

县域干线公路网货车碳排放时空演变特性分析

张书源¹, 张乐凯², 王思然¹

¹山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南

²中共昌邑市委党校, 山东 昌邑

收稿日期: 2025年8月23日; 录用日期: 2025年9月16日; 发布日期: 2025年9月25日

摘要

本研究以山东省为实证区域, 基于2011~2021年公路流量调查、车辆构成及交通统计年鉴数据, 采用“自下而上”碳排放核算模型, 测算了过去十一年间山东省干线公路网的货车碳排放量。研究综合运用趋势面分析、探索性空间数据分析(ESDA)以及标准差椭圆(SDE)等方法, 从多维度系统分析了货车碳排放的时空分异规律、空间关联模式及演变趋势。研究结果表明: (1) 时序上, 山东省干线公路网货车碳排放总量总体呈“快速增长-高位波动-缓慢下降”的三阶段特征, 与经济发展阶段和减排政策调控密切相关; (2) 空间上, 碳排放呈现出显著的“东高西低”的不均衡分布格局, 高值区持续集聚于山东半岛城市群的核心交通走廊, 且空间集聚效应随时间推移不断增强; (3) 通过标准差椭圆分析发现, 排放分布重心经历了先向西南后向东北的移动轨迹, 椭圆方向性与高速路网走向基本契合, 长短轴变化揭示了碳排放空间分布的扩散与集聚趋势。本研究揭示了山东省货车碳排放的时空动态规律, 可为区域交通低碳发展规划、差异化减排政策制定以及实现“双碳”目标提供科学依据和决策支持。

关键词

干线公路网, 碳排放, 时空演变, 特性分析

Analysis of Spatiotemporal Evolution Characteristics of Truck Carbon Emissions in County-Level Highway Networks

Shuyuan Zhang¹, Lekai Zhang², Siran Wang¹

¹School of Transportation and Logistics Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan Shandong

²Party School of Changyi Municipal Committee of the Communist Party of China, Changyi Shandong

Received: August 23, 2025; accepted: September 16, 2025; published: September 25, 2025

文章引用: 张书源, 张乐凯, 王思然. 县域干线公路网货车碳排放时空演变特性分析[J]. 地理科学研究, 2025, 14(5): 925-933. DOI: 10.12677/gser.2025.145089

Abstract

This study takes Shandong Province as an empirical area and, based on highway traffic volume surveys, vehicle composition data, and transportation statistical yearbooks from 2011 to 2021, employs a bottom-up carbon emission accounting model to estimate the carbon emissions of trucks on the provincial trunk highway network over the past eleven years. The research comprehensively applies methods such as trend surface analysis, exploratory spatial data analysis (ESDA), and standard deviational ellipse (SDE) to systematically examine the spatiotemporal patterns, spatial correlation modes, and evolution trends of truck carbon emissions from multiple dimensions. The findings reveal that: (1) Temporally, the total carbon emissions from trucks on Shandong's trunk highway network generally exhibit a three-phase characteristic of "rapid growth-high fluctuation-slow decline", which is closely related to stages of economic development and the regulation of emission reduction policies; (2) Spatially, carbon emissions show a significant uneven distribution pattern of "high in the east and low in the west", with high-value areas consistently clustered along the core transportation corridors of the Shandong Peninsula urban agglomeration, and the spatial clustering effect intensifies over time; (3) Standard deviational ellipse analysis indicates that the center of emission distribution has shifted first southwestward and then northeastward, with the orientation of the ellipse generally aligning with the direction of the expressway network. Changes in the major and minor axes reveal the diffusion and clustering trends of carbon emission spatial distribution. This study uncovers the spatiotemporal dynamics of truck carbon emissions in Shandong Province, providing a scientific basis and decision-making support for regional low-carbon transportation planning, differentiated emission reduction policies, and the achievement of dual-carbon goals.

Keywords

Trunk Highway Network, Carbon Emissions, Spatiotemporal Evolution, Characteristic Analysis

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国工业化与城镇化进程的持续推进，能源消耗与二氧化碳排放问题日益严峻。为实现“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的重大战略决策，推动重点领域绿色低碳转型已成为全社会共识。交通运输行业是化石能源消耗和温室气体排放的主要来源之一，其碳排放量仍处于快速增长阶段，减排潜力巨大，是实现“双碳”目标的关键环节[1]。在公路交通系统中，货车虽占机动车保有量的比例不高，但其能耗与排放贡献却远高于客运车辆，是公路碳排放的绝对主体。干线公路网作为货物长途运输的主动脉，承载了绝大部分的货车交通流[2]。精准识别与科学分析干线公路网上货车碳排放的时空动态，对于有效管控交通碳排放、制定差异化减排政策具有重要的理论和现实意义[3]。山东省作为我国的经济大省、工业大省和交通强省，拥有密集的干线公路网络，其路网规模和货运强度均位居全国前列。同时，山东也是国家“双碳”战略的重点实施区域，面临着巨大的减排压力。然而，现有研究多集中于国家或城市层面的交通碳排放核算，或侧重于高速交通与旅游经济等领域的耦合关系探讨[4][5]。针对省级尺度——尤其是像山东这样内部差异显著的省份——其干线公路货运碳排放的长期时空演变规律尚缺乏系统性的深入剖析。

时空分析方法是揭示环境现象空间格局和演变过程的有效工具。近年来，趋势面分析、探索性空间

数据分析(ESDA)(如 Global Moran's I 和 Getis-Ord Gi 指数)以及标准差椭圆等方法已被广泛应用于土地利用变化[6]、交通与旅游耦合[7]、区域经济差异[8]等领域的空间特征研究,有效揭示地理要素分布的中心趋势、离散程度和方向性[9],ESDA 能敏锐捕捉空间集聚与异质性格局[10],趋势面分析则能直观展示空间数据的整体变化趋势。这些方法为深入研究货车碳排放的时空演变特性提供了强有力的技术支撑。

本文在方法上突破了单一分析方法的局限,创新性地将趋势面分析、探索性空间数据分析和标准差椭圆三种空间分析方法有机整合,构建了“格局-关联-演变”的多维分析框架,实现了对货车碳排放时空特征的多角度解析;其次,在研究尺度上,首次在省域层面开展了长达 11 年的时序分析;最重要的是,本研究首次将空间方向性和分布形态演变纳入分析框架,揭示了碳排放空间分布与路网布局、经济带走向的内在关联规律,为理解交通碳排放的空间演化机制提供了新的视角和分析维度。

2. 研究方法数据来源

2.1. 干线公路县域货车车辆碳排放量测算

基于“自下而上”的方法,构建了干线公路网碳排放测算模型。研究数据来源于山东省干线公路网交通流量数据,涵盖小货车、中货车、大货车、特大货车及集装箱车五类分车型货车。该模型根据各路段的实际饱和度和路段车辆的平均速度测算油耗,在识别高能耗、高排放车辆以及确保分析结果的全面性和可信度方面具有显著优势。测算过程遵循“IPCC 碳排放核算方法”,以确保计算的科学性和标准化。

货车在干线公路的 w 路段的碳排放测算模型:

$$C_{DEaw} = \frac{F_{Ca} C_{EF}}{100} D_w N_{aw} \quad (1)$$

其中, C_{DEaw} 表示 a 类货车在 w 路段的碳排放量(kg); F_{Ca} 表示 a 类燃油车百公里油耗(L); D_w 表示 w 路段的长度(km); N_{aw} 表示 w 路段 a 类车数量;我国柴油的 C_{EF} 为 3.10、汽油的 C_{EF} 为 2.93。

考虑不同饱和度的干线公路不同路段碳排放的测算模型:

$$F_{Ca} = F_{base} \left(1 + k_1 \frac{S}{S_{crit}} + k_2 \frac{v_{opt} - v_{avg}}{v_{opt}} + k_3 S v_{avg} \right) \quad (2)$$

其中, F_{base} 是基础油耗,表示车辆在理想条件下(没有饱和度影响、最优速度下)的油耗,单位为升/百公里。 S 为饱和度,表示道路上的交通流量和容量的比值。 S_{crit} 是临界饱和度,表示道路容量达到极限的饱和度。 v_{opt} 是最优速度,表示车辆油耗最低的速度。 v_{avg} 是货车实际平均速度。 k_1 是饱和度对油耗增加的线性影响系数,它量化了交通流量饱和度的变化对车辆油耗的敏感度。 k_2 是实际行驶速度与车辆最优速度之间的偏差对油耗影响的系数,它量化了车辆偏离最优行驶速度时,油耗增加的幅度。 k_3 是饱和度与实际平均速度的交互作用对油耗影响的系数,它量化了速度和饱和度共同作用下对油耗的非线性影响。

$$C_{DE} = \sum_{\omega=1}^m \sum_{a=1}^n \left(\frac{F_{Ca} C_{EFi} D_w N_{aw}}{100} \right) \quad (3)$$

其中, C_{DE} 表示市县域的干线公路网碳排放总量和; n 表示货车类型的数量; m 表示在市县域的干线公路网范围内路段总数。

2.2. 趋势面分析

趋势面分析是把山东省县域货车碳排放量总体趋势通过可视化表达处理。本文利用 ArcGIS 软件中的趋势面分析工具来进行可视化。

$Z_i(x_i, y_i)$ 代表第 i 个县域货车碳排放量, (x_i, y_i) 是空间的平面坐标。由趋势面定义得出:

$$Z_i(x_i, y_i) = T_i(x_i, y_i) + \varepsilon_i \quad (4)$$

式中: $T_i(x_i, y_i)$ 代表趋势面的拟合值, ε_i 则为第 i 个县域的货车碳排放量真实值与趋势值二者间的误差。通过二阶多项式计算得出山东省 136 个县域货车碳排放量趋势值, 表达式为:

$$T_i(x_i, y_i) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 y + \beta_3 x^2 + \beta_4 y^2 + \beta_5 xy \quad (5)$$

式中: x, y 为研究单元的地理坐标, $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5$ 为多项式的系数。

2.3. 探索性空间数据分析

本研究不仅能够获得全局性的空间趋势, 还能识别出区域内的局部异质性, 为县域货车碳排放量提供重要的空间决策支持。

$$GMI = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (X_i - \bar{X})(X_j - \bar{X})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (6)$$

式中: GMI 为全局莫兰指数, n 表示研究对象的个数, y_i 代表第 i 个研究对象的属性值, y_j 则代表第 j 个研究对象的属性值, $\bar{y}$ 表示研究对象属性值的均值, w_{ij} 为空间权重, 本文空间关系使用的是邻近标准。

$$Z(GMI) = \frac{GMI - E(GMI)}{\sqrt{Var(GMI)}} \quad (7)$$

$$E(GMI) = -\frac{1}{n-1} \quad (8)$$

$$Var(GMI) = \frac{1/2n^2(n-1) \sum_{i \neq j} (w_{ij} + w_{ji})^2 - n(n-1) \sum_k \left(\sum_j w_{kj} + \sum_i w_{ki} \right)^2 - 2 \left(\sum_{i \neq j} w_{ij} \right)^2}{(n+1)(n-1)^2 \left(\sum_{i \neq j} w_{ij} \right)^2} \quad (9)$$

2.4. 标准差椭圆

标准差椭圆是空间统计学中一种经典的分析方法, 用于精确描述地理要素在空间上的整体分布特征。公式为:

平均中心坐标:

$$\bar{X}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \bar{Y}_w = \frac{\sum_{i=1}^n w_i y_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (10)$$

方位角:

$$\tan \theta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2 \right) + \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 - \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{y}_i^2 \right)^2 + 4 \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i^2 \tilde{y}_i^2}}{2 \sum_{i=1}^n w_i^2 \tilde{x}_i \tilde{y}_i} \quad (11)$$

X 轴的标准差:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \cos \theta - w_i \tilde{y}_i \sin \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \tag{12}$$

Y 轴的标准差:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (w_i \tilde{x}_i \sin \theta - w_i \tilde{y}_i \cos \theta)^2}{\sum_{i=1}^n w_i^2}} \tag{13}$$

式中: (x_i, y_i) 为研究对象的空间坐标; w_i 为权重; $(\bar{x}_w, \bar{y}_w)$ 是研究对象的加权平均中心; θ 为方位角; $\tilde{x}_i, \tilde{y}_i$ 分别表示每个县域货车碳排放量加权平均中心的坐标偏差; σ_x, σ_y 分表示椭圆 X 轴和 Y 轴的标准差。

3. 实例分析

3.1. 全局趋势面分析

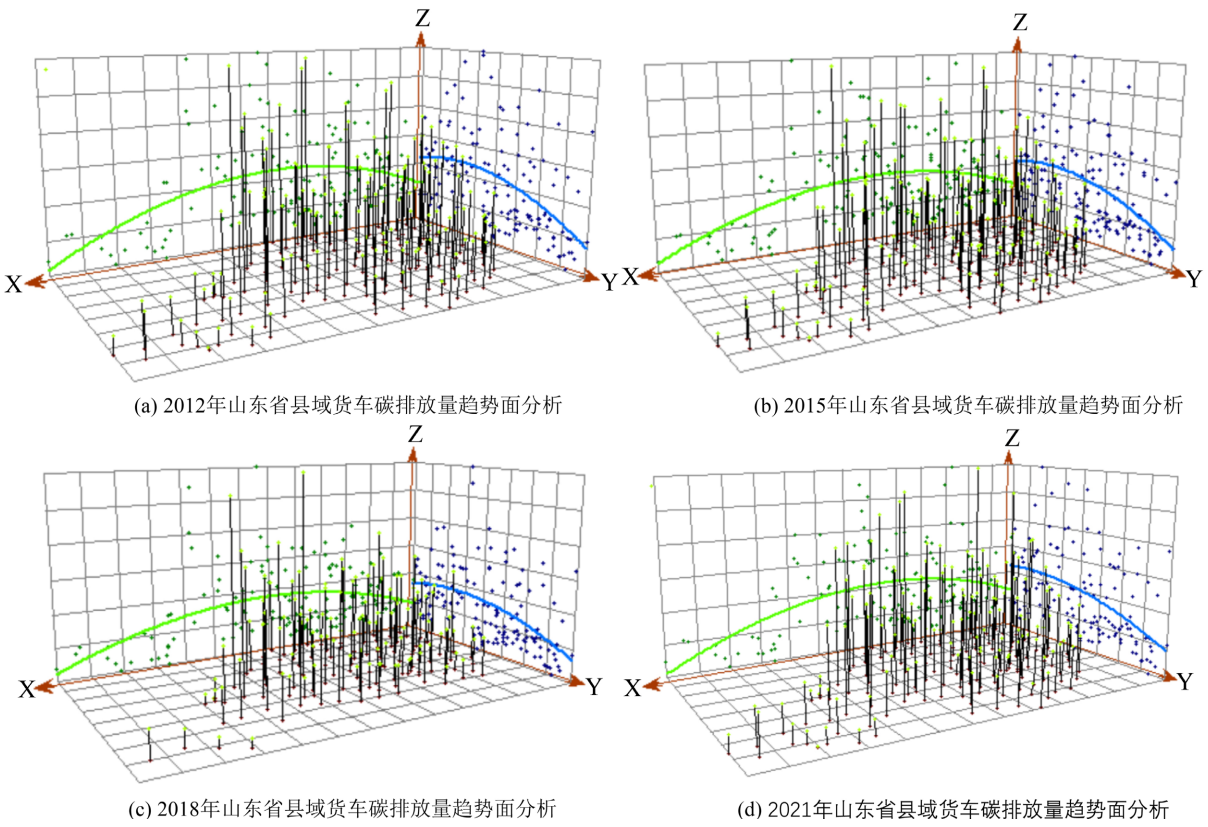


Figure 1. Trend surface analysis of county-level truck carbon emissions from 2011 to 2021
图 1. 2011~2021 年县域货车碳排放量趋势面分析

由于山东省 136 个区县间的县域货车碳排放量差异较为显著, 有必要对其进行趋势面分析。基于 ArcGIS 趋势面工具, 为便于研究, 选取 2012 年、2015 年、2018 年、2021 年为研究节点, 将山东省 136

个县域货车碳排放量属性值转化生成三维空间拟合可视化趋势面图。其中，Z 轴表示县域货车碳排放量属性值，X 轴和 Y 轴箭头方向分别表示正东和正北方向，见图 1。

趋势面清晰地揭示了两个核心特征：

(1) 显著的东西空间分异。所有年份的趋势面均呈现出由西向东陡然抬升的鲜明态势，形成了稳定的“东高西低”格局。这表明山东省东部沿海和经济发达地区的货车碳排放量始终显著高于西部内陆地区，空间不均衡性非常突出。

(2) 动态的时序演变过程。趋势面的形态和高度在十一年间发生了明显变化。

2012 年至 2015 年，趋势面整体快速抬升，尤其是东部高值区增长更为剧烈，反映出碳排放处于快速增长阶段。

2015 年至 2018 年，趋势面在高位保持波动稳定，东西差异格局固化，表明排放进入高位平台期。

2018 年至 2021 年，整个趋势面，特别是东部地区，出现轻微下沉与“平台化”趋势，暗示排放量开始进入缓慢下降通道，这可能与减排政策的生效和运输结构的优化有关。

综上所述，趋势面分析从宏观尺度表明，山东省货车碳排放不仅存在巨大的东西区域差异，其整体排放水平也先后经历了增长、趋稳和初步下降三个演变阶段，为理解碳排放的时空规律提供了直观的全局视角。

3.2. 总体空间关联特征

本文通过 ArcGIS 软件中的探索性空间数据分析(ESDA)工具，从全局角度分析了山东省县域货车碳排放量的空间依赖性和异质性。根据表 1，山东省县域货车碳排放量的全局 Moran's I 均为正值，且 2011~2021 年间的全局 Moran's I 值均通过了 1% ($p < 0.01$)的显著性水平检验。结果表明，研究期间该地区的县域货车碳排放量具有显著的空间依赖性和溢出效应，高协调区县相邻并相互受益。

Table 1. Global Moran's I index of county-level truck carbon emissions in Shandong Province from 2011 to 2021
表 1. 2011~2021 年山东省县域货车碳排放量全局 Moran's I 值

年份	Moran's I 值	Z 得分	p 值
2011 年	0.170993	11.437504	0.00
2012 年	0.243136	12.273655	0.00
2013 年	0.241028	12.165039	0.00
2014 年	0.177845	11.844884	0.00
2015 年	0.189332	8.933774	0.00
2016 年	0.161907	10.391823	0.00
2017 年	0.211893	14.659242	0.00
2018 年	0.238434	10.089876	0.00
2019 年	0.261321	13.138966	0.00
2020 年	0.213620	11.660601	0.00
2021 年	0.204736	13.665954	0.00

3.3. 县域货车碳排放量空间方向性演化

为进一步探究山东省县域货车碳排放量的时空格局及平均中心演变特征，采用 ArcGIS 软件中标准差椭圆统计运算模块，对 2011~2021 年县域货车碳排放量的平均中心迁移轨迹进行可视化，如图 2 所示，

测算出各项统计参数，如表 2 所示。

Table 2. Temporal changes in the parameters of the standard deviational ellipse for truck carbon emissions in counties of Shandong province

表 2. 山东省县域货车碳排放量标准差椭圆参数变化

年份	长半轴/km	短半轴/km	方位角/°	扁率
2011	190.41	122.48	74.41	0.36
2012	195.67	124.48	72.98	0.36
2013	192.14	125.21	72.51	0.35
2014	190.76	123.40	74.78	0.35
2015	190.01	122.60	73.10	0.35
2016	192.99	123.16	73.93	0.36
2017	187.80	123.46	75.81	0.34
2018	190.70	124.51	74.20	0.35
2019	191.36	124.59	73.41	0.35
2020	191.27	122.36	73.59	0.36
2021	192.17	122.91	74.76	0.36

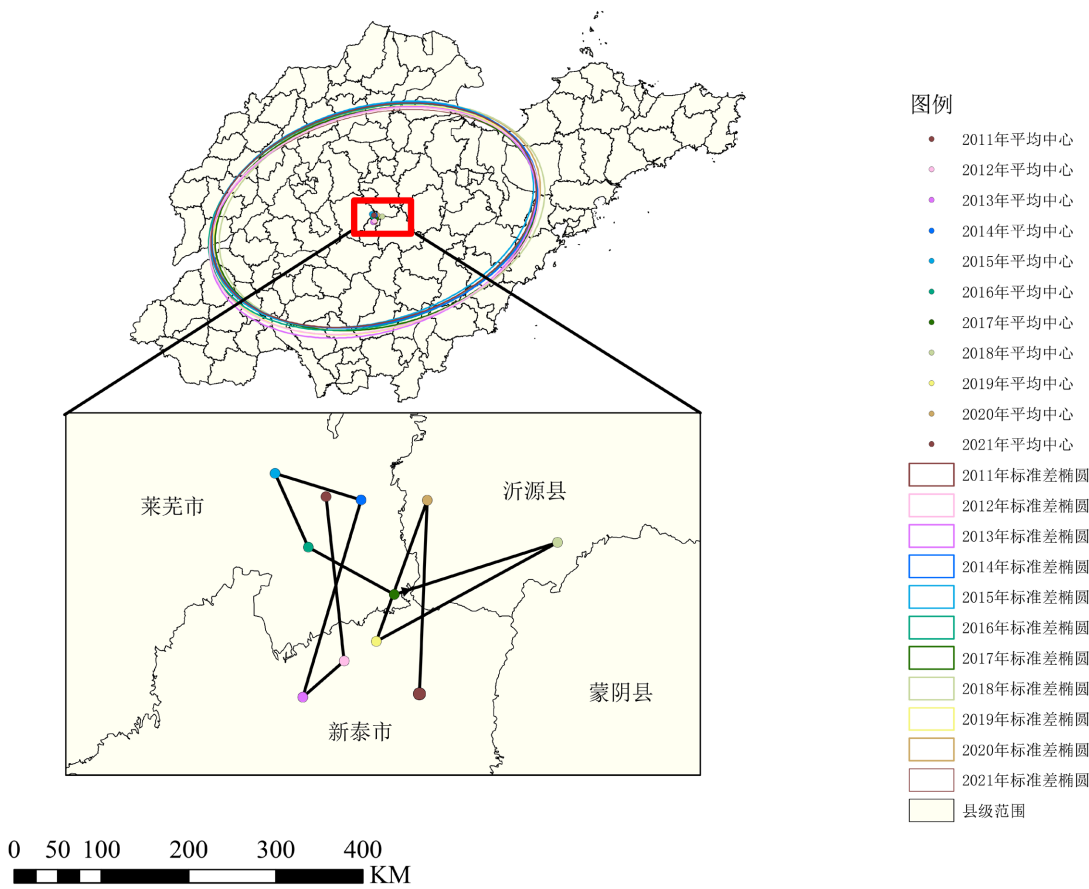


Figure 2. Migration trajectory of the overall mean center of truck carbon emissions on arterial highways in Shandong Province's counties

图 2. 山东省县域干线公路货车碳排放量总体平均中心迁移轨迹

根据表 2 可知, 县域货车碳排放量空间扩展稳定, 扩展方向一致且形状基本稳定。结合图 2 具体分析:

标准差椭圆(SDE)参数反映出碳排放空间分布的整体方向性与形态特征。十一年间, 椭圆长半轴在 187.80 km 至 195.67 km 之间波动, 短半轴长度相对稳定, 介于 122.36 km 至 125.21 km 之间; 方位角变化范围处于 72.51°与 75.81°之间, 反映出排放分布在东北—西南方向上保持较高一致性; 椭圆扁率始终维持在 0.35~0.36 水平, 说明排放分布在方向上具有稳定的偏斜特征。这些参数表明, 山东省县域货车碳排放的空间扩展幅度总体稳定, 空间分布的方向格局未发生显著改变, 其主轴方向与山东省高速公路主干网走向高度吻合, 说明高排放区域与货运主干道的空间重叠性较强。从排放重心的迁移路径来看, 椭圆平均中心呈现出“先向西南后转向东北”的移动轨迹。这一变化可能反映出早期区域发展中西部方向货运活动增强, 而后随经济结构、物流组织模式以及收费政策等调控因素的影响, 重心又逐步向东北方向回调, 体现出交通政策与区域经济互动对排放空间格局的驱动作用。

总体而言, 山东省货车碳排放的空间分布表现出明显的方向稳定性、小幅范围波动以及重心移动轨迹阶段反转等特征, 深刻揭示了路网结构、货运流量空间变动与碳排放分布之间密切的耦合关系。

4. 结论

本研究基于 2011~2021 年山东省干线公路网货车流量、车型构成及交通统计数据, 采用“自下而上”的碳排放核算模型, 结合趋势面分析、探索性空间数据分析(ESDA)和标准差椭圆(SDE)方法, 系统揭示了山东省县域尺度下货车碳排放的时空演变规律。主要结论如下:

(1) 时序演变特征显著: 山东省干线公路网货车碳排放总量在过去十一年间呈现出“快速增长—高位波动—缓慢下降”的三阶段变化趋势, 反映出碳排放与经济发展阶段、产业结构调整及减排政策实施之间的密切关联。

(2) 空间分布不均衡: 碳排放空间格局呈现明显的“东高西低”特征, 高值区持续集聚于山东半岛城市群的核心交通走廊, 空间集聚效应随时间增强, 表明经济发达区域与交通主干道对碳排放具有显著驱动作用。

(3) 空间方向性稳定中见动态变化: 标准差椭圆分析表明, 碳排放分布的主轴方向与高速公路网络走向高度一致, 椭圆形态参数总体稳定, 说明空间扩展幅度和方向性格局未发生显著改变。然而, 排放重心呈现出“先西南后东北”的移动轨迹, 反映出区域经济发展、物流组织优化及政策调控对碳排放空间格局的阶段性影响。

本研究从“格局—关联—演变”多维视角揭示了山东省干线公路网货车碳排放的时空动态特征, 深化了对交通碳排放空间演化机制的理解, 可为区域低碳交通规划、差异化减排策略制定以及“双碳”目标的实现提供科学依据和决策支持。山东省县域货车碳排放的时空演变, 是宏观经济增长周期、中观区域产业布局与物流组织优化、以及微观车辆技术减排与政策强制约束共同作用的“三维”结果。未来的减排政策制定应充分考虑这种时空异质性: 在东部高值集聚区, 应重点聚焦于运输结构优化和新能源货车的规模化替代; 而对于西部排放较低但潜力增长的地区, 则需坚持绿色招商和低碳物流网络规划, 避免重走高排放老路。本研究为实施这种差异化、精准化的时空减排策略提供了坚实的科学依据。。

参考文献

- [1] 康月, 安美清, 王智琦, 等. 黄河流域交通运输碳排放时空特征及影响因素[J/OL]. 环境科学: 1-20. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202504219>, 2025-09-22.
- [2] 吴烨, 尹应梅, 肖宇, 等. “双碳”目标下广州市交通碳排放量驱动因素和预测分析[J/OL]. 环境科学研究: 1-13. <https://doi.org/10.13198/j.issn.1001-6929.2025.08.02>, 2025-09-22.

-
- [3] 朱硕, 袁泉, 杨超. 交通运输科技领域研究现状与发展前沿知识图谱分析[J]. 交通运输研究, 2025, 11(3): 55-70.
 - [4] 杜鹏. 新时期我国交通运输业碳减排的任务与对策——“交通 7 + 1 论坛”第六十次会议[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 1-4.
 - [5] 第 60 次交通“7 + 1”论坛在北京交通大学举办[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 339.
 - [6] 张艳, 江海云, 杨维新. 渭河流域“三生”空间格局演变特征及其驱动因素[J]. 地球科学与环境学报, 2025, 47(4): 718-732.
 - [7] 郭向阳, 穆学青, 明庆忠, 等. 基于旅游系统理论的贵州省交旅融合水平时空格局与路径研究[J/OL]. 世界地理研究: 1-14. <https://link.cnki.net/urlid/31.1626.P.20250306.1801.002>, 2025-09-22.
 - [8] 管卫华, 吴小妮, 李焕兰, 等. 改革开放以来中国区域城镇化格局及演化机制[J]. 地理科学, 2025, 45(2): 265-277.
 - [9] 范元玲, 曾艳, 朱有晨, 等. 基于 GIS 与随机森林算法的湖北田歌孕育地理分布区域模型研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2025, 61(3): 418-428.
 - [10] 张新生, 刘驰, 陈章政, 等. 基于 GTWR 模型的黄河流域县域工业碳排放时空演变特征与影响因素[J/OL]. 环境科学: 1-24. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202504054>, 2025-09-22.