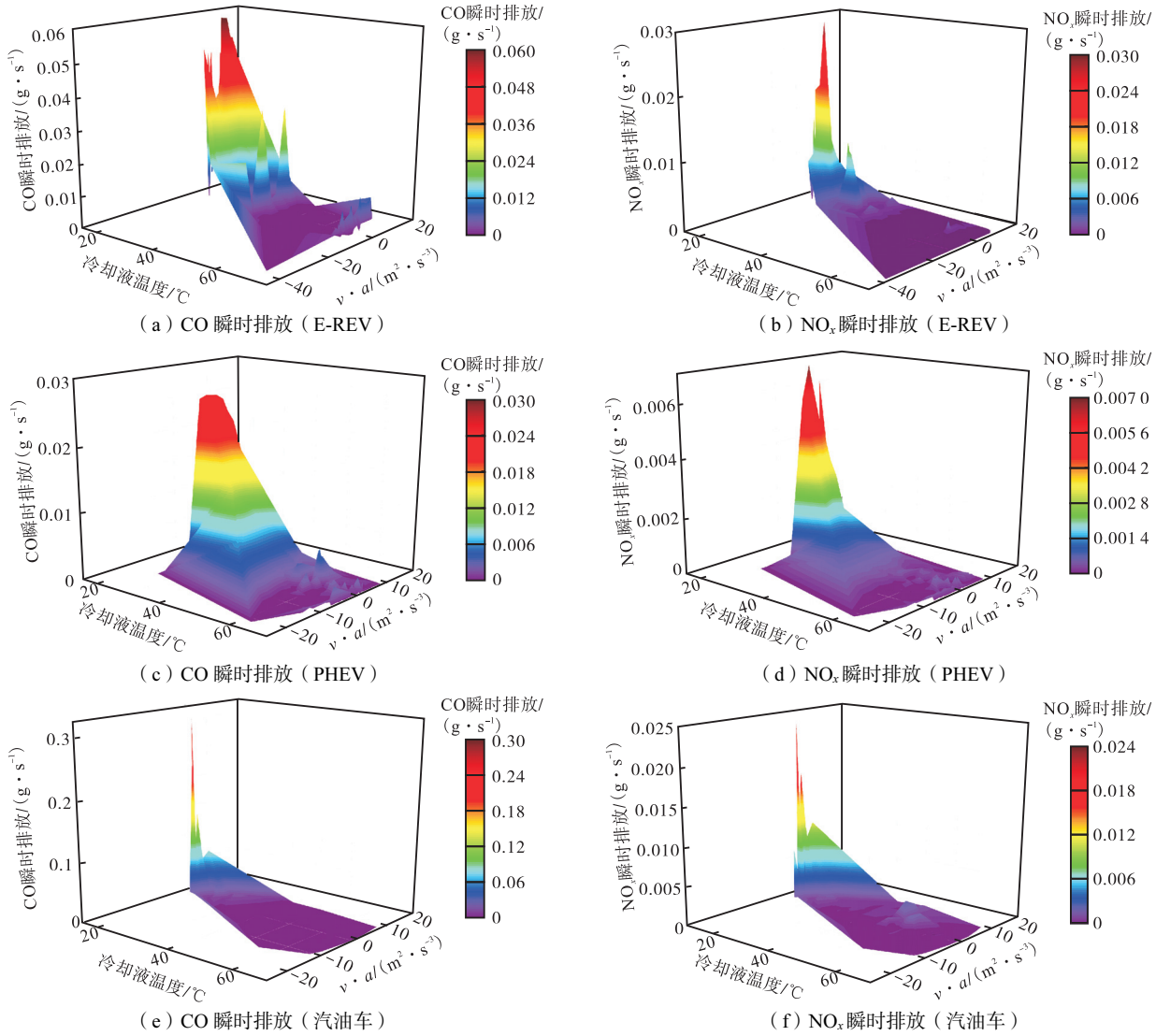
冷却液温度 T_c 能反映发动机的热状态，冷起动排放与 T_c、$v \cdot a$ 密切相关. 选取 E-REV、PHEV 和汽油车在城市 1 的测试数据进行分析. 图 3 为不同车型在冷起动阶段 CO、NO_x 瞬时排放与 T_c、$v \cdot a$ 的变化. CO、NO_x 排放主要集中于 $T_c \leqslant 30$ ℃、$v \cdot a > 0\ m^2\ s^3$ 区间，在此区间内，T_c 越低，$v \cdot a$ 越大，CO、NO_x 瞬时排放越大. 这是由于 $T_c \leqslant 30$ ℃时，催化剂未达到理想工作温度，发动机缸内低温燃烧，当 $v \cdot a > 0\ m^2\ s^3$ 时，汽车处于加速状态，发动机消耗更多的燃油且不充分燃烧，进而产生更多的污染物排放. 当 30 ℃ < $T_c \leqslant 70$ ℃时，随着 T_c 和 $v \cdot a$ 变化，CO、NO_x 瞬时排放未出现明显变化，表明 $T_c \leqslant 30$ ℃时的 CO、NO_x 排放与 $v \cdot a$ 密切相关，而 30 ℃ < $T_c \leqslant 70$ ℃时，CO、NO_x 排放受 $v \cdot a$ 影响较小，该结论与陈凌建等[18]的研究相似. 随着 T_c 升高，发动机缸体、润滑系统及尾气后处理系统逐渐升温，润滑油的流动性和润滑效果得到改善，减少发动机的摩擦和磨损，燃烧反应更加充分，CO、NO_x 污染物排放减少. 由图 3 可知，在冷起动期间，PHEV 的 CO 瞬时排放峰值大于汽油车，NO_x 瞬时排放峰值小于汽油车，而 E-REV 的 CO 瞬时排放峰值小于汽油车，NO_x 的瞬时排放峰值与汽油车相当，表明混合动力汽车与汽油车的冷起动排放特性差异较大.

为探究冷起动排放对市区和总行程排放的影响，笔者计算了 E-REV、PHEV 和汽油车剔除冷起动排放前、后的 CO、CO_2 和 NO_x 排放因子，如图 4 所示.

剔除冷起动排放之后，3 辆车的市区 CO 排放因子降低 29.99% ~ 68.77%，市区 CO_2 排放因子降低 0.09% ~ 5.53%，市区 NO_x 排放因子降低 4.44% ~ 53.99%；而总行程 CO 排放因子降低 6.19% ~ 21.42%，总行程 CO_2 排放因子降低 0.04% ~ 1.90%，总行程 NO_x 排放因子降低 1.20% ~ 49.09%. 在总行程工况中，冷起动排放占比大幅下降，因为冷起动发生在 RDE 试验发动机初始起动阶段，处于市区工况，而市郊和高速路段发动机缸内温度高、燃油雾化好且热效率高，因而冷起动对行程排放的贡献主要体现在市区排放. 剔除冷起动后，CO_2 排放因子最高下降比例仅为 5.53%，显著低于 CO、NO_x 排放因子下降比例，冷起动期间的 CO、NO_x 排放应作为混合动力汽车排放控制的重点.

剔除城市 2 的冷起动排放后，E-REV、PHEV 和汽油车的市区 CO 排放因子分别降低 31.84%、35.09% 和 29.99%，市区 NO_x 排放因子分别降低 55.88%、4.45% 和 26.10%；剔除城市 1 的冷起动排放后，E-REV、PHEV 和汽油车的市区 CO 排放因子分别降低 43.96%、36.91% 和 68.77%，市区 NO_x 排放因子分别降低 53.99%、6.97% 和 45.00%. 该现象表明，在实际道路行驶条件下，海拔升高加剧了不同车型在剔除冷起动排放前、后的污染物排放特性差异，汽油车对海拔变化更加敏感，混合动力汽车的污染物排放受高原环境的影响较小.

随海拔升高，3 辆车未剔除冷起动的市区 CO、CO_2 排放因子升高，其中 PHEV 的市区 CO 排放因子增长 4.41 倍. E-REV 和汽油车的市区 NO_x 排放因子



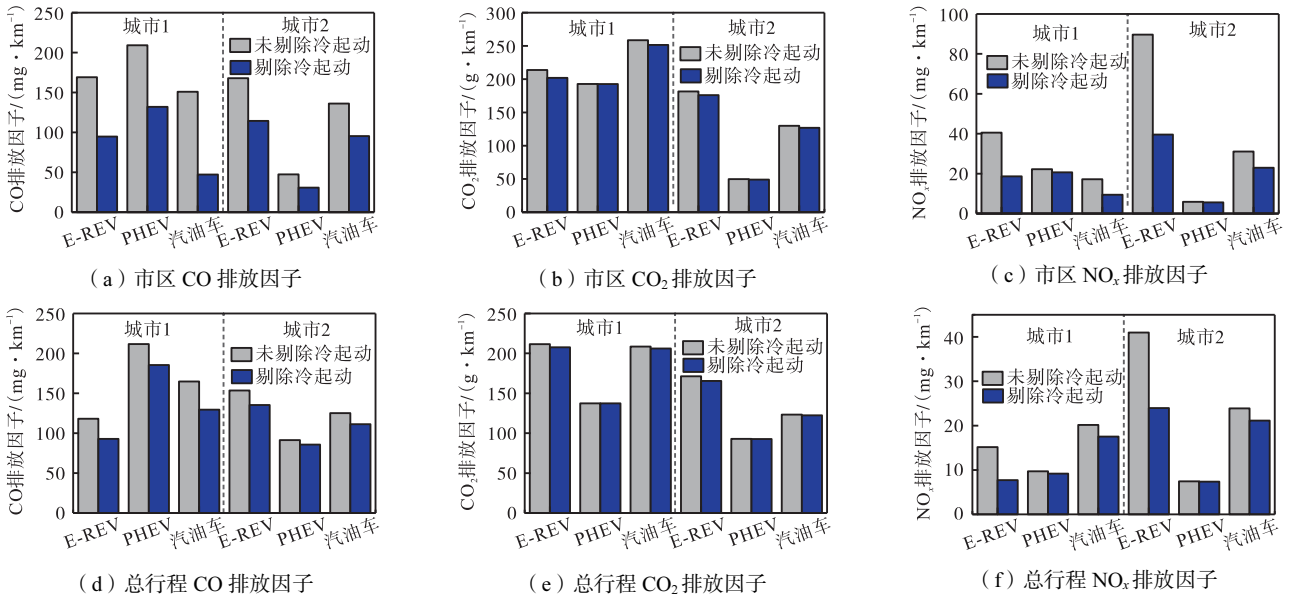
（a）CO 瞬时排放（E-REV）　（b）NO_x 瞬时排放（E-REV）

（c）CO 瞬时排放（PHEV）　（d）NO_x 瞬时排放（PHEV）

（e）CO 瞬时排放（汽油车）　（f）NO_x 瞬时排放（汽油车）

图 3　T_c、$v \cdot a$ 与 CO、NO_x 瞬时排放相关变化

Fig.3　Correlated variations of T_c, $v \cdot a$ and CO, NO_x instantaneous emissions



（a）市区 CO 排放因子　（b）市区 CO_2 排放因子　（c）市区 NO_x 排放因子

（d）总行程 CO 排放因子　（e）总行程 CO_2 排放因子　（f）总行程 NO_x 排放因子

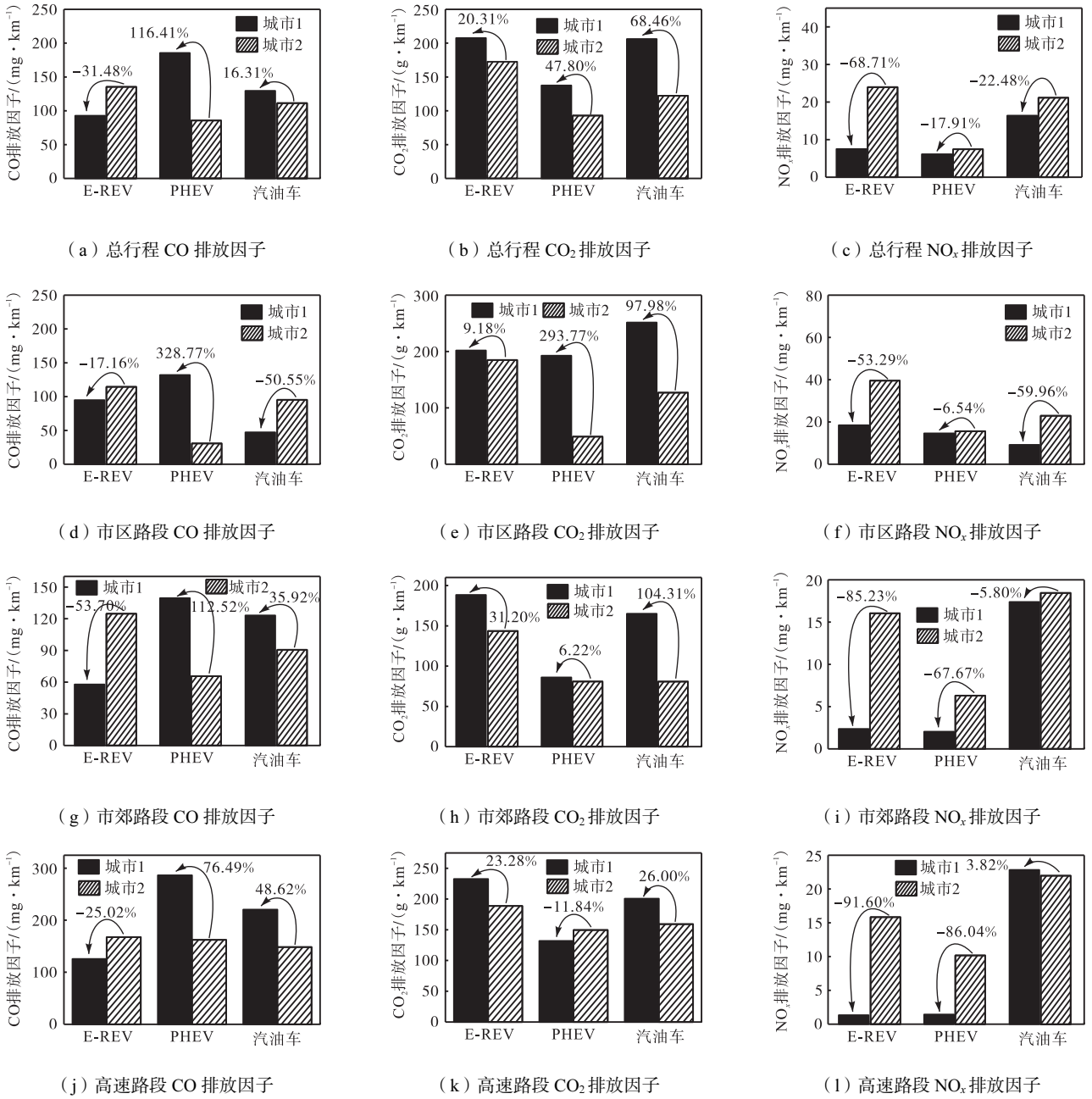
图 4　剔除冷起动与未剔除冷起动计算排放因子

Fig.4　Calculation of emission factors with and without excluding cold starts

降低，PHEV 的市区 NO_x 排放因子升高. 但剔除冷起动排放后，E-REV 和汽油车的市区 CO 排放因子随海拔升高而降低. 在总行程中，随海拔升高，E-REV 的 CO 排放因子降低，PHEV 和汽油车的总行程 CO 排放因子升高；3 辆车的总行程 CO_2 排放因子升高；E-REV 和汽油车的总行程 NO_x 排放因子降低，PHEV 的总行程 NO_x 排放因子升高. 剔除冷起动排放前、后，不同车型在各工况表现出不同的排放特性，冷起动排放提高了混合动力汽车在高原地区实际排放特性的不确定性. 为了更合理地评估混合动力汽车在高原地区的实际排放特性，应将冷起动排放纳入混合动力汽车的 RDE 法规中，并作为独立工况进行认证，给出混合动力汽车更加严格的冷起动结束判定条件，以更加真实地反映混合动力汽车的排放特性.

2.3　排放因子

图 5 为 E-REV、PHEV 和汽油车的总行程、市区、市郊和高速路段污染物排放因子计算结果. 整体来看，E-REV 的 CO 排放因子随着海拔升高而降低，PHEV 和汽油车与之相反. PHEV 所有工况的 CO 排放因子增长率大于 E-REV 和汽油车，PHEV 的 CO 排放受海拔的影响最大，PHEV 在城市 1 市区的 CO 排放因子增长率更是达到了 328.77%. 与汽油车相



（a）总行程 CO 排放因子　（b）总行程 CO_2 排放因子　（c）总行程 NO_x 排放因子

（d）市区路段 CO 排放因子　（e）市区路段 CO_2 排放因子　（f）市区路段 NO_x 排放因子

（g）市郊路段 CO 排放因子　（h）市郊路段 CO_2 排放因子　（i）市郊路段 NO_x 排放因子

（j）高速路段 CO 排放因子　（k）高速路段 CO_2 排放因子　（l）高速路段 NO_x 排放因子

图 5　不同道路下的污染物排放因子

Fig.5　Emission factors of pollutants under different road conditions

比，PHEV 在城市 2 具有良好的 CO 减排效果，但在城市 1 的所有工况中，PHEV 的 CO 排放因子远大于 E-REV 和汽油车，即在高原地区，PHEV 不具有良好的 CO 减排效果. 与城市 2 相比，E-REV 在城市 1 的排气温度上升，而 PHEV 和汽油车的排气温度下降，缸内温度上升有利于 CO 氧化成 CO_2，导致 CO 排放减少，反之 CO 排放升高. 此外，汽车在城市 1 的驾驶中，加、减速时间占比高于城市 2，这也可能导致汽车在高原地区污染物排放变化. 在高原地区，E-REV 在高原地区的 CO 排放下降，且不同车型的 CO 排放变化差异较大，表明海拔对汽车的 CO 排放影响大于驾驶行为的影响.

随着海拔的升高，空气中氧含量减少，燃烧效率下降，3 辆车的总行程 CO_2 排放因子增大. 除市区工况外，汽油车的 CO_2 排放因子增长率均大于混合动力汽车，表明海拔对汽油车影响更大. 对于 CO_2 排放，PHEV 在所有工况中均低于汽油车排放，而 E-REV 仅在城市 1 市区工况中低于汽油车排放. PHEV 在城市 1 市区、市郊的纯电机工作时间占比分别为 26.20%、38.59%，在城市 2 市区、市郊的纯电机工作时间占比分别为 61.60%、0%，导致 PHEV 在城市 1 市区的 CO_2 排放增长率达到 293.77%，而城市 1 高速 CO_2 排放降低 11.84%，也解释了 PHEV 在城市 1 市区燃油消耗量大幅升高，在城市 1 高速工况的燃油消耗量降低. 可知，混合动力汽车的 CO_2 排放和燃油消耗量不仅与高原环境相关，也受电量控制策略影响. E-REV、PHEV 和汽油车的 NO_x 排放因子随海拔升高而降低，除市区工况外，E-REV 的下降比例最大. 对于 NO_x 排放，E-REV 和 PHEV 的减排效果主要体现在市郊和高速排放. 随着海拔升高，E-REV 的 NO_x 排放因子大幅降低，在总行程、市区、市郊和高速工况中分别降低 68.71%、53.29%、85.23% 和 91.60%. 氧体积分数是 NO_x 生成的重要因素，城市 1 空气中的氧体积分数低于城市 2，汽车的进气量不足，且缸内燃烧起始点推迟，抑制 NO_x 生成，3 辆汽车在城市 1 的 NO_x 排放降低.

2.4 燃油经济性

图 6 为 3 辆车在城市 1 和城市 2 的燃油消耗量. 随着海拔的升高，3 辆汽车的燃油消耗量均升高，而 PHEV 在高速工况的燃油消耗量降低，其原因可能是 PHEV 在城市 1 高速工况的纯电机运行时长相比城市 2 增加 6.23%，导致 PHEV 在该路段的燃油消耗量降低. 在城市 1 市区工况中，E-REV、PHEV 的燃油消耗量分别比汽油车低 1.95 L/(100 km)、2.84 L/(100 km). 在低速、频繁起停的市区工况中，混合动力汽车具有一定的节能优势. E-REV 仅在城市 1 市区工况的燃油消耗量低于汽油车，PHEV 所有工况下的燃油消耗量低于汽油车，表明 PHEV 在高原地区表现出更好的节能效果.

表 2 为 3 辆车在城市 1 不同工况下的燃油消耗量增长率. 在市区、市郊和高速工况，不同的车型采用的控制策略不同，燃油消耗量各有不同. 在市区工况下，随着海拔升高，PHEV 的市区燃油经济性恶化尤为显著，这是由于 CO_2 排放是评价燃油消耗量的重要指标，而 PHEV 在城市 1 的市区 CO_2 排放因子相比城市 2 上升 293.77%，进而导致 PHEV 的市区燃油消耗量增长率最大. 此外，PHEV 在高原市区低电量行驶时，发动机进入高负荷工况且频繁起停，高原地区含氧量低，PHEV 发动机的燃油喷射量过大以满足驱动力需求，进一步导致 PHEV 的市区燃油经济性恶化. 在市郊工况下，混合动力汽车在市郊工况的燃油经济性受海拔变化影响较小. 在高速工况下，电池供电不足时，E-REV、PHEV 需要更大的动力输出，通过增加供油量提高发动机转速，以满足车辆在高速工况的动力需求，因而海拔对 E-REV、PHEV 和汽油车的高速燃油经济性影响差异不大.

由表 2 可知，不同车型受海拔升高影响程度不同，这种差异主要由车型的动力系统和驱动模式决定. E-REV 的燃油消耗量增长率较稳定，一方面，涡轮增压发动机可在高海拔地区将燃烧室的氧含量恢复到平原地区的水平；另一方面，因为 E-REV 的能量管理策略，电池电量低至一定阈值时，启动增程器给电机和电池供电，使电池电量始终保持在健康水

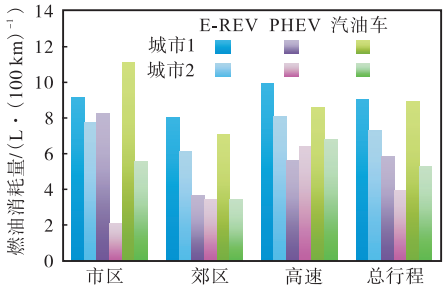


图 6 燃油消耗量

Fig.6 Fuel consumption

表 2 燃油消耗量增长率

Tab.2 Growth rate of fuel consumption (%)

车辆	市区路段	市郊路段	高速路段	总行程
E-REV	17.73	31.08	23.21	23.41
PHEV	288.17	6.35	−11.69	47.99
汽油车	99.06	104.18	26.03	69.07

平，确保 E-REV 动力不衰减.

3　结　论

（1）在城市 1 中，E-REV、PHEV 和汽油车的冷起动排放特性出现较大差异；剔除冷起动排放后，3 辆车在市区、总行程工况的 CO、CO_2 及 NO_x 排放因子均降低，冷起动对行程排放的贡献主要体现在市区排放；不同车型在剔除冷起动前、后的排放特性存在差异，而海拔进一步放大了这种差异，E-REV 和 PHEV 受海拔的影响较小.

（2）高原环境对不同车型的污染物排放产生的影响程度不同，PHEV 和汽油车的 CO 排放增加 116.41%、16.31%，而 E-REV 的 CO 排放下降 31.48%，E-REV、PHEV 和汽油车的 CO_2 排放分别增加 20.31%、47.80% 及 68.46%，NO_x 排放分别下降 68.70%、17.91% 及 22.48%.

（3）高原环境对不同车型的燃油消耗量影响不同，在高原地区的市区工况中，与汽油车相比，E-REV 与 PHEV 具有一定的节能优势，且 PHEV 比 E-REV 节能效果更好；在市郊、高速工况中，E-REV 的燃油消耗量大于汽油车，PHEV 的燃油消耗量小于汽油车.

参考文献：

[1] Volkova M V，Klimov K K，Lyubomudrov B E，et al. Development of the concept of environmentally friendly CHPP and TPP with the active use of photosynthetic processes[J]. International Journal of Hydrogen Energy，2023，48(23)：8418-8429.

[2] Bhattarai G，Shrestha S K，Sim H，et al. Effects of fine particulate matter on bone marrow-conserved hematopoietic and mesenchymal stem cells：A systematic review[J]. Experimental Molecular Medicine，2024，56(1)：118-128.

[3] 生态环境部. 中国移动源环境管理年报[R]. 北京：中华人民共和国生态环境部，2024.

[4] Liu Z，Hao H，Cheng X，et al. Critical issues of energy efficient and new energy vehicles development in China[J]. Energy Policy，2018，115：92-97.

[5] Vikram S，Vashisht S，Rakshit D，et al. Recent advancements and performance implications of hybrid battery thermal management systems for electric vehicles[J]. Journal of Energy Storage，2024，90：111814.

[6] Yang N，Li J，He C，et al. CO_2 emission characteristics of China Ⅵ hybrid vehicles[J]. Transportation Research Part D：Transport and Environment，2024，135：104377.

[7] 环境保护部，国家质量监督检验检疫总局. GB 18352.6—2016 轻型汽车污染物排放限值及测量方法[S]. 北京：中国环境科学出版社，2020.

[8] 靖春胜. 典型混合动力汽车排放及油耗特性的研究[D]. 天津：河北工业大学能源与环境工程学院，2020.

[9] Huang R，Ni J，Zheng T，et al. Characterizing and assessing the fuel economy，particle number and gaseous emissions performance of hybrid electric and conventional vehicles under different driving modes[J]. Atmospheric Pollution Research，2022，13(12)：101597.

[10] 禹文林，葛蕴珊，王欣，等. 混合动力汽车实际道路行驶排放特性研究[J]. 汽车工程，2018，40(10)：1139-1145.

[11] Danilo E，Yan Z，Jan C，et al. Real driving emissions in extended driving conditions[J]. Energies，2021，14(21)：7310-7328.

[12] Yan F，Zhao H，Yang Z. Research on RDE performance for in-use vehicles especially at high altitude conditions in China[C]// International Symposium on Vehicle Emission Supervision and Environment Protection，Chongqing，China，2022，2022-01004.

[13] 郑丰，赵海光，吉江林，等. 基于北京和昆明海拔条件下的国Ⅵ混合动力车实际道路排放特性研究[J]. 环境科学研究，2022，35(7)：1581-1588.

[14] Wang R，Zhang L，Peng J，et al. Effect of ambient high-temperature on real driving emission tests of a light-duty gasoline vehicle[J]. Atmospheric Pollution Research，2024，15(2)：101998.

[15] Liu C，Pei Y，Wu C，et al. Novel insights into the NO_x emissions characteristics in PEMS tests of a heavy-duty vehicle under different pay-loads[J]. Journal of Environmental Management，2023，348(15)：119400.

[16] 孙发荣. 增程式混合动力汽车工况预测能量管理策略研究[D]. 长春：吉林大学汽车工程学院，2021.

[17] 李士鹏. 插电式混合动力汽车工况预测及能量管理策略优化研究[D]. 淄博：山东理工大学机械工程学院，2023.

[18] 陈凌建，杜宝程，彭竟德，等. 轻型汽油车实际行驶排放试验中冷启动排放的评估[J]. 重庆大学学报，2022，45(6)：1-13.