

# “一带一路”倡议背景下中国运输业的碳排放及驱动因素研究

郑 锋

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年7月20日; 录用日期: 2024年9月18日; 发布日期: 2024年10月8日

## 摘 要

在“一带一路”倡议背景下, 中国运输业促进了“一带一路”沿线国家的区域联系, 但也造成了二氧化碳的排放。为了实现“一带一路”沿线国家的绿色发展, 探究中国运输业在“一带一路”沿线国家的碳排放情况至关重要。基于IO-SDA模型, 对碳排放以及其驱动因素进行了测算与特征分析。实证结果表明, 中国运输业是“一带一路”沿线国家的碳净出口国家, 直接碳排放强度效应对中国运输业在“一带一路”沿线国家的进出口碳排放具有持续且显著的抑制作用; 贸易规模效应对进出口碳排放起到持续且显著的促进作用; 贸易结构效应随着时间推移, 对进出口运输碳排放的促进作用逐渐提高, 而投入产出结构效应对进出口运输碳排放的促进作用有逐渐减弱的趋势。最后针对中国运输业在“一带一路”沿线国家的碳排放状况提出建议, 以促进中国运输业的绿色发展。

## 关键词

中国运输业, 碳排放, IO-SDA, “一带一路”倡议

## Research on Carbon Emissions and Driving Factors of China's Transport Industry in the Context of the Belt and Road Initiative

Duo Zheng

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Jul. 20<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 18<sup>th</sup>, 2024; published: Oct. 8<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

China's transport industry promotes regional links under the Belt and Road Initiative, but it also

contributes to carbon dioxide emissions. In order to realize the green development of the “Belt and Road”, it is crucial to explore the carbon emissions of China’s transport industry in the “Belt and Road”. Based on IO-SDA model, carbon emission and its driving factors are measured and analyzed. The empirical results show that China’s transport industry is a net carbon exporter of the “Belt and Road”, and the direct carbon emission intensity effect has a sustained and significant inhibition effect on the carbon emissions of China’s transport industry in the “Belt and Road”. The scale effect of trade plays a continuous and significant role in promoting import and export carbon emissions. With the passage of time, the promoting effect of trade structure effect on import and export transport carbon emissions is gradually increased, while the promoting effect of input-output structure effect on import and export transport carbon emissions is gradually weakened. Finally, some suggestions are put forward for the carbon emission status of China’s transport industry in the “Belt and Road”, so as to promote the green development of China’s transport industry.

## Keywords

China’s Transport Industry, Carbon Emission, IO-SDA, Belt and Road Initiative

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

20 世纪以来, 随着工业革命的兴起, 人类文明开始经历飞跃式的发展, 世界经济也进入到了急速发展阶段, 但随之而来的是越来越严重的环境问题。全球温室气体排放量日益增加, 近年来温室效应问题愈发严重[1]。运输业是国民经济和社会发展的基础性、先导性和服务性行业, 是连接区域间消费和生产的关键联系, 同时也是全球能耗和排放量增长最快的领域之一[2]。2013 年, 中国政府提出了共建“丝绸之路经济带”和“21 世纪海上丝绸之路”倡议(简称“一带一路”倡议)。随着“一带一路”沿线国家交通联系的加强, 中国运输业的碳排放总量也在不断增加。

关于“一带一路”倡议下的运输碳排放, 学者们进行了广泛研究。Wang 等人(2020)采用了 Tapio 解耦模型来建立碳排放与“一带一路”沿线国家的运输业整体和区域增长之间的关系, 研究发现“一带一路”沿线国家运输碳排放强度总体呈下降趋势, 且两极化趋势明显[3]。Du 等人(2021)估算 2005-2017 年“一带一路”沿线国家的交通运输碳效率, 发现大多数“一带一路”国家的运输碳效率较低, 运输碳减排潜力巨大[4]。Zhang 等人(2023)分析了 1981~2020 年间 64 个“一带一路”沿线国家的运输-环境库兹涅茨曲线关系, 研究结果表明, 运输碳排放与经济增长之间存在 N 型关系, 且大多数“一带一路”沿线国家仍处于“爬坡”阶段[5]。

与此同时, 当前中国运输业碳排放的研究主要集中在国内能源消耗和效率对中国运输碳排放的影响, 以及不同经济情景下优化能源结构对中国运输业碳减排的影响。Li (2022)等人认为中国运输业碳排放受到能源效率和城市化的抑制, 但收入增长、私人汽车和货物周转的非线性促进效应较大[6]。Sun 等人(2022)利用三维灰色关联分析模型, 确定了影响中国运输业碳排放的五个主要因素, 即能源结构、物流规模、人口、GDP 和第三产业[7]。Jiang 等人(2022)构建中国经济“新常态”前期和后期两种情景, 运用扩展结构分解模型、投入产出法和能耗法, 研究中国经济“新常态”初期和后期中国运输行业的碳排放状况和减排效果[8]。

目前, 有关中国运输业在“一带一路”沿线国家的碳排放以及驱动因素研究比较少, 且大多数研究

主要集中于中国国内的运输业碳排放[9] [10]。因此，本文以“一带一路”沿线国家作为研究区域，对中国运输业在该区域 2006~2016 年的碳排放及驱动因素进行分析，并根据实证结果对中国运输业的绿色发展提出建议。这将有助于中国运输业制定具有区域差异的环境政策，也有利于“一带一路”倡议下中国和其他发展中国家实现可持续运输和能源战略的政策制定。

## 2. 研究方法

### 2.1. 基于 IO 模型的中国运输业碳排放计算

IO 模型广泛用于社会经济影响研究，旨在评估工业生产贸易和其他经济活动之间相互作用的社会经济后果[11]。多区域 IO 模型(如表 1 所示)以投入产出法的基本原理为基础，确保各地区各产业部门的发展满足以下基本条件。

Table 1. Multi-regional input-output model

表 1. 多区域 IO 模型

投入	产出	中间使用				最终使用			总产出		
		区域 1		...		区域 m		区域 1		...	区域 m
		部门 1	...	部门 n	...	部门 1	...	部门 n			
中间投入	部门 1										
	区域 1										
	...										
	部门 n										
	...										
	部门 1										
	区域 m										
	...										
	部门 n										
	增加值								$v_j^s$		
	总投入								$x_j^s$		

根据模型，有如下均衡方程式：

$$Z + Y = X \tag{1}$$

其中， $Z$  是中间投入矩阵， $Y$  是最终使用矩阵， $X$  是总产出矩阵。令  $A_{ij} = \frac{Z_{ij}}{X_j}$ ，其经济意义是一生产部门  $j$  的单位产出中消耗了第  $i$  个部门的产品数量。代入公式(1)可得，

$$AX + Y = X \tag{2}$$

$$X = (I - A)^{-1} Y = LY \tag{3}$$

在上式中， $A$  是直接消耗系数矩阵， $L = (I - A)^{-1}$  是列昂惕夫逆矩阵。

令各个区域的生产部门直接碳排放系数矩阵设为  $F$ ，其碳排放量的计算矩阵可通过矩阵转换得到：

$$E = \hat{F}LY \tag{4}$$

从生产侧角度，中国第  $i(i=1,2,\dots,k)$  个运输业子部门碳计算公式为：

$$E_{TP} = \hat{F}_i LY = \hat{F}_i LY_{ab} + \hat{F}_i LY_{dm} \quad (5)$$

其中， $Y_{ab}$  表示“一带一路”沿线国家(除中国以外)各个部门最终需求， $Y_{dm}$  表示中国国内各个部门最终需求。其中  $\hat{F}_i LY_{ab}$  是中国第  $i$  个运输业子部门的出口碳。 $\hat{F}_i LY_{dm}$  是中国第  $i$  个运输业子部门的国内碳排放量。

同理，中国第  $i$  个运输业子部门的消费侧运输碳可通过以下方式获得：

$$E_{TC} = FL\hat{Y}_i = F_{ab}L\hat{Y}_i + F_{dm}L\hat{Y}_i \quad (6)$$

其中， $F_{ab}$  是“一带一路”沿线国家(除中国以外)各个部门直接碳排放系数， $F_{dm}$  是中国国内各个部门直接碳排放系数。 $F_{ab}L\hat{Y}_i$  是中国第  $i$  个运输业子部门的进口碳。 $F_{dm}L\hat{Y}_i$  是第  $i$  个运输子部门的国内碳。

因为  $\hat{F}_i LY_{dm} = F_{dm}L\hat{Y}_i$ ，所以中国第  $i$  个运输业子部门对“一带一路”沿线国家的净出口运输碳量为：

$$ENCE = E_{TP} - E_{TC} = \hat{F}_i LY_{ab} + \hat{F}_i LY_{dm} - (F_{ab}L\hat{Y}_i + F_{dm}L\hat{Y}_i) = \hat{F}_i LY_{ab} - F_{ab}L\hat{Y}_i \quad (7)$$

当  $ENCE > 0$ ，说明某一“一带一路”沿线国家通过运输的方式将运输碳净转移到了中国国内，即中国替该国承担了一部分运输碳排放。当  $ENCE < 0$ ，说明中国通过运输的方式将运输碳净转移到了某一“一带一路”沿线国家，该国承担了一部分来自中国的运输碳排放。

## 2.2. 基于 IO-SDA 模型的中国运输业碳排放驱动因素分析

基于 IO-SDA 模型被广泛用于估计碳排放或能源消费变化的驱动因素[12]。SDA 的中心思想是分解其驱动因素的变化，从而在一定时间内产生累积的贡献总和。本文将影响中国与“一带一路”沿线国家贸易产生的运输碳排放的因素分解为四个方面：直接碳排放强度、投入产出结构、贸易结构和贸易规模。

对式(4)为基础进行推导， $Y$  可进一步被分解为：

$$Y = QS \quad (8)$$

其中， $Q$  为中国对“一带一路”沿线  $S$  国的贸易总额， $S = \frac{Y_i^s}{Y^s}$  表示中国第  $i$  个运输子部门对“一带一路”沿线  $S$  国的运输贸易额占其对  $S$  国贸易总额的比例。将式(4)与式(8)结合，得到：

$$E = \hat{F}L\hat{Q}\hat{S} \quad (9)$$

中国第  $i$  个运输子部门对“一带一路”沿线  $S$  国的运输碳排放的变化可以表示为：

$$\Delta E = E_{t+1} - E_t = \hat{F}_{t+1}L_{t+1}\hat{Q}_{t+1}\hat{S}_{t+1} - \hat{F}_tL_t\hat{Q}_t\hat{S}_t \quad (10)$$

其中下标  $t+1$  代表每个驱动因素在时间  $t+1$  的值，下标  $t$  表示时间  $t$  的值。按照以前的研究，分解方法采用两极分解法。

$$\begin{aligned} \Delta E = & \frac{1}{2} \left[ \Delta\hat{F}_tL_t\hat{Q}_t\hat{S}_t + \Delta\hat{F}_{t+1}L_{t+1}\hat{Q}_{t+1}\hat{S}_{t+1} \right] \\ & + \frac{1}{2} \left[ \hat{F}_{t+1}\Delta L\hat{Q}_t\hat{S}_t + \hat{F}_t\Delta L\hat{Q}_{t+1}\hat{S}_{t+1} \right] \\ & + \frac{1}{2} \left[ \hat{F}_{t+1}L_{t+1}\Delta\hat{Q}_t\hat{S}_t + \hat{F}_tL_t\Delta\hat{Q}_{t+1}\hat{S}_{t+1} \right] \\ & + \frac{1}{2} \left[ \hat{F}_{t+1}L_{t+1}\hat{Q}_{t+1}\Delta\hat{S} + \hat{F}_tL_t\hat{Q}_t\Delta\hat{S} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

将上式简化为：

$$\Delta E = f(\Delta \hat{F}) + f(\Delta L) + f(\Delta \hat{Q}) + f(\Delta \hat{S}) \quad (12)$$

其中,  $F$  表示直接碳排放系数矩阵, 与对应部门的燃料组成结构和燃烧效率有关,  $\Delta F$  反映中国运输子部门碳排放的技术水平的变化。  $L$  代表运输业的中间生产技术, 涵盖该部门生产活动所涉及的技术和流程,  $\Delta L$  反映了生产部门相对份额的变化。  $Q$  表示贸易规模,  $\Delta Q$  表示运输业的贸易总量。  $S$  表示贸易结构,  $\Delta S$  表示运输业的最终需求相对于总贸易量的比例。

### 3. 实证分析

#### 3.1. 数据来源

本文的全球多区域投入产出表来自 Eora 数据库的数据, 该数据库被广泛用于评估相关领域的生态足迹, 因为其具有 26 个部门的统一分类以及高分辨率的国家(189 个国家), 包含了绝大多数的“一带一路”沿线国家。

关于中国运输业子部门, 本文从 EXIOBASE 数据库中提取中国运输业子部门(铁路运输、陆路运输、管道运输、海上运输、内河运输、航空运输)总产出和对应碳排放等信息, 嵌套入 EORA-GMRIO 数据库中的多区域投入产出模型, 并进行测算中国各个运输子部门与“一带一路”沿线国家在进出口贸易中转移的碳排放。

#### 3.2. 中国运输业在“一带一路”沿线国家的碳排放转移分析

本文根据 IO 模型计算得到中国运输业对“一带一路”沿线国家出口贸易碳排放、进口贸易碳排放如下。

**Table 2.** China's transport sector exports carbon emissions to countries along the Belt and Road (Units: mt)

**表 2.** 中国运输业对“一带一路”沿线国家出口碳排放(单位: mt)

年份	中国运输业子部门						总量
	铁路运输	陆路运输	管道运输	海上运输	内河运输	空中运输	
2006	2.176	0.226	0.020	3.021	3.534	2.424	11.401
2007	2.591	0.309	0.026	3.889	4.528	3.342	14.684
2008	2.738	0.344	0.042	4.198	4.084	3.550	14.957
2009	2.049	0.281	0.037	3.166	3.430	2.814	11.778
2010	2.078	0.317	0.042	3.736	3.713	3.266	13.151
2011	2.312	0.388	0.052	4.201	4.403	3.670	15.026
2012	2.223	0.427	0.057	3.729	4.871	3.813	15.121
2013	1.841	0.389	0.054	3.182	4.620	3.508	13.594
2014	1.767	0.412	0.065	3.388	5.017	3.933	14.581
2015	1.530	0.403	0.067	3.304	4.406	4.071	13.779
2016	1.876	0.593	0.070	4.186	5.159	5.312	17.195

在出口碳方面(如表 2 所示), 中国运输业对“一带一路”沿线国家出口运输贸易碳排放量在 2006 年

至 2016 年间总体呈现增长的趋势。这是因为中国在这段期间加大交通基础设施的投入,极大的缩短了中国与“一带一路”地区交通来往的时间,使区域间的贸易活动更为便捷和频繁,致使区域间碳排放有所增加。2008 年全球受到金融危机的冲击,导致中国 2009 年对“一带一路”沿线国家出口运输碳排放量的下降,仅为 11.78 mt,较前一年出口运输碳排放量的 14.96 mt 下降了 21.26%,同时中国对“一带一路”沿线国家出口运输碳排放量出现最低点。2013 年“一带一路”倡议正式被提出后,中国加大了对“一带一路”沿线国家的贸易规模,出口运输碳排放量增加至 14.58 mt。2015 年由于“一带一路”沿线大部分国家经济活动受到全球经济改善迟缓、国际市场大宗商品下降等因素的影响,导致了我国出口到“一带一路”倡议下相关地区的货物量的一定程度的减少,出口运输碳排放量下降至 13.78 mt。到 2016 年开始回升,中国出口运输碳排放量为 17.19 mt,同比增长 24.75%。

内河运输和海上运输是中国运输业出口运输碳排放量的最大部门,两者共同占据出口碳排放总量的 50% 以上,这是因为中国对外贸易的货物运输方式主要采用水上运输。空中运输和铁路运输分别造成了第三、四大出口运输碳排放量,其中空中运输碳排放量的占比在 2006 年至 2016 年间逐年上升,伴随着铁路运输碳排放量的占比在这期间的逐年下降,从 2006 年占总量比重的 19.09% 下降至 2016 年的 10.91%。一方面是因为中国航班线路逐步完善,直达国际城市数量上升,加大了我国对“一带一路”沿线国家空中运输的规模。2016 年中国空中运输出口碳量为 5.31 mt,是 2006 年排放量的 2.19 倍。另一方面因为电气化的提升使得中国铁路运输的综合能耗下降,一定程度上提高铁路运输的运行效率并减少铁路运输导致的碳排放量。2016 年中国铁路出口运输碳排放量为 1.86 mt,相较于 2006 年排放量 2.18 mt 下降了 13.78%。

**Table 3.** China's transport sector imports carbon emissions to countries along the Belt and Road (Units: mt)  
**表 3.** 中国运输业对“一带一路”沿线国家进口碳排放(单位: mt)

年份	中国运输业子部门						总量
	铁路运输	陆路运输	管道运输	海上运输	内河运输	空中运输	
2006	0.475	1.243	0.046	0.570	0.029	0.595	2.958
2007	0.508	1.433	0.058	0.670	0.035	0.677	3.381
2008	0.632	1.565	0.061	0.769	0.043	0.796	3.866
2009	0.622	1.729	0.065	0.683	0.045	0.797	3.940
2010	0.732	2.134	0.065	0.893	0.054	0.990	4.869
2011	0.838	2.544	0.089	1.039	0.063	1.161	5.735
2012	0.858	2.601	0.078	1.040	0.066	1.200	5.843
2013	0.855	2.732	0.093	1.062	0.069	1.214	6.025
2014	0.849	2.662	0.079	1.052	0.069	1.222	5.933
2015	0.690	2.086	0.084	0.922	0.066	1.092	4.940
2016	0.896	3.335	0.093	1.238	0.082	1.510	7.155

在进口碳方面(如表 3 所示),中国运输业对“一带一路”沿线国家进口运输贸易碳排放量在 2006 年至 2016 年间总体呈现缓慢增长的趋势。在 2006 年至 2013 年期间,由于经济快速发展以及国内生产建设

的需要,中国进口规模不断扩大,中国对“一带一路”沿线国家进口运输碳排放量呈现持续上升的态势。其中2009年至2011年期间进口运输碳排放量增长率为45.55%,高于2006年至2008年的增长率30.66%。但是2013年至2015年期间,中国对“一带一路”沿线国家进口运输碳排放量呈现下降的趋势,2015年进口运输碳排放量仅为4.93 mt,较2014年的5.93 mt进口运输碳排放量下降了16.86%。2016年进口运输碳排放量大幅增加至7.16 mt,增长率为44.87%。

其他陆路运输是进口运输碳排放量的最大部门,占据进口碳排放总量的40%以上,且在2006年至2016年间的占比量有逐年上升的趋势。空中运输造成了第二大进口碳排放量,常年占据进口碳排放总量的20%左右。海上运输和铁路运输碳排放量的占比在2006年至2016年间逐年下降,跌幅分别为10.22%以及21.99%,但是这并不意味着两者的排放量的减少。2016年海上运输和铁路运输碳排放量分别为1.24 mt以及0.90 mt,同2006年运输碳排放量分别增长117.14%以及88.66%。

在碳平衡方面,2006年至2016年期间,中国运输业对“一带一路”沿线国家净出口运输贸易碳的变化幅度与出口运输贸易碳的变化幅度相似,且该期间的净出口运输碳排放量均为正值,表明中国运输业是“一带一路”沿线国家的碳净出口国家,承担着“一带一路”沿线国家的碳排放责任。从另一个角度而言,“一带一路”沿线国家在与中国进行运输贸易过程中成为受益者,没有被中国转移碳排放,成为所谓的“污染天堂”。

### 3.3. 中国运输业在“一带一路”沿线国家的碳排放驱动因素分析

本文根据IO-SDA模型计算得到中国运输业对“一带一路”沿线国家出口贸易碳排放、进口贸易碳排放驱动因素如下。

**Table 4.** Analysis of driving factors of exported carbon emission from China’s transport industry to countries along the Belt and Road (Unit: mt)

**表 4.** 中国运输业对“一带一路”沿线国家出口碳排放驱动因素分析(单位: mt)

年份	驱动因素	中国运输业子部门						总量ΔC
		铁路运输	陆路运输	管道运输	海上运输	内河运输	空中运输	
2006~2009	ΔF	-5.751	-1.178	-0.084	0.002	-1.077	-2.466	-0.948
	ΔL	3.303	0.533	0.078	0.009	0.469	1.510	0.705
	ΔQ	-0.148	-0.027	-0.003	0.000	-0.039	-0.045	-0.033
	ΔS	2.972	0.545	0.064	0.007	0.792	0.897	0.666
2009~2013	ΔF	-5.348	-1.132	-0.093	-0.005	-1.917	-1.103	-1.098
	ΔL	2.275	0.155	0.074	0.005	0.692	0.766	0.583
	ΔQ	0.143	0.023	0.004	0.000	0.037	0.044	0.035
	ΔS	4.746	0.746	0.123	0.017	1.204	1.483	1.174
2013~2016	ΔF	-0.112	-0.197	0.070	0.010	0.160	-0.677	0.521
	ΔL	1.306	-0.064	0.058	-0.005	0.270	0.443	0.604
	ΔQ	0.898	0.113	0.028	0.004	0.213	0.293	0.248
	ΔS	1.508	0.182	0.048	0.006	0.361	0.479	0.431

续表

	$\Delta F$	-15.523	-2.944	-0.206	0.006	-3.770	-6.063	-2.545
2006~2016	$\Delta L$	12.825	1.330	0.349	0.021	2.766	5.093	3.265
	$\Delta Q$	1.282	0.222	0.029	0.003	0.334	0.395	0.299
	$\Delta S$	7.209	1.091	0.194	0.021	1.835	2.200	1.868

对于出口运输碳驱动因素分解结果来看(表 4 所示),中国运输业在 2006 年至 2009 年期间出口运输碳变化量为 0.377 mt,其中直接碳排放强度效应导致的抑制碳排放作用最强,为-5.751 mt。贸易结构效应在这期间同样具有抑制碳排放作用,为-0.148 mt。投入产出结构效应和贸易规模效应分别促进 3.303 mt 以及 2.972 mt 出口运输碳排放。在 2009 年至 2013 年期间,主导中国运输业出口运输碳上升 1.816 mt 的驱动因素是贸易规模效应、投入产出结构效应以及贸易结构效应,分别为 4.746 mt、2.275 mt 以及 0.143 mt。在 2013 年至 2016 年期间,中国运输业的出口运输碳变化量为 3.601 mt,直接碳排放强度效应抑制了 0.112 mt 运输碳排放,而贸易规模效应、投入产出结构效应以及贸易结构效应体现了较强的促进出口运输碳排放的作用,分别为 1.508 mt、1.306 mt 以及 0.898 mt。铁路运输是表现出较强的直接碳排放强度效应减排效应的子部门(-15.825 mt),但其投入产出结构效应也表现出较强的促排效应(12.825 mt)。

**Table 5.** Analysis of driving factors of imported carbon emission from countries along the Belt and Road to China's transport industry (Unit: mt)

**表 5.** 中国运输业对“一带一路”沿线国家进口碳排放驱动因素分析(单位: mt)

年份	驱动因素	中国运输业子部门						总量 $\Delta C$
		铁路运输	陆路运输	管道运输	海上运输	内河运输	空中运输	
2006~2009	$\Delta F$	-0.650	-0.103	-0.281	-0.010	-0.117	-0.007	-0.131
	$\Delta L$	-0.387	-0.061	-0.167	-0.006	-0.070	-0.004	-0.078
	$\Delta Q$	0.164	0.015	0.140	0.006	-0.043	0.007	0.037
	$\Delta S$	1.855	0.296	0.794	0.029	0.342	0.020	0.374
2009~2013	$\Delta F$	-1.678	-0.246	-0.753	-0.026	-0.294	-0.019	-0.338
	$\Delta L$	1.104	0.162	0.496	0.017	0.194	0.013	0.223
	$\Delta Q$	0.179	-0.054	0.155	-0.002	0.047	0.002	0.032
	$\Delta S$	2.478	0.372	1.105	0.040	0.433	0.028	0.500
2013~2016	$\Delta F$	-0.378	-0.047	-0.177	-0.005	-0.065	-0.004	-0.080
	$\Delta L$	-0.850	-0.116	-0.389	-0.012	-0.149	-0.010	-0.174
	$\Delta Q$	0.761	-0.010	0.435	-0.005	0.111	0.009	0.221
	$\Delta S$	1.597	0.214	0.734	0.023	0.279	0.018	0.329
2006~2016	$\Delta F$	-3.406	-0.446	-1.561	-0.046	-0.600	-0.038	-0.713
	$\Delta L$	-0.064	-0.011	-0.026	-0.001	-0.013	-0.001	-0.013
	$\Delta Q$	1.137	-0.081	0.821	0.000	0.072	0.023	0.303
	$\Delta S$	6.611	0.970	2.897	0.096	1.223	0.070	1.356

对于进口运输碳驱动因素分解结果来看(表 5 所示), 中国运输业在 2006 年至 2009 年期间进口运输碳变化量为 0.982 mt, 其中直接碳排放强度效应导致的抑制碳排放作用最强, 为-0.650 mt。投入产出结构效应在这期间同样具有抑制碳排放作用, 为-0.387 mt。贸易规模效应具有最强的促进碳排放作用, 1.855 mt 的影响结果是导致中国运输业在 2006 年至 2009 年期间进口运输碳上升的主要驱动因素。在 2009 年至 2013 年期间, 主导中国运输业进口运输碳上升 2.085 mt 的驱动因素是贸易规模效应、投入产出结构效应以及贸易结构效应, 分别为 2.478 mt、1.104 mt 以及 0.179 mt。直接碳排放强度效应抑制了中国运输业在这期间 1.678 mt 的进口运输碳。这一期间中国消费需求极大程度上推动中国运输业进口碳排放的增长, 中国经济结构调整和进口规模扩张是导致中国运输业碳排放的增长, 而提高运输业的能源利用率则可以抑制这些影响。在 2013 年至 2016 年期间, 中国运输业的进口运输碳变化量为 1.090 mt, 投入产出结构效应和直接碳排放强度效应体现了较强的抑制运输碳排放的作用, 分别为-0.850 mt 和-0.378 mt。贸易规模效应和贸易结构效应是两个影响程度最高的促进碳排放的驱动因素, 分别为 1.579 mt 和 0.761 mt。铁路运输是表现出较强的直接碳排放强度效应减排效应的子部门(-3.406 mt), 但其贸易规模效应也表现出较强的促排效应(6.611 mt)。

总体来看, 直接碳排放强度效应对中国运输业在“一带一路”沿线国家的进出口碳排放具有持续且显著的抑制作用。这体现出中国运输业在传统能源利用技术以及新能源研发普及等方面作出了不懈的努力与十足的进步, 先进的运输科技可以有效地降低运输碳排放。另一方面, 贸易规模效应对中国运输业在“一带一路”沿线国家的进出口碳排放具有持续且显著的促进作用。受到金融危机以及欧洲主权债务危机的影响, “一带一路”沿线国家的需求相对减少, 导致贸易规模效应在相应期间的影响程度减弱。贸易结构效应随着时间推移, 对进出口运输碳排放的促进作用逐渐提高, 而投入产出结构效应对进出口运输碳排放的促进作用有逐渐减弱的趋势, 这可能与中国在特定时期存在经济结构的调整有一定的关联, 说明中国运输业在早期与其他生产部门之间的结构变化更倾向于碳密集产业, 后期的产业联动则有低碳产业方向的趋势。

#### 4. 结论与政策建议

本文使用 IO-SDA 模型测算了“一带一路”倡议背景下 2006 年至 2016 年中国运输业的碳排放变化以及驱动因素, 结论如下:

1) 中国运输业对在“一带一路”沿线国家的进出口运输贸易碳均呈现逐年上升的趋势, 随着双边贸易的深入, 中国运输业造成的碳排放量还会继续升高。陆路运输和内河运输分别是中国运输业进、出口的碳排放量的主要来源部门, 这是由中国在“一带一路”沿线国家的贸易运输方式决定的;

2) 中国运输业是“一带一路”沿线国家的碳净出口国家, 承担着“一带一路”沿线国家的碳排放责任。中国运输业使得“一带一路”沿线国家成为碳排放的受益者, 没有被中国转移碳排放, 成为所谓的“污染天堂”, 体现出“一带一路”倡议的合作共赢的理念。

3) 直接碳排放强度效应对中国运输业在“一带一路”沿线国家的进出口碳排放具有持续且显著的抑制作用; 贸易规模效应对进出口碳排放起到持续且显著的促进作用。贸易结构效应随着时间推移, 对进出口运输碳排放的促进作用逐渐提高, 而投入产出结构效应对进出口运输碳排放的促进作用有逐渐减弱的趋势。

本文提出建议如下: 中国运输业碳减排的治理应有明确的区域减排目标。中国相关部门可以促进能源开发、转换和利用方面的技术研究和开发(例如, 清洁煤和生物燃料技术), 鼓励天然气、太阳能等清洁能源的应用, 通过财政补贴和碳交易政策, 努力提高非化石能源在工业能源消费中的比重, 并推进研究新能源在不同交通运输工具上的应用以及政策, 例如货车、船舶、飞机等, 为将来绿色跨境运输打下

基础。此外，在制定能源规划和低碳经济政策时，中国相关部门可以促进区域间的产业转移，以实现中国运输业的减排。

## 参考文献

- [1] 李忠艳. 运输产业集聚对碳中和效果的作用测度及其作用机制[J]. 运输技术, 2023, 42(9): 33-38, 109.
- [2] 李松庆, 裴艳丽. 中国运输业碳排放研究: 文献综述与展望[J]. 运输科技, 2019, 42(2): 12-17.
- [3] Wang, C., Wood, J., Geng, X., Wang, Y., Qiao, C. and Long, X. (2020) Transportation CO<sub>2</sub> Emission Decoupling: Empirical Evidence from Countries along the Belt and Road. *Journal of Cleaner Production*, **263**, Article ID: 121450. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121450>
- [4] Du, Q., Lu, C., Zou, P.X.W., Li, Y., Li, J. and Cui, X. (2021) Estimating Transportation Carbon Efficiency (TCE) across the Belt and Road Initiative Countries: An Integrated Approach of Modified Three-Stage Epsilon-Based Measurement Model. *Environmental Impact Assessment Review*, **90**, Article ID: 106634. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106634>
- [5] Zhang, L., Jiang, C., Cai, X., Huang, X., Wu, J. and Chen, P. (2023) Transport-Environmental Kuznets Curve Hypothesis: Evidence from Belt and Road. *SAGE Open*, **13**, No. 2. <https://doi.org/10.1177/21582440231177873>
- [6] Li, R., Li, L. and Wang, Q. (2022) The Impact of Energy Efficiency on Carbon Emissions: Evidence from the Transportation Sector in Chinese 30 Provinces. *Sustainable Cities and Society*, **82**, Article ID: 103880. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103880>
- [7] Sun, Y., Kamran, H.W., Razaq, A., Qadri, F.S. and Suksatan, W. (2022) Dynamic and Causality Linkages from Transportation Services and Tourism Development to Economic Growth and Carbon Emissions: New Insights from Quantile ARDL Approach. *Integrated Environmental Assessment and Management*, **18**, 1272-1287. <https://doi.org/10.1002/ieam.4570>
- [8] Jiang, T., Yu, Y. and Yang, B. (2022) Understanding the Carbon Emissions Status and Emissions Reduction Effect of China's Transportation Industry: Dual Perspectives of the Early and Late Stages of the Economic "New Normal". *Environmental Science and Pollution Research*, **29**, 28661-28674. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18449-4>
- [9] 刘小兰, 朱颖. 长江经济带运输业碳排放效率非均衡性及驱动因素分析[J]. 生态经济, 2023, 39(11): 47-53.
- [10] 严桂琴, 徐梦月. 基于 LMDI 的运输业碳排放脱钩及其影响因素分析[J]. 运输科技, 2024, 47(2): 10-15.
- [11] 刘佳. 基于投入产出法的甘肃省交通运输业对区域 GDP 贡献分析[J]. 甘肃科技, 2023, 39(8): 1-6.
- [12] 王火根, 汪钰婷, 肖丽香. 基于 IO-SDA 法的 2020~2060 年中国行业 CO<sub>2</sub> 排放预测与分析[J]. 中国环境科学, 2024, 44(3): 1743-1755.