韩全康,景雪雪,程亚伦,等.河南省机动车温室气体排放特征及情景分析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(12):6935-6942.
Han Q K, Jing X X, Cheng Y L, et al. Characteristics and scenario analysis of greenhouse gas emissions from motor vehicles in Henan Province [J]. China Environmental Science, 2025,45(12):6935-6942.

河南省机动车温室气体排放特征及情景分析

韩全康[1],景雪雪[1],程亚伦[1],王玲玲[2*],张宇哲[3],朱仁成[1**],胡京南[3] (1.郑州大学生态与环境学院,河南 郑州 450001；2.河南省生态环境和安全监测中心,河南 郑州 450046；3.中国环境科学研究院大气环境研究所,北京 100012)

摘要：为评估河南省交通领域温室气体排放水平及减排潜力,基于 COPERT 模型计算本地化机动车排放因子,利用 ArcGIS 软件构建 3km × 3km 网格化排放清单,系统剖析全省机动车温室气体排放的时空演变特征,并结合 Gompertz 函数与弹性系数法预测 2025~2035 年河南省机动车保有量,探究不同控制情景下的排放变化趋势.结果表明:2019~2023 年,河南省机动车温室气体排放总量从 1.4 亿 t 增至 1.6 亿 t,年均增长率为 2.9%;其中,CO_2 占比超过 98%,小型客车和重型货车是机动车碳排放的主要贡献者.城市道路系统排放占比达 78.8%,排放高值区集中于郑州、洛阳等核心城市,呈现“中心集聚、外围扩散”的空间分布特征.基准情景下,2035 年排放总量将升至 1.7 亿 t;若协同推行新能源汽车推广、增加绿色通勤及老旧车辆淘汰三项措施,2035 年排放量可降至 0.7 亿 t,较基准情景下降 58.1%.

关键词：机动车排放；温室气体；情景分析；COPERT 模型；管控措施
中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)12-6935-08

Characteristics and scenario analysis of greenhouse gas emissions from motor vehicles in Henan Province.

HAN Quan-kang[1], JING Xue-xue[1], CHENG Ya-lun[1], WANG Ling-ling[2*], ZHANG Yu-zhe[3], ZHU Ren-cheng[1**], HU Jing-nan[3] (1.School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China；2.Henan Ecological Environment Monitoring and Safety Center, Zhengzhou 450046, China；3.Institute of Atmospheric Environment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China). *China Environmental Science*, 2025,45(12)：6935~6942

Abstract：To evaluate the greenhouse gas (GHG) emissions and mitigation potential in the transportation sector of Henan Province, localized vehicle emission factors were calculated based on the COPERT model. A 3km × 3km gridded emission inventory was established using ArcGIS, and the spatiotemporal dynamics of vehicle-related GHG emissions were systematically analyzed. Vehicle ownership in Henan Province from 2025 to 2035 was forecast by combining the Gompertz function with the elasticity coefficient method, and emission trends under multiple policy scenarios were examined. The results showed that total vehicle GHG emissions increased from 140 million tonnes to 160 million tonnes during 2019 to 2023, with an average annual growth rate of 2.9%. Carbon dioxide (CO_2) accounted for more than 98% of total emissions, while light-duty passenger cars and heavy-duty trucks were identified as the primary contributors. Urban road traffic was responsible for 78.8% of total emissions, and high-emission areas were concentrated in core cities such as Zhengzhou and Luoyang, presenting a spatial pattern of central clustering and peripheral diffusion. Under the baseline scenario, total GHG emissions were projected to reach 170 million tonnes by 2035. In contrast, when new energy vehicle promotion, green commuting, and accelerated retirement of aging vehicles were jointly implemented, total emissions were reduced to 70 million tonnes, representing a 58.1% decrease compared with the baseline. These findings provided quantitative evidence to support carbon management and the optimization of mitigation pathways in the transportation sector of Henan Province.
Key words：vehicle emissions；greenhouse gases；scenario analysis；COPERT model；control measures

随着我国经济社会的快速发展,机动车保有量呈现“高速增长、高频使用和高度聚集”的特征[1].尽管机动车尾气污染治理已取得显著成效,但 CO_2 以及具有较高全球增温潜势(GWP)的甲烷(CH_4, GWP=29.8)与氧化亚氮(N_2O,GWP=273)等温室气体排放仍缺乏有效控制,是当前环境管理与气候变化应对的重要挑战[2-4].交通运输是能源消耗与碳排放的主要领域,2021 年交通运输领域产生 CO_2 高达 969.5Mt,占全国碳排放总量的 9.1%,其排放特征及减排潜力备受关注[5-7].其中,道路交通运行强度高、车辆类型多、能耗水平大,成为首要排放源[6].

收稿日期：2025-05-22
基金项目：河南省大气污染成因科技支撑二期项目(2023DF1055);国家重点研发计划(2024YFC3713700);河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2025GGJS002)
* 责任作者，正高级工程师，lindaw2007@163.com; ** 副教授，zhurc@zzu.edu.cn

目前,机动车排放清单构建主要有两类技术方法[8]:一类是“自上而下的燃料消耗法”,适用于宏观尺度排放估算,具有数据获取便捷、适用范围广等优势[9];另一类是“自下而上的活动水平−排放因子法”,更适用于区域尺度和精细化分析,是当前国内外城市及区域研究的主流方法[10-11].近年来,国内机动车碳排放研究主要聚焦于国家层面[12]及京津冀[13]、长三角[14]等经济发达地区,对中部交通枢纽河南省的研究相对薄弱.且在构建机动车排放清单过程中,基础参数的获取与整合面临诸多挑战.例如,机动车保有量分类口径不统一、燃料类型与排放标准信息不完善、行驶里程数据精度不足等问题,均会给排放估算结果带来不确定性.开展排放清单研究,常见的排放模型有 MOVES[16]、COPERT[17]、CMEM 和 MEIC[18]等,其中,COPERT 模型因其结构清晰、参数全面,且与我国机动车排放控制体系基本契合,成为国内研究重要工具[19].该模型对排放因子的输入参数高度敏感,需进行本地化修正,以增强模拟结果的科学性与准确性[20].例如,Lv 等[21]基于 COPERT IV 模型评估了 2003~2015 年云南省机动车排放水平,系统分析了不同车型的排放特征及其相对贡献;Chen 等[22]利用 COPERT 模型构建了江浙沪地区高速公路车辆排放清单,并开展多情景政策模拟,为区域交通减排策略的制定提供参考.另外,在交通领域温室气体排放趋势分析中,机动车保有量预测是关键环节[23-24].目前大多数研究采用传统弹性系数法进行预测,但该方法无法动态反映人口结构和经济发展差异,存在一定的高估风险[25-26].Gompertz 函数能够精准刻画机动车保有量随人均 GDP 增长呈“S”型演进的趋势,在中长期预测中展现出更高的拟合效果与稳定性[27-28].综上,现有研究在区域覆盖范围、数据获取精度以及排放趋势预测方法等方面仍存在不足,尤其缺乏针对河南省的本地化参数研究,尚未形成结合空间分布特征与情景模拟的系统化温室气体排放评估.因此,亟需开展面向中部地区的可量化减排研究,为区域交通碳排放管理与政策优化提供科学依据.

本文以河南省为研究对象,基于 COPERT 模型构建本地化排放因子,结合车队结构和活动水平,评估不同类型机动车温室气体排放水平;进一步利用 ArcGIS 构建 3km×3km 网格排放清单,分析其空间分布特征;随后通过 Gompertz 函数与弹性系数法,研究 2025~2035 年不同情景下的机动车保有量及排放趋势,系统评估不同控制措施对温室气体的减排效果.研究结果可为河南省交通领域碳排放管理及“双碳”目标实现提供科学依据.

1 研究方法

1.1 研究区域概况

河南省是全国重要的综合交通枢纽和物流集散中心,行政区域面积约 $16.7\times10^4 km^2$,道路交通网络密集.截至 2023 年,全省公路总里程达 28.1 万 km,其中高速及一级公路总计 1.4 万 km,占比 4.8%;二级公路 3.2 万 km,占比 11.4%;三级公路 2.3 万 km,占比 8.3%;四级及以下公路 21.1 万 km,占比 75.1%.南阳、信阳与商丘等地市道路总里程居全省前列,但路网以中低等级道路为主;郑州、洛阳等区域性交通枢纽城市中高等级道路占比较大.

1.2 清单构建方法

1.2.1 机动车不同排放阶段存活量计算 排放阶段为 r 的机动车在目标年份 T 时的保有量计算,如公式(1)所示:

$$S_{r,T}=\sum_{y=t_0}^{t_1}N_{r,y}-\sum_{y=t_0}^{T}(\theta_{r,y}\times D_y^{\text{real}}) \tag{1}$$

$$\theta_{r,y}=\frac{D_{r,y}^{\text{theory}}}{\sum_r D_{r,y}^{\text{theory}}} \tag{2}$$

式中: $S_{r,T}$ 为排放阶段为 r 的机动车在目标年份 T 的保有量(万辆);$N_{r,y}$ 为第 y 年注册的排放阶段为 r 的保有量(万辆); $D_{r,y}^{\text{real}}$ 为第 y 年实际淘汰车辆总量(万辆);$\theta_{r,y}$ 为排放阶段 r 在第 y 年理论淘汰量占比; $D_{r,y}^{\text{theory}}$ 为第 y 年理论上淘汰的排放阶段 r 车辆数量(万辆).

1.2.2 机动车保有量预测 为兼顾不同车型的增长特征与数据适配性,本研究分别采用 Gompertz 函数和传统弹性系数方法计算对机动车保有量进行预测.Gompertz 函数形式如下:

$$V_{\text{p}}=V_{\text{s}}\times a^{b^g}\times P \tag{3}$$

式中:V_{S} 为机动车保有率饱和值(辆/千人);V_{p} 为机动车保有量(辆);g 为人均 GDP(万元/人);P 为人口数量(千人);a 为模型回归参数,$0<a<1$;b 为模型回归参数,$0<b<1$.

传统弹性系数方法预测机动车保有量计算方

法如下所示:

$$\mathrm{VP}_{i,j}=\mathrm{VP}_{2020,i}\times\left(1+\alpha_{i,j}\right)^{j-2020} \tag{4}$$

$$\alpha_{i,j}=\varepsilon_j\times\beta_{i,j} \tag{5}$$

$$\varepsilon_j=\frac{1}{10}\sum\nolimits_{i=2010}^{2020}\frac{\alpha_{i,j}}{\beta_{i,j}} \tag{6}$$

$$G=G_0\left(1+\beta\right)^{t-t_0} \tag{7}$$

式中:$\mathrm{VP}_{i,j}$ 是按类型划分的机动车保有量(辆);i 是年份;j 是车辆类型;$\alpha_{i,j}$ 是第 i 年 j 型机动车保有量增长率(%);$\beta_{i,j}$ 是第 i 年人均收入年增长率(GDP 年增长率%);ε_j 是第 j 型机动车保有量弹性系数;G_0 为基准年的国内生产总值(亿元);G 为目标年或参照年的 GDP 值(亿元);β 为 GDP 的年增长速率(%);t 为预测目标年或参照年;t_0 为预测基准年.

1.2.3　温室气体排放因子确立　基于 COPERT 模型,综合考虑以下参数构建适用于河南省本地化的温室气体排放因子库:①车型结构:依据河南省分车型机动车保有量统计,明确排放因子适用类别;②燃料类型:区分汽油、柴油、天然气及新能源等能源构成;③排放标准:结合国Ⅰ至国Ⅵ标准实施时间,推算在用车辆比例;④运行参数:采用不同车型年均行驶里程、平均运行速度进行校正;⑤气象因素:纳入河南省典型气温、湿度条件对排放的影响.通过与国内相关研究及指南推荐值对比,确保构建的排放因子处于合理区间,并通过地方数据修正与适应性调整提升测算精度[20].

为克服 COPERT 模型与我国机动车分类体系存在的差异,本研究结合中国现行机动车分类标准,并参考相关文献与行业资料,对 COPERT 模型中的车型进行合理映射.表 1 车型映射表,直观展示我国车辆分类与 COPERT 内置分类在车型、燃料类型和尺寸参数等方面的对应关系.

表 1　中国车型与 COPERT 模型车型映射

Table 1　Mapping table of Chinese vehicle categories to COPERT model categories

中国车型	COPERT 模型对应车型		
	车辆类型	尺寸参数	燃料类型
微型客车	乘用车	中型	汽油
		小型	柴油
			LPG 双燃料
小型客车		大型/SUV	汽油
			柴油
			LPG 双燃料
中型客车	城市客车	⩽15t 中型城市客车	柴油
重型客车		15~18t 中大型城市客车	
		⩾18t 大型城市客车	
微型货车	轻型商用车	N1-III 类	
轻型货车		⩽7,5t 小型货车	
中型货车	重型货车	12~14t 中大型货车	
		⩽7,5t 小型货车	汽油
		7,5~12t 中型货车	柴油
重型货车		40~50t 铰接式重型货车	
摩托车	L 类机动车	2 冲程>50cm³	
		4 冲程<250cm³	汽油
		4 冲程 250~750cm³	

1.2.4　排放清单的建立　根据车辆类型、燃料种类及排放标准,结合保有量与排放因子,测算机动车温室气体排放总量,并按各温室气体 GWP 值换算为 CO_2 当量进行统一表征:

$$E=\sum\nolimits_i P_i\times\mathrm{EF}_i\times\mathrm{VKT}_i\times10^{-6} \tag{8}$$

式中:E 为机动车年尾气排放量排放量(t);EF_i 为 i 类型机动车行驶单位距离尾气所污染物排放量(g/km);P_i 为所在地区 i 类型机动车的保有量(辆);VKT_i 为 i 类型机动车年均行驶里程,(km/辆);i 涵盖营运与非营运车辆,包含微型客车、小型客车、中型客车、大型客车、微型货车、轻型货车、中型货车、重型货车、普通及轻便摩托车.

1.2.5　空间分布特征分析　本研究采用“标准道路长度法”进行排放空间化[29],以道路长度作为空间分配因子,结合不同地区道路类型与机动车活动水平,分配排放总量,基于 ArcGIS 平台构建 3km×3km 高分辨率的路网排放清单.

1.3　数据来源

本研究数据主要来源于官方统计资料与技术文件,以确保数据的时效性与准确性.其中,机动车保有量、人口规模、人均 GDP 及道路类型长度等数据来自《河南省统计年鉴》[30];表 2 是河南省机动车年均行驶里程,主要参考《道路机动车排放清单编制技术指南》及《机动车强制报废标准规定》的推荐值[31],并结合河南省在用车辆运行状况进行区域化调整;新能源汽车及纯电动车的保有量数据,来源于中国汽车工业协会年度统计报告[32],并通过《中国移动源环境管理年报》补充完善[33].本研究假设自新标准实施当年起,新注册车辆均全面执行最新排放标准,以此推算各年份河南省各类型车辆的排放标准构成;老旧车辆数量采用机动车存活曲线模型进行拟合与推导[34].

表 2 机动车年均行驶里程(km)

Table 2 Annual average mileage of vehicles (km)

车型	载客汽车				载货汽车				摩托车
	微型	小型	中型	重型	微型	轻型	中型	重型	
营运	75000	75000	50000	58000	41700	40000	40000	75000	/
非营运	18000	18000	25000	30000	30000	30000	35000	46700	9200

2 结果与讨论

2.1 机动车保有量变化情况

图 1 展示了 2019~2023 年河南省机动车保有量的变化趋势.该时期内保有量持续上升,从 1728 万辆增至 2214 万辆,年均增速约为 6.4%.其中,小型客车占据主导地位,2023 年保有量达 1857 万辆,占总量的 83.9%,凸显居民出行刚性需求的持续增加;受城乡配送、电商物流等高频运输需求推动,轻型货车增幅显著,较 2019 年增长 19.1%;重型货车保有量略有下降,中型与微型货车保有量较小,总体稳定;普通摩托车保有量持续下降,从 182 万辆降至 142 万辆,与出行结构变化及电动车替代有关.

从地市分布来看,2023 年省会郑州机动车保有量 496 万辆,占全省总量的 23.8%,位居第一;洛阳、南阳和商丘等保有量超过 140 万辆,位列全省前列;鹤壁、济源等保有量相对较低,在 40 万辆以下.从使用性质看,非营运车辆是增长主力,其中非营运小型客车 5 年净增超过 450 万辆,反映私人出行市场持续扩张;营运小型客车数量呈波动下滑趋势,从 16.1 万辆降至 10.7 万辆,年均降幅超过 8%;此外,轻型货车呈增长趋势,2023 年达到 103 万辆,表明“短途化、小批量、高频率”的现代物流需求正重塑运输结构.

总体而言,河南省机动车保有量增长呈现出“轻型化”与“私用化”并存的特征,反映了交通出行和货运结构的深层次转型.这一趋势将对能源消费模式、道路承载压力及碳排放结构产生影响.

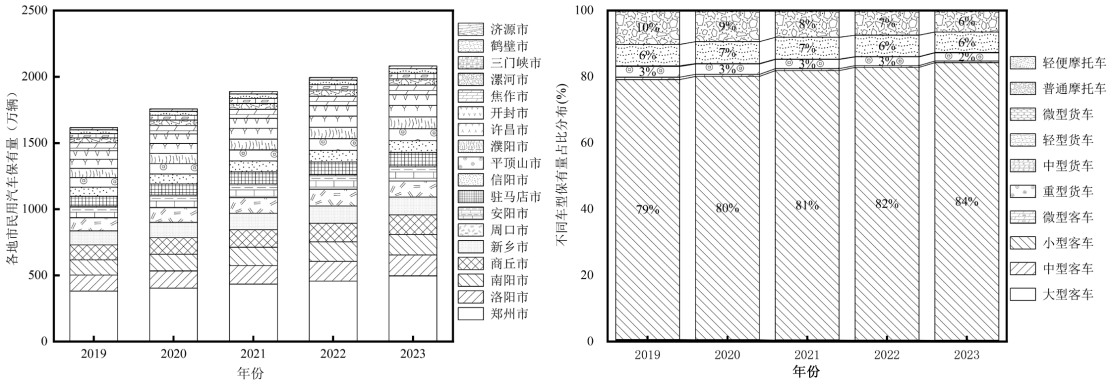


图 1 2019~2023 年河南省机动车保有量变化情况

Fig.1 Changes in motor vehicles ownership in Henan Province, 2019~2023

2.2 机动车温室气体排放的时间演变特征

表 3 数据显示,2019~2023 年河南省机动车温室气体排放总量持续增长,从 1.4 亿 t 增至 1.6 亿 t,年均增长 2.9%.CO_2 一直为主要成分,占比超过 98%,是驱

动温室气体排放增长的核心因子.CH_4 排放略有下降,从 1.0 万 t 降至 0.9 万 t,或归因于天然气车辆占比下降及发动机燃烧控制技术进步[35].N_2O 排放量显著增加,从 0.6 万 t 增至 0.8 万 t,增幅达 36%,这可能与国 V 及以上标准重型柴油车广泛应用 SCR 系统有关[36],因为特定工况下 SCR 装置存在 N_2O 副产排放增加风险[37].

表 3　2019~2023 年河南省机动车温室气体排放量(万 t)

Table 3　Greenhouse gas emissions from motor vehicles in Henan Province, 2019~2023 ($\times10^4$ tonnes)

年份	CO_2	CH_4	N_2O	GHG
2019	13789.57	0.98	0.23	13881.33
2020	14534.51	0.95	0.27	14638.94
2021	14821.66	0.90	0.30	14934.12
2022	15251.84	0.90	0.31	15366.75
2023	15511.91	0.89	0.31	15625.53

注:GHG(Greenhouse Gas)为总排放量,指将各单项温室气体(CO_2、CH_4、N_2O)排放量,依据其全球变暖潜能值(GWP)换算为二氧化碳当量后的累计值.

图 2 展示了 2023 年河南省不同排放标准、车型及燃料类型的温室气体排放贡献率.从排放标准看,2023 年温室气体排放主要集中于国Ⅳ至国Ⅵ阶段,其中国Ⅴ车辆贡献最为突出,分别占 CO_2 和 N_2O 总排放的 35.6%与 54.4%;国Ⅵ车辆的 CO_2 贡献率达 28.2%,反映出新排放标准车辆数量快速增长,其规模效应逐步显现.国Ⅲ及以下车辆排放占比持续下降,体现出政策性淘汰的显著成效.按车辆类型划分,小型客车为 CO_2 与 CH_4 的主要来源,分别贡献 60.9% 和 70.7%;重型货车则主导 N_2O 排放,占比达 70.8%.从用途来看,载客车辆主导 CO_2 与 CH_4 排放,而 N_2O 排放则高度集中于载货车辆.按燃料类型划分,汽油车贡献 63.3%的 CO_2 与 87.9%的 CH_4 排放,柴油车贡献 71.8%的 N_2O 排放,凸显柴油车在温室气体结构中的重要地位.

总体而言,河南省机动车温室气体排放呈现“总量增长、CO_2 主导、结构趋重”的特征,高排放标准车辆和高强度运行车辆成为主要排放源.未来需重点关注柴油重型货车和国Ⅴ及以上标准车辆的碳排放,强化其运行工况与后处理系统的排放监控和控制.

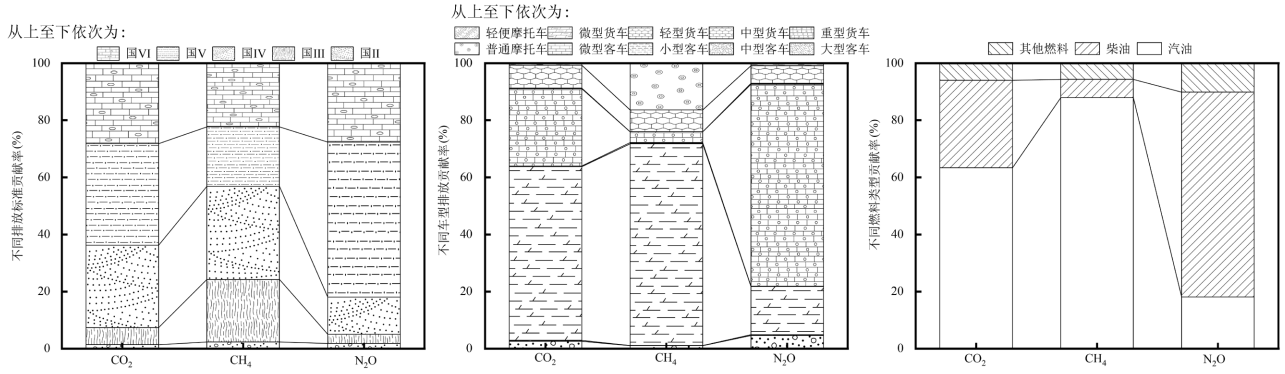


图 2　2023 年河南省不同排放标准、车型及燃料类型温室气体排放贡献率

Fig.2　Contribution of different emission standards, vehicle types, and fuel types to GHG emissions in Henan Province, 2023

2.3　机动车温室气体排放的空间分布特征

2023 年河南省机动车温室气体当量达 1.56 亿 t,其中城市道路系统排放量占比 78.8%,已成为区域交通碳排放的主导来源.按公路等级划分,城市二级、三级和四级公路分别排放 4964.4, 2579.1 和 4060.8 万 t,合计占比 74.8%;相比之下,高速公路、国道、省道等干线道路的排放量相对较低,如高速公路为 683.6 万 t(4.4%)、省道为 1020.9 万 t(6.6%),反映出城市道路车辆密度与交通活动强度更高.从气体组成看,以 CO_2 排放为主导,其排放特征随交通流量与道路类型变化而变化;CH_4 与 N_2O 总量较小,但因其较高的 GWP 值,在车辆高强度行驶区域仍需重点关注.空间分布上,排放格局主要受人口密度、机动车保有量和道路运行强度影响[38].如图 3 所示,高排放区域集中于以郑州、洛阳为核心的城市群;连霍、京港澳等高速也呈现排放集中现象,体现交通干线的空间扩散效应.值得注意的是,三级和四级城市道路排放量超过干线道路总和.这类道路承担大量短途出行、通勤与城市配送任务,常存在低速、拥堵等运行工况,是“高密度—高排放”区域的重要组成部分.

总体来看,河南省机动车温室气体排放空间格局呈现“中心集聚、外围扩散”的结构特征.城市道路网密集、交通活动频繁,既是排放总量的高值区,也是单位排放强度显著较高的重点区域.针对当前城市道路高密度交通带来的排放强度问题,未来应重点推进道路系统结构优化与排放热点区域治理,从源头减少短途高频次出行对交通碳排放的拉动效应.

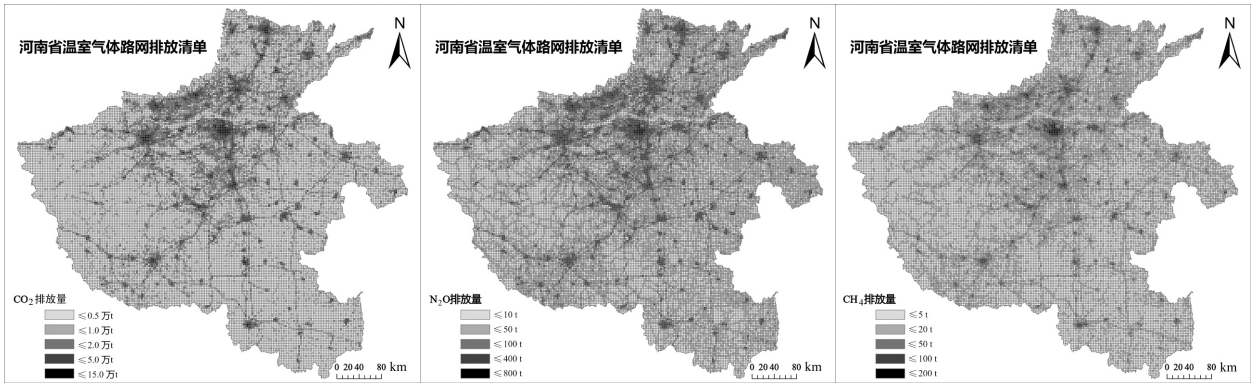


图 3 2023 年河南省机动车温室气体当量排放量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of GHG equivalent emissions from motor vehicles in Henan Province, 2023

2.4 未来情景预测

图 4(a)为本研究构建的机动车保有量预测模型与 2019~2023 年《河南省统计年鉴》公布数据的对比结果.从图中可以看出,模型回归精度较高,拟合效果良好,能够有效反映近年实际保有量的变化趋势,为后续的中长期预测提供了可靠支撑.图 4(b)展示了 2025~2035 年河南省机动车保有量的预测变化趋势,预测结果显示未来十年机动车总量将持续增长,其中轻型客车与轻型货车增长尤为显著,增速将逐步趋稳,为后续排放趋势模拟提供了可靠数据基础.

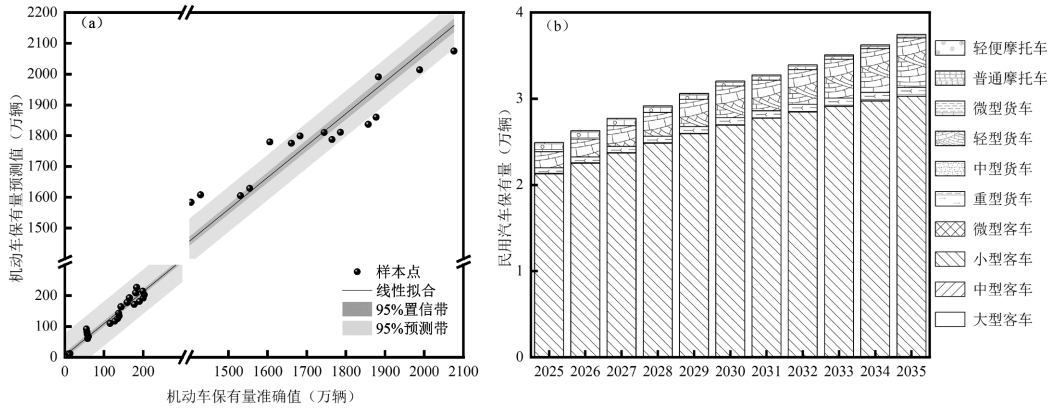


图 4 河南省机动车保有量实际值与预测结果对比及未来变化趋势

Fig.4 Comparison between Actual and Predicted Values of Motor Vehicle Ownership and Its Future Change Trend in Henan Province

(a)机动车实际保有量与预测结果对比(2019~2023 年);(b)机动车保有量未来变化趋势(2025~2035 年)

基于河南省当前政策实践与产业发展方向[39],本研究构建了八种排放控制情景,包括 1 种基准情景、3 种单一减排措施情景(推广新能源汽车、增加绿色通勤、淘汰老旧车辆)及 4 种组合措施情景(涵盖任意两两组合与三者联动的综合情景).图 5 为不同控制情景下 2025~2035 年河南省机动车温室气体排放模拟结果:在不采取额外干预政策的基准情景下,全省机动车温室气体排放量将从 2025 年的 1.6 亿 t 缓慢增至 2035 年的 1.7 亿 t,反映出交通排放受结构性刚性约束,减排难度较大.单一减排措施中,新能源汽车推广成效最为显著,至 2035 年可将排放降至 1.3 亿 t,较基准情景减少 23.9%;增加绿色通勤(14.5%)和淘汰老旧车辆(11.3%)的减排潜力相对有限.三种策略均呈现减排效应逐年积累的特征.在组合情景下,减排效果显著提升,措施间协同作用突出:例如,新能源汽车推广与老旧车辆淘汰联动实施可

将 2035 年排放量降至 0.9 亿 t,减排幅度达 45.7%;若三项措施协同实施,排放量仅为 0.7 亿 t,较基准情景下降 58.1%,展现出显著的减排潜力.

新能源汽车推广可从能源端降低单位排放强度,绿色通勤与公共交通发展可有效抑制交通总量增长,老旧车辆淘汰则是中短期内降碳的关键举措.为实现长期减排目标,建议河南省重点推动新能源汽车推广、绿色通勤方式转变及老旧车辆淘汰等措施协同实施,并构建以车辆替代、出行优化与结构调整为核心的综合交通减排政策体系,逐步实现全省交通领域碳排放水平的稳步下降与结构性优化.

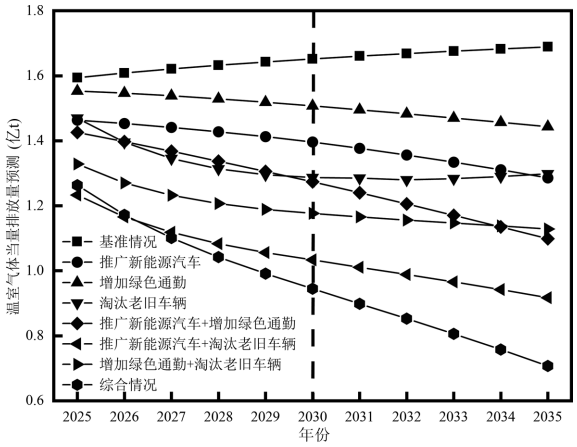


图 5　不同情景下机动车温室气体排放量

Fig.5　GHG emissions from motor vehicles under different scenarios

2.5　不确定分析

本文采用蒙特卡罗方法,借助 Oracle Crystal Ball 软件对关键参数的不确定性进行定量分析[40].研究聚焦于排放估算中三类核心变量:机动车保有量、年均行驶里程及排放因子.鉴于《河南省统计年鉴》中机动车保有量数据存在统计误差及更新滞后问题,设定其变异系数(CV)为 5%;考虑到年均行驶里程受区域经济发展、交通结构调整等因素影响显著,设定其 CV 为 15%,并假定其服从正态分布.排放因子经本地化 COPERT 模型进行校正,相对稳定.为提升模拟精度,研究设置 10000 次模拟迭代,置信水平为 95%,得出 2023 年河南省机动车温室气体排放总量的不确定性区间为[−34.68%,46.46%].结果表明,机动车保有量与行驶里程是影响排放清单不确定性的主要因素,这表明实际运行数据的获取与精度对清单可信度至关重要.未来情景模拟中,政策执行力度、经济发展速率及交通出行结构演变等动态因素,将进一步加剧排放估算的不确定性与复杂性.此外,现行排放清单尚未涵盖外地车辆本地通行、过境运输等使用场景,仍存在一定测算盲区.建议后续研究强化机动车运行活动数据的采集与校验,构建更具代表性的行驶工况数据库,以提高清单精度与政策适配性.

3　结论

3.1　2019~2023 年河南省机动车保有量呈快速增长态势,其中非营运小型客车占比最高,郑州市保有量位居全省首位.同期,机动车温室气体排放当量由 1.4 亿 t 增至 1.6 亿 t,CO_2 为主导成分;CH_4 与 N_2O 虽排放量相对较小,但因其温室效应强,仍需重点关注.

3.2　排放结构方面,国Ⅴ及以上排放标准车辆是主要排放源,小型客车和重型货车贡献突出.汽油车为 CO_2 与 CH_4 的主要排放来源,柴油车主导 N_2O 排放.空间分布上,近八成排放集中于城市道路系统,郑州等城市成为主要排放热点区域.

3.3　预测显示,2035 年河南省机动车保有量将达 3548 万辆,较 2023 年增长 65.5%;若缺乏政策干预,温室气体排放量将攀升至 1.7 亿 t,较 2023 年增加 8.3%,交通领域碳排放压力持续加剧.

3.4　协同推进新能源汽车推广、绿色通勤与老旧车辆淘汰措施,可将 2035 年排放量降至 0.7 亿 t,较基准情景减排 58.1%,累计减排量达 7.6 亿 t,减排潜力显著.

参考文献:

[1] Xu Y, Liu Z, Xue W, et al. Identification of on-road vehicle CO_2 emission pattern in China: A study based on a high-resolution emission inventory [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 175:105891.

[2] Shi X, Huang Z, Dai Y, et al. Evaluating emission reduction potential and co-benefits of CO_2 and air pollutants from mobile sources: A case study in Shanghai, China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024,202:107347.

[3] Guo X, Zhang X, Dong J, et al. Optimal allocation of urban new energy vehicles and traditional energy vehicles considering pollution and cost [J]. Environment, Development and Sustainability, 2023,26 (3):6007-6026.

[4] World Meteorological Organization (WMO). State of the Global Climate 2023 [R]. Geneva: WMO, 2024. (WMO-No. 1347, ISBN: 978-92-63-11347-4).

[5] 卞元东,顾　晨,杨金亚,等.长三角近实时机动车大气污染物排放清单建立研究 [J]. 环境科学学报, 2025,45(2):418-429.
Bian Y D, Gu C, Yang J Y, et al.Study on the near real-time vehicle emission inventory of air pollutants in Yangtze River Delta [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2025,45(2):418-429.

[6] Li Y, Lv C, Yang N, et al. A study of high temporal-spatial resolution greenhouse gas emissions inventory for on-road vehicles based on

traffic speed-flow model: A case of Beijing [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,277:122419.
[7] International Energy Agency (IEA). World Energy Statistics and Balances [DB/OL]. Paris: IEA, 2025 (Updated July 2025). Licence: Terms of Use for Non-CC Material. Available from: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances.
[8] Cifuentes F, González C M, Trejos E M, et al. Comparison of top-down and bottom-up road transport emissions through high-resolution air quality modeling in a city of complex orography [J]. Atmosphere, 2021,12(11):1372.
[9] Sun S, Sun L, Liu G, et al. Developing a vehicle emission inventory with high temporal-spatial resolution in Tianjin, China [J]. Science of the Total Environment, 2021,776:145873.
[10] Ibarra-Espinosa S, Zhang X, Xiu A, et al. A comprehensive spatial and temporal vehicular emissions for northeast China [J]. Atmospheric Environment, 2021,244:117952.
[11] Gu X, Yin S, Lu X, et al. Recent development of a refined multiple air pollutant emission inventory of vehicles in the Central Plains of China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2019,84:80-96.
[12] 周嘉仪,李 楠,冯伟航,等.我国道路源二氧化碳排放估算及未来情景预测 [J]. 环境科学学报, 2023,43(10):267-278.
Zhou J Y, Li N, Fen W H, et al. Estimation of road source carbon dioxide emissions in China and future scenario predictions [J]. Journal of Environmental Science, 2023,43(10):267-278.
[13] Yang W, Yu C, Yuan W, et al. High-resolution vehicle emission inventory and emission control policy scenario analysis, a case in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2018,203:530-539.
[14] Zhang S, Wu Y, Zhao B, et al. City-specific vehicle emission control strategies to achieve stringent emission reduction targets in China's Yangtze River Delta region [J]. Journal of Environmental Sciences, 2017,51:75-87.
[15] 孙世达,金嘉欣,吕建华,等.基于精细化年均行驶里程建立机动车排放清单 [J]. 中国环境科学, 2020,40(5):2018-2029.
Sun S D, Jin J X, Lv J H, et al.Developing vehicle emission inventory based on refined annual average vehicle kilometers travelled [J]. China Environmental Science, 2020,40(5):2018-2029.
[16] Shan X, Chen X, Jia W, et al. Evaluating urban bus emission characteristics based on localized MOVES using sparse GPS Data in Shanghai, China [J]. Sustainability, 2019,11(10):2936.
[17] Jiang P, Zhong X, Li L. On-road vehicle emission inventory and its spatio-temporal variations in North China Plain [J]. Environmental Pollution, 2020,267:115639.
[18] Turkensteen M. The accuracy of carbon emission and fuel consumption computations in green vehicle routing [J]. European Journal of Operational Research, 2017,262(2):647-659.
[19] Ren W, Xue B, Geng Y, et al. Inter-city passenger transport in larger urban agglomeration area: emissions and health impacts [J]. Journal of Cleaner Production, 2016,114:412-419.
[20] 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.
Lv C, Zhang Z, Chen X M, et al. Study on CO_2 emission factors of road transport in Chinese provinces [J]. China Environmental Scienc, 2021,41(7):3122-3130.
[21] Lv W, Hu Y, Li E, et al. Evaluation of vehicle emission in Yunnan province from 2003 to 2015 [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,207:814-825.
[22] Chen J, Chen J, Chen D, et al. Emission control in expressway systems: Vehicle emission inventory and policy scenario analysis [J]. Systems, 2024,12(8):273.
[23] Sun S, Zhao G, Wang T, et al. Past and future trends of vehicle emissions in Tianjin, China, from 2000 to 2030 [J]. Atmospheric Environment, 2019,209:182-191.
[24] Wu T, Cui Y, Lian A, et al. Vehicle emissions of primary air pollutants from 2009 to 2019 and projection for the 14th Five-Year Plan period in Beijing, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2023,124:513-521.
[25] Liu Y H, Liao W Y, Lin X F, et al. Assessment of Co-benefits of vehicle emission reduction measures for 2015~2020 in the Pearl River Delta region, China [J]. Environmental Pollution, 2017,223:62-72.
[26] Duan S, Qiu Z, Liu Z, et al. Impact assessment of vehicle electrification pathways on emissions of CO_2 and air pollution in Xi'an, China [J]. Science of the Total Environment, 2023,893:164856.
[27] Liang X, Zhang S, Wu Y, et al. Air quality and health benefits from fleet electrification in China [J]. Nature Sustainability, 2019,2(10):962-971.
[28] Wu T, Zhang M, Ou X. Analysis of future vehicle energy demand in China based on a Gompertz function method and computable general equilibrium model [J]. Energies, 2014,7(11):7454-7482.
[29] 王计广,桂华侨,陈金潮,等.唐山市机动车排放清单与减排经济效益研究 [J]. 中国环境科学, 2021,41(11):5114-5124.
Wang J G, Gui H Q, Chen J C, et al. Vehicle emission inventory and economic benefits of emission reduction in Tangshan [J]. China Environmental Science, 2021,41(11):5114-5124.
[30] 河南省统计局.河南省统计年鉴 [M]. 中国统计出版社, 2012-2023.
Henan Provincial Bureau of Statistics. Henan Statistical Yearbook [M]. China Statistics Press, 2012-2023.
[31] 中国环境保护部 2018.道路机动车排放清单编制技术指南 [M]. 北京:中国环境科学出版社.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2018. Technical guidelines for compiling emission inventories of road motor vehicles [M]. Beijing: China Environmental Science Press.
[32] 中国汽车技术研究中心 2023.中国新能源汽车产业发展报告 [M]. 北京:社会科学文献出版社.
China Automotive Technology and Research Center. 2023. Report on the development of china's new energy vehicle industry [M]. Beijing: Social Sciences Academic Press.
[33] 中国环境保护部2023.中国移动源环境管理年报 [M]. 北京:中国环境科学出版社.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. 2023. Annual report on environmental management of mobile sources in China [M]. Beijing: China Environmental Science Press.
[34] 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.
Huan Z H, Ji L,Yin J,et al.Peak pathway of China's road traffic carbon emissions [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(2):385-393.
[35] Pan D, Tao L, Sun K, et al. Methane emissions from natural gas vehicles in China [J]. Nature communications, 2020,11(1):4588.
[36] 王雯楠,刘格格,魏红格,等.基于高分辨率动态排放清单的郑州市机动车排放特征研究 [J]. 环境工程, 2024,42(10):92-101.
Wang W N, Liu G G, Wei H G, et al. Research of vehicle eminssion characterisitics in Zhengzhou based on high-resolution dynamic emission inventory [J]. Environmental Engineering, 2024,42(10):92-101.
[37] Chen H, He L, Ji L, et al. The next challenge in emissions control for heavy-duty diesel vehicles: From NO_x to N_2O [J]. Environmental Pollution, 2024,363:125269.
[38] 李永锋,马 杰,王胜蓝,等.重庆市典型道路机动车排放 NO_2 污染特征 [J]. 环境工程技术学报, 2022,12(5):1601-1608.
Li Y F, Ma J, Wang S L, et al. Research on the pollution characteristics of NO_2 emitted by motor vehicles on typical roads in Chongqing [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022,12(5):1601-1608.
[39] 唐湘博,曹利珍,马志文,等.不同排放控制策略的城市减污降碳协同效应及空气质量改善研究 [J]. 环境科学研究, 2024,37(11):2423-2433.
Tang X B, Cao L Z, Ma Z W, et al. Research on synergistic effect of pollution and carbon emission reduction on air quality improvement under different emission control strategies in urban areas [J]. Research of Environmental Sciences, 2024,37(11):2423-2433.
[40] 李光华,高 健,邓顺熙,等.渭南市道路移动源高分辨温室气体排放清单及特征研究 [J]. 环境科学学报, 2022,42(12):332-340.
Li G H, Gao J, Deng S X, et al. A study on high temporal-spatial resolution emission inventory and its characteristics of greenhouse gas for on-road mobile source in Weinan, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022,42(12):332-340.

作者简介：韩全康(2000-),男,安徽亳州人,郑州大学在读硕士研究生,研究方向为大气环境污染与控制研究.hanqk@gs.zzu.edu.cn.