杨文卓,王 远,陈晗璐,等.中国道路交通碳排放时空特征及影响因素 [J]. 中国环境科学, 2026,46(3):1710-1724.
Yang W Z, Wang Y, Chen H L, et al. Analysis of spatial and temporal characteristics and influencing factors of carbon emissions from road transportation in China [J]. China Environmental Science, 2026,46(3):1710-1724.

中国道路交通碳排放时空特征及影响因素

杨文卓[1,2,3],王 远[1,2,3*],陈晗璐[1,2,3],董战峰[4] (1.福建师范大学,湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室,福建 福州 350117；2.福建师范大学地理科学学院,碳中和未来技术学院,福建 福州 350117；3.福建师范大学地理研究所,福建 福州 350117；4.生态环境部环境规划院,北京 100044)

摘要：本文在核算中国 31 省份 2003~2022 年道路交通碳排放量基础上,运用 slope 值、泰尔指数并融合 XGBoost-SHAP 构建可解释的机器学习模型分析中国及东、中、西部道路交通碳排放的时间特征、空间差异及影响因素.结果表明:小微型客车与重型货车碳排放合计占比超 80%,轻微型货车占比先升后稳,中型货车占比持续下降.中大型客车、公交车及出租车排放占比较低且呈下降态势.中国道路交通碳排放量呈现“快速增长—增速放缓”的阶段性特征.东部地区前期增速较快,但后期增速持续放缓;中部地区后期增速反超东部;西部地区基数低但增速最快.中国道路交通碳排放总体呈现“东扩-中升-西稳”的空间格局,东部沿海及中部腹地依次形成高排放连绵带.区域间道路交通碳排放差异逐渐降低,区域内差异显著上升.东、西部内部各省份差异显著,中部差异最小且保持稳定.全国层面,公路货运周转量为首要因素且对道路交通碳排放具有显著的推动作用,其次为人口总量与每万人机动车保有量,且各显著因素呈现协同增排效应.区域层面,东、西部地区公路货运周转量仍最为显著,但在中部地区不显著.每万人机动车拥有量与人均 GDP 贡献率中部较东、西部显著提升.

关键词：道路交通；碳排放；时空特征；XGBoost-SHAP；影响因素
中图分类号：X511 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2026)03-1710-15

Analysis of spatial and temporal characteristics and influencing factors of carbon emissions from road transportation in China. YANG Wen-zhuo[1,2,3], WANG Yuan[1,2,3*], CHEN Han-lu[1,2,3], DONG Zhan-feng[4] (1.Key Laboratory for Humid Subtropical Eco-gergraphical Processes of the Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China；2.Carbon Neutral and Future Technology Institute, School of Geographic Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China；3.Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China；4.Chinese Academy for Environmental Planning, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 100044, China). *China Environmental Science*, 2026,46(3)：1710~1724

Abstract：With the continuous increase in carbon emissions from road transportation and significant regional differences, understanding the spatio-temporal evolution patterns and influencing factors of carbon emissions from road transportation in China is crucial for energy conservation and carbon reduction in this sector. Based on the calculation of carbon emissions from road transportation in 31 provinces of China from 2003 to 2022, this study uses slope values, Theil index, and integrates XGBoost-SHAP to construct an interpretable machine learning model to analyze the temporal characteristics, spatial differences, and influencing factors of carbon emissions from road transportation in China and its eastern, central, and western regions. The results show that: The combined carbon emissions from small and medium-sized passenger cars and heavy-duty trucks account for over 80%, while the proportion of light-duty trucks first increases and then stabilizes, and that of medium-duty trucks continuously decreases. The proportions of medium and large-sized passenger cars, buses, and taxis are relatively low and show a downward trend. The carbon emissions from road transportation in China exhibit a phased characteristic of "rapid growth-decelerating growth". The eastern region had a relatively fast growth rate in the early stage, but it has been continuously decelerating in the later stage; the central region's growth rate surpassed that of the eastern region in the later stage; the western region has a low base but the fastest growth rate. The overall spatial pattern of carbon emissions from road transportation in China is "expansion in the east-increase in the central-stability in the west", with high-emission continuous belts formed successively in the eastern coastal areas and the central hinterland. The differences in carbon emissions from road transportation between regions are gradually decreasing, while the differences within regions are significantly increasing. The differences among provinces within the eastern and western regions are significant, while those in the central region are the smallest and remain stable. (4) At the national level, the turnover volume of road freight is the

收稿日期：2025-07-25
基金项目：福建省自然科学基金资助重点项目(2021J02030);福建省社科基金资助项目(FJ2021B042)
* 责任作者，教授, y.wang@fjnu.edu.cn

primary factor and has a significant driving effect on carbon emissions from road traffic, followed by the total population and the number of motor vehicles per 10,000people, moreover, each significant factor shows a synergistic effect of increasing emissions. At the regional level, the turnover volume of road freight remains the most significant factor in the eastern and western regions, but it is not significant in the central region. The contribution rate of motor vehicles per 10,000people and per capita GDP in the central region has significantly increased compared to the eastern and western regions.

Key words：road traffic；carbon emissions；spatio-temporal characteristics；XGBoost-SHAP；influencing factors

国际能源署指出,交通运输是全球排放温室气体的重要来源之一,道路交通碳排放量占比不断增加[1].我国道路交通碳排放量约占交通运输领域碳排放总量的 86%,道路交通排放的空气污染物也已经成为城市大气污染的主要人为来源[2].国内外学者针对交通碳排放领域已开展了大量研究.从研究对象看,当前研究主要集中于交通部门,研究主要聚焦于国家[3-4]、区域[5-6]、省市[7-8]交通部门的碳排放核算、趋势预测[9]及驱动因素分析[10-11].从时空变化看,既有研究主要涉及区域、省市等尺度,主要应用核密度估计[12]、标准差椭圆[13]、地理加权回归[14]等方法分析探讨了道路交通碳排放的时间变化与空间差异.结果表明,不论区域还是省市尺度,道路交通碳排放均表现出随时间变化逐渐攀升,并呈现明显的空间集聚特征.相关研究发现福建省城市群道路交通碳排放呈现出明显的“东北−西南”走向,碳排放重心集中[13].深圳市道路交通碳排放空间集聚显著,中心干道显著高于外围路段[15].从影响因素看,相关文献指出 GDP、交通能源强度、城市化率、人口总量、车型构成、道路交通运行状况是道路交通碳排放主要影响因素[13,16-17].研究方法上,主要运用对数平均迪式指数法(LMDI)[18-20]、可拓展的随机性环境影响评估模型(STIRPAT)[21-23]等方法,筛选相关变量对道路交通碳排放进行解释.

已有研究对我国道路交通碳排放的时空特征及其影响因素已进行了广泛探索,形成了较为系统的理论和实证分析基础,但整体上仍存在进一步完善的空间.首先,当前研究多聚焦于宏观交通系统,较少关注交通内部结构的分异性,使得道路交通这一高排放子领域的重要性在整体分析中易被弱化,难以揭示其特有的排放特征.其次,现有关于道路交通碳排放时空差异的分析多集中在单一区域或省市尺度,缺乏对中国不同省份间区域变化的系统比较,尚未深入细化各省道路交通碳排放的增长趋势类型,导致区域间、区域内部的差异格局及对全国排放增量的具体贡献仍不明晰.在影响因素分析上,尽管基于 LMDI、STIRPAT 等理论框架的相关研究较为丰富,但对于变量间非线性关系和交互影响的识别能力仍有限,难以准确呈现关键驱动因子的区域分异特征.尤其是在东中西部道路交通碳排放、经济水平和资源禀赋显著不同的背景下,区域异质性问题进一步凸显.当前对道路交通碳排放系统影响机制尚缺乏清晰的识别与解释,关于不同区域影响因素的异质性分析则更少,这在一定程度上制约了分区域精准施策与减排政策效果提升.

针对上述不足,本研究以 2003~2022 年中国 31 个省份为研究对象,核算了各省道路交通碳排放量,并对不同车辆类型的排放占比进行了全面分析;结合 slope 值与泰尔指数等定量分析工具,判别不同省份道路交通碳排放的变化趋势类型,评估区域内外差异及各区域对全国碳排放增长的贡献.进一步地,研究采用 XGBoost−SHAP 机器学习算法,识别并解析全国及东、中、西部区域道路交通碳排放的主要影响因素,揭示影响机制的区域异质性,旨在为深化道路交通行业绿色低碳转型、科学制定差异化管理对策及推动交通领域“双碳”目标实现,提供决策参考.

1　理论基础及研究方法

1.1　研究方法

1.1.1　道路交通碳排放核算方法　分车辆及燃料类型,将各类道路交通机动车所产生的碳排放进行加总得到研究区域道路交通总碳排放量,核算公式如下:

$$C=\sum_{i,j}P_{i,j}\cdot \mathrm{VKT}_i\cdot \mathrm{FC}_{i,j}\cdot \mathrm{EF}_j \tag{1}$$

式中:C 为道路交通碳排放量;$P_{i,j}$ 为第 i 类机动车第 j 类燃料类型保有量;VKT_i 为第 i 类车型的年均行驶里程;$\mathrm{FC}_{i,j}$ 为第 i 类机动车第 j 类燃料类型机动车的能源消耗量;EF_j 为第 j 类燃料的碳排放因子.

1.1.2 slope 值 为进一步刻画中国 31 省份道路交通碳排放随时间的变化趋势,本文在碳排放量核算基础上,计算各省份道路交通碳排放量的 slope 值[24],计算公式如下:

$$\text{slope}_j=\frac{20\times\sum_{t=1}^{20}tC_{t,j}-\sum_{t=1}^{20}t\sum_{j=1}^{31}C_{t,j}}{20\times\sum_{t=1}^{20}t^2-(\sum_{t=1}^{20}t)^2} \tag{2}$$

式中:slope_j 为第 j 省的碳排放增长斜率;20 为时间跨度年数;t 为年份序号;$C_{t,j}$ 为第 t 年第 j 个省份的道路交通碳排放量,变化趋势类型及标准划分见表 1.

表 1 变化趋势类型及标准划分

Table 1 Types of trends and criteria

增长类型	Slope 值范围	统计含义
缓慢增长型	$<\bar{X}-0.5s$	显著低于平均水平
中速增长型	$\bar{X}-0.5s\sim\bar{X}+0.5s$	接近均值
较快增长型	$\bar{X}+0.5s\sim\bar{X}+1.5s$	明显高于均值
迅猛增长型	$>\bar{X}+1.5s$	极端高增长

注: $\bar{X}$ 为各省份slope值的平均值,s为各省份slope值的标准差.

1.1.3 泰尔指数 泰尔指数基于信息熵的概念,用于衡量收入分配、资源分布等方面的不平等程度.泰尔指数能够表征交通碳排放区域差异[25].计算公式如下:

$$\begin{aligned}T&=T_b+T_{wi}\\&=\sum_{i=1}^{m}\frac{s_i}{S}\ln\left(\frac{s_i/S}{n_i/N}\right)+\sum_{j=1}^{n_i}\frac{s_{i,j}}{S_i}\ln\left(\frac{s_{i,j}/S}{1/n_i}\right)\end{aligned} \tag{3}$$

$$T_i=\sum_{j=1}^{n_i}\frac{s_{i,j}}{S_i}\ln\left(\frac{s_{i,j}/S}{1/n_i}\right) \tag{4}$$

$$W_b=\frac{T_b}{T},W_{wi}=\frac{T_{wi}}{T} \tag{5}$$

式中:T_b、T_i、T_{wi}、T 分别表示区域间、i 区域内、区域内差异、整体贡献;W_b、W_{wi} 分别表示区域间、区域内差异贡献率;N、n_i 分别表示全国、第 i 个区域的省份数量;S、S_i、$s_{i,j}$ 分别表示全国、第 i 个区域、第 i 个区域第 j 个省份的年度碳排放量.

1.1.4 影响机制分析及变量选取 供给与活动驱动交通供给规模与活动强度提升,直接需求驱动构成交通出行需求的核心动力,技术创新驱动通过创新投入、强度降低调节优化碳排放效率,三者协同塑造道路交通碳排放时空格局(图 1).在此理论框架下,首先基于 2003~2022 年中国 31 省份面板数据,利用 slope 值及泰尔指数,分析道路交通碳排放的时空演变特征;然后构建 XGBoost−SHAP 模型,分析中国道路交通碳排放影响因素;最后得出结论.

本文在相关研究的基础上[6,16,26-27],结合理论框架选取共 8 项指标(表 2).所选变量间均不存在多重共线性(VIF<7.5).除道路交通碳排放强度外,其余变量均通过 0.01 双侧显著性检验,但其影响可能因非线性、调节效应被掩盖,可纳入影响因素分析进一步分析.

社会经济上,研究发现交通需求是道路交通碳排放的直接驱动力[28].人口规模扩大、经济发展提升居民出行频率和出行半径,带动机动车保有量增加,进而推动能源消耗和碳排放增长[29].直接需求驱动机制强调人口、经济与出行需求的联动性,以及需求结构变化对交通系统压力的传导效应.(1)人口总量体现需求基数效应,以地区常住人口数量表征.人口数量增加会直接扩大出行基数,进而导致碳排放增长.(2)人均 GDP 体现经济水平,一方面经济发展通常伴随更高的机动车购买力和交通需求,导致碳排放上升[11,30];另一方面,相关研究发现经济增长与碳排放存在倒“U”型关系,随着阈值点之后经济增长的增加,碳排放量开始减少[31].

交通活动与基础设施上,道路交通基础设施的供给和交通活动的控制,是调节交通活动强度和效率的关键[32].其代表了碳排放的“直接活动层”,通过交通系统的实际运行和基础设施条件直接影响碳排放水平.(1)每万人机动车拥有量体现直接规模效应,更多车辆意味着更高的燃油消耗和排放.机动车保有量的增长会显著增加地区道路交通能源消耗量,进而推高道路交通碳排放[33],每万人机动车拥有量能够消除人口基数干扰,相较于总量直接关联人均出行需求结构.(2)道路交通网密度反映基础设施供给.路网密度带来的通行效率提升可能体现“杰文斯悖论”[34],密度提高一定程度会缓解拥堵[35],减少碳排放;然而,路网密度提升又可能诱发更多出行需求,增加碳排放.(3)公路货运周转量衡量实际交通活动规模,体现货运强度效应.货运碳排放在道路交通碳排放占比较大[36],其需求增加会显著增加道路交通碳排放量.

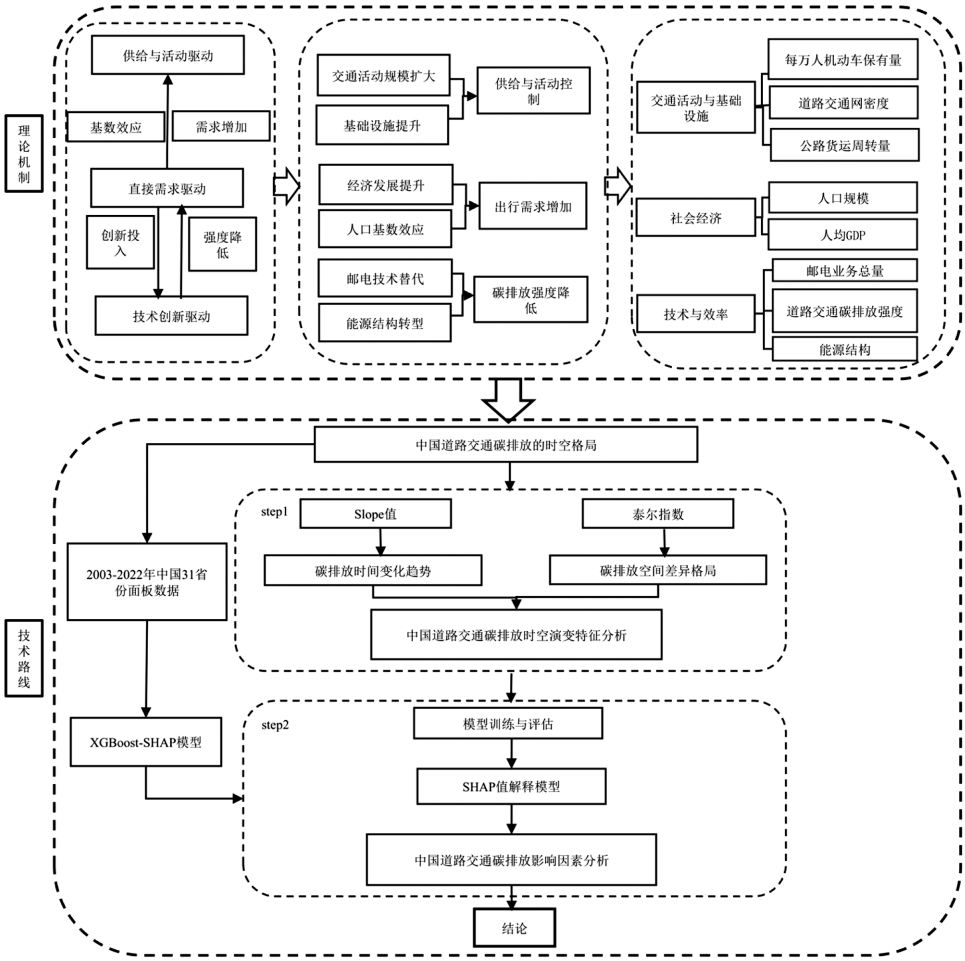


图 1　理论机制及技术路线

Fig.1　Theoretical mechanism and technical roadmap

表 2　中国道路交通碳排放影响因素指标

Table 2　Indicators of factors affecting carbon emissions from road transportation in China

维度	变量	指标说明	单位
社会经济	人口总量	年末人口总量	万人
	人均 GDP	GDP/人口总量	万元/人
交通活动与基础设施	每万人机动车拥有量	机动车保有量/年末人口总量	辆/万人
	道路交通网密度	行政区划面积/公路里程	km/km^2
	公路货运周转量	货运量与运输距离的乘积	t·km
技术与效率	邮电业务总量	邮政和电信业务的总产出值	亿元
	道路交通碳排放强度	道路交通碳排放量/GDP	t/亿元
	能源结构	天然气、电力占能源消耗总量比重	%

技术与效率因素上,技术与效率机制强调通过提高单位能耗利用效率、优化能源结构、加强管理手段,影响碳排放总量和强度. (1)邮电业务总量体现数字经济发展程度,体现为电子商务驱动的物流需求.物流环节碳排放占比不断增加[37],高度依赖公路货运的物流模式,致使重型货车行驶量与能耗激增,直接推高道路交通碳排放.但当前研究较少关注邮电业务总量在道路交通的影响机制及区域异质性,其影响机制尚不明确.(2)道路交通碳排放强度直接表示单位 GDP 的排放量,是衡量经济活动中碳排放效率的重要指标.碳排放强度更低,表明道路交通活动的碳效率更高;碳排放强度较高,可能与工业比重较大或能源结构相关.(3)能源结构衡量能源清洁程度,道路交通部门存在对能源资源的巨大需求[38],道

路交通电动化进程下,提升清洁能源消费占比可显著降低碳排放.与此同时,其减排成效还取决于电力清洁程度,在以煤电为主的电网结构下,电动汽车的推广无法产生良好的碳减排效果[39].

1.1.5 模型构建与选取 极端梯度提升(XGBoost)是一种基于梯度提升框架的集成学习算法,通过迭代地构建决策树来优化预测性能[40].其核心思想是通过组合多个弱学习器(决策树)的预测结果,逐步修正前序模型的残差,最终形成强学习器.同时,在目标函数中引入了正则化系数,有效控制模型复杂度并防止过拟合. XGBoost 基于树的集成框架,天然擅长捕捉非线性关系与特征交互,能有效应对多因素综合影响的道路交通系统.

首先,将 2003~2022 年中国 31 个省级行政区的 620 个时间序列数据进行归一化处理.其中,80%的样本用于训练,20%的模型用于测试.采用网格搜索结合 5 折交叉验证优化参数.树结构参数设置浅树[3-4],既能捕捉核心交互,又避免拟合噪声.采样参(subsample,colsample_bytre)为[0.8~0.9],缓解时间序列数据的自相关性.正则化参数(reg_alpha)为[0~1],gamma=0 平衡偏差与方差.学习率(learning_rate)为[0.01~0.1],小步长结合早停,专注长期演变趋势.树数量(n_estimators)为[50~100].最优参数组合为colsample_bytree=0.9,learning_rate=0.1,max_depth=4,n_estimators=100,reg_alpha=1,reg_lambda=0.1,subsample=0.8.

表 3 机器学习预测精度对比

Table 3 Comparison of machine learning prediction accuracy

模型	R^2	MAE	MSE
KNN	0.961	0.027	0.023
SVR	0.771	0.068	0.138
XGB	0.977	0.023	0.001
RF	0.970	0.025	0.017

为评价模型的精确度,采用 R^2、MSE、MAE 对模型算法进行评估.此外,选取 K-近邻(KNN)、支持向量回归(SVR)、随机森林(RF)3 种机器学习模型进行对比,结果见表 3.

1.1.6 SHAP 算法 SHAP(Shapley Additive Explanations)是一种基于博弈论的机器学习可解释性方法,用于量化每个特征对模型预测的贡献度.其核心优势在于:基于 Shapley 值,确保贡献分配的公平性.全局与局部解释,既可分析单个样本的预测逻辑,也能评估整体特征重要性.本研究结合 XGBoost-SHAP 解释模型,量化道路交通碳排放的影响因素,为分析道路交通碳排放提供更全面的视角.

1.2 数据来源

研究以 2003~2022 年中国 31 省市为研究对象,所使用的机动车保有量、人口总量、邮电业务总量、公路货运周转量等数据来源于《中国统计年鉴》、《中国交通统计年鉴》以及各省市统计年鉴.燃油经济性参考相关文献[41].不同类型机动车年均行驶里程来源于《道路机动车排放清单编制技术指南》中提供的基准值,采用统一静态参数(表 4).各燃油类型车辆比例来源于《中国机动车环境管理年报》.排放因子数据来源于《省级温室气体清单编制指南(试行)》.

表 4 道路机动车年均行驶里程

Table 4 Annual average mileage of motor vehicles on roads

机动车类型	年均行驶里程 VKT(km)
微小型载客车	18000
出租车	120000
中型载客车	31300
大型载客车	58000
公交车	60000
微轻型载货车	30000
中型载货车	35000
重型载货车	75000

2 结果与讨论

2.1 中国道路交通碳排放的时空演变特征

2.1.1 道路交通碳排放核算结果 中国道路交通各类车辆碳排放占比呈现出明显的结构调整特征(图 2).道路交通车辆结构随时间发生了显著变化,重型货车与小型客车是碳排放主要来源[42].

小微型客车占比呈现持续上升趋势,从 2003 年占比 15%,逐步增长到后期占比近 50%.这与居民生活水平提升、私家车保有量快速增长密切相关,小微型客车成为道路交通碳排放的主要贡献车型之一,体现了个人出行需求增长对碳排放结构的影响.重型货车占比始终保持 20%~30%的较高水平,期间虽有小幅波动,但长期是道路交通碳排放重要组成部分.重型货车承担大宗货物运输,行驶里程长、燃油消耗大,其占比稳定反映了工业生产、物流运输对公

路货运的持续需求[43].轻微型货车占比先升后稳,后期趋于平稳;中型货车占比逐步下降.这可能与物流模式优化有关,这也反映出货运车辆向“轻小灵活”与“重型高效”两端分化的趋势.中型客车、大型客车占比持续降低,体现公共交通结构调整,如高铁、城市轨道交通发展,会显著分流长途、城市大运量客运需求[44],减少此类客车碳排放占比.公交车占比持续降低,反映公交车辆能源转型对碳排放的抑制作用.《“十四五”新型城镇化实施方案》明确要求,到 2025 年全国城市新能源公交车辆占比提高到 72%[45],这会进一步推动其碳排放降低.出租车占比呈现小幅波动,总体呈现降低态势.主要受城市出行需求、网约车发展等影响,其在整体碳排放中占比不高,对总量影响较小.

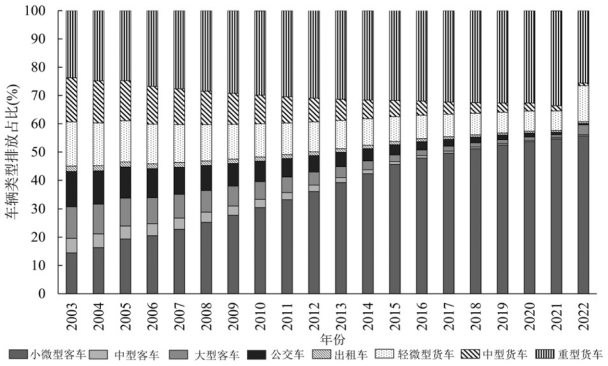


图 2　中国道路交通碳排放分车辆类型占比变化

Fig.2　Changes in the proportion of carbon emissions from road traffic in China by vehicle type

2.1.2　道路交通碳排放时序演变分析　本文利用“自下而上”法核算 2003~2022 年中国 31 省份道路交通碳排放量,并计算全国及东、中、西部道路交通碳排放量均值进行对比分析(图 3).

全国层面,呈现持续增长态势.全国道路交通碳排放量均值 20a 间增长 5.06 倍,年均增速达 9.5%.2003~2011 年为快速增长期,年均增长 10.8%.该时期工业化与城镇化驱动交通需求刚性增长,化石能源依赖和低效运输结构形成碳排放“双高”路径,导致道路交通碳排放快速增长.2012~2015 年均增速降至 6.1%,经济结构优化降低对高碳运输的依赖,公共交通与新能源汽车发展初步形成替代效应,而“公转铁”、老旧车淘汰等行政手段直接抑制排放增长.2016~2021 年均增速回升至 8.9%,受益于电商物流爆发和基建投资加码,但 2020 年因疫情原因短暂下滑.2022 年增速进一步降至 3.2%,反映燃油车市场饱和及新能源替代效应增强带来显著的碳减排效应.

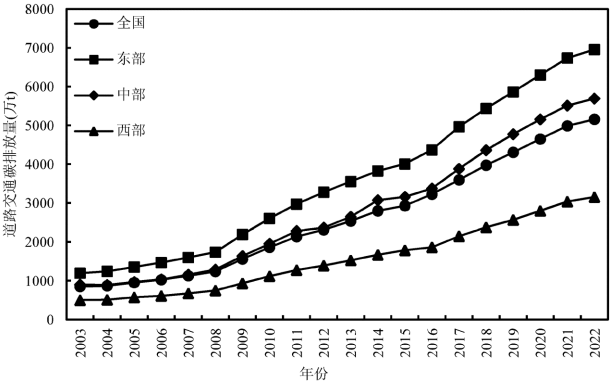


图 3　2003~2022 年道路交通碳排放量走势

Fig.3　Trends in carbon emissions from road transportation, 2003~2022

区域层面,呈现东部主导,中西部增速分化.东部地区前期增速较快,后期增速趋缓.2009~2011 年增速超 20%,2012 年后持续放缓,从高速领跑”转向“高质量发展”,增速趋稳.具体表现为前期经济高速发展,公路货运周转量、机动车保有量双高增长,道路交通碳排放随“量增”快速攀升;后期,浙江、江苏等东部主要省份相继发布《浙江省低碳发展“十二五”规划》、《江苏省“十四五”绿色交通发展规划》等政策文件.结构调整、绿色政策与区域协同发力,传统高碳货运需求受抑,新能源替代、运输结构优化推进,碳排放增速随经济增速换挡而趋缓,实现从“高速排放扩张”到“高质量低碳增长”的转变.中部地区增速地区前期增速较快,后期增速趋缓.2009~2011 年增速超20%,2012年后持续放缓,从“高速领跑”转向“高质量发展”,增速趋稳.具体表现为前期经济高速发展,公路货运周转量、机动车保有量双高增长,道路交通碳排放随“量增”快速攀升;后期,浙江、江苏等东部主要省份相继发布《浙江省低碳发展“十二五”规划》、《江苏省“十四五”绿色交通发展规划》等政策文件.结构调整、绿色政策与区域协同发力,传统高碳货运需求受抑,新能源替代、运输结构优化推进,碳排放增速随经济增速换挡而趋缓,实现从“高速排放扩张”到“高质量低碳增长”的转变.中部地区增速韧性突出,增速后期反超东部.2014 年后多次增速领跑,2022 年增速仍达 5.4%.《中共中央国务院关于促

进中部地区崛起的若干意见》(中发〔2006〕10 号)明确提出,依靠中部地区加快建设“综合交通运输枢纽”[46],交通基础设施的完善促进了车辆保有量快速增长.西部地区基数较低但增速最快,年均增长10.5%,高于东部与中部增速.具体表现为前期机动车保有量低基数效应带来的低排放,后期西部大开发战略实施,交通基础设施水平显著提升[47],导致后期碳排放量增长速度较快.

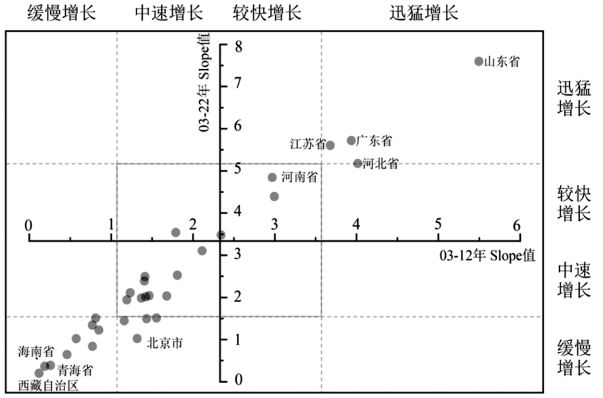


图 4 2003~2022 年、2003~2012 年中国 31 省份道路交通碳排放变化类型

Fig.4 Types of changes in carbon emissions from road transportation in the 31provinces of China, 2003~2022, 2003~2012

为进一步探究省份层面道路交通碳排放量随时间变化趋势,本文通过公式计算中国 31 省份 2003~2022 年道路交通碳排放量 slope 值.由图 4 可知,2003~2022 年山东、广东、江苏、河北为迅猛增长型代表,青海、海南、西藏等为缓慢增长型代表.2003~2012 年为经济高速增长期,各省份普遍呈现中高速增长,山东、广东、江苏等沿海省份增速领跑;2013~2022 年增速整体放缓,但河北、河南等部分省份逆势加速.特别需要关注的是,山东省全周期 Slope 值为 7.59,显著高于其他省份,呈现极端高增长态势,主要由于其机动车保有量居全国首位,其中轻微型客车数量庞大,这使得公路客运碳排放较高.同时,公路货运量和周转量占综合货运体系比例较高,大宗货物中长距离公路运输占比偏高.广东、江苏、浙江等东部沿海省份 slope 值先增后降,呈现早期外向型经济拉动,后期经济转型,交通运输结构优化转型抑制增速,但传统物流需求强劲导致增长速度仍处于较高水平.北京市、海南省则为极端低增长型代表,这体现为强政策干预下道路交通需求总量控制、能源结构替代及效率持续提升的协同减排效应.“双高”省份可借鉴其成功经验,但需警惕过度依赖政策强制可能导致的经济活力抑制.

2.1.3 道路交通碳排放空间格局分析 选取 2007 年、2012 年、2017 年、2022 年进行空间分析,分别对应“十一五”、“十二五”、“十三五”、“十四五”规划中期,有助于揭示经济及政策对道路交通碳排放影响机制.中国道路交通碳排放量总体呈现“空间极化持续强化,区域差异显著上升”的特征(图 5). 2007 年高排放区呈分散点状分布于东部沿海,中西部普遍低排放.2022 年在山东、江苏、广东形成“沿海弓形带”,在河南、安徽、湖北形成“中部箭簇区”.空间格局演变表现出制造业梯度转移的碳足迹携带,具体而言,东部沿海产业升级,将高碳工业环节转移至中部,一定程度减缓了东部地区道路交通需求增长,但经济体量仍导致其处于高碳排放;中部产业承接效应导致道路货运汽车保有量增速加快,配套物流碳排放激增,在中后期跃升为高排放地区;西部与“西部大开发战略”以生态保护与基础设施先行,而非高密度工业开发等措施密切相关,虽然道路交通碳排放量较快增长,但由于其基数较小仍处于中低排放水平.

省域层面,山东从次核心跃升为主极核,主要归因于重化工业集聚以及港口物流带来的道路货运需求量较大,从而推高道路交通碳排放量;广东、江苏为稳定“珠三角”“长三角”城市群核心省份,城市群扩张带来的人口数量提升以及跨境贸易带来道路交通碳排放跃升明显.中部崛起带中,河南属于人口大省以及处于中原交通枢纽,加之富士康等人口密集型制造业内迁,从低排放区跃升为中部高排放核心.安徽、湖北由于国家综合立体交通网规划,武汉-合肥发展轴建设,形成制造业主通道;同时,“长江经济带战略”实施加速沿江交通廊道建设,从而形成“安徽-湖北走廊”空间格局.内蒙古由低排放转变为中排放,这与《能源发展“十三五”规划》明确将晋陕蒙建成亿吨级煤炭基地,煤炭公路运输量较大密切相关;青海、西藏、海南第三产业占比较高,道路货运需求较低,使其维持极低排放水平.总体来看,我国道路交通碳排放的空间差异是经济发展、人口分布、策导向等多重因素综合作用的结果.

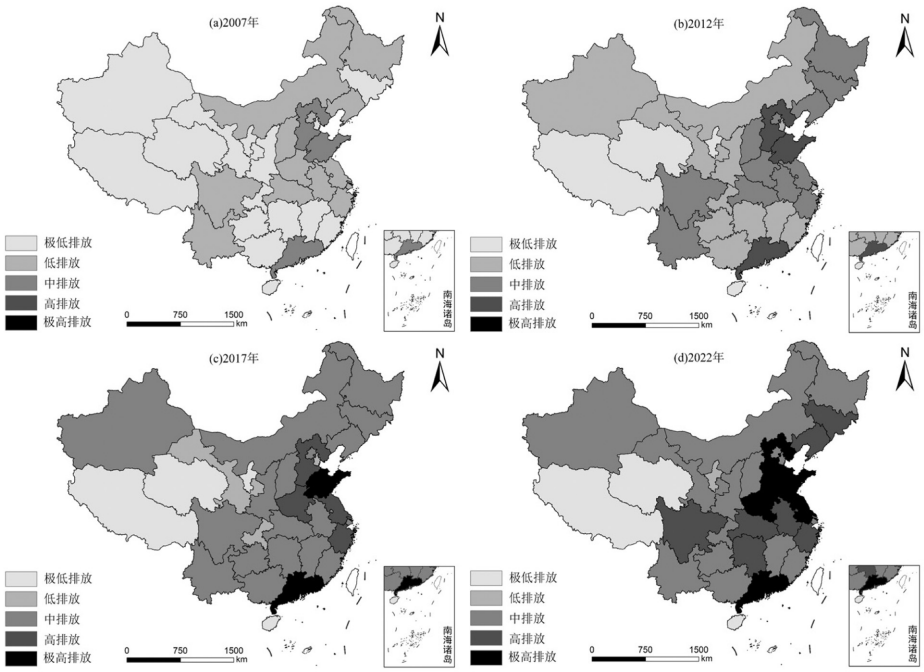


图 5　中国道路交通碳排放量空间格局演变

Fig.5　Evolution of spatial pattern of carbon emissions from road transportation in China

审图号:GS(2024)0650 号

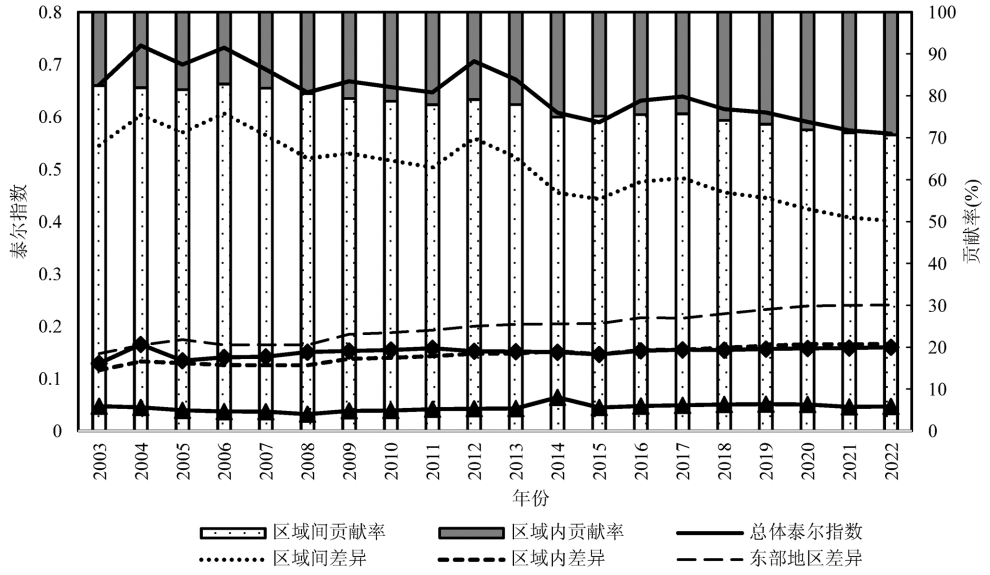


图 6　中国道路交通碳排放各区域泰尔指数及区域贡献率

Fig.6　Tyrell's index and regional contribution of carbon emissions from road transportation in China by region

中国东、中、西部的自然及社会经济状况不一,道路交通碳排放也存在较大差异.为分析各区域的碳排放空间差异性,本文根据公式计算出中国道路交通碳排放的总体泰尔指数、区域间、区域内的差异和贡献率,结果见.总体来看,中国区域总体泰尔指数从 0.66 降至 0.57,总体呈波动下降趋势,但存在阶段性波动,表明东、中、西部各区域道路交通碳排放总体差异逐渐缩小.区域间差异始终是总体差异的主要来源,其贡献率长期高于 70%,但数值从 2003 年 0.54 降至 2022 年 0.40,表明区域间差距逐步缩小.区域内差异持续上升,从 0.12 增至 0.17,其贡献率从 17.5%提升至 29.3%,提示需关注区域内不平衡问题.区域间贡献率从 82.4%降至 70.7%,但仍占主导地位,表明跨区域交通能源协调政策仍需加强.区域内贡

献率由 17.5%上升至 29.3%,这与区域内各省份交通基础设置及产业结构差异有关.分区域来看,东部地区内部差异显著高于其他区域, 这是因为东部沿海省份经济产业分工明确带来道路机动车客、货保有量差异显著.西部地区差异水平居中,但长期高于中部地区,这与“西部大开发”政策下各省份战略定位不同有关,成渝城市圈作为西部核心增长极,与西部能源富集但生态脆弱省份的发展路径存在显著差异.中部地区差异最小且相对稳定,反映中部省份经济结构趋同化,交通基础设施水平及各类机动车保有量差异较小.

2.2 道路交通碳排放的影响因素与区域异质性

2.2.1 全国尺度影响因素分析 图 7 中特征按平均绝对 SHAP 值从高到低排列.SHAP 值为正,代表该特征使碳排放量增加;SHAP 值为负,代表使碳排放量减少.黑色代表特征高值,灰色代表特征低值.

公路货运周转量影响程度最高,贡献率为 32.03%.公路货运周转量越高,道路交通碳排放量也越大,这与相关研究结论较为一致[13].当前我国营业性货运量中公路运输周转量占比高达 73.7%[48],与此同时重型卡车燃料类型主要为柴油且能耗水平较高,公路货运周转量增加会显著加剧碳排放量上升.

人口总量与每万人机动车拥有量影响次之,贡献率分别为 24.88%和 19.75%.道路交通碳排放量随着人口总量与每万人机动车拥有量增加而上升,体现出需求驱动效应.研究期间,人口数量增长 9%,机动车保有量则由 2380 万辆飙升至 3.12 亿辆,人口总量增加直接导致机动车保有量与道路交通需求量增长,进而导致道路交通能源消耗量与碳排放量上升.与此同时,人口增长与机动车保有量增长导致城市空间扩张及诱导出行模式向私家车转变,其相互促进可能体现乘数效应,并通过拥堵效应被显著放大.因此,要有效控制道路交通碳排放,必须同时关注人口发展趋势和机动车保有量的增长,并打破两者之间的高碳耦合关系.

邮电业务总量重要性位列第四,贡献率为 8.9%.研究表明,数字经济浪潮下电子商务的发展极大的促进了快递物流网络的形成[49],邮政业务总量随之显著提升.而长途公路货运正是支撑快递物流体系的绝对主力,贡献了快递行业绝大部分的碳排放,导致道路交通碳排放显著提升.这表明虽然数字经济能显著降低区域碳排放水平[50-51],但需警惕中国经济结构数字化转型对道路交通物流产生的巨大碳排放压力,相关结论在以道路交通为主的物流业得到证实[52].

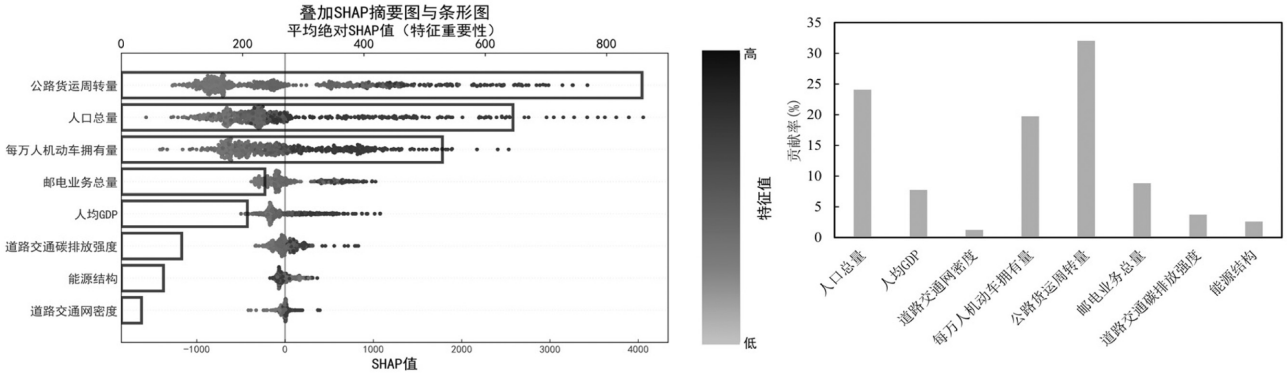


图 7 全国 SHAP 解释和特征重要性及贡献率

Fig.7 National SHAP interpretation and characteristic importance and contributions

人均 GDP 对道路交通碳排放增长有一定程度促进作用,其贡献率为 7.75%.研究表明人均 GDP 在 1 万~2.5 万美元区间时,机动车保有量会保持较高增速[30],由此提高碳排放.但人均 GDP 与碳排放可能存在倒“U”型关系,即未来随着经济发展带来更多技术投入,加之产业结构升级和环境政策强化将推动碳排放逐步下降[53].道路交通碳排放强度影响较低,但仍与道路交通碳排放呈现显著正相关性,具体表现为交通需求与经济增长深度绑定,经济增长导致人口与商品流动量增加.带来交通需求刚性增长,道路交通碳排放仍随 GDP 上升.

能源结构影响不显著,整体呈现出负向影响,当

前我国清洁能源比例不断提高,道路交通电动化能够为车辆电气化提供低碳动力源,进而实现减排效果.道路交通网密度影响虽不显著但与道路交通碳排放呈现显著正向关联,高密度路网诱导更多出行需求,导致碳排放量上升.这与相关研究中高密度路网城市群道路交通碳排放显著高于其他地区的结论相一致[54].

2.2.2　道路交通碳排放主导因素的交互影响　尽管单因素分析能够清晰地揭示单个变量对道路交通碳排放的独立影响,但其难以解释当多个因素同时变化时可能产生的的放大或削弱现象.因此,研究进一步探讨各影响因素之间是否存在协同效应和作用机理.限于篇幅,本文只探讨最大贡献度因素与排名前 5 的其他 4 个因素的交互影响,即公路货运周转量与人口总量、每万人机动车拥有量、邮电业务总量、人均 GDP 的交互影响(图 8).

结果表明,公路货运周转量与其他因素均体现出协同增排效应.公路货运周转量从低到高时,SHAP 值从负转正且持续上升,货运周转量本身对碳排放的驱动由弱抑制转为强促进.人口规模放大了货运周转量的碳排放驱动,体现为人口规模扩张带来消费需求增长,进而带来货运周转量提升,推高碳排放.此外,在人口规模越大的省份,公路货运需求增长对碳排放的边际推动效应也越强.每万人机动车拥有量通过“运力供给充足性”,调节了公路货运周转量对碳排放的驱动效应.机动车保有量越高,货运周转量提升时,运输活动的规模扩张越充分,碳排放的促进效应就越强,二者呈现协同放大的交互特征.公路货运周转量与邮电业务总量体现数字技术衍生需求.邮电业务发达的地区,电商订单量庞大,公路货运贡献了电商运输绝大部分的碳排放,导致道路交通碳排放显著提升;邮电业务落后的地区,货运需求较小,周转量增长的碳排放增量有限.公路货运周转量较低时,无论高/低 GDP 地区,均对碳排放无显著驱动.人均 GDP 显示经济活跃度,高人均 GDP 地区运输组织呈现“多段式拆分”的特征,货运周转量提升显著,导致总碳排放快速上升.

综上,这些交互效应揭示了道路交通碳排放的驱动是多维度调节变量的协同结果,需结合各交互效应进行协同减排.

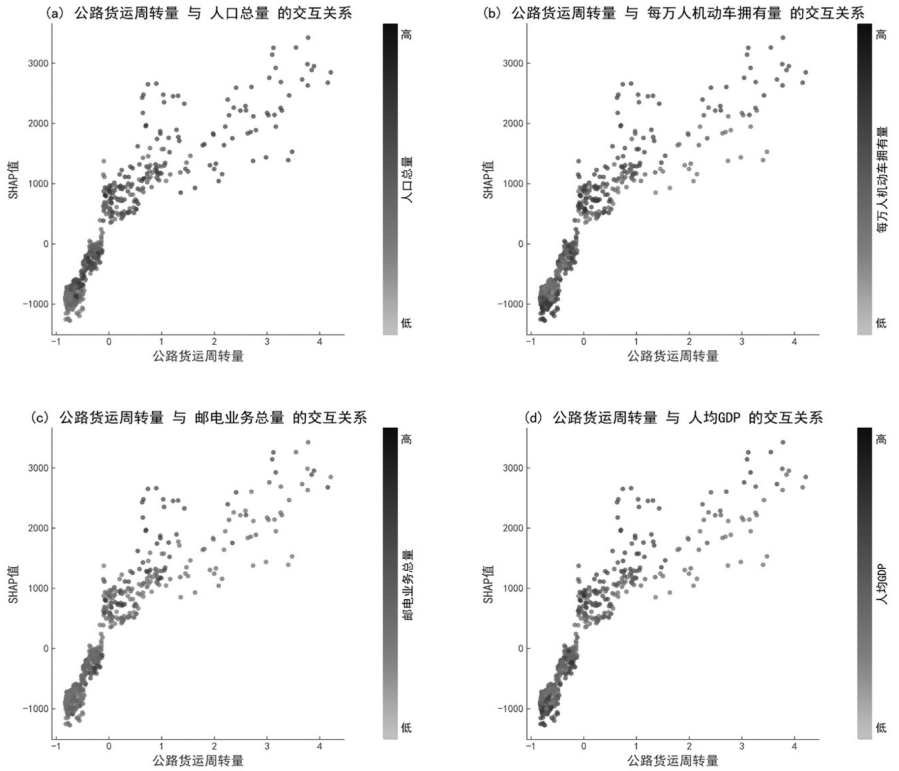


图 8　主导因素影响道路交通碳排放的交互效应

Fig.8　Shows the interaction effect of dominant factors on carbon emissions from road traffic

2.2.3　区域尺度影响因素分析　泰尔指数分解结果表明,东、中、西部道路交通碳排放区域内及区域间指

数及贡献率存在显著差异.为此,进一步对东、中、西部进行影响因素分析,结果如图 9 所示.总体而言,影响东、中、西部道路交通碳排放的因素既存在共性也存在一定差异性,体现出较为显著的区域异质性.

社会经济.人口总量在三大区域贡献率相差较小,体现出东中西部人口总量虽有较大差异,但人口数量与交通需求的匹配度相对均衡.人均 GDP 在中部影响最为显著,贡献率为 23.4%,东、西部则并不显著.具体表现为区域碳排放驱动力的结构性差异.中部省份多处于工业化和城镇化的快速推进阶段,制造业、资源加工业等产业蓬勃发展,货运量的大幅增加,公路货运周转量随之上升,从而显著推动道路交通碳排放增长;东部人均 GDP 持续增长,但第三产业对道路交通的依赖程度相对较低,对道路交通碳排放的直接推动作用不明显;西部由于交通基础设施相对薄弱,交通物流体系不完善,货物运输效率较低,难以形成规模效应,导致人均 GDP 增长对道路交通碳排放的驱动作用不突出.

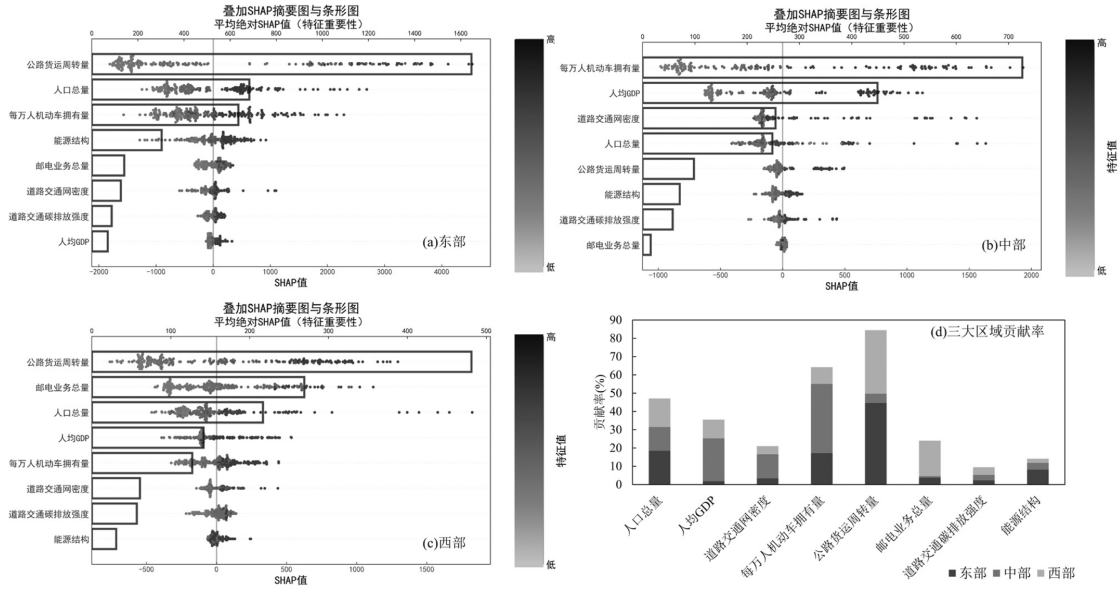


图 9 东中西部 SHAP 解释和特征重要性及贡献率

Fig.9 East-central-west SHAP interpretation and characteristic importance and contributions

交通活动与基础设施.道路交通网密度在中部贡献率为 15.36%,东、西部则不显著.较高的路网密度带来更多的出行需求,带来更高的碳排放.此外,中部高值分散说明各省份道路交通网密度差异较大,对道路交通碳排放影响程度有所差异.每万人机动车拥有量在东、中、西部贡献率分别为 17.22%,37.82%,9.19%,表现出较大区域差异.东部每万人机动车保有量高,但公共交通发达,加之“双碳”政策推广新能源,机动车保有量影响弱化;中部城镇化驱动机动车的爆发式增长,但公共交通分担率偏低,机动车使用强度较高;西部除四川、重庆、陕西外每万人机动车保有量较低,拉低整体贡献基数.因此,中部人口大省需加快公共交通发展,减少私人交通出行需求.公路货运周转量在东部与西部影响最为显著,在中部地区却仅有 6.92%的贡献率,呈现出较大差异.究其原因,东部制造业与商贸业高度集聚,货运需求庞大,同时,电商与快递业爆发式发展,公路货运成为支撑电商物流的核心方式,导致公路货运碳排放量较高.西部资源型省份如内蒙古、新疆依赖公路干线运输,加之“西部陆海新通道”“西部大开发”等一系列政策推动基建补短板,经济的快速发展诱导物流业需求不断增长[55],进而推高道路交通碳排放;中部公路货运周转量贡献率较低且与碳排放并不是简单的线性关系,如湖北、安徽等有较高的水路货货运分担率[56],这会显著降低道路货运碳排放,高排放的河南铁路、水路分担率均较低,道路货运碳排放显著提升.

技术与效率.邮电业务总量在西部贡献率为 15.13%,东、中部不显著.具体来看,东部邮电与道路交通深度融合,侧重物流效率.中部邮电业务体量较小,未能体现出对道路交通碳排放的规模效应.研究期间,西部省份数字经济发展水平以显著高于全国

平均水平的速度高速增长[57],其催生的电商消费与物流需求,在西部地区独特的地理环境下,几乎完全由长距离、高依赖度公路货运来承载,从而放大了其对道路交通碳排放的正向影响.道路交通碳排放强度在东中西部影响均不显著,随着经济进一步发展,产业结构逐渐优化,转向以服务业和高新技术产业为主,这些产业对公路货运的依赖程度相对较低,单位 GDP 的货运需求下降,进而降低其影响.能源结构在中、西部不显著,东部贡献率为 8.2%且呈现正向影响.研究表明,东部地区充电基础设施水平更高,这显著提升了电动汽车渗透率[58].然而,电动汽车保有量高速增长可能导致高排放的“反弹陷阱”机制,进而导致总排放量不降反升,这在相关研究中已得到证实[59].此外,将能源消耗从燃油转向电力的减排效果,也取决于电力来源的清洁程度.东部电力供给侧清洁化水平低于全国及其他区域[60],碳排放因子处于较高水平[61].综上,东部地区“能源结构”指标呈现正向影响,是交通终端消费反弹与能源供给侧高碳锁定相互作用的系统性结果.

2.3　政策建议

(1)针对不同车辆类型排放占比差异较大问题,双核减排破解私家车与重卡困局.小微型客车严格实施“存量新能源化+增量控速”策略,扩大新能源车路权,提升替代率,抑制高保有量区域增长; 重型货车推行“技术−结构−机制”三重突破,加大电动重卡补贴力度,强制钢铁/煤炭等大宗商品“公转铁”比例≥40%.复制公交电动化经验至城市物流,提升轻微型货车电动化比例.深化客运结构低碳转型,放大高铁分流效应.

(2)针对道路交通碳排放区域差异显著问题,实施区域差异化策略.对于山东、江苏、浙江、广东等东部省份加大减排力度,破解“高排放锁定”.推广智能交通系统,强化总量控制,严格机动车限购政策.对于湖北、河南、安徽等中部省份遏制“中部崛起”的碳代价.依托长江黄金水道和京广铁路干线,构建“铁水公”无缝衔接的物流走廊.对于山西、河南等重工业省份,逐步推广节能车辆和清洁能源技术.对于甘肃、青海、宁夏等西部省份平衡开发与生态保护,限制资源粗放运输.针对新疆、内蒙古等资源型省份,配套煤炭专线铁路和矿区电动重卡短途运输网络,同时提高光伏、风电清洁能源占比.

(3)公路货运周转量、人口总量、每万人机动车拥有量、邮电业务总量、人均 GDP 是导致道路交通碳排放增长的重要因素.首先,因地制宜加快“公转铁”“公转水”,提升铁路、水路货运分担率,但需要注意避免盲目追求铁路及水路货运分担率,而将短途公路货运转为长途联运,从而导致交通行业整体减排压力增大.其次,搭建智慧物流平台,整合物流信息,实现货物运输的精准匹配,减少空驶率.此外,优化城市空间布局,缩短通勤距离,发展低碳公共交通,降低私家车依赖度,从而实现协同减排.基于人口规模和城市承载力,实施差异化限购,人口密集城市提高购车门槛、控制增量;高峰时段或区域限行高排放机动车,减少拥堵和碳排放,同时根据人口流动调整限行区域.

当然,囿于数据的可得性,本研究也存在一定的局限性.其一,对机动车使用强度与车辆结构动态变化的考量不足.本研究在参数设定中,未能充分考虑机动车年均行驶里程(VKT)随经济发展、出行习惯改变而呈现的动态变化趋势,同时也简化了车辆年龄结构对整体排放的影响.未来的研究应引入更细粒度的 VKT 预测模型,构建动态的车队年龄结构.其二,本研究未能充分刻画清洁能源消费占比与交通电动化的滞后减排效应.未来的研究应构建电力部门与交通部门的耦合模型,引入基于时间序列的、前瞻性的电网碳强度情景,更精确地量化交通电动化在不同时间尺度上的真实减排贡献.

3　结论

3.1　中国道路交通碳排放主要呈现“双核驱动”特征,小微型客车与重型货车合计占比超过 80%,构成绝对排放主体.货运结构呈现两极化,轻微型货车占比先升后稳,中型货车持续下降;客运减排效果显著,中大型客车、公交车和出租车排放占比低且持续降低.

3.2　时间序列.全国排放量经历了从快速增长到增速放缓的转变.东部地区前期增速快而后放缓,中部后期反超东部,西部基数低但增长最快.省域层面,山东、广东、江苏、河北等东部省份增长迅猛,北京、海南、西藏则为低增长代表,整体呈现“高者恒高、低者恒低”的稳定格局.

3.3　空间格局.东部持续形成高排放连绵区,中部崛

起并逐渐融入高值带,西部保持低排放稳定态势.区域差异显著但总体泰尔指数下降,表明区域协调政策初显成效,其中东部和西部内部差异较大,中部差异最小且稳定.

3.4 影响因素.全国层面以公路货运周转量为首要驱动因素,人口、机动车拥有量、邮电业务总量和人均 GDP 均具促进作用,且存在协同增排效应.区域层面存在明显差异;东部仍以公路货运和人口为主,能源结构影响上升;中部每万人机动车拥有量跃居首要因素;西部则以公路货运和邮电业务为主.

参考文献:

[1] Fang K, Li C, Tang Y, et al. China's pathways to peak carbon emissions: New insights from various industrial sectors [J]. Applied Energy, 2022,306:118039.

[2] Jin B, Zhu R, Mei H, et al. Volatile organic compounds from a mixed fleet with numerous E10-fuelled vehicles in a tunnel study in China: Emission characteristics, ozone formation and secondary organic aerosol formation [J]. Environmental Research, 2021,200:111463.

[3] Irfan M, Mahapatra B, Shahbaz M. Energy efficiency in the Indian transportation sector: effect on carbon emissions [J]. Environment, Development and Sustainability, 2023,26(3):6653-6676.

[4] 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.
Li X Y, Tan X Y, Wu R, et al. Research on the Path to Carbon Peaking and Carbon Neutrality in the Transportation Field [J]. Engineering Sciences in China, 2021,23(6):15-21.

[5] 徐艺诺,翁大维,王 硕,等.粤闽浙沿海重点城市道路交通节能减排路径 [J]. 环境科学, 2024,45(5):3107-3118.
Xu Y N, Weng D W, Wang S, et al. Energy conservation and emission reduction pathways for road traffic in key coastal cities of Guangdong, Fujian and Zhejiang [J]. Environmental Science, 2024,45(5):3107-3118.

[6] 田泽源,董 治,董治宇,等.基于面板数据模型关中平原城市群交通碳排放峰值预测与脱钩分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(10):5901-5911.
Tian Z Y, Dong Z, Dong Z Y, et al. Peak prediction and decoupling analysis of transportation carbon emissions in guanzhong plain urban agglomeration based on Panel Data Model [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2024,44(10):5901-5911.

[7] Jung M C, Wang T, Kang M, et al. Urban landscape affects scaling of transportation carbon emissions across geographic scales [J]. Sustainable Cities and Society, 2024,113:105656.

[8] 杨 青,郭 露,刘星星,等.中国省域交通碳排放空间关联格局的驱动特征 [J]. 中国环境科学, 2024,44(2):1171-1184.
Yang Q, Guo L, Liu X X, et al. Driving characteristics of spatial correlation pattern of carbon emissions from provincial transportation in China [J]. China Environmental Science, 2024,44(2):1171-1184.

[9] 宋永朝,舒 秦,金程容,等.中国区域交通碳排放预测与碳达峰路径规划 [J]. 环境科学, 2025,46(4):1995-2008.
Song Y C, Shu Q, Jin C R, et al. Carbon emission prediction and carbon peak path planning of regional transportation in China [J]. Environmental Science, 2025,46(4):1995-2008.

[10] Raza M Y, Wang W, Javed Q. Decoupling effect and driving factors of transport CO_2 emissions: Modeling and prediction of energy and environmental factors towards Vision-2035 in a developing economy [J]. Energy Strategy Reviews, 2025,59:101750.

[11] 张国兴,苏钊贤.黄河流域交通运输碳排放的影响因素分解与情景预测 [J]. 管理评论, 2020,32(12):283-294.
Zhang G X, Su Z X. Decomposition of influencing factors and scenario prediction of carbon emissions from transportation in the Yellow River basin [J]. Management Review, 2020,32(12):283-294.

[12] 郑 琰,蒋雪梅,肖玉杰.交通运输业碳排放效率时空演变及趋势预测 [J]. 环境科学, 2024,45(4):1879-1887.
Zheng Y, Jiang X M, Xiao Y J. Spatio-temporal evolution and trend prediction of carbon emission efficiency in the transportation industry [J]. Environmental Science, 2024,45(4):1879-1887.

[13] 翁大维,谢郑一,温晓娟,等.福建省城市群道路交通碳排放时空异质性 [J]. 环境科学, 2025,46(8):4826-4838.

[14] Weng D W, Xie Z Y, Wen X J, et al. Spatio-temporal heterogeneity of road traffic carbon emissions in urban agglomerations of Fujian Province [J]. Environmental Science, 2024:1-19.

[15] Lei H, Zeng S, Namaiti A, et al. The Impacts of Road Traffic on Urban Carbon Emissions and the Corresponding Planning Strategies [J]. Land, 2023,12(4):800.

[16] 许 晔,王 钧,刘爽爽,等.深圳市主要道路交通碳排放特征与低碳交通发展情景研究 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2018,54(1):146-156.
Xu Y, Wang J, Liu S S, et al. Research on carbon emission characteristics of main road traffic in Shenzhen and the development scenario of low-carbon transportation [J]. Journal of Peking University (Natural Science Edition), 2018,54(1):146-156.

[17] 王 硕,徐艺诺,翁大维,等.中国道路交通碳排放驱动因素及碳达峰 [J]. 生态学报, 2025,45(3):1315-1327.
Wang S, Xu Y N, Weng D W, et al. Driving factors of carbon emissions from road traffic in china and carbon peaking [J]. Acta Ecologica Sinica, 2025,45(3):1315-1327.

[18] 张陶新.中国城市化进程中的城市道路交通碳排放研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2012,22(8):3-9.
Zhang T X. Research on carbon emissions from urban road traffic in China's urbanization process [J]. China Population, Resources and Environment, 2012,22(8):3-9.

[19] 刘小艳,武 平,王红晓.基于 LMDI 模型的内蒙古交通碳排放驱动因素分析 [J]. 交通节能与环保, 2024,20(1):89-93,100.
Liu X Y, Wu P, Wang H X. Analysis of driving factors of transportation carbon emissions in Inner Mongolia based on LMDI model [J]. Transportation Energy Conservation and Environmental Protection, 2024,20(1):89-93,100.

[20] 陈 锋,张 晶,任 娇,等.基于 LMDI 模型的黄河流域碳排放时空差异及影响因素研究 [J]. 地球环境学报, 2022,13(4):418-427.
Chen F, Zhang J, Ren J, et al. Research on spatio-temporal differences and influencing factors of carbon emissions in the Yellow River basin based on LMDI model [J] Journal of Earth Environment, 2022,13(4):418-427.

[21] Isik M, Sarica K, Ari I. Driving forces of Turkey's transportation sector CO_2 emissions: An LMDI approach [J]. Transport Policy, 2020, 97:210−219.

[22] 王李轩,李　蓁,何吉成,等.基于 STIRPAT 模型的陕西省交通运输业碳排放影响因素分析 [J]. 交通运输研究, 2022,8(6):98−107.
Wang L X, Li Z, He J C, et al. Analysis of influencing factors of carbon emissions in the transportation industry of Shaanxi Province based on STIRPAT model [J]. Transportation Research, 2022,8(6):98−107.

[23] Yang X, Liu X. Path analysis and mediating effects of influencing factors of land use carbon emissions in Chang−Zhu−Tan urban agglomeration [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2023, 188:122268.

[24] 黄威翔,高川作,吴　波,等.基于 STIRPAT 模型的广西碳达峰路径 [J]. 环境科学, 2025,46(2):682−695.
Huang W X, Gao C Z, Wu B, et al. Path to carbon peak in Guangxi based on STIRPAT model [J]. Environmental Science, 2025,46(2):682−695.

[25] 刘　颖,王　远,朱　琳.长三角地区建筑业碳排放变化的时空特征及影响因素分析 [J]. 中国环境科学, 2023,43(12):6677−6688.
Liu Y, Wang Y, Zhu L. Analysis of spatio−temporal characteristics and influencing factors of carbon emission changes in the construction industry in the Yangtze River Delta region [J]. China Environmental Science, 2023,43(12):6677−6688.

[26] 李　健,刘一璇.省域交通运输业碳排放生产率时空演变分析 [J/OL]. 环境科学,https://doi.org/10.13227/j.hjkx. 202411293.
Li J, Liu Y X. Analysis of the spatio−temporal evolution of carbon emission productivity in provincial transportation industry [J/OL]. Environmental Science, https://doi.org/10.13227/ j.hjkx.202411293.

[27] 刘慧甜,胡大伟.基于机器学习的交通碳排放预测模型构建与分析 [J]. 环境科学, 2024,45(6):3421−3432.
Liu H T, Hu D W. Construction and analysis of traffic carbon emission prediction model based on machine learning [J]. Environmental Science, 2024,45(6):3421−3432.

[28] 曾晓莹,邱荣祖,林丹婷,等.中国交通碳排放及影响因素时空异质性 [J]. 中国环境科学, 2020,40(10):4304−4313.
Zeng X Y, Qiu R Z, Lin D T, et al. Spatio−temporal heterogeneity of carbon emissions and influencing factors in China's transportation [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2020,40(10):4304−4313.

[29] Winkler L, Pearce D, Nelson J, et al. The effect of sustainable mobility transition policies on cumulative urban transport emissions and energy demand [J]. Nature Communications, 2023,14(1).

[30] Li X, Zhang R, Chen J, et al. Urban−scale carbon footprint evaluation based on citizen travel demand in Japan [J]. Applied Energy, 2021,286:116462.

[31] 郝　瀚,王贺武,欧阳明高.中国乘用车与商用车保有量预测 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011,51(6):868−872.
Hao H, Wang H W, Ouyang M G. Prediction of passenger and commercial vehicle ownership in China [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2011,51(6):868−872.

[32] Jun W, Mughal N, Zhao J, et al. Does globalization matter for environmental degradation? Nexus among energy consumption, economic growth, and carbon dioxide emission [J]. Energy Policy, 2021,153:112230.

[33] 崔　倩,周志祥,官冬杰,等.交通碳排放核算、模拟及影响因素研究进展 [J]. 环境工程, 2025,43(1):31−41.
Cui Q, Zhou Z X, Guan D J, et al. Research progress on carbon emission accounting, simulation and influencing factors of transportation [J]. Environmental Engineering, 2025,43(1):31−41.

[34] 刘淳森,曲建升,葛钰洁,等.基于 LSTM 模型的中国交通运输业碳排放预测 [J]. 中国环境科学, 2023,43(5):2574−2582.
Liu C S, Qu J S, Ge Y J, et al. Carbon emission prediction of China's transportation industry based on LSTM model [J]. China Environmental Science, 2023,43(5):2574−2582.

[35] Alcott B. Jevons' paradox [J]. Ecological Economics, 2005,54(1): 9−21.

[36] 叶　飞,程　文.中国道路交通碳排放研究进展分析 [J]. 交通节能与环保, 2021,17(1):1−6.
Ye F, Cheng W. Analysis of research progress on carbon emissions from road traffic in China [J]. Transportation Energy Conservation and Environmental Protection, 2021,17(1):1−6.

[37] Xu G, Lv Y, Sun H, et al. Mobility and evaluation of intercity freight CO_2 emissions in an urban agglomeration [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2021,91:102674.

[38] 李　璇.我国电子商务绿色发展绩效评价及影响因素分析 [J]. 商业经济研究, 2021,(13):83−86.
Li X. Performance evaluation and influencing factors analysis of green development of e−commerce in China [J]. Commercial Economics Research, 2021,(13):83−86.

[39] Dominković D F, Bačeković I, Pedersen A S, et al. The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,82:1823−1838.

[40] 赵子贤,邵超峰,陈　珏.中国省域私人电动汽车全生命周期碳减排效果评估 [J]. 环境科学研究, 2021,34(9):2076−2085.
Zhao Z X, Shao C F, Chen J. Evaluation of carbon emission reduction effects throughout the life cycle of private electric vehicles in provincial regions of China [J]. Research of Environmental Sciences, 2021,34(9):2076−2085.

[41] Takefuji Y. Beyond XGBoost and SHAP: Unveiling true feature importance [J]. Journal of Hazardous Materials, 2025,488:137382.

[42] 庞　可,张　芊,马彩云,等.基于 LEAP 模型的兰州市道路交通温室气体与污染物协同减排情景模拟 [J]. 环境科学, 2022,43(7):3386−3395.
Pang K, Zhang Q, Ma C Y, et al. Scenario simulation of synergistic emission reduction of greenhouse gases and pollutants in road traffic in Lanzhou city based on LEAP model [J]. Environmental Science, 2022,43(7):3386−3395.

[43] 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 Z H, Ji L, Yin J, et al. Research on the peak path of carbon dioxide emissions from road traffic in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2022,35(2):385−393.

[44] 刘昭然,诸立超.我国货运结构调整的理论认识和实践难点 [J]. 铁道货运, 2024,42(8):8−14.
Liu Z R, Zhu L C. Theoretical understanding and practical difficulties of freight structure adjustment in China [J]. Railway Freight, 2024, 42(8):8−14.

[45] 樊海博.基于多项 Logit 模型的客运通道交通分担率研究 [J]. 铁道建筑技术, 2023,(12):174−176,193.

Fan H B. Research on traffic sharing rate of passenger transport channels based on multiple Logit models [J]. Railway Construction Technology, 2023,(12):174-176,193.

[46] 国家发展改革委.国家发展改革委关于印发“十四五”新型城镇化实施方案的通知 [EB/OL]. (2022-06-21). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/12/content_5700632.htm.
National Development and Reform Commission. Notice on printing and distributing the "14th Five-Year Plan" new urbanization implementation plan by the National Development and Reform Commission [EB/OL]. (2022-06-21). https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/12/content_5700632.htm.

[47] 詹小灵,吴建新,孙伟增.中部崛起战略的经济效应及其机制——基于空间断点回归的分析 [J]. 数量经济技术经济研究, 2025,42(4):5-25.
Zhan X L, Wu J X, Sun W Z. The economic effects and mechanism of the central rise strategy: an analysis based on spatial regression breakpoint [J]. Journal of Quantitative & Technical Economics, 2025, 42(4):5-25.

[48] 刘瑞明,赵仁杰.西部大开发:增长驱动还是政策陷阱——基于PSM-DID方法的研究 [J]. 中国工业经济, 2015,(6):32-43.
Liu R M, Zhao R J. Western development: growth-driven or policy trap - a study based on the PSM-DID method [J]. China Industrial Economics, 2015,(6):32-43.

[49] 交通运输部.2023 年交通运输行业发展统计公报 [EB/OL]. (2024-06-18)[2025-06-01]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html.
Ministry of Transport. Statistical bulletin on the development of the transportation industry in 2023 [EB/OL]. (2024-06-18)[2025-06-01]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202406/t20240614_4142419.html.

[50] 李苑君,吴旗韬,张玉玲,等.中国三大城市群电子商务快递物流网络空间结构及其形成机制研究 [J]. 地理科学, 2021,41(8):1398-1408.
Li Y J, Wu Q T, Zhang Y L, et al. Research on the spatial structure and formation mechanism of e-commerce express logistics network in China's three major urban agglomerations [J]. Geographical Science, 2021,41(8):1398-1408.

[51] 徐维祥,周建平,刘程军.数字经济发展对城市碳排放影响的空间效应 [J]. 地理研究, 2022,41(1):111-129.
Xu W X, Zhou J P, Liu C J. Spatial effects of digital economy development on urban carbon emissions [J]. Geographical Research, 2022,41(1):111-129.

[52] 杨刚强,王海森,范恒山,等.数字经济的碳减排效应:理论分析与经验证据 [J]. 中国工业经济, 2023,(5):80-98.
Yang G Q, Wang H S, Fan H S, et al. The carbon emission reduction effect of digital economy: theoretical analysis and empirical evidence [J]. China Industrial Economics, 2023,(5):80-98.

[53] 焦志伦,李雯雯,刘秉镰.数字经济发展必然减少行业碳排放吗?——来自物流业的新证据 [J]. 南开经济研究, 2024,(6):110-128.
Jiao Z L, Li W W, Liu B L. Does the development of the digital economy necessarily reduce carbon emissions in industries? ——new evidence from the logistics industry [J]. Nankai Economic Research, 2024,(6):110-128.

[54] 王 锋,吴丽华,杨 超.中国经济发展中碳排放增长的驱动因素研究 [J]. 经济研究, 2010,45(2):123-136.
Wang F, Wu L H, Yang C. Research on the driving factors of carbon emission growth in China's economic development [J]. Economic Research Journal, 2010,45(2):123-136.

[55] 胡 胜,王振华,邢汉发,等.中国城市路网形态与交通碳排放关系及影响机制研究 [J]. 地球信息科学学报, 2025,27(7):1687-1703.
Hu S, Wang Z H, Xing H F, et al. Research on the relationship and influence mechanism between urban road network morphology and transportation carbon emissions in China [J]. Journal of Geo-Information Science, 2025,27(7):1687-1703.

[56] 陈 猛,谈晓勇.西部陆海新通道物流业碳排放特征及驱动因素研究 [J]. 铁道运输与经济, 2024,46(12):100-107.
Chen M, Tan X Y. Research on carbon emission characteristics and driving factors of the logistics industry in the western land-sea new corridor [J]. Railway Transport and Economy, 2024,46(12):100-107.

[57] 刘昭然,诸立超.中国省级层面货运结构调整的碳减排贡献 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2024,24(2):24-33.
Liu Z R, Zhu L C. The carbon emission reduction contribution of freight structure adjustment at the provincial level in China [J]. Transportation System Engineering and Information, 2024,24(2):24-33.

[58] 王家庭,袁春来,马 宁,等.中国八大综合经济区数字经济发展水平测度、区域差异和收敛性研究 [J]. 区域经济评论, 2024,(1):111-121.
Wang J T, Yuan C L, Ma N, et al. Research on the measurement, regional differences and convergence of digital economic development levels in China's eight comprehensive economic zones [J]. Regional Economic Review, 2024,(1):111-121.

[59] 李晓敏,刘毅然.充电基础设施对新能源汽车推广的影响研究 [J]. 中国软科学, 2023,(1):63-72.
Li X M, Liu Y R. Research on the impact of charging infrastructure on the promotion of new energy vehicles [J]. China Soft Science, 2023, (1):63-72.

[60] Gryparis E, Papadopoulos P, Leligou H C, et al. Electricity demand and carbon emission in power generation under high penetration of electric vehicles. A European Union perspective [J]. Energy Reports, 2020,6:475-486.

[61] 刘海英,韩鹏程,张 瑜.电力供给清洁化和能源消费电气化的耦合协调度及其对碳减排影响 [J]. 生态经济, 2025,41(3):33-42.
Liu H Y, Han P C, Zhang Y. The coupling coordination degree of clean power supply and electrification of energy consumption and its impact on carbon emission reduction [J]. Ecological Economy, 2025,41(3):33-42.

[62] 魏夕凯,谭效时,阮嘉桐,等.2005~2021 年区域和省级电网碳排放因子研究 [J]. 气候变化研究进展, 2024,20(3):337-350.
Wei X K, Tan X S, Ruan J T, et al. Research on carbon emission factors of regional and provincial power grids from 2005 to 2021 [J]. Advances in Climate Change Research, 2024,20(3):337-350.

作者简介：杨文卓(2000-),男,湖北襄阳人,福建师范大学硕士研究生,主要从事环境经济地理研究.发表论文 2 篇.1902857342@qq.com.