

基于LMDI模型的交通运输业碳排放影响因素研究

——以山东省为例

李雨润

山东交通学院交通与物流工程学院, 山东 济南

收稿日期: 2024年9月6日; 录用日期: 2024年10月29日; 发布日期: 2024年11月5日

摘要

交通运输业是全球第二大碳排放源, 为研究交通碳排放影响因素及未来发展形式, 以达到交通运输业实现碳达峰的目的。本文以山东省为例, 利用“自上而下”的方法计算山东省2014~2022年交通运输业的碳排放量, 并构建LMDI模型, 对交通运输碳排放的各项驱动因素进行分解, 确定显著性明显的影响因素。研究表明: 2014~2022年山东交通碳排放量受疫情影响呈先增后减的趋势, 其中汽油、柴油能源消耗量占比分别为10%和43%; 能源结构、能源强度、产业结构对山东省交通运输业碳排放的增加起抑制作用, 经济产出、人口规模对山东省交通运输业碳排放的增加起促进作用; 为实现碳达峰目标, 山东省需要采取积极措施以降低交通运输业的碳排放量。

关键词

交通碳排放量, 影响因素, 碳达峰, LMDI模型

Research on the Influencing Factors of Carbon Emission in the Transportation Industry Based on LMDI Model

—Taking Shandong Province as an Example

Yurun Li

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

Received: Sep. 6th, 2024; accepted: Oct. 29th, 2024; published: Nov. 5th, 2024

文章引用: 李雨润. 基于 LMDI 模型的交通运输业碳排放影响因素研究[J]. 交通技术, 2024, 13(6): 379-387.
DOI: 10.12677/ojtt.2024.136041

Abstract

The transportation industry is the second largest source of carbon emissions in the world, and the research on the influencing factors and future development forms of transportation carbon emissions is to achieve the goal of carbon peak in the transportation industry. Taking Shandong Province as an example, this paper uses the “top-down” method to calculate the carbon emissions of the transportation industry in Shandong Province from 2014 to 2022, and constructs an LMDI model to decompose the driving factors of transportation carbon emissions and identify significant influencing factors. The results show that from 2014 to 2022, the carbon emissions of Shandong’s transportation will increase first and then decrease due to the impact of the epidemic, of which gasoline and diesel energy consumption will account for 10% and 43% respectively. Energy structure, energy intensity and industrial structure inhibit the increase of carbon emissions of the transportation industry in Shandong Province, and economic output and population size play a role in promoting the increase of carbon emissions of the transportation industry in Shandong Province. To achieve the carbon peak goal, Shandong Province needs to take proactive measures to reduce carbon emissions from the transportation sector.

Keywords

Transportation Carbon Emissions, Influencing Factors, Carbon Peaking, LMDI Model

Copyright © 2024 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

交通运输业在全球与能源相关的温室气体(GHG)排放中占据很大比重, 根据国际能源署的数据, 全球 GHG 排放总量的近 1/4 来自交通运输业。中国交通运输业正处于高速发展阶段, 被认为是未来几十年能源消耗和碳排放增加的主要影响因素。因此, 在保证交通运输业发展的同时, 探寻交通运输业碳排放影响因素, 对推动交通领域碳排放实现碳达峰具有重要意义。

计算 CO₂ 排放量是研究碳排放的基础, IPCC 提供了“自上而下”和“自下而上”两种计算碳排放的方法, 其中, “自上而下”是通过收集各种燃料的消耗数据计算 CO₂ 排放量[1]; “自下而上”法是以收集不同运输工具的保有量、行驶总里程等数据计算 CO₂ 排放量[2]。其中, “自上而下”法模型简洁, 数据主要来自于统计年鉴; 而“自下而上”法虽然模型精度高, 但其所依赖的数据收集难度大, 且不同车型、不同燃料类型及不同地理位置均影响运输工具的碳排放系数, 为计算山东省交通运输业碳排放实际排放量, 本文选用“自上而下”法计算碳排放量。

识别交通运输业碳排放影响因素对于碳减排具有重要意义。国内外学者主要从碳排放影响因素分析进行研究。其中, 在识别碳排放影响因素中, 最常用的是分解分析法与回归分析法。分解分析法可以将研究对象的变化量以乘积的形式分解到若干个影响因素中, 从而判断各因素对研究对象的贡献程度。结构分解法(SDA)和指数分解法(IDA)是较为常用的两种方法[3]。根据算法的不同, IDA 又分为: 拉式分解法和迪式分解法[4], 在众多方法中, 对数平均权重法(LMDI)具有不产生残差项的优点, 被广泛应用到研究中去。Lin 等人通过 LMDI 方法对交通运输业的 CO₂ 排放进行了研究, 发现人口规模和收入水平是导致碳排放增加的直接因素, 而交通运输结构则抑制了碳排放。Xu 等人在研究交通运输部门的碳排放时纳

入了技术发展相关指标, 结果表明技术水平的提高是减少碳排放增长的关键因素。Zhang 等[5]人分解了 2000~2015 年我国多个地区交通碳排放的驱动因素, 也发现了相似的结论, 人均收入和人口规模是造成 CO₂ 排放量增长的关键。Li 等[6]人利用 LMDI 分解法分析了我国交通 CO₂ 排放的影响因素, 得到了相同的结论。刘慧等[7]人运用 LMDI 模型发现经济发展是长三角地区碳排放量增加的主要因素。黄奕等[8]人运用 LMDI 分解方法对碳排放影响因素及其作用进行了探讨, 结果发现济发展水平、能耗强度、行业比重、人口密度、碳排放强度和能源结构对全国交通运输业碳排放的累积影响依次递减。

为对道路交通运输系统碳排放有更清晰的认识, 本文在碳排放测算中采用“自上而下”的计算方法, 选取山东省 2014~2022 年统计年鉴中交通运输业、仓储业和邮政业的数据来代替交通运输业进行计算分析, 利用 LMDI 模型把能源结构、能源强度、产业结构、经济产出、人口规模 5 个变量作为影响山东省交通碳排放的主要驱动因素, 进而分析各个驱动因素对碳排放的影响程度。据此提出合理化对策建议, 为实现山东省交通运输业的低碳发展, 实现双碳的目标提供参考。

2. 碳排放的研究方法与数据来源

由于区域交通碳排放量难以被精准测算, 并且结合已有的研究成果, 本研究采用 IPCC2006 中“自上而下”的计算方法, 根据山东省交通运输业能源消耗量和碳排放系数估算其二氧化碳排放量。

2.1. 碳排放计算依据

准确计算交通运输业 CO₂ 排放是一项重要任务, 是合理分析碳排放影响因素的重要依据, 是做好碳达峰碳中和工作的重要基础。统计数据并未对交通运输业进行精确的界定, 因此, 选取 2014~2022 年统计年鉴中交通运输业、仓储业和邮政业的数据来代表交通运输业进行分析。估算公式如下:

$$C = \sum_{i=1} C_i = \sum_{i=1} E_i \theta_i \delta_i O_i IN \quad (1)$$

其中, i 为能源种类, C 为碳排放总量, C_i 为交通运输业第 i 种能源的碳排放量, E_i 为交通运输业第 i 种能源的消耗量, θ_i 为第 i 种能源标准煤折合系数, δ_i 为第 i 种能源的碳排放系数, O_i 为 i 种能源的碳氧化率, IN 表示碳与二氧化碳之间的转化系数。 θ_i 、 δ_i 的具体数据来源于《国家温室气体排放清单指南》, 见表 1 ($IN = 44/12$)。

Table 1. Energy carbon emission coefficient

表 1. 能源碳排放系数

能源种类	折标准煤系数	碳排放系数	碳氧化率
原煤	0.7143	0.7599	0.94
原油	1.4286	0.5854	
汽油	1.4714	0.5854	0.98
煤油	1.4714	0.5714	0.98
柴油	1.4571	0.5921	0.98
燃料油	1.4286	0.6185	0.98
天然气	1.33	0.4483	0.99
电力	0.1229	2.2132	1

2.2. 碳排放计算结果

如表 2 所示, 2014~2019 年, 交通能源消费碳排放总量总体呈上升趋势, 各年份增速波动较大。受疫情影响, 2019~2020 年碳排放总量呈下降趋势, 后又呈增长趋势。由表可看出, 柴油碳排放量增

长最快, 由 2014 年的 833.1111 万吨增长至 2019 年的 930.491 万吨, 自 2014 年, 柴油消费碳排放量一直占据主导地位; 原煤消费碳排放量呈下降趋势; 天然气、电力消费碳排放量呈上升趋势, 增速波动较小; 汽油、煤油消费碳排放量呈上升趋势, 增速波动较大; 燃料油消费碳排放量整体呈下降趋势, 这与轨道交通高速发展有必然的联系; 虽总交通碳排放量均呈下降趋势, 但汽油、柴油碳排放量仍占主体低位。

Table 2. Carbon emissions from transportation industry in Shandong Province (unit: 10,000 tons)

表 2. 山东省交通运输业碳排放量(单位: 万吨)

年份	原煤(万吨)	汽油(万吨)	煤油(万吨)	柴油(万吨)	燃料费(万吨)	天然气(亿立方米)	电力(亿千瓦时)	总量
2022	27.2130423	442.0329123	325.1287492	826.238493	100.3478392	23.3485923	153.424523	1897.734151
2021	26.3975361	446.7806402	319.4189467	815.3211236	94.29839593	21.21060619	153.8898233	1877.317072
2020	26.58461998	418.9072932	312.331065	783.4211236	97.15592308	19.26269337	144.8140139	1802.476732
2019	28.09999945	427.4970113	372.3149719	930.4911236	511.8466131	15.86466769	122.9423105	2409.056697
2018	30.13921379	422.5968365	354.1464717	920.6611236	503.8137867	15.47508513	109.557985	2356.390502
2017	30.13921379	402.3619972	378.9695333	954.3411236	502.8612777	13.31073756	99.92366426	2381.907547
2016	49.40885389	373.9409836	354.1774232	861.4511236	388.2109384	12.66143328	89.40170939	2129.252465
2015	48.28635058	352.8414075	301.5290096	846.8711236	366.2714799	10.8650248	80.63507591	2007.299472
2014	48.28635058	328.3405337	300.33778374	833.1111236	669.296359	7.402068689	72.25740568	1969.031625

3. 基于 LMDI 的碳排放影响因素模型

根据山东省交通运输业实际发展情况, 结合其他研究者关于区域交通运输碳排放影响因素的研究成果, 并根据数据的可得性, 利用 LMDI 因素分解方法, 从宏观层面上, 选取能源种类、各类交通能源消耗量、碳排放量以及总交通能源消耗量、交通运输量增加值、第三产业量增加值、人口数量为影响因素, 构建 LMDI 模型, 对山东省交通业碳排放影响因素进行分解。

3.1. 构建 LMDI 模型

碳排放影响因素研究是从经济发展、产业结构、能源结构、技术水平等方面, 用定量方法分析碳排放量变化的原因。指数分解分析是广泛采用的方法, 其实质是将碳排放或能源消费表示为多个因素指标的乘积, 然后根据不同的权重确定方法进行分解, 以确定各指标对碳排放量增量的贡献大小。指数分解法的基本形式如下:

$$C = \sum_i v_i = \sum_i X_{1i} X_{2i} X_{3i} \cdots X_{ni} \quad (2)$$

其中, C 为研究对象, x 为分解出来的对 C 有影响的因素, i 代表不同产业部门、能源种类或地域等。碳排放与影响因素的关系最初是 Yoichi Kaya 在 IPCC 研讨会上提出的 Kaya 恒等式, 能够量化反映能源消费碳排放与能源、经济和人口的关系。其原始形式如下:

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} \times \frac{E}{GDP} \times \frac{GDP}{P} \times P \quad (3)$$

其中, CO_2 表示二氧化碳排放量, E 示能源消耗量, GDP 为国内生产总值, P 代表人口数量。通过因式分解, 将 CO_2 展开为能源结构碳强度(CO_2/E)、单位 GDP 能耗(E/GDP)、人均 GDP(GDP/P)以及人口规模(P)这 4 个因素, 从而将 CO_2 排放与能源消耗量、国内生产总值、人口这 3 个因素进行关联, 为分析 4 类因

素对 CO₂ 的影响提供了基础，在碳排放领域被广泛使用。

研究发现能源消费碳排放还与产业结构、能源效率等因素密切相关，近年来采用指数分解法分析碳排放时均引入更多的变量，即扩展的 Kaya 恒等式。在原始 Kaya 恒等式的基础上，对可能影响山东省碳排放的驱动因素进一步分解。具体表达式如下式所示：

$$CE = \sum_{i=1}^n \frac{CE_i}{EC_i} \frac{EC_i}{EC} \frac{EC}{GDP_{tr}} \frac{GDP_{tr}}{GDP_3} \frac{GDP_3}{PO} PO \quad (4)$$

其中， i 表示交通能源种类； CE_i 表示 i 类交通能源的碳排放量； EC_i 表示 i 类交通能源消耗量； EC 表示交通能源总消耗量； GDP_{tr} 表示交通运输业增加值； GDP_3 表示第三产业增加值； PO 表示地区人口数量。为明确各类因素对碳排放变化的影响，令：

$$a_i = \frac{CE_i}{EC_i}, \quad b_i = \frac{EC_i}{EC}, \quad c = \frac{EC}{GDP_{tr}}, \quad d = \frac{GDP_{tr}}{GDP_3}, \quad e = \frac{GDP_3}{PO} \quad (5)$$

其中， a_i 表示 i 类交通能源碳排放系数，为能源碳排放强度因素； b_i 表示 i 类能源在交通能源消耗中所占份额，为能源结构因素； c 表示交通运输业单位增加值能耗，为能源强度因素； d 表示交通运输业产值占第三产业产值的比重，为产业结构因素； e 表示人均第三产业增加值，为经济产出因素； f 为地区人口数量，为人口规模因素。公式进一步可以表示为：

$$CE = \sum_{i=1}^n a_i \times b_i \times c \times d \times e \times f \quad (6)$$

交通运输业碳排放变化分解为能源碳排放强度、能源结构、能源强度、产业结构、经济产出及人口规模等 6 种驱动因素定量影响之和，为对碳排放变化进行合理分解，消除分解余量，更好地表示各指标的两期均值采 Ang 和 Choi 提出的 LMDI 算法，具体表达式如下：

$$\Delta TCE = CE^t - CE^1 = \Delta CE_a + \Delta CE_b + \Delta CE_c + \Delta CE_d + \Delta CE_e + \Delta CE_f \quad (7)$$

$$\Delta CE_a = \sum_{i=1}^n \frac{CE_i^t - CE_i^1}{\ln CE_i^t - \ln CE_i^1} \ln \left(\frac{a_i^t}{a_i^1} \right) \quad (8)$$

$$\Delta CE_b = \sum_{i=1}^n \frac{CE_i^t - CE_i^1}{\ln CE_i^t - \ln CE_i^1} \ln \left(\frac{b_i^t}{b_i^1} \right) \quad (9)$$

$$\Delta CE_c = \sum_{i=1}^n \frac{CE_i^t - CE_i^1}{\ln CE_i^t - \ln CE_i^1} \ln \left(\frac{c^t}{c^1} \right) \quad (10)$$

$$\Delta CE_d = \sum_{i=1}^n \frac{CE_i^t - CE_i^1}{\ln CE_i^t - \ln CE_i^1} \ln \left(\frac{d^t}{d^1} \right) \quad (11)$$

$$\Delta CE_e = \sum_{i=1}^n \frac{CE_i^t - CE_i^1}{\ln CE_i^t - \ln CE_i^1} \ln \left(\frac{e^t}{e^1} \right) \quad (12)$$

其中， t 表示时期， CE^t 为 t 期碳排放总量， CE^1 为初期(基准期)碳排放总量， ΔCE_a 、 ΔCE_b 、 ΔCE_c 、 ΔCE_d 、 ΔCE_e 及效应及人口规模效应；此处考虑到各类交通能源碳排放系数为固定值，碳排放效应可忽略，即 $\Delta CE_a = 0$ 。

3.2. 数据来源

结合数据的可获得性和全面性，本文以山东省研究对象，碳排放量数据来自中国碳核算数据库 (CEADS) 提供的分行业碳排放数据。此数据库采取了政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 的排放核算方法，

根据更新的排放系数以及最新的能源消耗数据清单,以统一的格式核算了山东省的碳排放量,主要包括47个社会经济部门燃烧的17种化石燃料的排放(与能源有关的排放)和与过程有关的排放。此数据与本文研究较为契合,故直接采用此碳排放数据进行碳排放分解研究。此外,本文能源消费数据来源于2014~2022年《中国能源统计年鉴》、2014~2022年《山东统计年鉴》。折标煤系数来源于《综合能耗计算通则》(GB/T2589-2008),碳排放系数及氧化率来源于《省级温室气体清单编制指南》。各区域GDP及人口数据均来源于各地统计年鉴。下表3为山东省交通运输业各种数据统计表。

Table 3. Statistical table of various data of transportation industry in Shandong Province

表 3. 山东省交通运输业各种数据统计表

年份	交通碳排放总量(万吨)	交通运输业生产总值(亿元)	第三产业生产总值(亿元)	人口(万人)
2022	1897.734151	4911.01	46122.33	10163
2021	1877.317072	4344.65	44011.65	10170
2020	1802.476732	3553.15	39153.05	10165
2019	2409.056697	3636.66	37640.17	10106
2018	2356.390502	3384.94	37877.43	10077
2017	2381.907547	3268.01	34858.6	10033
2016	2129.252465	2725.41	31751.7	9973
2015	2007.299472	2503.65	28537.35	9866
2014	1969.031625	2400.43	26894.24	9808

4. 山东省交通碳排放量变化结构分析

根据上述得出的交通运输业碳排放总量以及数据统计表中的数据,利用LMDI模型,对山东省2014~2022年交通运输业碳排放量测算结果进行分解,从能源结构、能源强度、产业结构、经济产出及人口规模五种驱动因素入手,得出各因素对碳排放变化产生的累计影响效应以及单年效应,深入分析各因素对交通运输业碳排放量影响。

4.1. 计算结果

各驱动因素对相对基准年碳排放变化的累积效应和相对上一年碳排放变化的单年效应。如下表4、表5所示。

Table 4. Cumulative effect of driving factors of transportation carbon emission change in Shandong Province (10^4 tons)

表 4. 山东省交通碳排放变化驱动因素累计效应(10^4 吨)

年份	能源结构	能源强度	产业结构	经济产出	人口规模
2014~2015	703.1271165	107.842179	-51.2797564	185.700015	11.6897673
2014~2016	840.7465506	161.371262	-97.6053663	383.894882	38.0499868
2014~2017	1088.443463	317.8160578	87.95453445	596.009736	53.3044029
2014~2018	1042.159039	426.6195989	-15.8499871	762.415674	62.4478544
2014~2019	1177.529599	544.8187003	154.1297537	751.181273	69.4334616
2014~2020	799.0688181	453.6534695	315.3448433	712.168254	70.9472177
2014~2021	627.1526626	860.5806619	-244.498857	944.839371	73.3340008
2014~2022	667.1443446	764.9453464	-200.934252	972.342231	72.3342453

Table 5. The effect of annual changes in driving factors of transportation carbon emissions in Shandong Province (10⁴ tons)
表 5. 山东省交通碳排放驱动因素逐年变化效应(10⁴ 吨)

年份	能源结构	能源强度	产业结构	经济产出	人口规模
2014~2015	703.1271165	107.842179	-51.2797564	185.7000151	11.68976733
2015~2016	137.6194341	53.52908305	-45.2062403	194.4322298	26.25608667
2016~2017	247.6969123	156.4447958	198.7536875	196.8308865	13.51530375
2017~2018	-46.2844243	108.8035411	-113.482557	186.4019008	10.36715223
2018~2019	135.3705603	118.1991014	185.8367426	-21.8184183	6.846972067
2019~2020	-378.460780	-91.1652308	202.1813812	70.2311556	12.17272892
2020~2021	-171.916155	406.9271924	-541.757796	208.7662753	14.90466841
2021~2022	-134.323454	386.3425324	-341.535344	248.4535644	15.04533363

截至 2022 年, 能源结构因素、能源强度因素、经济产出因素、人口规模因素的累积效应都对山东省交通碳排放起正向驱动作用, 产业结构因素累积效应起负向驱动作用。相比基准年, 各驱动因素累积效应依次为 667.144 万吨、764.945 万吨、972.342 万吨、72.334 万吨、-200.934 万吨。

4.2. 交通碳排放的 LMDI 分析结果

(1) 能源结构效应

从分解结果可以看出, 能源结构的年度效应是对山东省交通运输业碳排放呈现正贡献率的“倒 u 型”变化过程, 即对碳排放变动起着正向驱动作用, 由此可以看出山东省交通运输业的能源消费结构存在一些问题。一方面, 从能源消费结构来看, 作为交通工具主要动力来源的汽油、柴油, 其碳排放系数相对较高, 在整个碳排放中所占比例相当大。从能源结构的单年效应可以看出, 单年效应逐渐下降, 表明能源结构处于不断优化之中, 体现了山东省近年来对交通绿色、低碳、可持续发展的重视和努力, 不断推动交通运输“新旧转换”, 积极开展“交通运输低碳转型工程”, 成效显著。

(2) 能源强度效应

交通运输业能源强度是反映能源的使用和产出状况的一个重要指标。从总的趋势来看, 山东省交通运输业在能源利用上变得更加高效, 单位产出的能源消耗量下降, 交通能源消费与产出之间关系有所改善, 从 2014 年的 0.82 吨/万元下降到 2022 年的 0.56 吨/万元。其中, 2019~2020 年, 山东交通碳排放量下降了 606.58 万吨, 能源强度因素贡献的碳排放量为-91.165 万吨, 负向贡献量较大, 表明能源强度是交通碳排放减少的重要因素。从山东省的实际情况来看, 虽然在部分年份能源强度对碳排放增长起到了一定的负效应, 但总体上来看, 其累积效应仍然为正, 表明在优化能源强度方面, 仍存在较大的改善空间。为此, 山东省应继续加强交通运输业的技术创新, 推动交通运输工具的能效提升, 提升能源利用效率, 减少能源消耗。同时, 通过推广绿色、低碳的交通运输方式, 如公共交通、共享出行等, 进一步降低能源强度, 减少碳排放。

(3) 产业结构效应

产业结构效应在山东省交通碳排放中呈现出负向驱动作用, 是推动山东省交通行业减少能源消费碳排放的最主要因素。从累计效应看, 产业结构效应使交通部门的碳排放量减少了 200.93 万吨。这一结果的出现, 可能与山东省推动经济结构调整、优化产业结构布局的政策措施有关。近年来, 山东省一直聚力于高质量发展, 产业结构持续优化, 第三产业比重不断提升。具体来看, 从 2014 年到 2022 年, 山东省三次产业结构从 8.3:49.7:42.0 调整到 7.2:40:52.8。产业结构对碳排放量影响的大小, 主要由交通运输业增加值与第三产业增加值的增速决定[9]。如下图 1 所示, 产业结构对碳排放的作用在第三产业增加值增速

大于交通运输业增加值增速的情况下为负的驱动效应，反之则为正的驱动效应。尽管产业结构效应对交通碳排放起到了负向驱动作用，但能源结构单年效应值波动较大，这反映出产业结构调整过程的复杂性和艰巨性，在产业结构调整的过程中要时刻关注其合理性，以确保其对碳排放的负向驱动作用能够持续。

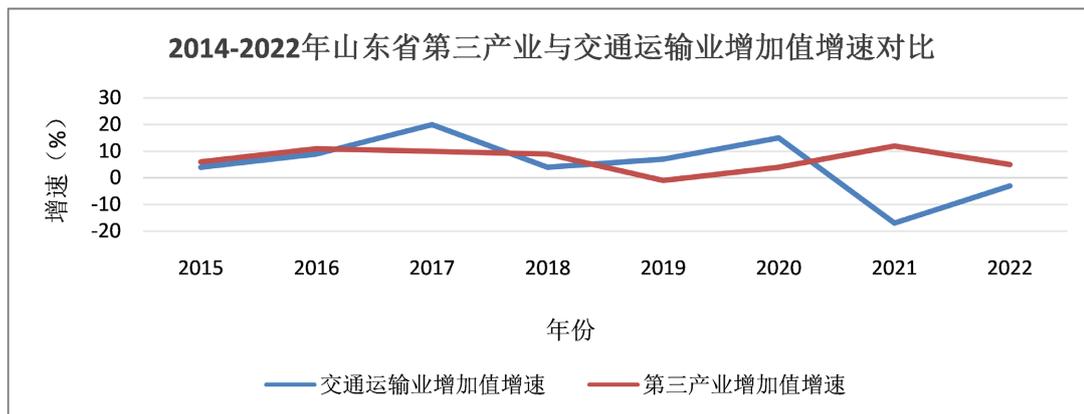


Figure 1. Comparison of the growth rate of added value of the tertiary industry and the transportation industry
图 1. 第三产业与交通运输业增加值增速对比

(4) 经济产出效应

山东省的交通碳排放增长主要受到经济产出这一重要因素的影响。从分解结果来看，经济产出因素对碳排放的年度效应呈现持续上升的趋势，呈现出显著的正向驱动作用，与交通碳排放水平呈现显著的正向关联。2014~2022年，山东省人均GDP从5.19万元增长至8.6万元，增长了65.7%。在此期间，对经济产出贡献的碳排放量从185.7万吨增长33.8%至248.45万吨。这一系列增长趋势揭示了交通碳排放与经济活动之间的紧密联系。近年来，山东省各行业得到了蓬勃发展，经济持续稳健增长，GDP排名一直位居前列，展现出强大的综合实力。在经济快速增长的背景下，山东省的交通运输需求持续增加，特别是货物运输和旅客运输的需求不断增长，从而导致碳排放量不断攀升。与此同时，人均国内生产总值的逐年上升，居民可支配收入越来越多，居民对消费和出行需求也随之增加，汽车保有量逐年上升，进一步推动了交通碳排放的增长。

(5) 人口规模效应

从分解结果可以看出，人口规模效应一直起着正向的驱动作用，说明人口规模因素在一定程度上增加了交通运输业的碳排放量，但其正向驱动效益相对于经济产而言是微弱的。从2014年到2022年，山东省常住人口从9808万人增长3.62%至10163万人，人口规模效应对交通能源碳排放的贡献值从11.69万吨上升至15.05万吨。2015~2016年人口规模的正向效应明显提高，这是因为二胎政策的全面实施，常住人口数量不断增加，这也进一步推动了交通碳排放量的增长。然而，尽管人口增速有所提高，相较于山东省经济的发展速度而言，人口规模的增长仍然相对缓慢，此外，人口老龄化的影响也不容忽视[9]。事实上，山东省作为人口大省，人口规模庞大，从长期趋势来看，人口规模效应对交通碳排放的贡献率呈现出持续增长的趋势。因此，不能忽视人口规模效应对山东省交通运输业碳排放的影响，在未来的发展中，应综合考虑人口因素，制定更加全面、科学的交通碳排放减排策略。

5. 结论及建议

本文通过“自上而下”的方法对山东省交通运输业碳排放进行测算，并利用LMDI模型对交通碳排放量的变化进行因素分解，分析了各因素对交通碳排放的动态影响，得出了一系列结论。

(1) 从碳排放量整体结果看,山东省交通运输业的碳排放量呈现出逐年增长的趋势,这与经济快速发展和交通运输业规模不断扩大密切相关,在快速发展经济的同时,交通需求不断扩大,交通碳排放量显著上升。

(2) 利用 LMDI 模型进行因素分解后,发现能源结构、能源强度、产业结构、经济产出和人口规模等因素都对交通碳排放量产生了显著影响。除产业结构外,能源结构、能源效率、经济产出、人口规模都对交通碳排的增长产生促进作用。

(3) 针对交通碳排放的核算结果、驱动因素分析,结合交通业实际情况,根据交通业转型升级要求,提出以下建议:一是研发新技术,发展新能源。提高新能源汽车的保有量,不断完善新能源汽车配套设施,助力构建新型电动出行能源基础设施。二是倡导低碳生活,优化交通运输结构。推动绿色低碳出行,鼓励公众选择公共交通、骑行、步行等绿色低碳出行方式,减少私家车出行。

基金项目

(1) 资助项目:济南市高校院所自主培养创新团队项目(20233040);

(2) 济南市“新高校 20 条”资助项目:基于车路云协同感知的交通系统智能化控制关键技术研究(202333040);

(3) 2021 年度山东省自然科学基金项目(青年基金),城市交通路网瓶颈区域动态激活判定机理及快速疏导控制方法研究,项目编号:ZR2021QF110;

(4) 山东省科学技术厅(新一代信息技术),混合增强智能“交通大脑”新架构及关键技术研究,项目编号:2021TSGC1011;

(5) 山东省科学技术厅(新一代信息技术),智慧隧道一体化安全监管平台关键技术研究及应用,项目编号:2022TSGC2096,2022-11 至 2024-11;

(6) 山东省社会科学规划研究项目(22CJJJ31),山东省交通运输领域碳达峰驱动因素耦合机理与实现路径研究;

(7) 山东省重点研发计划(软科学)重点项目(2023RZB06052)。

参考文献

- [1] Han, X., Xu, Y., Kumar, A., et al. (2018) Decoupling Analysis of Transportation Carbon Emissions and Economic Growth in China. *Environmental Progress and Sustainable Energy*, **37**, 1696-1704.
- [2] Ang, B.W. and Liu, N. (2007) Energy Decomposition Analysis: IEA Model versus Other Methods. *Energy Policy*, **35**, 1426-1432. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.04.020>
- [3] Ang, B.W. (2004) Decomposition Analysis for Policymaking in Energy. *Energy Policy*, **32**, 1131-1139. [https://doi.org/10.1016/s0301-4215\(03\)00076-4](https://doi.org/10.1016/s0301-4215(03)00076-4)
- [4] Hergoualc'h, K. and Verchot, L.V. (2014) Greenhouse Gas Emission Factors for Land Use and Land-Use Change in Southeast Asian Peatlands. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **19**, 789-807. <https://doi.org/10.1007/s11027-013-9511-x>
- [5] Zhang, K., Liu, X. and Yao, J. (2019) Identifying the Driving Forces of CO₂ Emissions of China's Transport Sector from Temporal and Spatial Decomposition Perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, **26**, 17383-17406. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05076-3>
- [6] Li, W., Li, H., Zhang, H., et al. (2016) The Analysis of CO₂ Emissions and Reduction Potential in China's Transport Sector. *Mathematical Problems in Engineering*, **2016**, 1-12.
- [7] 刘慧, 薛亮. 长三角地区交通运输碳排放影响因素研究[J]. 物流工程与管理, 2023, 45(5): 92-95.
- [8] 黄羿, 李冬梅, 李永田, 等. 交通运输业碳排放的时空变化特征及影响因素——基于全国与经济区域层面[J]. 环境保护科学, 2021, 47(4): 62-70.
- [9] 郝晴, 回晓洋, 闫桂焕, 等. 基于 LMDI 模型的山东省交通碳排放分析研究[J]. 科学与管理, 2017, 37(6): 51-56+67.