

区域汽车 CO₂ 排放量估算与 CO₂ 排放因子研究 ——以江苏省为例

郁建桥^{1,2}, 周俐峻¹, 刘海涛³

- 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210019
- 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心, 江苏 南京 210044
- 清华大学苏州汽车研究院(吴江), 江苏 苏州 215200

摘要:基于保有量法估算了2022年江苏省汽车 CO₂ 排放量,同时结合江苏省环境监测中心对省内生产和销售的重点车型的实际道路便携式排放测试系统(PEMS)排放测试结果,建立了江苏省本地化汽车 CO₂ 排放因子模型。结果显示:从车辆类型层面来看,小型汽油客车、重型柴油货车、轻型柴油货车分别以60.76%、27.57%、3.95%的碳排放贡献率占据前三;从排放标准层面来看,国五、国四、国六标准车辆分别以33.95%、28.25%、25.28%的碳排放贡献率占据前三;从地区层面来看,苏州、南京和无锡碳排放贡献率居于10%~21%区间,徐州、南通、常州、盐城碳排放贡献率居于6%~10%区间,其他城市处在4%左右。基于本研究建立的汽车 CO₂ 排放因子模型估算得到的江苏省国六汽车碳排放总量,相比基于《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)》推荐值估算得到的碳排放总量上浮了5.3%。基于国六 PEMS 试验获取的绝大多数车型的 CO₂ 平均排放因子要高于推荐值。不同汽车通过远程监控和 PEMS 试验两种方式获取的 CO₂ 排放因子存在较大偏差,同一辆车的 CO₂ 排放因子会受驾驶行为、车辆载荷及环境温度等因素变化的影响而出现偏差。

关键词:江苏省;汽车;碳排放;CO₂ 排放因子

中图分类号:X831 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-6002(2026)01-0135-09

DOI:10.19316/j.issn.1002-6002.2026.01.12

Study on Regional CO₂ Emission Estimation and CO₂ Emission Factors of Vehicles: A Case Study of Jiangsu Province

YU Jianqiao^{1,2}, ZHOU Lijun¹, LIU Haitao³

- Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing 210019, China
- Jiangsu Collaborative Innovation Center of Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China
- Suzhou Automotive Research Institute (Wujiang), Tsinghua University, Suzhou 215200, China

Abstract: This study estimated CO₂ emissions of vehicles in Jiangsu Province in 2022 based on the ownership method. At the same time, by integrating the actual road portable emission testing system (PEMS) test results of key vehicle models produced and sold in the province by Jiangsu Environmental Monitoring Center, a localized CO₂ emissions factor model for vehicles in Jiangsu Province was established. The results show that according to the perspective of vehicle types, CO₂ emissions of small gasoline buses, heavy diesel trucks, and light diesel trucks accounted for 60.76%, 27.57% and 3.95%, respectively. According to the emission standard, the proportion of vehicle emissions that meet the emission standard of China 5, China 4 and China 6 were 33.95%, 28.25% and 25.28%, respectively. According to the region, the carbon emission contribution rates of Suzhou, Nanjing and Wuxi were in the range of 10%-21%, while Xuzhou, Nantong, Changzhou, and Yancheng were in the range of 6%-10%, and the remaining cities were about 4%. Based on the CO₂ emission factor model of vehicles established by this study, the total carbon emissions of China 6 vehicles in Jiangsu Province was estimated to be 5.3% higher than the estimate based on the recommended values from the *Technical Guide for Compiling Integrated Emission Inventory of Air Pollutants and Greenhouse Gases (Trial)*. There was a large deviation between the CO₂ emission factors obtained by remote monitoring data and those obtained by PEMS test. Furthermore, the CO₂ emission factors of the same vehicle can vary due to changes in driving behavior, vehicle loads and ambient temperature.

Keywords: Jiangsu Province; vehicle; carbon emission; CO₂ emission factor

收稿日期: 2024-12-02; 修订日期: 2025-05-20

第一作者简介: 郁建桥(1966—), 男, 硕士, 正高级工程师, yjq@jshb.gov.cn。

自工业革命以来,人类活动产生了大量以CO₂为主的温室气体排放,使得全球气温不断升高,进而危害自然生态系统的平衡和人类健康。为了应对气候变化带来的挑战,在2015年第21届联合国气候变化大会上,近200个缔约方一致通过了《巴黎协定》,旨在通过实现碳达峰和近零排放,将全球平均气温较工业革命前的上升幅度控制在2℃以内,并努力控制在1.5℃内^[1]。2020年,习近平主席在第七十五届联合国大会一般性辩论上郑重宣布,中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和^[2]。

根据中国碳核算数据库(CEADs)披露的碳排放数据,在2010年之前,中国已经超越美国,成为全球最大的碳排放国家;2021年中国碳排放量达到103亿t,占据全球的近31%,其中电力和热力生产、工业、交通及建筑为全国主要碳排放行业^[3]。中国作为世界上交通运输最繁忙的国家之一,铁路、公路、水运、民航的客运周转量和货运周转量都居全球前列,交通碳排放面临巨大压力。据相关研究报告,中国交通碳排放量占全国能源碳排放量的比重在10%上下,其中公路碳排放为交通碳排放的主要来源,占比高达80%^[4-5]。

汽车行业作为我国重要的经济支柱产业,在推动经济发展的同时,其带来的大气污染物排放和碳排放问题不容小觑。对此,国内外学者开展了大量研究,代表性成果有:万方^[6]结合智慧环保治理思路,提出了以人工智能和大数据分析技术为驱动的机动车排放监管体系构建思路,实现了对机动车污染物排放的更加精细化、动态化、智慧化控制和治理;李淇^[7]基于LEAP模型模拟评估了我国不同发展情景下的道路移动源能源消耗、碳及大气污染物排放情况;黄志辉等^[8]采用行驶里程法分析了我国道路交通碳排放现状、未来变化趋势及主要驱动因素;吕晨等^[9]基于MOVES模型核算了我国大陆地区31个省份分车型的CO₂排放因子,并建立了各省份的单位客运、货运周转量的机动车CO₂排放因子库;徐浩成等^[10]对比并归纳了国内外道路交通碳排放核算方法的特点,包括基于燃料单位热值碳排放因子的碳排放核算方法、基于试验测试碳排放因子的碳排放核算方法、基于道路交通排放核算模型的碳排放核算方法、基于机动车在线监控平台的碳排放核算方法。

纵观国内外研究文献,以往的碳排放估算普遍采用物料核算法,以能源部门为主导,数据渠道单一,统计结果滞后,缺乏不同维度、领域的交叉验证,难以满足新形势下科学、精准、实时评估碳排放的需要^[11]。此外,大部分学者在核算我国公路碳排放时,主要借鉴的是国外污染物排放核算模型,当中涉及的模型参数(如车龄、车辆环保标准、行驶工况、载荷、空调使用情况等)未结合我国各地区车辆实际使用条件,不能真实反映我国实际道路交通条件下的碳排放水平^[12]。鉴于不同地区车辆活动水平和碳排放因子的差异,建立各地区碳排放清单对有效评估全国公路碳排放水平就显得尤为重要。此外,从2019年7月1日起,我国相继开始实施重型柴油车和轻型汽车国六排放标准。未来,满足国六排放标准的车辆将很快成为我国汽车市场的主力车型。与此同时,江苏省环境监测中心从2019年起,每年在全省范围内组织开展满足国六排放标准的新生产和销售机动车环保达标抽查核验工作。为此,本研究结合江苏省历年环保达标抽查核验数据,对江苏省汽车碳排放测算(本文仅讨论CO₂排放),尤其是满足国六排放标准的汽车的碳排放测算,开展一系列研究,为未来评估全国公路碳排放总量提供数据支撑。

1 汽车碳排放量估算方法与数据来源

1.1 估算方法

此前,我国环保部门更加注重对机动车尾气污染物排放的控制,并未对机动车碳排放清单进行长时间序列的研究。通过查阅文献发现,目前关于我国不同地区碳排放量核算的研究还很匮乏。现有部分研究包括:陈素平等^[13]参考《2006年IPCC国家温室气体清单指南》中的移动源CO₂排放系数,建立了天津市道路交通领域各项减排政策的CO₂减排量计算模型;张兰怡等^[14]通过用每一种能源的消耗量乘以IPCC推荐的能源碳排放系数,核算了福建省交通源碳排放量;原佩琪^[15]利用车载测试数据和国外模型数据,计算了澳门机动车的CO₂排放总量。近年来,我国机动车保有量猛增,且更新换代速度逐年攀升,而上述关于地区碳排放测算的研究工作大抵还是参考2006年的碳排放系数,研究结果已无法用于有效评估各地区机动车的现今碳排放量。

2024年1月,生态环境部发布了《大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南(试行)》(环办大气函[2024]28号)^[16](以下简称《2024指南》)。对于机动车碳排放量计算,《2024指南》推荐了3种方法:在线监控法、交通量法和保有量法。其中,在线监控法通过获取纳入监控车辆在运行时逐秒向远程排放管理平台发送的车辆主要运行参数,如车速、油耗等,基于碳平衡原理(不考虑CO和HC排放量的影响),按照公式(1)计算得到CO₂排放因子。理论上,在车速和油耗传感器运行状态正常及数据传输稳定的情况下,通过在线监控法获取的机动车碳排放量最贴合实际。但现阶段我国只强制要求重型国六汽车在全寿命期内,实时向远程排放管理平台发送车辆主要运行参数。考虑到当前我国大部分地区国六排放标准车型的占比不足三成,该方法还无法有效测算各地区机动车碳排放总量。

$$F_{\text{远程}} = \frac{\sum_i Q_{\text{fuel}} \times \rho_{\text{fuel}} \div 3.6 \div f_{\text{C,H}} \div \omega_{\text{CO}_2}}{\sum_i v_i \div 3600} \quad (1)$$

式中: $F_{\text{远程}}$ 为远程监控CO₂排放因子,g/km; Q_{fuel} 为发动机瞬时喷油量,L/h; ρ_{fuel} 为燃油密度,采用《2024指南》中的推荐值,汽油取0.73 kg/L,柴油取0.84 kg/L; $f_{\text{C,H}}$ 为燃油的碳元素系数,假定汽油的碳氢比为1:1.85,柴油的碳氢比为1:1.86,则汽油的碳元素系数取1.154,柴油的碳元素系数取1.155; ω_{CO_2} 为CO₂中碳元素的质量分数,取12/44≈0.273; v_i 为车辆瞬时速度,km/h。

《2024指南》中明确了采用交通量法估算汽车碳排放量的计算公式,具体如公式(2)所示。对于公式(2)中涉及的车流量、道路长度等基础数据,可通过实际观察、模型反演和路网GIS地图等途径获取,但需要建立在交通运输、公安交管和生态环境等部门建立了数据共享机制的基础上。除此之外,对于公式中涉及的每类机动车的CO₂排放因子,需要基于国内交通碳排放核算模型中的参考值,结合各地区实际道路交通状况优化得到。但当前国内暂无已公布的道路交通碳排放核算模型,故该方法还无法测算各地区机动车碳排放总量。

$$E_{d,h,l} = \sum_i V_{i,d,h,l} \times L_l \times F_{i,v} \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中: $E_{d,h,l}$ 为 l 路段在第 d 天第 h 小时的CO₂累积排放量,t; $V_{i,d,h,l}$ 为 i 类机动车在 l 路段第 d 天第 h 小时的流量,辆; L_l 为 l 路段长度,km; $F_{i,v}$ 为

i 类机动车在车速 v 下的CO₂排放因子,g/km。

相比前两种方法,通过保有量法估算汽车碳排放量所需的基础数据,如保有量和年均行驶里程等,可较容易地从各地区统计部门官网公布的统计年鉴数据库和各地区车管所官网发布的数据库中获取。其计算公式如公式(3)所示:

$$Q_{\text{保有量}} = \sum_i P_i \times S_i \times F_i \div 10^6 \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{保有量}}$ 为采用保有量法估算得到的CO₂累积排放量,t; P_i 为所在地区 i 类机动车的保有量,辆; S_i 为所在地区 i 类机动车的年均行驶里程,km/辆; F_i 为所在地区 i 类机动车的CO₂排放因子,g/km。

综上所述,本研究将采用保有量法测算江苏省汽车碳排放总量。

1.2 数据来源

1.2.1 CO₂ 排放因子

汽车CO₂排放因子与发动机排量、发动机固有技术、车重、车龄、载荷、环境温度、驾驶行为、交通状况等多重因素密切相关。由于缺乏足够的数据库支撑,本研究拟采用《2024指南》提供的不同类型机动车CO₂排放因子,估算江苏省汽车碳排放总量。

基于2019—2023年度江苏省环境监测中心在全省范围内组织开展的新生产、销售机动车环保达标抽查核验数据,建立了江苏省本地化机动车CO₂排放因子模型,对比分析基于不同数据来源的CO₂排放因子的差异。同时,对比分析基于本省CO₂排放因子模型估算的国六车辆碳排放量和基于《2024指南》推荐值估算的相同车辆碳排放量之间的差异。

基于轻型汽车国六排放标准^[17]附录D中的实际行驶污染物排放试验方法,在苏州市内选取一条满足市区、市郊和高速路段相应行驶速度和里程要求的测试路线。具体工况特征为:市区、市郊、高速路段的平均车速分别约为30、78、102 km/h,总里程约为90 km。选取3辆满足国六排放标准的小型汽油客车,在(25±5)℃条件下,由同一驾驶员分别按照平顺、正常和激烈3种驾驶要求完成实际道路便携式排放测试系统(PEMS)测试,对比不同驾驶行为下CO₂排放因子的差异。驾驶行为的定义分别如下:“平顺驾驶”指驾驶员换挡、转向等动作流畅自然,避免频繁变道或急加速、急刹车行驶;“正常驾驶”指驾驶员的驾

驶行为与平常驾驶行为相符;“激烈驾驶”指驾驶员以一种运动、激进的方式进行驾驶,驾驶过程中伴随着大量的急加速和急减速事件。

基于重型柴油车国六排放标准^[18]附录 K 中的实际道路行驶测量方法(采用 PEMS),在苏州市内选取一条满足市区、市郊和高速路段相应行驶速度及里程要求的测试路线。具体工况特征为:市区、市郊、高速路段的平均车速分别约为 25、60、80 km/h。M2(包括驾驶员座位在内的座位数超过 9 座,且最大设计总质量不超过 5 000 kg 的载客汽车)、M3(包括驾驶员座位在内的座位数超过 9 座,且最大设计总质量超过 5 000 kg 的载客汽车)和 N2(最大设计总质量超过 3 500 kg,但不超过 12 000 kg 的载货汽车)类车辆的运行道路组成相同,均依次为 68 min 的市区路、38 min 的市郊路、45 min 的高速路;N3(最大设计总质量超过 12 000 kg 的载货汽车)类车辆的运行道路组成依次为 24 min 的市区路、30 min 的市郊路、66 min 的高速路。选取满足国六排放标准的小型柴油客车(M2类)、大型柴油客车(M3类)、轻型柴油货车(N2类)和重型柴油货车(N3类)各 1 辆,在(25±5)℃条件下,分别以空载和满载两种载荷状态,由同一驾驶员按照正常驾驶要求完成实际道路 PEMS 测试,对比不同载荷下 CO₂ 排放因子的差异。

此外,基于轻型汽车国六排放标准附录 D 中的实际行驶污染物排放试验方法,选取与轻型汽车实际道路 PEMS 试验相同的速度工况进行转毂循环测试。选取 3 辆满足国六排放标准的小型汽油客车,分别在-7、0、23、35℃环境温度下,由同

一驾驶员按照循环测试曲线开展转毂 PEMS 试验,对比不同环境温度下 CO₂ 排放因子的差异。

1.2.2 年均行驶里程

建立本地化、分车型的年均行驶里程清单,对准确估算地区碳排放量具有至关重要的作用。但受社会经济、交通结构和地理环境等多重因素的影响,现阶段我国大部分城市并没有官方统计的年均行驶里程^[19]。考虑到获取数据的复杂程度,本研究采用原环境保护部 2014 年发布的《道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南(试行)》^[20](以下简称《2014 指南》)中的不同车型年均行驶里程数据,估算江苏省汽车碳排放量。

1.2.3 汽车保有量

通过查阅江苏省公安厅登记备案的不同类型机动车保有量数据获悉,2022 年江苏省汽车保有量总计约为 2 450 万辆。按车辆类型划分汽车保有量,排名前三的车型依次为小型汽油客车(91.7%)、轻型柴油载货汽车(2.6%)和重型柴油载货汽车(1.8%);按排放标准划分汽车保有量,排名前三的排放标准依次为国四(31.1%)、国五(29.0%)、国六(26.5%);按地区划分汽车保有量,排名前三的城市依次为苏州(21.7%)、南京(13.1%)、无锡(10.5%)。

1.3 推荐取值

按照《2014 指南》中的车辆类型划分标准,结合江苏省公安厅 2022 年登记备案的汽车保有量数据,选取保有量较高的车辆类型。表 1 汇总了不同类型车辆在《2024 指南》中的 CO₂ 排放因子推荐值及在《2014 指南》中的年均行驶里程。

表 1 推荐 CO₂ 排放因子和年均行驶里程
Table 1 CO₂ emission factors and vehicle kilometers of travel

| 车辆类型 | 保有量占比/% | CO ₂ 排放因子/(g/km) | 年均行驶里程/km |
|--------|---------|-----------------------------|-----------|
| 小型汽油客车 | 91.68 | 174.9 | 18 000 |
| 轻型柴油货车 | 2.58 | 242.4 | 30 000 |
| 重型柴油货车 | 1.81 | 965.6 | 75 000 |
| 小型柴油客车 | 1.20 | 174.9 | 18 000 |
| 轻型汽油货车 | 1.09 | 242.4 | 30 000 |
| 中型柴油货车 | 0.41 | 498.9 | 35 000 |
| 大型柴油客车 | 0.16 | 636.6 | 58 000 |

2 结果与讨论

2.1 江苏省汽车碳排放量估算

由于本研究在获取江苏省各地区机动车 CO₂

排放因子和车辆年均行驶里程实际数据上面临较大难度,为了保障最终结果的可靠性,本研究分别引用了《2024 指南》中的不同类型机动车 CO₂ 排放因子、《2014 指南》中的不同类型机动车年均行驶里程和 2022 年江苏省公安厅登记备案的不同

类型机动车保有量数据,利用公式(3)估算得到了2022年江苏省汽车 CO₂ 累积排放量,约为1.0213亿 t。其中,按照车型划分,小型汽油客车贡献最大,碳排放占比达到60.76%;重型柴油货车和轻型柴油货车分别以27.57%、3.95%的碳排放贡献率紧随其后。此三类车型的碳排放贡献率合计超过了92%,无疑是未来实现“双碳”目标需重点关注的对象。按照排放标准划分,碳排放占比较高车辆对应的排放标准主要为国五(33.95%)、国四(28.25%)、国六(25.28%)。按照地区划分,碳排放占比基本呈现3个等级,处在10%~21%区间的城市依次为苏州(20.12%)、南京(13.17%)、无锡(10.58%),处在6%~10%区间的城市依次为徐州(9.39%)、南通(8.75%)、常州(7.09%)、盐城(6.27%),其余城市均处在4%左右。未来,随着交通运输、公安交管和生态环境等多部门实现数据共享,准确评估各地区机动车碳排放量将获得有力的数据支撑。

图1为2022年江苏省不同类型汽车保有量和碳排放量。从图中可明显看出,保有量占比越高的汽车,其碳排放贡献也越大。虽然小型柴油客车的保有量高于后面3种车型,但其 CO₂ 排放因子明显低于后面3种车型,导致其碳排放量排名最低。相应地,重型柴油货车的 CO₂ 排放因子明显高于其他车型,导致其碳排放量排名更高。由此可见,合理评估汽车的 CO₂ 排放因子对于准确估算其碳排放量具有重要意义。

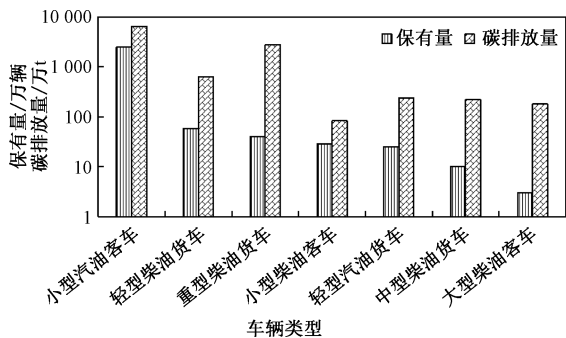


图1 2022年江苏省不同类型汽车保有量和碳排放量
Fig.1 Vehicle ownership and carbon emissions of different types of cars in Jiangsu Province in 2022

2.1.1 基于实际道路 PEMS 试验的 CO₂ 排放因子

通过查阅江苏省环境监测中心在2019—2023年期间完成的国六新生产、销售机动车环保达标抽查核验数据库,对照图1呈现的碳排放量

贡献突出的7类车型,选取省内10家汽车生产企业和重点销售企业各自对应主流车型当中的1辆样车的实际道路 PEMS 试验排放数据进行分析,发现各车型 CO₂ 平均排放因子大多高于表1中的推荐值。按照保有量排名顺序,各车型依次高出9.71%、16.67%、-13.08%、23.33%、16.92%、6.23%、13.65%。究其原因,可能为本研究通过试验获取的 CO₂ 排放因子都是基于国六排放标准车辆,而表1推荐的 CO₂ 排放因子覆盖了不同排放标准车辆。面对排放标准的逐步加严,绝大多数企业都采用了更多的热管理措施,即“降低了排放,牺牲了油耗”。此前也有学者研究发现^[21-22],国六柴油车 CO₂ 排放要高于国五柴油车。图2为不同类型汽车 CO₂ 排放因子试验值与推荐值的差异。不难发现,重型柴油货车的 CO₂ 排放因子波动幅度要明显高于其他车型,主要可能是因为部分试验是基于空载状态完成,而本研究开展的载荷对 CO₂ 排放因子的影响分析显示,该车型部分车辆的空载 CO₂ 排放因子不足满载的60%,这也导致了其试验 CO₂ 平均排放因子低于推荐值。

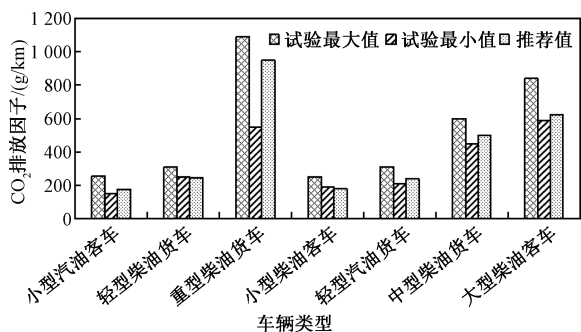


图2 不同类型汽车 CO₂ 排放因子试验值与推荐值的差异

Fig.2 Differences between test values and recommended values of CO₂ emission factors for different types of cars

2.1.2 基于远程监控的 CO₂ 排放因子

基于3辆测试车辆(大型柴油客车、轻型柴油货车和重型柴油货车各1辆,分别对应图3中的样车11、样车12和样车13)在开展实际道路 PEMS 试验期间发送到企业远程监控平台的车辆实时数据,通过公式(1)求出其远程监控 CO₂ 排放因子,与 PEMS 设备测得的试验 CO₂ 排放因子进行对比,结果见表2。3辆车的远程监控 CO₂ 排放因子和 PEMS 设备测得的试验 CO₂ 排放因

子互有高低,两者偏差按样车顺序依次为-8.47%、-11.1%和34.07%。分别对通过远程监控和PEMS试验获取的车速及CO₂排放量数据进行线性拟合发现,车速的相关性极好,相关系数达到0.99;不同车辆CO₂排放量的相关性差异较大,这也导致CO₂排放因子并未呈现与之相同的变化规律。推敲其原因,可能有两方面:一是通过远程监控平台获取的CO₂排放因子是基于车辆油耗及燃油在理想状态下燃烧的化学关系式换算而来,而汽车在实际行驶过程中受多重因素影响(主要影响因素包括发动机燃烧效率水平、驾驶员操控行为、燃油质量、道路类型和交通流状态等),基本无法实现燃油理想燃烧。因此,通过PEMS设备测得的试验CO₂排放因子更能真实反映车辆的实际CO₂排放水平。二是3辆车通过远程终端设备发送数据的频率分别为0.1、0.03、

1 Hz,这导致在后期数据处理过程中无法将其与PEMS设备测量结果实现同步对比。

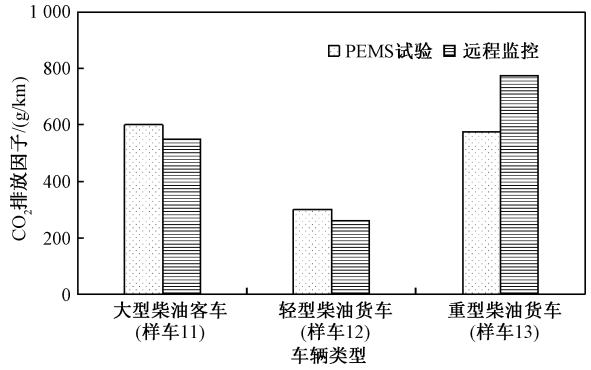


图3 不同类型汽车PEMS试验与远程监控CO₂排放因子的差异

Fig. 3 Differences between test values and remote monitoring values of CO₂ emission factors for different types of cars

表2 PEMS试验和远程监控的参数相关性及其排放因子

Table 2 Parameter correlation and emission factors between PEMS tests and remote monitoring

| 车辆编号 | 车速相关系数 | CO ₂ 排放量相关系数 | PEMS试验CO ₂ 排放因子/(g/km) | 远程监控CO ₂ 排放因子/(g/km) |
|------|--------|-------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 样车11 | 0.99 | 0.95 | 599.9 | 549.1 |
| 样车12 | 0.99 | 0.75 | 283.7 | 252.2 |
| 样车13 | 0.97 | 0.24 | 576.4 | 772.8 |

2.1.3 基于试验值和推荐值估算的国六车辆碳排放总量差异

由前文分析可知,基于《2024指南》推荐的CO₂排放因子估算的江苏省国六汽车碳排放占比为25.28%,对应约2582万t。为了评估该排放量是否具有代表性,本研究通过对江苏省内汽车生产企业和重点销售企业开展主流车型实际道路PEMS试验,建立了江苏省本地化汽车CO₂排放因子模型,估算了江苏省国六汽车碳排放总量,约为2719万t,相较基于《2024指南》推荐值估算的国六汽车碳排放总量上浮5.3%。由此可看出,未来随着国六排放标准车辆保有量的攀升,通过《2024指南》推荐的CO₂排放因子估算的汽车碳排放总量很有可能出现更多低估。

本研究估算2022年江苏省机动车碳排放量引用的江苏省本地化汽车CO₂排放因子,是在环保监督查验过程中对随机抽选的不同品牌、不同载重量、不同技术路线国六排放车辆进行分析测试,并考虑了驾驶习惯、载荷情况及环境温度后的结果,具有一定的代表性。但由于样本数量、样本排放阶段等的限制,其与推荐值有所差异。

2.1.4 我国机动车碳排放量变化趋势

通过对我国机动车燃油消耗政策法规进行研究可以看出,在国家标准的推动下,我国乘用车综合燃料消耗水平持续降低,乘用车行业平均油耗从2016年的6.43 L/100 km下降至2022年的4.1 L/100 km。在此基础上,相关标准进一步提出至2030年平均燃料消耗量降至3.3 L/100 km的总体目标^[23]。我国重型商用车燃料消耗量限值第一、二、三阶段标准分别自2012年、2014年、2019年开始实施,在降低重型商用车燃料消耗量方面发挥了重要作用。其中,第三阶段油耗限值与前一阶段相比,货车加严了13.8%,客车加严了12.5%,半挂牵引车加严了14.3%,自卸汽车加严了13.5%,城市客车加严了15.9%。2024年出台的第四阶段标准,进一步加严了15%~20%^[24]。从全国碳排放结构来看,汽车行业(尤其是汽车行驶环节)对全国碳排放贡献较大(约占7.5%),因而汽车行业需要承担相应的减碳责任。按照《2030年前碳达峰行动方案》相关要求,我国相关部门还会继续出台高要求的燃料消耗标准及污染物排放标准,淘汰高排放高能

耗的落后产品,促进先进节能低碳技术应用。这将有效支撑汽车行业在 2030 年前实现碳排放达峰,也将成为缓解汽车工业快速发展与生态文明建设之间矛盾的重要途径。

2.2 CO₂ 排放因子主要影响因素分析

2.2.1 驾驶行为对 CO₂ 排放因子的影响

图 4 为 3 辆国六小型汽油客车在平顺、正常和激烈 3 种驾驶行为下的 PEMS 试验 CO₂ 排放因子。不难发现,随着驾驶工况的激进,发动机负荷增大,3 辆车的试验 CO₂ 排放因子都出现了不同程度的升高。按照样车顺序,3 辆车在激烈驾驶和平顺驾驶下的试验 CO₂ 排放因子偏差依次为 19%、22% 和 21%。对标《2024 指南》中的小型汽油客车推荐 CO₂ 排放因子,仅有样车 3 在平顺驾驶行为下的试验 CO₂ 排放因子与推荐值相当,样车 1 和样车 2 在平顺驾驶行为下的试验 CO₂ 排放因子分别高出推荐值 30% 和 33%。由此可见,未来随着国六轻型汽车的大量涌现,小型汽油客车的碳排放贡献还会存在较大增长。

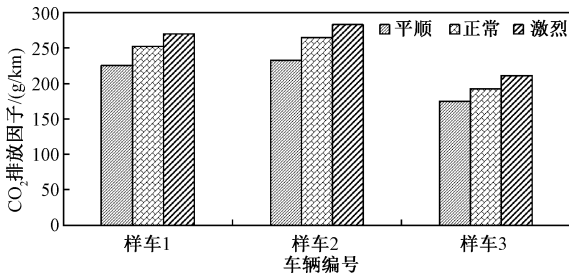


图 4 不同驾驶行为下的 CO₂ 排放因子

Fig. 4 CO₂ emission factors under different driving behaviors

2.2.2 车辆载荷对 CO₂ 排放因子的影响

图 5 为 4 辆国六样车(轻型柴油货车,样车 4;重型柴油货车,样车 5;小型柴油客车,样车 6;大型柴油客车,样车 7)在空载和满载状态下的 PEMS 试验 CO₂ 排放因子。按照样车顺序,4 辆车在满载和空载状态下的试验 CO₂ 排放因子偏差依次为 28%、70%、18%、46%。对于样车 5 和样车 7,由于二者允许装载较大的质量,其满载和空载状态的试验 CO₂ 排放因子发生较大偏离。与《2024 指南》中对应车型的推荐 CO₂ 排放因子相比,样车 5 和样车 7 在空载状态下的试验 CO₂ 排放因子分别比各自推荐值小 41% 和 47%。因此,对于上述两种车型的碳排放估算,应尽可能跟踪到该车型在日常使用中的实际装载质量。此外,对于样车

5 所属车型,虽然其保有量相对较低,但其推荐 CO₂ 排放因子比推荐值最低车型(样车 6)高出 4 倍有余。因而在与其他车型保有量相当的情况下,样车 5 所属车型的碳排放量会出现明显攀升,其将成为我国机动车减排的重点管控对象。

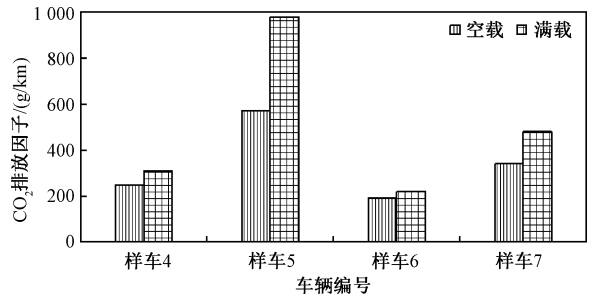


图 5 不同载荷下的 CO₂ 排放因子

Fig. 5 CO₂ emission factors with different payloads

2.2.3 环境温度对 CO₂ 排放因子的影响

图 6 为 3 辆小型汽油客车基于同一实际道路 PEMS 试验速度工况,分别在 -7、0、23、35 °C 环境温度下的转毂 PEMS 试验 CO₂ 排放因子。图 6 显示,3 辆车在低温(-7 °C)和高温(35 °C)下的 CO₂ 排放因子均高于另外两个温度。此前已有学者研究表明^[25-26],低温状态时,机油黏度增大,曲轴转动所需力矩增大,会使得发动机做功增多,进而导致 CO₂ 排放因子升高;高温状态时,发动机进气温度升高,燃烧恶化,也会导致 CO₂ 排放因子升高。样车 8 在低温(-7 °C)和高温(35 °C)下的转毂 PEMS 试验 CO₂ 排放因子分别超出《2024 指南》推荐值 17% 和 9%,其余样车比推荐值略低或与之接近。在不同环境温度下,3 辆样车的 CO₂ 排放因子最大值与最小值的偏差分别达到 32%、21%、17%。由此可见,在不同环境温度下,同一辆车的碳排放存在较大差异。

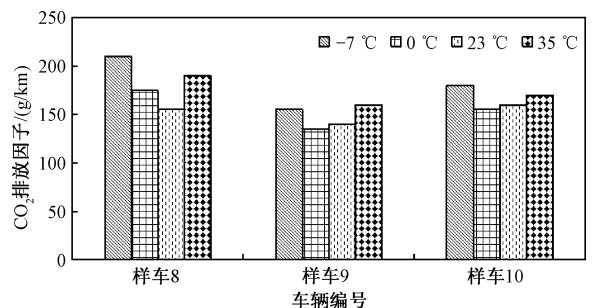


图 6 不同环境温度下的 CO₂ 排放因子

Fig. 6 CO₂ emission factors at different ambient temperatures

3 结论

1) 基于保有量法估算的2022年江苏省汽车CO₂累积排放量约为1.0213亿t。其中,从汽车类型层面划分,小型汽油客车、重型柴油货车和轻型柴油货车分别以60.76%、27.57%和3.95%的碳排放贡献率占据前三;从排放标准层面划分,国五标准、国四标准和国六标准车辆分别以33.95%、28.25%和25.28%的碳排放贡献率占据前三;从地区层面划分,有3个城市的碳排放贡献率居于10%~21%区间,4个城市居于6%~10%区间,其他城市处在4%左右。

2) 基于本研究建立的汽车CO₂排放因子模型估算得到的江苏省国六汽车碳排放总量约为2719万t,较利用推荐值估算得到的碳排放总量上浮5.3%。未来,随着国六排放标准车辆保有量的攀升,通过《2024指南》推荐的CO₂排放因子估算得到的汽车碳排放总量很有可能出现更多低估。为此,全国各地应加快构建符合当地特色的汽车CO₂排放因子模型。

3) 基于国六PEMS试验获取的绝大多数车型的CO₂平均排放因子要高于《2024指南》中的推荐值,但重型柴油货车因实际载荷的不同,其PEMS试验CO₂排放因子的波动幅度比其他车型更明显。

4) 由于远程监控平台数据接收质量和处理方法的差异,通过远程监控获取的不同国六重型汽车的CO₂排放因子与通过PEMS试验获取的CO₂排放因子存在较大偏差。

5) 汽车CO₂排放因子与车辆自身因素和外部环境因素紧密相关,同一辆车的CO₂排放因子会受驾驶行为、车辆载荷和环境温度等因素变化的影响而出现偏差。

参考文献 (References):

[1] 未来智库. 汽车领域碳达峰时间点预测、减排力度和实现路径[EB/OL]. (2022-08-25) [2025-04-11]. <https://www.vzkoo.com/read/20220825842b4500607976e0be38becf.html>.

[2] 吴瑞丽,汪巍,丁俊男,等. 全球及区域碳模拟与源汇同化反演研究进展[J]. 中国环境监测,2023,39(5):44-51.
WU Ruili, WANG Wei, DING Junnan, et al. Research Progress on Global and Regional Carbon Modelling

and Source-Sink Assimilation Inversion [J]. Environmental Monitoring in China, 2023, 39(5): 44-51.

- [3] 徐若翀, 同丹, 肖清扬, 等. MEIC-global-CO₂: 精细源分类下包含次国家信息的全球CO₂排放清单[J]. 中国科学: 地球科学, 2024, 54(2): 469-485.
XU Ruochong, TONG Dan, XIAO Qingyang, et al. MEIC-global-CO₂: A New Global CO₂ Emission Inventory with Highly-Resolved Source Category and Sub-country Information [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2024, 54(2): 469-485.
- [4] 严刚, 薛文博, 史旭荣, 等. 中国机动车“减污降碳”目标、路径、效益分析与政策建议[R]. 北京: 生态环境部环境规划院, 2023.
- [5] International Energy Agency. What Are the Main Sources of CO₂ Emissions in China? [EB/OL]. [2025-04-11]. <https://www.iea.org/countries/china/emissions>.
- [6] 万方. 人工智能和大数据驱动的机动车排放监管体系探析[J]. 中国环境监测, 2025, 41(1): 27-33.
WAN Fang. Analysis of the Vehicle Emission Supervision System Based on the Artificial Intelligence and Big Data Technology [J]. Environmental Monitoring in China, 2025, 41(1): 27-33.
- [7] 李洪. 中国道路移动源大气污染物和碳排放协同控制途径研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [8] 黄志辉, 纪亮, 尹洁, 等. 中国道路交通二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 385-393.
HUANG Zhihui, JI Liang, YIN Jie, et al. Peak Pathway of China's Road Traffic Carbon Emissions [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 385-393.
- [9] 吕晨, 张哲, 陈徐梅, 等. 中国分省道路交通二氧化碳排放因子[J]. 中国环境科学, 2021, 41(7): 3122-3130.
LYU Chen, ZHANG Zhe, CHEN Xumei, et al. Study on CO₂ Emission Factors of Road Transport in Chinese Provinces [J]. China Environmental Science, 2021, 41(7): 3122-3130.
- [10] 徐浩成, 余浩, 吕强, 等. 道路交通碳排放核算方法研究[J]. 汽车工程学报, 2023, 13(4): 496-505.
XU Haocheng, YU Hao, LYU Qiang, et al. Research on Accounting Methods for Road Traffic Carbon Emissions [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2023, 13(4): 496-505.
- [11] 宋静俏, 冀建树, 何佳宝, 等. 宁波市碳监测试点实践经验下的碳排放形势分析与政策建议[J]. 中国环境监测, 2024, 40(6): 21-27.

- SONG Jingqiao, JI Jianshu, HE Jiabao, et al. Analysis of Carbon Emission Situation and Policy Suggestions Based on the Pilot Practical Experience of Carbon Monitoring in Ningbo [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2024, 40(6): 21-27.
- [12] 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.
- TENG Wentao, ZHANG Qianqian, LIU Fang, et al. The Progress in the Research on Estimation of Vehicle Carbon Emission in China [J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 54(3): 83-92.
- [13] 陈素平, 赵莎莎, 姜洋, 等. 天津市道路交通减排政策实施效果评估 [J]. *城市交通*, 2021, 19(5): 59-65.
- CHEN Suping, ZHAO Shasha, JIANG Yang, et al. Implementation Effects of Road Traffic Carbon Reduction Policies in Tianjin [J]. *Urban Transport of China*, 2021, 19(5): 59-65.
- [14] 张兰怡, 卢秋萍, 张圆圆, 等. 福建省交通碳排放影响因素与减碳趋势研究 [J]. *哈尔滨商业大学学报 (自然科学版)*, 2022, 38(3): 360-366, 375.
- ZHANG Lanyi, LU Qiuping, ZHANG Yuanyuan, et al. Research on Influencing Factors and Carbon Reduction Trend of Transportation Carbon Emissions in Fujian Province [J]. *Journal of Harbin University of Commerce (Natural Sciences Edition)*, 2022, 38(3): 360-366, 375.
- [15] 原佩琪. 澳门机动车燃油消耗及二氧化碳排放模型研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [16] 生态环境部. 大气污染物与温室气体融合排放清单编制技术指南 (试行) [S/OL]. (2024-01-19) [2025-04-11]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202401/W020240130539574113045.pdf>.
- [17] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 轻型汽车污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段): GB 18352.6—2016 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2017.
- [18] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 重型柴油车污染物排放限值及测量方法 (中国第六阶段): GB 17691—2018 [S]. 北京: 中国环境出版集团, 2019.
- [19] 孙世达, 王博, 孙露娜, 等. 江苏省高时空分辨率机动车排放清单构建及特征 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(9): 4 490-4 502.
- SUN Shida, WANG Bo, SUN Luna, et al. Development and Characteristics of Vehicle Emission Inventory with High Spatiotemporal Resolution in Jiangsu Province [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(9): 4 490-4 502.
- [20] 环境保护部. 道路机动车大气污染物排放清单编制技术指南 (试行) [S/OL]. (2014-12-31) [2025-04-11]. <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bgg/201501/W020150107594587831090.pdf>.
- [21] 冯谦, 刘保献, 杨妍妍, 等. 基于远程监测的北京市柴油车实际道路 NO_x 与 CO₂ 排放特征 [J]. *中国环境科学*, 2023, 43(8): 4 418-4 426.
- FENG Qian, LIU Baoxian, YANG Yanyan, et al. Characteristics of Actual Road NO_x and CO₂ Emissions from Diesel Vehicles in Beijing Based on Remote Monitoring [J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(8): 4 418-4 426.
- [22] 葛子豪, 尹航, 徐龙, 等. 重型柴油车实际道路氮氧化物和碳排放研究 [J]. *中国环境科学*, 2024, 44(2): 646-653.
- GE Zihao, YIN Hang, XU Long, et al. Emissions of Nitrogen Oxides and Carbon Dioxide from Heavy-Duty Diesel Vehicles Based on Remote Monitoring [J]. *China Environmental Science*, 2024, 44(2): 646-653.
- [23] 工业和信息化部. 乘用车燃料消耗量评价方法及指标: GB 27999—2025 [S/OL]. (2025-06-30) [2025-10-11]. <https://openstd.samr.gov.cn/bz/gk/gb/newGbInfo?hcno=625681E3EEC23C924A29D229D00DCD04>.
- [24] 工业和信息化部, 交通运输部. 重型商用车燃料消耗量限值: GB 30510—2024 [S/OL]. (2024-09-29) [2025-04-11]. <http://c.gb688.cn/bzgk/gb/showGb?type=online&hcno=35651BC9CFA4506EB75F140E59A4F73D>.
- [25] 李娜, 高涛, 曹斌, 等. 环境温度对重型柴油车实际道路驾驶油耗排放的影响 [J]. *内燃机与配件*, 2024(8): 1-4.
- LI Na, GAO Tao, CAO Bin, et al. Impact of Ambient Temperature on Fuel Consumption and Emissions During Real Road Driving of Heavy-Duty Diesel Vehicles [J]. *Internal Combustion Engine & Parts*, 2024(8): 1-4.
- [26] 郑思凯, 闫峰, 刘乐, 等. 环境温度对混合动力汽车实际道路行驶油耗的影响研究 [J]. *汽车工程师*, 2023(2): 16-21.
- ZHENG Sikai, YAN Feng, LIU Le, et al. Study on the Influence of Ambient Temperature on Real Driving Fuel Consumption of Hybrid Electric Vehicles [J]. *Automotive Engineer*, 2023(2): 16-21.