

# 基于 MOVES 模型的济南市机动车碳排放分析

郭猛<sup>1,2</sup>, 冯海霞<sup>1,2\*</sup>, 王兴渝<sup>1,2</sup>, 朱茂欣<sup>1,2</sup>, 许之心<sup>1,2</sup>, 王君<sup>1,2</sup>

1. 山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南 250357; 2. 山东省智能交通重点实验室(筹), 山东 济南 250357

**摘要:**为量化 CO<sub>2</sub> 排放因子、燃料消耗量与交通运行状况对机动车碳排放的影响,以济南市为研究区,在 MOVES 模型本地化的基础上,构建基于车速的 CO<sub>2</sub> 排放因子模型,建立 CO<sub>2</sub> 排放因子、燃料消耗量与车速的关系式,分析不同交通运行状况对济南市机动车 CO<sub>2</sub> 排放的影响。结果表明:不同类型机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子差异显著,但随平均车速的变化趋势基本一致,当平均车速小于 10 km/h 时,各车型的 CO<sub>2</sub> 排放因子处于较高水平,平均车速升至 10~<50 km/h 时,CO<sub>2</sub> 排放因子迅速减小,平均车速为 50~<100 km/h 时,CO<sub>2</sub> 排放因子逐渐稳定并处于较低水平,平均车速为 100~120 km/h 时,大部分车型的 CO<sub>2</sub> 排放因子有增大趋势;2017 年至 2022 年,济南市核心区的高峰期平均车速由 20.18 km/h 增至 31.72 km/h,拥堵缓解使汽油小型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车、柴油重型货车的 CO<sub>2</sub> 排放因子分别降低 21.71%、21.23%、18.84%、15.35%,仅汽油小型客车每年汽油消耗量减少约 93.6 万 t,CO<sub>2</sub> 排放量减少约 312.0 万 t;将本文模型与基于车辆比功率的 CO<sub>2</sub> 排放因子模型进行对比,二者的 CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的变化趋势基本一致,在平均车速为 15~60 km/h 时,所构建模型能较好地拟合 CO<sub>2</sub> 排放因子与平均车速的关系,适用于城市道路交通 CO<sub>2</sub> 排放研究。提高城市交通运行效率是降低机动车碳排放的重要途径。

**关键词:** MOVES 模型; CO<sub>2</sub> 排放因子; 平均车速; 燃料消耗量

中图分类号: U491.9<sup>+</sup>2; X734.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-0032(2025)06-0045-08

引用格式: 郭猛, 冯海霞, 王兴渝, 等. 基于 MOVES 模型的济南市机动车碳排放分析[J]. 山东交通学院学报, 2025, 33(6): 45-52.

GUO Meng, FENG Haixia, WANG Xingyu, et al. Analysis of vehicle CO<sub>2</sub> emissions in Jinan City based on the MOVES model[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(6): 45-52.

## 0 引言

应对气候变化、推动温室气体减排已成为全球共识。交通运输领域是碳排放的重要来源,其排放量仅次于能源和工业领域<sup>[1]</sup>。在我国,交通运输是碳排放增长最快的领域之一,其节能减排已成为我国达成“双碳”目标的关键环节<sup>[2]</sup>。公路运输是交通运输领域碳排放的主要来源,其碳排放量在整个交通运输领域碳排放量的占比大于 80%<sup>[3]</sup>。机动车作为公路运输的载体,其保有量持续增长,截至 2024 年全国的机动车达 4.53 亿辆<sup>[4]</sup>;尽管新能源汽车销量增长迅速,传统能源汽车仍在市场中占据主导地位,机动车的节能减排是实现我国交通运输绿色低碳转型的关键路径<sup>[5]</sup>。

机动车排放清单是研究机动车 CO<sub>2</sub> 排放的基础,其核算方法主要基于 CO<sub>2</sub> 排放因子与机动车活动

收稿日期: 2024-11-13

**基金项目:**国家自然科学基金项目(52102412);山东省自然科学基金项目(ZR2022MG077);山东省自然科学基金创新发展联合基金项目(ZR2024LZN008);2025 年度山东省人文社会科学课题一般项目;2023 年度“新高校 20 条”自主培养创新团队项目(202333040);济南市高校院所自主培养创新团队项目(20233040);山东省重点研发计划(软科学)重点项目(2024RZB0703)

**第一作者简介:**郭猛(1998—),男,山东滨州人,硕士研究生,主要研究方向为智能交通,E-mail:15265430112@163.com。

\* **通信作者简介:**冯海霞(1976—),女,山东茌平人,教授,硕士研究生导师,工学博士,主要研究方向为智能交通与环境遥感,E-mail:fhx76@163.com。

水平。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)在《2006年IPCC国家温室气体清单指南》提出基于销售燃料量及对应CO<sub>2</sub>排放因子的核算方法,CO<sub>2</sub>排放因子的单位为kg/TJ<sup>[6]</sup>。随着机动车排放的深入研究,单位行驶里程CO<sub>2</sub>排放因子和机动车活动水平(行车里程)为核心的清单核算方法得到广泛应用,单位行驶里程CO<sub>2</sub>排放因子主要来源于实测数据或基于实测数据构建的机动车排放模型,CO<sub>2</sub>排放因子的单位为g/km或g/s。目前常用的MOBILE、COPERT、MOVES等模型均具有CO<sub>2</sub>排放因子库,并支持根据具体研究区进行本地化修正。MOVES模型是一种适用于宏观、中观、微观等多空间尺度综合性机动车排放模型,具有良好的可移植性和模拟准确性。金晨阳等<sup>[7]</sup>对比MOVES、COPERT等5种主流机动车排放模型的适用性,认为MOVES模型在架构设计上具有显著优势,其模块化结构支持跨区域、多尺度排放模拟;滕文焘等<sup>[8]</sup>通过实证研究发现,MOVES模型在微观运行工况表征方面表现突出,能基于实时车辆运行参数准确反映交通流与CO<sub>2</sub>排放的耦合关系。

尽管上述两类CO<sub>2</sub>排放因子来源与单位不同,但均可通过车辆燃料消耗量建立关联。《2006年IPCC国家温室气体清单指南》《省级温室气体清单编制指南(试行)》均指出,在无法直接获取燃料销量时,可通过燃料消耗量与行驶里程进行推算。机动车CO<sub>2</sub>排放量取决于燃料消耗量,而燃料消耗量受车速等运行状况影响。目前对机动车燃料消耗量研究多侧重于其影响因素与调控机制。杨鑫等<sup>[9]</sup>通过构建理化参数测试体系与发动机仿真平台,研究高密度复合燃料分子结构对柴油机燃烧过程的影响机理。张博琦等<sup>[10]</sup>基于系统动力学理论,从人机路协同系统视角分析机动车燃料消耗量的影响因素,构建涵盖动力总成优化设计、燃料替代技术及驾驶行为模式调控的多维节能调控体系。王金豪等<sup>[11]</sup>针对高原低压缺氧环境,建立废气涡轮增压柴油机工况模拟系统,分析进排气动态调控策略对缸内燃烧与能量分配的影响机制。

车速作为燃料消耗量与排放的关键影响参数,被广泛纳入各类机动车排放模型中。宏观与中观尺度模型(如MOBILE、EMFAC、TREMOD、COPERT)多以平均车速为基本表征参数;微观尺度模型(如MOVES、CMEM、IVE、VT-Micro)亦将平均车速作为核心输入变量之一。宋国华等<sup>[12]</sup>建立基于平均车速的车辆比功率分布模型,并用于测算机动车燃料消耗量。冯海霞等<sup>[13]</sup>、沈岩等<sup>[14]</sup>、林丹婷等<sup>[15]</sup>分析平均车速、车辆类型、道路等级等对机动车CO<sub>2</sub>排放的影响。车速也是表征交通运行状况的重要指标,如高德、百度等导航平台采用的拥堵延时指数(基于自由流车速与实际车速之比进行计算),已成为评估城市交通状况的常用指标。

本文以济南市为研究区,基于MOVES模型求解不同类型机动车的CO<sub>2</sub>排放因子,构建燃料消耗量、CO<sub>2</sub>排放因子与车速的关系模型,分析交通运行状况对济南市机动车CO<sub>2</sub>排放量的影响,以期在城市交通管理、节能减排政策制定及绿色出行推广提供科学依据。

## 1 数据和方法

### 1.1 研究数据

近年来,济南市机动车保有量持续快速增长,交通拥堵问题突出,道路通行效率下降。根据百度地图、高德地图平台发布的交通分析报告,济南市自2016年起长期位列国内主要拥堵城市名单,尽管近几年拥堵状况有所缓解,但整体通行压力依然较大。

通过官方统计资料、文献调研、模拟仿真、网络平台监测及实地调研等多种途径获取机动车保有量、行驶里程、车龄、燃料参数、气象参数等基础数据。其中,机动车保有量来源于统计年鉴等官方统计资料,车龄分布依据济南市机动车污染监测中心的车辆统计数据,气象参数取自中国气象数据网。

济南市未公开车辆行驶里程相关数据,参考生态环境部发布的《道路机动车排放清单编制技术指南(试行)》,并结合实际对不同类型机动车的行驶里程进行时效性修正。根据中国汽车技术研究中心与美国橡树岭实验室基于17万辆样本车辆拟合的华东地区数据,确定小型载客汽车的年均行驶里程为12 222.88 km<sup>[16]</sup>;结合文献<sup>[17]</sup>调整货车及其他商用车辆的行驶里程,使其更符合实际运行特征,中型、

大型载客汽车的年均行驶里程分别为 31 300、58 000 km,轻型、中型、重型载货汽车的年均行驶里程分别为 28 000、25 000、55 000 km。

采用 MOVES 模型时需进行参数本地化,先设定时间、地区、道路类型、机动车类型、核算目标等规范条件,再将机动车保有量、行驶里程、车龄、燃料及气象等参数替换为济南实际数据,提高模型模拟的准确性与适用性。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 基于车速的 CO<sub>2</sub> 排放因子

采用 MOVES 模型模拟不同车速下机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子,构建二者的关系式为:

$$E_{i,j,k} = f(v)_{i,j,k},$$

式中: $E_{i,j,k}$  为机动车 CO<sub>2</sub> 排放因子,g/km,其中, $i$  为燃料类型, $j$  为机动车类型, $k$  为机动车排放标准; $v$  为平均车速。

在 MOVES 模型本地化的基础上,以 8 km/h 为速度梯度模拟汽油小型客车、柴油小型客车、汽油中型客车、柴油中型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车、柴油中型货车、柴油重型货车和摩托车等 9 类机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的变化曲线,如图 1 所示。因天然气汽车在机动车保有量中占比较小<sup>[18]</sup>,未纳入研究范围。

由图 1 可知:不同机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子差异显著,柴油重型货车的 CO<sub>2</sub> 排放因子最大,摩托车最小;不同机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的变化趋势基本一致,平均车速小于 10 km/h 时,各车型的 CO<sub>2</sub> 排放因子处于较高水平,平均车速为 10~<50 km/h 时,CO<sub>2</sub> 排放因子迅速减小,平均车速为 50~<100 km/h 时,CO<sub>2</sub> 排放因子逐渐稳定并处于较低水平,平均车速为 100~120 km/h 时,大部分车型的 CO<sub>2</sub> 排放因子有增大趋势。反映出低速拥堵工况下,发动机效率较低,CO<sub>2</sub> 排放因子处于较高水平,当机动车处于高效运行区间时,CO<sub>2</sub> 排放因子逐渐稳定并维持在较低水平。

基于 MOVES 模型的模拟结果,采用最小二乘法拟合得到上述 9 类机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子与平均车速的数值方程及相应的决定系数  $R^2$ ,如表 1 所示。 $E_{gp}$ 、 $E_{dp}$ 、 $E_{gb}$ 、 $E_{db}$ 、 $E_{gt}$ 、 $E_{dt}$ 、 $E_{dgm}$ 、 $E_{dth}$ 、 $E_m$  分别为汽油小型客车、柴油小型客车、汽油中型客车、柴油中型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车、柴油中型货车、柴油重型货车和摩托车的以 g/km 为单位的 CO<sub>2</sub> 排放因子的数值, $\{v\}$  为以 km/h 为单位的  $v$  的数值。由表 1 可知: $R^2$  均大于 0.930,拟合效果较好,能较好的反映 CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的变化趋势。

#### 1.2.2 CO<sub>2</sub> 排放因子与燃料消耗量的关系

机动车 CO<sub>2</sub> 排放量<sup>[6]</sup>

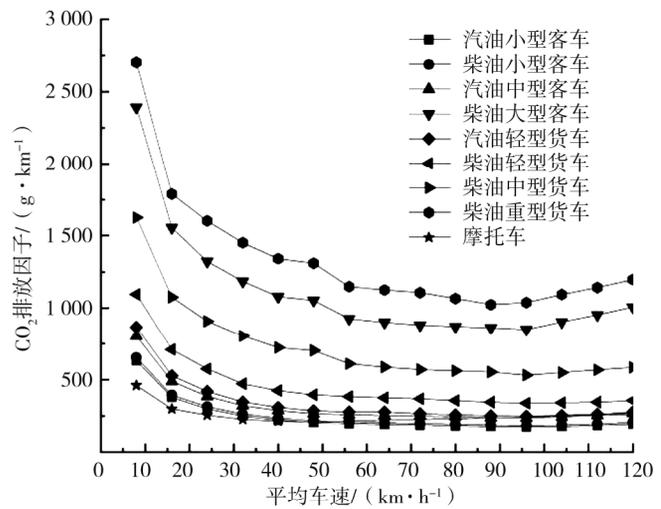


图 1 不同机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的变化曲线

表 1 不同机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子与平均车速的数值方程及  $R^2$

机动车类型	数值方程	$R^2$
汽油小型客车	$E_{gp} = 3\ 694.657/\{v\} + 123.776$	0.993
柴油小型客车	$E_{dp} = 3\ 992.201/\{v\} + 136.501$	0.993
汽油中型客车	$E_{gb} = 5\ 269.894/\{v\} + 228.777$	0.987
柴油中型客车	$E_{db} = 11\ 632.503/\{v\} + 807.614$	0.980
汽油轻型货车	$E_{gt} = 5\ 011.981/\{v\} + 177.171$	0.992
柴油轻型货车	$E_{dt} = 5\ 831.982/\{v\} + 269.066$	0.995
柴油中型货车	$E_{dgm} = 8\ 789.245/\{v\} + 470.711$	0.989
柴油重型货车	$E_{dth} = 13\ 451.549/\{v\} + 913.381$	0.978
摩托车	$E_m = 553.61 - 16.24\{v\} + 0.23\{v\}^2 - 0.000\ 96\{v\}^3$	0.934

$$Q = \sum_i [F_i E_i] = \sum_i \sum_j \sum_k (A_{i,j,k} E_i),$$

式中:  $F_i$  为第  $i$  类燃料的消耗量, TJ, 为燃料质量与相应低位发热量之积;  $E_i$  为第  $i$  类燃料的  $\text{CO}_2$  排放因子,  $\text{kg/TJ}$ , 为燃料含碳率与碳至  $\text{CO}_2$  的转换系数之积;  $A_{i,j,k}$  为第  $i$  类燃料第  $j$  类机动车第  $k$  类排放标准的机动车活动水平数据, 在宏观或中观尺度(如国家、区域、城市), 通常指某类机动车的年均行驶里程与机动车保有量之积, 在微观尺度(如具体道路或路网), 一般为车辆在特定路段上的行驶里程及该路段的车流量之积。

汽油和柴油的  $\text{CO}_2$  排放因子如表 2 所示<sup>[6]</sup>。

无法直接获取燃料消耗量(如能源统计报告)时, 可参考《省级温室气体清单编制指南(试行)》中基于年均行驶里程的估算方法, 公式为:

$$O_{i,j,k} = P_{i,j,k} L_{i,j,k} H_{i,j,k} \rho_i,$$

式中:  $O_{i,j,k}$  第  $i$  种燃料第  $j$  类机动车第  $k$  类排放标准的道路交通燃料消耗量, t;  $P_{i,j,k}$  为第  $i$  种燃料第  $j$  类机动车第  $k$  类排放标准的机动车保有量, 万辆;  $L_{i,j,k}$  为第  $i$  种燃料第  $j$  类机动车第  $k$  类排放标准的年均行驶里程, km;  $H_{i,j,k}$  为第  $i$  种燃料第  $j$  类机动车第  $k$  类排放标准的百公里燃料消耗量,  $\text{L}/(100 \text{ km})$ ;  $\rho_i$  为第  $i$  种燃料密度,  $\text{kg/L}$ 。

基于燃料消耗量核算的机动车  $\text{CO}_2$  排放量

$$Q_{i,j,k} = P_{i,j,k} L_{i,j,k} H_{i,j,k} \rho_i R_i E_i, \quad (1)$$

式中  $R_i$  为第  $i$  种燃料平均低位发热值,  $\text{TJ/Gg}$ 。

基于 MOVES 模型核算的机动车  $\text{CO}_2$  排放量

$$Q'_{i,j,k} = \sum E_{i,j,k} A_{i,j,k} = \sum E_{i,j,k} L_{i,j,k} P_{i,j,k} = f(v)_{i,j,k} L_{i,j,k} P_{i,j,k} \circ \quad (2)$$

在城市尺度上, 式(1)(2)的求解结果应相等, 即

$$P_{i,j,k} L_{i,j,k} H_{i,j,k} \rho_i R_i E_i = f(v)_{i,j,k} L_{i,j,k} P_{i,j,k} \circ \quad (3)$$

求解式(3)得到基于车速的  $\text{CO}_2$  排放因子与百公里燃料消耗量的关系为:

$$f(v)_{i,j,k} = H_{i,j,k} \rho_i R_i E_i \circ \quad (4)$$

## 2 结果分析

### 2.1 模型计算结果

结合表 2, 由式(4)求解得到不同机动车的燃料消耗量和平均车速的数值方程如表 3 所示。 $H_{gp}$ 、 $H_{dp}$ 、 $H_{gb}$ 、 $H_{db}$ 、 $H_{gt}$ 、 $H_{dt}$ 、 $H_{dtm}$ 、 $H_{dth}$ 、 $H_m$  分别为汽油小型客车、柴油小型客车、汽油中型客车、柴油大型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车、柴油中型货车、柴油重型货车和摩托车的以  $\text{L}/(100 \text{ km})$  为单位的燃料消耗量的数值。

根据济南市机动车污染监测中心的数据, 载客汽车中, 汽油小型客车数量最多, 占比达 95.28%; 载货汽车中, 汽油轻型货车、柴油轻型货车和柴油重型货车的占比分别为 32.19%、43.64% 和 20.97%。选取上述 4 类机动车作为分析对象。

基于百公里燃料消耗量标准限值<sup>[19-21]</sup>, 根据

表 2 汽油和柴油的  $\text{CO}_2$  排放因子

燃料类型	$\text{CO}_2$ 排放因子/ $(\text{kg} \cdot \text{TJ}^{-1})$			平均低位发热量/ $(\text{TJ} \cdot \text{Gg}^{-1})$
	缺省值	95%置信区间		
		低限	高限	
汽油	69 300	67 500	73 000	44.3
柴油	74 100	72 600	74 800	43.0

表 3 不同机动车燃油消耗量与平均车速的数值方程

机动车类型	数值方程
汽油小型客车	$H_{gp} = 152.988/v + 5.125$
柴油小型客车	$H_{dp} = 165.309/v + 5.652$
汽油中型客车	$H_{gb} = 218.215/v + 9.473$
柴油大型客车	$H_{db} = 481.677/v + 33.441$
汽油轻型货车	$H_{gt} = 207.535/v + 7.336$
柴油轻型货车	$H_{dt} = 241.489/v + 11.141$
柴油中型货车	$H_{dtm} = 363.944/v + 19.491$
柴油重型货车	$H_{dth} = 556.999/v + 37.821$
摩托车	$H_m = 22.923 - 0.672/v + 0.0095 v ^2 - 0.000039 v ^3$

式(4)和表3,得到汽油小型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车和柴油重型货车在3种百公里燃料消耗量水平工况(标准限值、标准限值的85%、标准限值的75%)下的CO<sub>2</sub>排放因子和平均车速,结果如表4所示。

表4 4类机动车在不同百公里燃料消耗量水平工况下的CO<sub>2</sub>排放因子和平均车速

机动车 类型	百公里燃料消耗 量/(L·(100 km) <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 排放因子/(g·km <sup>-1</sup> )			平均车速/(km·h <sup>-1</sup> )		
		标准限值	标准限值的85%	标准限值的75%	标准限值	标准限值的85%	标准限值的75%
汽油小型客车	8.9	210.36	178.81	168.29	42.67	67.13	82.99
汽油轻型货车	13.2	312.56	262.41	237.42	37.02	58.80	83.19
柴油轻型货车	15.5	423.10	359.64	338.48	37.86	64.39	84.01
柴油重型货车	46.3	1 318.54	1 120.70	1 054.83	33.24	51.56	70.12

由表4可知:百公里燃料消耗量变化时,CO<sub>2</sub>排放因子和对应的平均车速均显著变化。当百公里燃料消耗量由标准限值降至标准限值的85%时,汽油小型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车和柴油重型货车的CO<sub>2</sub>排放因子分别减小15.00%、16.04%、15.00%和15.00%,平均车速分别提高57.32%、58.83%、70.07%和46.51%。若百公里燃料消耗量降至标准限值的75%,上述机动车的CO<sub>2</sub>排放因子分别减小5.88%、9.52%、5.88%和6.16%,平均车速分别提高23.63%、40.47%、30.47%和35.76%。

据百度地图发布的《2024年度中国城市交通报告》可知,2024年济南市核心活动区在平峰期和高峰的平均车速分别为47.21、32.17 km/h,已低于汽油小型客车燃料消耗量标准限值对应的车速,说明实际燃料消耗量可能超出标准限值。

平均车速是反映城市交通运行状况的关键指标之一。根据百度地图大数据报告,2017年济南市交通拥堵程度最严重,通勤高峰期的平均车速仅为20.18 km/h;2022年该拥堵情况开始有所改善,通勤高峰期平均车速为31.72 km/h,平峰期平均车速为46.46 km/h。为量化车速对燃料消耗量与CO<sub>2</sub>排放量的影响,根据表1、3,计算得到20.18、31.72、46.46 km/h 3种车速下的CO<sub>2</sub>排放因子与百公里燃料消耗量,结果如表5所示。分析95家主要汽车公司,1 519种车型的燃料消耗的限值和综合燃料消耗量数据<sup>[22]</sup>,发现各车型平均综合燃料消耗量约是燃料消耗限值的85%,故以燃料消耗量限值的85%作为机动车燃料消耗量参考。

表5 4类机动车在不同车速下的CO<sub>2</sub>排放因子和百公里燃料消耗量

车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	CO <sub>2</sub> 排放因子/(g·km <sup>-1</sup> )				百公里燃料消耗量/(L·(100 km) <sup>-1</sup> )			
	汽油小型 客车	汽油轻型 货车	柴油轻型 货车	柴油重型 货车	汽油小型 客车	汽油轻型 货车	柴油轻型 货车	柴油重型 货车
20.18	306.86	425.54	558.06	1 797.35	12.8	17.9	21.3	60.2
31.72	240.25	335.18	452.92	1 432.79	10.1	14.2	17.3	50.9
46.46	203.30	285.05	394.59	1 149.01	8.6	12.0	15.0	45.8

由表4、5对比可知:相较于百公里燃料消耗量标准限值85%工况下的CO<sub>2</sub>排放因子,2022年济南市汽油小型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车、柴油重型货车高峰期CO<sub>2</sub>排放因子分别增大34.36%、27.73%、25.94%、13.89%,2017年高峰期CO<sub>2</sub>排放因子分别增大71.61%、62.16%、55.17%、34.55%;汽油小型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车、柴油重型货车在2022年的高峰期CO<sub>2</sub>排放因子比2017年分别减小21.71%、21.23%、18.84%、15.35%。以汽油小型客车为例,按《道路机动车排放清单编制技术指南(试行)》推荐的年均行驶里程为18 000 km计算,单车每年汽油消耗量减少约360.0 kg,CO<sub>2</sub>排放量减

少约 1.2 t。济南市 2022 年汽油小型客车保有量约 260 万辆,仅该车型每年汽油消耗量减少约 93.6 万 t, CO<sub>2</sub> 排放量减少约 312.0 万 t。通过改善城市交通运行效率,提高道路平均车速,不仅改善市民出行体验,也有效降低了机动车燃料消耗量与 CO<sub>2</sub> 排放量,是实现交通运输领域节能减排的重要途径。

## 2.2 模型验证

文献[23]基于北京市浮动车交通信息采集系统采集的约 800 万条数据,构建基于车辆比功率的 CO<sub>2</sub> 排放因子模型,与本文在 MOVES 模型本地化的基础上构建的基于车速的 CO<sub>2</sub> 排放因子模型进行对比,验证本文模型的适用性。本文模型与文献[23]模型的 CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的变化曲线如图 2 所示。

由图 2 可知:两条曲线的变化趋势基本一致,CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的增大先迅速减小后减速放缓,再小幅增大;车速为 0~40 km/h 时,CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的增大迅速减小;车速为 50~80 km/h 时,CO<sub>2</sub> 排放因子逐渐趋于稳定并维持在较低水平;车速大于 100 km/h 时,CO<sub>2</sub> 排放因子小幅增大。本文拟合的基于车速的 CO<sub>2</sub> 排放因子公式为反比例函数,虽相关系数较高,但不能反应车速较大时 CO<sub>2</sub> 排放因子增大的情况,故在车速较大时,拟合公示不适用。从高德、百度导航平台可知,我国城市的平均车速大于 15 km/h,且自由流车速小于 60 km/h,研究关注的车速范围处于模型拟合较好的区间,本文构建的基于车速的 CO<sub>2</sub> 排放因子模型可用于城市交通运行状况的 CO<sub>2</sub> 排放研究。

本文在建立 CO<sub>2</sub> 排放因子、燃料消耗量、车速关系时,虽将百公里燃料消耗量设为常数,实际运行中该参数受车辆质量、劣化程度、平均车速等因素影响,但基于平均百公里燃料消耗量的变化仍可有效反映车速、燃料消耗量与 CO<sub>2</sub> 排放量间的内在关联。

## 3 结论

本文以济南市为例,在 MOVES 模型本地化的基础上,构建基于车速的 CO<sub>2</sub> 排放因子模型,建立 CO<sub>2</sub> 排放因子、燃料消耗量与车速的关系模型,分析交通运行状况对济南市机动车 CO<sub>2</sub> 排放的影响。

1)通过 MOVES 模型以 8 km/h 为速度梯度模拟汽油小型客车、柴油小型客车、汽油中型客车、柴油大型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车、柴油中型货车、柴油重型货车和摩托车等 9 类机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的变化曲线,不同机动车的 CO<sub>2</sub> 排放因子差异显著,但随平均车速的变化趋势基本一致:当平均车速小于 10 km/h 时,各车型的 CO<sub>2</sub> 排放因子处于较高水平;随着平均车速升至 10~<50 km/h 时,CO<sub>2</sub> 排放因子迅速减小;当平均车速为 50~<100 km/h 时,CO<sub>2</sub> 排放因子逐渐稳定并处于较低水平;平均车速为 100~120 km/h 时,大部分车型的 CO<sub>2</sub> 排放因子有增大趋势。

2)2017、2022 年济南市核心区的高峰期平均车速分别为 20.18、31.72 km/h,平均车速提高带来的交通改善使汽油小型客车、汽油轻型货车、柴油轻型货车、柴油重型货车的 CO<sub>2</sub> 排放因子分别减小 21.71%、21.23%、18.84%、15.35%。以汽油小型客车为例,单车每年汽油消耗量减少约 360.0 kg,CO<sub>2</sub> 排放量减少约 1.2 t;以济南市 2022 年汽油小型客车保有量约 260 万辆估算,仅该车型每年汽油消耗量减少约 93.6 万 t,CO<sub>2</sub> 排放量减少约 312.0 万 t。缓解交通拥堵,提高城市交通运行效率会显著降低机动车 CO<sub>2</sub> 排放。

3)将本文构建的基于车速的 CO<sub>2</sub> 排放因子模型与文献[22]构建的基于车辆比功率的 CO<sub>2</sub> 排放因子

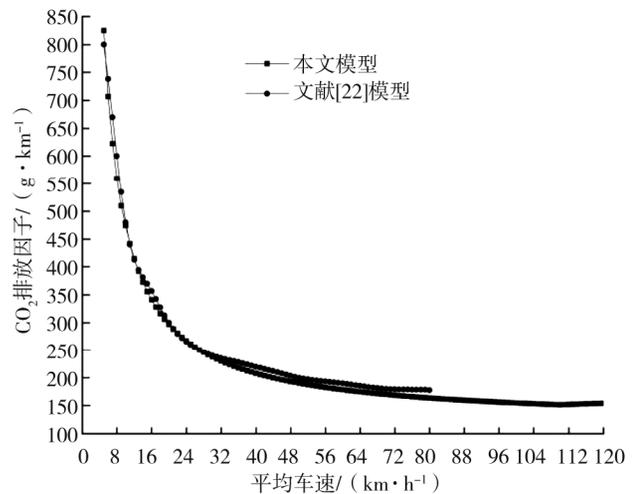


图 2 CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的变化曲线

模型进行对比,验证模型的适用性。结果表明两种方法的 CO<sub>2</sub> 排放因子随车速的变化趋势基本一致,在车速为 15~60 km/h 时,本文构建模型能较好拟合 CO<sub>2</sub> 排放因子随平均车速的变化趋势,适用于城市交通 CO<sub>2</sub> 排放研究。

### 参考文献:

- [1] International Energy Agency. CO<sub>2</sub> emissions in 2023 [R/OL]. (2024-03-01) [2024-10-21]. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2023>.
- [2] 李晓易,谭晓雨,吴睿,等. 交通运输领域碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6):15-21.
- [3] 李玲. 交通领域绿色低碳转型显成效[N]. 中国能源报, 2023-12-25(006).
- [4] 公安部. 全国机动车保有量达 4.53 亿辆 驾驶人达 5.42 亿人[EB/OL]. (2025-01-18) [2025-03-15]. [https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202501/content\\_6999762.htm](https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202501/content_6999762.htm).
- [5] 全国机动车保有量突破 4 亿 一季度新注册登记新能源汽车同比增加 138.20% [J]. 道路交通管理, 2022(5):5.
- [6] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories [R]. Hayama, Japan: Institute for Global Environmental Strategies (IGES), 2006.
- [7] 金晨阳,陈军辉,范武波,等. 机动车尾气排放模型应用及研究进展[J]. 环境科学导刊, 2020, 39(2):42-48.
- [8] 滕文焘,张芊芊,刘芳,等. 中国机动车碳排放估算的研究进展[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2022, 54(3):83-92.
- [9] 杨鑫,苏鹏,周维贵,等. 高密度复合燃料对柴油发动机性能的影响[J]. 石油学报(石油加工), 2023, 39(2):451-457.
- [10] 张博琦,张霞,夏鸿文. 汽车节能的因素与措施分析[J]. 交通节能与环保, 2014, 10(5):14-17.
- [11] 王金豪,毕玉华,申立中,等. 高原环境下进排气节流对柴油机性能的影响[J]. 内燃机工程, 2022, 43(3):36-44.
- [12] 宋国华,于雷. 城市快速路上机动车比功率分布特性与模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6):133-140.
- [13] 冯海霞,王兴渝,咸化彩,等. 城市交通运行状况对机动车碳排放的影响研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(4):167-175.
- [14] 沈岩,武彤冉,闫静,等. 基于 COPERT 模型北京市机动车大气污染物和二氧化碳排放研究[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(6):1075-1082.
- [15] 林丹婷,张兰怡,陈诚,等. 城市核心区域乘用车碳排放的时空分布特征[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2019, 48(5):664-672.
- [16] OU S Q, YU R J, LIN Z H, et al. Intensity and daily pattern of passenger vehicle use by region and class in China: estimation and implications for energy use and electrification[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2020, 25(3):307-327.
- [17] 中国汽车技术研究中心. 节能与新能源汽车发展报告(2017) [R]. 北京:人民邮电出版社, 2017.
- [18] 刘合,梁坤,张国生,等. 碳达峰、碳中和约束下我国天然气发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6):33-42.
- [19] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 轻型商用车燃料消耗量限值及评价指标:GB 20997—2024 [S]. 北京:中国标准出版社, 2024.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 营运货车燃料消耗量限值及测量方法:JT/T 719—2016 [S]. 北京:人民交通出版社, 2017.
- [21] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 乘用车燃料消耗量限值:GB 19578—2021 [S]. 北京:中国标准出版社, 2021.
- [22] 中华人民共和国工业和信息化部. 2022 年度中国乘用车企业平均燃料消耗量与新能源汽车积分情况公告 [EB/OL]. (2023-07-07) [2024-10-21]. [https://ythxxfb.miit.gov.cn/ythzxfwpt/hlwmbh/tzgg/xzsk/clsczr/art/2023/art\\_5ed7667bf00c4d13a1f7de95b25c0ede.html](https://ythxxfb.miit.gov.cn/ythzxfwpt/hlwmbh/tzgg/xzsk/clsczr/art/2023/art_5ed7667bf00c4d13a1f7de95b25c0ede.html).
- [23] 靳秋思,张远景,宋国华,等. 基于交通运行指数的速度分布聚类与排放测算[J]. 交通信息与安全, 2016, 34(6):15-21.

## Analysis of vehicle CO<sub>2</sub> emissions in Jinan City based on the MOVES model

GUO Meng<sup>1,2</sup>, FENG Haixia<sup>1,2\*</sup>, WANG Xingyu<sup>1,2</sup>, ZHU Maoxin<sup>1,2</sup>,  
XU Zhixin<sup>1,2</sup>, WANG Jun<sup>1,2</sup>

1. School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China;

2. Key Laboratory of Intelligent Transportation in Shandong Province (Under Preparation), Jinan 250357, China

**Abstract:** To quantify the impacts of the CO<sub>2</sub> emission factor, fuel consumption, and traffic operating conditions on vehicle CO<sub>2</sub> emissions, this study takes Jinan City as the research area. Based on a localized MOVES model, a speed-based CO<sub>2</sub> emission factor model is constructed, and the relationship among the CO<sub>2</sub> emission factor, fuel consumption, and vehicle speed is established to analyze the influence of different traffic conditions on vehicle CO<sub>2</sub> emissions in Jinan. The results show that the CO<sub>2</sub> emission factors of different vehicle types differ significantly but follow generally consistent trends with changes in average speed. When the average speed is below 10 km/h, the CO<sub>2</sub> emission factors of all vehicle types remain at a high level. As the average speed increases to 10–50 km/h, the CO<sub>2</sub> emission factors decrease rapidly. When the average speed reaches 50–100 km/h, the CO<sub>2</sub> emission factors gradually stabilize and remain at a relatively low level. At speeds between 100 km/h and 120 km/h, most vehicle types show an increasing trend in CO<sub>2</sub> emission factors. From 2017 to 2022, the average peak-hour speed in the core area of Jinan increased from 20.18 km/h to 31.72 km/h. The alleviation of traffic congestion reduced the CO<sub>2</sub> emission factors of gasoline passenger cars, gasoline light-duty trucks, diesel light-duty trucks, and diesel heavy-duty trucks by 21.71%, 21.23%, 18.84%, and 15.35%, respectively. For gasoline passenger cars alone, this translates to an annual reduction in gasoline consumption of approximately 936 000 tons and a reduction in CO<sub>2</sub> emissions of about 3.12 million tons. The proposed model is compared with the CO<sub>2</sub> emissions factor model based on vehicle specific power, and both show generally consistent trends of CO<sub>2</sub> emission factors with vehicle speed. Within the speed range of 15–60 km/h, the constructed model fits the relationship between CO<sub>2</sub> emission factors and average speed well, demonstrating its applicability to the study of CO<sub>2</sub> emissions from urban road traffic. Improving urban traffic operational efficiency is an important pathway to reducing vehicle CO<sub>2</sub> emissions.

**Keywords:** MOVES model; CO<sub>2</sub> emission factor; average speed; fuel consumption

(责任编辑:赵玉真)