

# 中国交通运输碳排放影响因素研究 ——基于双层次计量模型分析

王靖添<sup>1,2</sup> 马晓明<sup>1,2,†</sup>

1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871;

† 通信作者, E-mail: xmma@pku.edu.cn

**摘要** 构建中国交通运输碳排放总量层次和强度层次影响因素模型, 使用 Johansen 协整分析和误差修正模型等计量模型进行实证分析。研究表明, 交通运输碳排放主要受经济发展水平、交通运输结构、运输装备能效水平、运输组织水平和基础设施密度等因素影响。实证结果显示, 国内生产总值、铁路运输占比、乘用车燃料消耗量、百人电话拥有量和公路路网长度对交通运输碳排放影响的弹性系数分别为 0.74%, -2.60%, 2.01%, -0.68% 和 0.17%。因此, 在经济正常发展情景下, 提升铁路等低碳运输方式的比例, 推进降低传统汽车燃油消耗水平, 推广纯电动汽车等新能源汽车, 加快智慧交通发展, 有助于控制交通运输碳排放水平。

**关键词** 交通运输; 碳排放; 影响因素; 协整分析; 双层次模型

## Influencing Factors of Carbon Emissions from Transportation in China: Empirical Analysis Based on Two-level Econometrics Method

WANG Jingtian<sup>1,2</sup>, MA Xiaoming<sup>1,2,†</sup>

1. School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; 2. College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: xmma@pku.edu.cn

**Abstract** This study constructs a two-level influence factor model on the carbon emission amount and intensity of China's transport sector. Econometric methods including Johansen co-integration analysis and error correction model are used for empirical analysis. The results show that the transport sector's emissions are mainly affected by factors including economic development level, transport sector structure, transportation equipment energy efficiency, transportation management, infrastructure system intensity and so forth. Empirical analysis shows that the impact elastic coefficients of gross domestic product, proportion of railway transport, vehicle fuel consumption, telephone ownership rate per one hundred people and road network length are 0.74%, -2.60%, 2.01%, -0.68% and 0.17% respectively. Under business as usual scenario in terms of economic development, increasing the proportion of low-carbon transportation modes such as railway, lowering fuel consumption of conventional vehicles, promoting new-energy vehicles and accelerating the development of smart transportation can all contribute to controlling the amount of carbon emissions from the transport sector.

**Key words** transportation; carbon emissions; influencing factors; co-integration analysis; two-level model

气候变化是当今人类社会面临的共同挑战。工业革命以来的人类活动, 特别是发达国家大量消费化石能源所产生的 CO<sub>2</sub> 累积排放, 导致大气中温室气体浓度显著增加, 加剧以变暖为主要特征的全球

气候变化。为积极应对气候变化, 中国明确了自主行动目标: CO<sub>2</sub> 排放 2030 年左右达到峰值, 并争取尽早达峰, 争取在 2060 年前实现碳中和。国家统计局公布的数据显示, 2017 年交通运输仓储和邮政业

国家交通运输部交通运输战略规划政策项目(2016-16-1)和国家交通运输部交通运输节能减排能力建设项目(2015-JNJP-007-053, 2013-JNJP-002-011)资助

收稿日期: 2020-11-03; 修回日期: 2021-03-20

能源消费占全国总量的比例为 9.41%。交通运输行业是能源消耗及碳排放三大行业之一,是应对气候变化的重点领域。同时,作为国民经济发展的先导性和基础性行业,交通运输行业在 2030 年前仍将保持快速发展态势,交通运输行业碳排放总量控制将是我国 2030 年碳排放达峰的重要影响因素。因此,加快研究和识别中国交通运输碳排放的影响因素,支撑制定具有针对性的低碳交通政策措施,具有重要的理论和现实意义。

目前,学术界主要通过因素分解模型、计量经济模型及综合类模型,研究交通运输碳排放的影响因素。因素分解模型是基于数学逻辑关系识别直接影响因素的方法。例如,Guo 等<sup>[1]</sup>采用对数平均迪氏分解法(LMDI),分析我国京津冀地区交通部门 CO<sub>2</sub> 排放的驱动因素。Lv 等<sup>[2]</sup>应用人口、富裕程度和技术(STIRPAT)模型以及地理加权回归(GWR)模型,分析我国货运碳排放的驱动因素以及城市化对货运碳排放的影响。Lim 等<sup>[3]</sup>分析城市空间分布对交通运输碳排放的影响。Engo<sup>[4]</sup>基于扩展的 Kaya 等式,采用 Tapio 和 LMDI 方法,分析 1990—2016 年喀麦隆交通部门与能源相关的 CO<sub>2</sub> 排放和增长之间的脱钩关系。Solaymani<sup>[5]</sup>运用 LMDI 方法,研究 7 个交通运输 CO<sub>2</sub> 排放大国的碳排放影响因素。Huang 等<sup>[6]</sup>将指标分解分析(IDA)、生产理论分解分析(PDA)和归因分析(AA)相结合,把 CO<sub>2</sub> 运输强度的变化分解为 9 个因子,确定不同区域对各因子的贡献。Li 等<sup>[7]</sup>利用中国 30 个省的数据,采用 Tapio 脱钩指数,从省份的尺度分析交通行业发展与 CO<sub>2</sub> 排放的关系。喻洁等<sup>[8]</sup>基于 LMDI 方法,分析中国交通运输行业碳排放的变化情况。Andreoni 等<sup>[9]</sup>对欧洲水运和航空运输部门 CO<sub>2</sub> 排放趋势进行分解分析。丁金学<sup>[10]</sup>基于交通运输碳排放因素分解模型,定量地分析 1991—2010 年交通能源效率、交通运输结构和交通发展水平等因素对交通运输排放的影响。LMDI 方法在交通运输碳排放影响因素的研究中相对简易,解释影响因素的说服力比较强。

一些学者采取计量经济模型,研究交通运输碳排放的影响因素。例如,Xu 等<sup>[11]</sup>运用分位数计量经济回归模型,探讨驱动交通运输行业 CO<sub>2</sub> 排放的因素,研究结果显示主要影响因素包括人口规模、人均 GDP、交通能源强度、城镇化水平、货运周转量和客运周转量。Lo 等<sup>[12]</sup>使用计量经济学模型,研究航空 CO<sub>2</sub> 排放的决定因素,主要影响因素包括

航空燃料价格、飞行距离和飞机型号等。Lin 等<sup>[13]</sup>采用分位数分析方法,研究 1980—2010 年中国交通运输业人均 GDP、能源强度、碳强度、总人口和城镇化率对 CO<sub>2</sub> 排放的影响。Talbi<sup>[14]</sup>采用向量自回归(VAR)模型,分析 1980—2014 年突尼斯交通部门 CO<sub>2</sub> 排放变化的影响因素,包括经济增长、城镇化率和能源强度等因素。Xu 等<sup>[15]</sup>采用向量自回归模型,分析交通运输行业 CO<sub>2</sub> 排放变化的影响因素。Alshehry 等<sup>[16]</sup>验证了沙特阿拉伯 1971—2011 年的环境库兹涅茨曲线假说,发现在沙特阿拉伯交通运输 CO<sub>2</sub> 排放与经济增长之间不存在倒 U 型关系。Xu 等<sup>[17]</sup>采用 2000—2012 年省级面板数据和非参数相加回归模型,研究我国交通运输行业 CO<sub>2</sub> 排放的关键影响因素。Saboori 等<sup>[18]</sup>采用协整方法,得出经济增长和能源消耗是影响 OECD 国家道路交通碳排放主要因素的结论。Lin 等<sup>[19]</sup>采用协整方法,研究交通运输业 CO<sub>2</sub> 排放与 GDP、城镇化率、能源强度和碳强度等影响因素之间的长期关系。从这些研究可以看出,OLS 回归模型、协整分析和向量自回归模型等方法能够在定性分析判断的基础上,通过对时间序列的研究,量化识别交通运输碳排放的影响因素。

此外,部分学者采用投入产出模型、可计算一般均衡模型(CGE 模型)和综合评估模型(AIM 模型)等方法,对交通运输碳排放影响因素进行量化研究。例如,Du 等<sup>[20]</sup>利用中国投入产出表的数据,采用假设提取法(HEM),对各个运输子部门(包括铁路、公路、水运和航空)的 CO<sub>2</sub> 排放量进行研究。Mittal 等<sup>[21]</sup>提出一种基于行为参数和交通技术细节的自底向上的客运模型 AIM (Asia-Pacific Integrated model/transport model),研究结果表明出行速度和土地利用方式对出行需求有显著影响。Edelenbosch 等<sup>[22]</sup>量化了活动增长、模式结构、能源强度和燃料组合的变化对客运碳排放路径的影响。Zhang 等<sup>[23]</sup>开发了亚太综合运输模型(AIM),将旅客的选择模式与运输技术细节结合起来。Selvakkumaran 等<sup>[24]</sup>构建 AIM/Enduse 模型,研究泰国交通运输行业碳排放。

综上所述,交通运输碳排放的影响因素主要有经济发展水平、人口规模、交通运输总周转量、交通能源强度、交通运输碳强度、城镇化率、城市空间分布、土地利用方式、运输结构、交通运输效率、产业结构、私家车保有量规模和交通燃料价

格等。

现有研究存在如下不足之处: 1) 系统性解释影响交通运输碳排放影响因素的研究总体上偏宏观层面, 大部分研究只阐述经济水平、人口规模、交通运输总量、城镇化率和交通能源强度等宏观因素, 对进一步提出精准碳减排措施的支撑意义不足; 2) 部分研究阐述的影响因素存在重复解释问题, 如经济水平和交通运输量、交通能耗强度和能源强度等因素同时出现, 产生多重共线性问题; 3) 对部分重要影响因素的量化分析不足, 如从交通运输要素来看, 针对运输结构、运输装备、运输组织和基础设施等因素对碳排放的影响量化研究还需要进一步深入。因此, 需要构建一个具有逻辑思维的分析框架来识别重要的影响因素, 既要避免重复因素解释, 同时能够挖掘深层次的影响因素。

我们认为因素分解模型具有严谨的数学逻辑关系, 是一种识别影响因素的适当方法, 同时, 计量经济学方法在量化分析各因素对交通运输碳排放方面具有优势。因此, 本研究拟采用因素分解方法识别中国交通运输碳排放影响因素, 结合交通运输行业维度逻辑分析, 构建中国交通运输碳排放总量层次和强度层次影响因素模型, 使用 Johansen 协整分析、误差修正模型(VEC)等计量经济学方法进行实证研究, 量化分析各主要因素对交通运输碳排放的影响程度。

## 1 方法与数据

### 1.1 双层次计量模型性构建思路

#### 1.1.1 基于 LMDI 模型的影响因素识别

定量研究 CO<sub>2</sub> 排放影响因素的方法主要有指数分解方法(Index Decomposition Analysis, IDA)和结构分解方法(Structural Decomposition Analysis, SDA)。IDA 中的迪氏分解法(Logarithmic Mean Divisia Index, LMDI)因运用指数平均权重方程, 可实现完全分解。本研究采用以下因素分解式:

$$TCE = \sum_{i,j} TCE_{i,j} = \sum_{i,j} (TE_{i,j} F_j), \quad (1)$$

式中, TCE 表示交通运输碳排放量;  $TCE_{i,j}$  表示第  $i$  种交通运输方式使用第  $j$  中能源燃料产生的碳排放, 其中交通运输方式为公路、铁路、水路和民航, 能源燃料包括汽油、柴油、燃料油、煤油、原油、天然气、电力、煤炭和焦炭;  $TE_{i,j}$  表示为第  $i$  种交通方式的第  $j$  种能源燃料消耗量;  $F_j$  表示为第  $j$  种能源燃料的碳排放系数。

基于以上交通运输碳排放核算方法, 对其进行分解:

$$TCE = \sum_{i,j} TCE_{i,j} = \sum_{i,j} \left( GDP \times \frac{TT}{GDP} \times \frac{TT_i}{TT} \times \frac{TE_{ij}}{TT_i} \times F_j \right), \quad (2)$$

式中, GDP 为国内生产总值, 反映经济发展水平; TT 为交通运输总周转量;  $TT_i$  为第  $i$  种交通运输方式的运输周转量。基于以上分析, 经济发展水平(GDP)、交通效能(单位 GDP 的交通运输周转量)、运输结构(不同交通运输方式占比)、交通运输的碳排放强度(单位交通运输周转量的碳排放量)是影响交通运输碳排放因素。

本研究分两个层次进行分析, 第一个层次为总量层次, 也就是基于 LMDI 识别出来的影响因素: 经济发展水平(GDP)、交通运输效能(TTP)、交通运输结构(RS)和交通运输碳排放强度(TCI):

$$TCE = f(GDP, TTP, RS, TCI); \quad (3)$$

第二个层次重点对交通运输碳排放强度的影响因素进行识别, 包括交通运输装备、运输组织管理和交通基础设施等 3 个维度。我们认为运输装备燃料消耗效率(VE)、运输组织效率水平(IT)和交通基础设施网络密度(RL)都对碳排放强度产生影响:

$$TCI = f(VE, IT, RL). \quad (4)$$

综上所述, 本研究构建的双层次模型初步识别影响因素包括经济发展水平、交通运输效能、交通运输结构、运输装备燃料消耗效率、运输组织效率和交通基础设施路网密度等。双层次模型构建逻辑是通过将交通运输碳排放强度变量分别作为总量层次模型的解释变量和强度层次模型的被解释变量, 将影响因素分层进行量化分析, 一方面解释了经济水平(交通运输发展水平)、交通运输结构和交通运输碳强度对碳排放的影响弹性, 同时进一步将交通运输碳强度的影响因素进行量化识别, 量化了运输装备、运输组织和交通设施等交通运输行业维度因素对碳排放的影响弹性。

#### 1.1.2 总量层次影响因素分析与变量选取

1) 从变化趋势看, 经济发展水平(GDP)与交通运输总周转量(TT)具有一致性的关系, 且存在高度相关性。从定性分析结果看, 经济水平和交通运输发展水平显然是影响交通运输碳排放的重要因素。本文选择 1980—2019 年国家统计局发布的 GDP(不变价)和交通运输换算周转量(加权求和客运周转量

和货运周转量)(图1),在进行一阶差分计算并确认数据平稳后,采用一元协整方法研究两者的关系。实证结果显示,具有高度相关性(调整系数 $R^2$ 为0.98),方程结果显示GDP每增长1%,交通运输量将增长0.51%。因此,在研究交通运输碳排放的影响因素中,经济发展水平和交通运输需求量只能选择其中之一,避免多重共线性问题。本模型选择经济发展水平(GDP)作为主要解释变量之一。

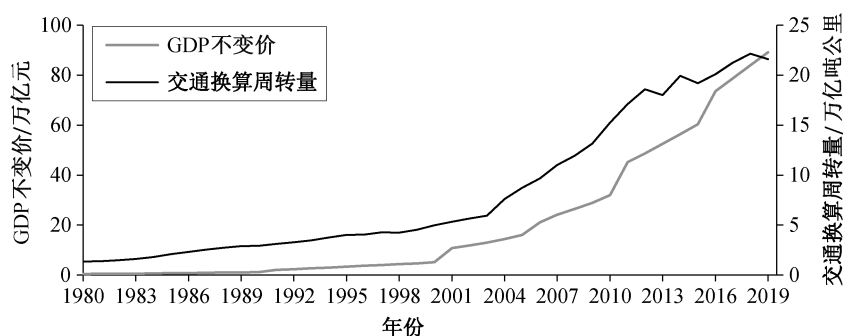
2) 由于不同交通运输方式的能耗强度和碳排放强度有差异,铁路运输占比变化影响交通运输碳排放总量。交通运输部公布的数据显示,铁路运输能耗强度和碳排放强度在各种交通运输方式中最低。以碳排放强度为例,客运方面,公路、水路(邮轮)和民航分别是铁路的7.1倍、47.7倍和19.1倍;货运方面,公路、水路和民航分别是铁路的9.5倍、1.9倍和88.2倍(表1)。可见,在交通运输发展规模不变的情况下,运输结构差异对交通运输碳排放产生较大的影响,因此本研究选择铁路运输占比作为主要解释变量之一。

3) 交通运输碳排放与能源消费之间关系的主要差异在能源结构方面,主要受能源消耗品种的结构影响(图2)。由于不同能源的碳排放因子具有差异性,因此提升低碳能源比例可以降低交通运输系统碳排放水平。通常,若以直接排放为对比口径,则电力的碳排放为零,因此电动化和电气化成为交通运输低碳发展重要方向,推广纯电动汽车、铁路电气化以及交通机械设备油改电等成为重要措施。

基于以上分析,总量层次模型中,选取国内生产总值、铁路运输占比和交通运输碳排放强度作为解释变量进行实证分析。

### 1.1.3 强度层次影响因素分析与变量选取

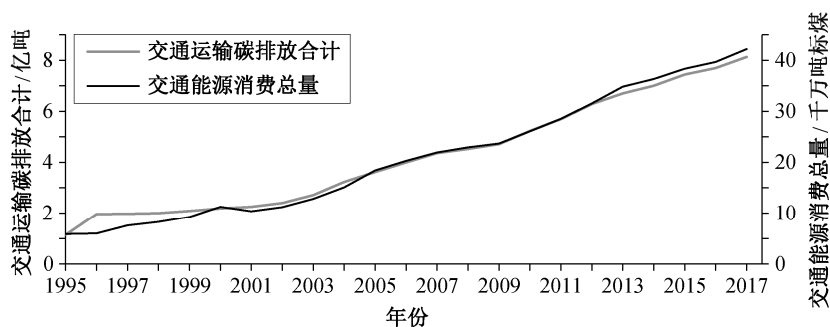
在总量层次模型基础上,进一步研究交通运输碳排放强度的影响因素,构建强度层次影响因素模型,以便更好地解释影响交通运输碳排放因素。交通运输碳排放强度体现了低碳交通的发展水平,按照交通运输框架分析,运输装备能效水平、运输组织效率和基础设施密度都可能对低碳交通发展水平产生影响。



数据来自国家统计局

图1 GDP与交通运输换算周转量变化(1980—2019)

Fig. 1 Change of GDP and traffic turnover(1980—2019)



数据来自中国能源统计年鉴(1997—2018)

图2 交通运输碳排放与能源消费变化(1995—2017)

Fig. 2 Trend of carbon emission and energy consumption in transportation (1995—2017)

表 1 交通运输能耗和碳排放强度相对系数(2012 年)

Table 1 Relative coefficient of transportation carbon emission intensity (2012)

指标	客运		货运	
	单耗系数	CO <sub>2</sub> 排放强度系数	单耗系数	CO <sub>2</sub> 排放强度系数
铁路	1	1	1	1
公路	3.34	7.105	4.47	9.52
水路	24.45	47.68	0.96	1.88
民航	8.628	19.05	39.9	88.2

说明: 根据交通运输部资料整理。

1) 选取乘用车燃油消耗值反映运输装备能效水平。交通运输装备包括乘用车、货车、机车、船舶和飞机等, 交通运输装备能源效率影响能耗水平, 进而影响碳排放量。根据数据可获取性, 本研究进行简化处理, 选择乘用车的燃油消耗值反映运输装备能效水平。该指标数值与交通运输行业能耗变化的总体趋势相同(图 3), 可以反映交通运输装备技术水平的变化趋势。

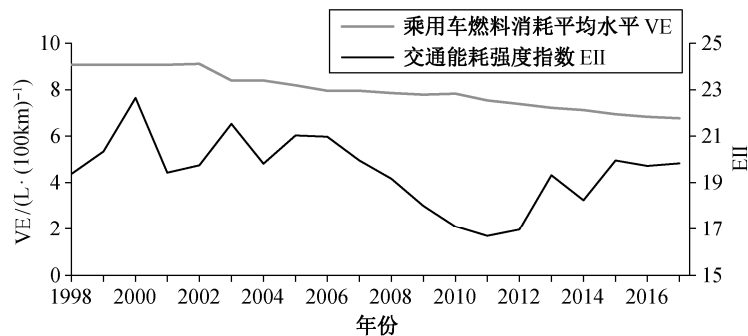
2) 选择百人电话拥有率反映信息化水平, 体现

运输组织效率水平。运输组织是一个管理性的概念, 高效率的运输组织可以提高交通运输效率, 降低碳排放强度。本研究用交通信息化水平相关指标来反映运输组织效率。通常, 智慧交通投资额可以作为反映交通信息化水平的变量, 但受限于数据可获得性。本研究选择百人电话拥有率(图 4)反映社会通信水平在交通运输领域的应用发展情况, 进而间接地量化反映交通运输信息化水平。

3) 选取公路里程数反映交通基础设施发展水平。交通基础设施包括公路、铁路、机场、港口和航道等, 完善和高效的现代交通网络体系刺激交通需求提升, 进而对碳排放产生影响, 公路里程的变化可以在一定程度上反映基础设施规模发展趋势。

## 1.2 模型与方法

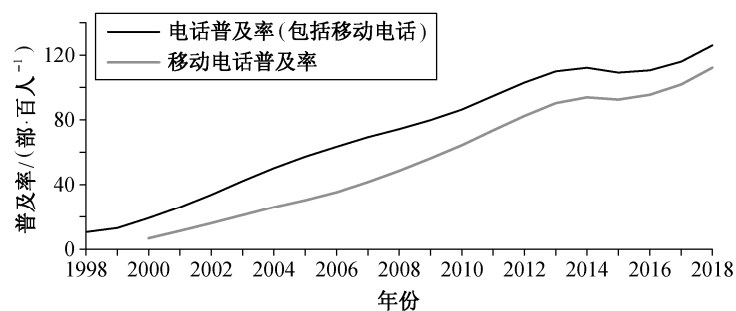
首先, 采用 ADF 检验(augmented Dickey-Fuller test)对时间序列进行平稳性检验。通常, 若原始数据时间序列为非平稳数据, 可采取差分计算后再进行平稳性检验。然后, 采用 Johansen 协整方法<sup>[25]</sup>构建多元模型。具体检验过程是通过计算迹统计量



数据来自工业和信息化部网站、能源与交通创新中心网站

图 3 乘用车燃料消耗水平(VE)与交通运输能耗强度指数(EII)(1998—2017)

Fig. 3 Changes of fuel consumption level of passenger vehicles (VE) and energy intensity index of transportation (EII) (1998—2017)



数据来源: 国家统计局官网

图 4 中国电话普及率变化(1998—2017)

Fig. 4 Telephone penetration rate in China (1998—2017)

(Trace)和最大特征值(Max-Eigenvalue)等统计量进行的,主要解决当时时间序列为非平稳数据时出现的伪回归现象。实际上,“协整”表示变量间的长期均衡关系,若长期均衡存在,则均衡误差应当围绕均衡值 0 波动,即均衡误差  $\mu_t$  应该是一个平稳序列。协整检验分为两类:1)一元模型协整检验,常用恩格尔-格兰杰(Engle-Grange, EG)方法;2)多元模型协整检验,常用 Johansen 协整方法。最后,使用误差修正模型进行修正。

### 1.3 数据来源与描述

1) 总量层次模型变量的选取:被解释变量为交通运输碳排放(TCE),解释变量为经济发展水平(GDP)、交通运输结构(RS)和交通运输碳排放强度(TCI)。交通运输碳排放使用《中国能源统计年鉴》中 1995—2017 年交通邮政仓储业中汽油、柴油、燃料油、煤油、原油、天然气、电力、煤炭和焦炭的消耗数据,加上生活消费中汽油消耗量的 80%(反映私家车能源和碳排放部分),乘以相应碳排放系数,求和加总。经济发展水平使用《中国统计年鉴》中 1995—2017 年 GDP 不变价数据。交通运输结构使用《中国统计年鉴》中 1995—2017 年客运周转量和货运周转量数据,并按照系数进行折算成统一单位(亿吨公里)的交通换算周转量,然后计算不同方式的占比。本研究选择铁路运输占比来反映运输结构。交通运输碳排放强度使用《中国能源统计年鉴》中能源数据、IPCC 碳排放因子和交通运输换算周转量的数据计算得出。

2) 强度层次模型变量的选取:被解释变量为交通运输碳排放强度,解释变量为乘用车燃料消耗值(VE)、百人电话拥有量(IT)和公路里程(RL)。运输装备能效选取乘用车燃料消耗值,数据来自能源与交通创新中心提供的 1998—2017 年乘用车工况油耗水平<sup>①</sup>。信息化水平选择百人电话拥有量,来自《中国统计年鉴》中 1998—2017 年数据。交通基础设施水平选择全国公路里程(RL),来自《中国统计年鉴》中 1998—2017 年数据。模型使用的数据详见附录。

## 2 实证结果分析

### 2.1 单位根检验

总量层次模型数据 ADF 检验:总量层次模型中交通运输碳排放,国内生产总值、铁路运输占比和交通运输碳排放强度的原始时间序列基本上为非平稳时间序列;经过一阶差分检验后,全部为平稳时间序列。强度层次模型数据 ADF 检验:交通运输碳排放强度、百人电话拥有量、公路里程原始时间序列为非平稳序列,乘用车燃料消耗值为平稳时间序列;一阶差分后,所有序列为平稳时间序列。详见表 2。

### 2.2 Johansen 协整检验

基于时间序列一阶差分后均为平稳时间序列,本研究采用协整分析。因为存在多元影响因素,总量层次模型和强度层次模型都采用 Johansen 协整检验分析。协整检验结果拒绝了 0 个协整向量的假设,

表 2 模型数据的 ADF 检验结果  
Table 2 Data stationarity test of the model

总量层次模型数据 ADF 检验				强度层次模型数据 ADF 检验			
变量	带常数项	带趋势项和常数项	无趋势项和常数项	变量	带常数项	带趋势项和常数项	无趋势项和常数项
LTCE	0.170306	-2.163471	5.966642	TCI	-1.836887	-1.282532	-1.233596
LGDP	-0.745388	-2.187184	4.210773	VE	-0.244816	-6.287895***	-3.194223***
LRS	-0.125513	-2.353135	-3.708331***	IT	-1.784379	-0.028873	1.528424
LTCI	-3.534977**	-7.542496***	0.403670	RL	-0.992831	-1.763182	1.871427
$D(LTCE)$	-12.30958***	-11.39467***	-6.698954***	$D(TCI)$	-4.535158***	-4.876172***	-4.431852***
$D(LGDP)$	-4.974221***	-4.190486**	-2.922666***	$D(VE)$	-5.3197***	-5.135895***	-0.930173
$D(LRS)$	-4.903469***	-4.740709***	-3.103529***	$D(IT)$	-3.287111**	-3.204479	-0.766366
$D(LTCI)$	-12.56848***	-11.86527***	-12.78634***	$D(RL)$	-4.459737***	-4.450296**	-3.423156***

注:\*\*\*代表 1% 的显著水平,\*\*代表 5% 的显著水平。

① 能源与交通创新中心. 中国乘用车实际道路行驶与油耗分析年度报告, 2018

总量层次模型时间序列具备协整关系(表 3), 强度层次模型中时间序列协整分析显示同样具有协整关系(表 4)。

总量层次模型协整方程为

$$\text{LTCE} = 0.742778 \text{ LGDP} - 2.604426 \text{ LRS} + 0.599508 \text{ LTCI} - 0.137178. \quad (5)$$

总量层次协整方程实证结果分析如下。

1) 经济水平决定碳排放总体水平, 经济发展水平与交通运输需求量具有高度相关性, 交通运输需求量在一定程度上决定碳排放总体规模。实证分析结果显示, GDP 每增长 1%, 碳排放将增长 0.74%。

2) 在相同的交通运输需求情况下, 运输结构差异会对交通碳排放总量产生较大的影响。如提高铁路运输占比, 将有助于降低交通运输碳排放总量。实证分析结果显示, 铁路运输占比每提高 1%, 交通运输碳排放将减少 2.6%。

3) 交通运输碳排放强度是反映低碳交通水平的重要指标。实证分析结果显示, 交通运输碳排放强度每下降 1%, 交通运输碳排放总量将下降 0.59%。

强度层次模型协整方程为

$$\text{TCI} = 3.406352 \text{ VE} - 1.162797 \text{ IT} + 0.294279 \text{ RL}. \quad (6)$$

强度层次协整方程实证分析如下。

1) 交通运输装备是交通运输领域重要碳排放源, 车辆燃料消耗水平下降, 将有效地降低行业碳

排放强度水平。实证分析结果显示, 乘用车燃料消耗值每下降 1 个单位, 行业碳排放强度将下降 3.41 个单位。因此, 加快降低运输装备工具的燃料消耗值将对交通运输低碳转型具有重要的意义。通过总量层次模型与强度层面模型转化结果可以得出, 乘用车燃料消耗值每下降 1%, 交通运输碳排放将减少 2.01%。

2) 交通运输组织与管理对碳排放强度有直接的影响。提高交通信息化水平, 发展智慧交通, 有助于提高运输效率, 降低碳排放强度。实证分析结果显示, 信息化水平每提升 1 个单位, 交通运输碳排放强度降低 1.16 个单位。通过总量层次模型与强度层面模型转化结果可以得出, 信息化水平每提升 1%, 交通运输碳排放降低 0.68%。

3) 交通基础设施水平对碳排放强度也有直接的影响。交通基础设施完善, 综合交通网络健全, 公路路网密度完善, 有助于各个区域、省份、城镇以及乡村的链接。实证分析结果显示, 公路里程每提升 1 个单位, 交通运输碳排放强度提升 0.29 个单位。主要原因可能是路网更加便捷, 刺激交通需求增加, 且末端节点的变动影响了碳排放强度变化。通过总量层次模型与强度层面模型转化结果可得, 交通基础设施水平每提升 1%, 碳排放提升 0.17%。

### 2.3 误差修正模型

协整反映长期的均衡关系, 本研究对总量层次

表 3 总量层次模型协整分析结果

Table 3 Johansen co-integration analysis of the total volume level model

原假设	特征根	无限制协整秩检验(迹统计)			无限制协整秩检验(最大特征值)		
		迹统计	5%的临界值	P**	最大特征值统计	5%的临界值	P**
0 个协整向量*	0.854173	77.71897	63.87610	0.0022	40.43207	32.11832	0.0038
至多 1 个协整向量	0.645011	37.28690	42.91525	0.1631	21.74903	25.82321	0.1577
至多 2 个协整向量	0.418396	15.53787	25.87211	0.5301	11.38127	19.38704	0.4748
至多 3 个协整向量	0.179575	4.156595	12.51798	0.7193	4.156595	12.51798	0.7193

说明: 迹统计检验显示在 5%的水平下存在一个协整关系; \*表示在 0.05 水平上拒绝假设, \*\*表示 MacKinnon-Haug-Michelis (1999) P 值。下同。

表 4 强度层次模型协整分析结果

Table 4 Johansen co-integration analysis of intensity level model

原假设	特征根	无限制协整秩检验(迹统计)			无限制协整秩检验(最大特征值)		
		迹统计	5%的临界值	P**	最大特征值统计	5%的临界值	P**
0 个协整向量*	0.761930	41.89466	40.17493	0.0332	25.83346	24.15921	0.0294
至多 1 个协整向量	0.397948	16.06120	24.27596	0.3752	9.133391	17.79730	0.5795
至多 2 个协整向量	0.317971	6.927808	12.32090	0.3324	6.888289	11.22480	0.2593
至多 3 个协整向量	0.002193	0.039519	4.129906	0.8707	0.039519	4.129906	0.8707

模型协整关系进行误差修正模型分析。实证分析结果显示,交通运输碳排放与经济发展水平、运输结构和交通碳强度长期均衡之间的偏差,在滞后一期(即  $t-1$  期)有 3.17% 被修正。强度层次模型是通过传导机制影响交通运输碳排放总量,因此不再做误差修正。

## 2.4 模型不足之处

由于受到相关变量时间序列数据获得性的限制,部分变量选择采取简化处理方式。例如,因无法获取智慧交通投资额时间序列数据来反映交通运输信息化水平,本研究选择电话普及率,间接地反映全社会及交通运输信息化水平,在一定程度上削弱了模型的解释力度。今后可以针对此类问题,进一步识别和收集更加符合客观情况的指标和数据,逐步优化模型。

## 3 讨论与建议

基于实证研究,我们发现中国交通运输碳排放的影响因素为经济发展水平(交通运输总需求)、交通运输结构、运输装备能效、运输组织水平和基础设施密度,分别用国内生产总值、铁路运输占比、乘用车燃料消耗值、百人电话拥有量和公路路网长度等指标反映,弹性系数分别为 0.74%, -2.60%, 2.01%, -0.68% 和 0.17% (表 5)。

1) 交通运输结构调整是最具力度的交通运输碳减排措施,但目前缺乏市场化机制驱动。我国在推进交通运输结构性碳减排的过程中,主要经历区域试点和全国推广两个阶段。2017 年以来,我国开始探索引导长距离大宗货物运输由公路运输向铁路运输转移,环境保护部和交通运输部等机构以及京津冀等 6 省市推进实施了“天津、河北及环渤海所有集疏港煤炭主要由铁路运输,禁止环渤海港口接收柴油货车运输的集疏港煤炭,大幅提升区域内铁路货运比例”结构性减排举措。2018 年 9 月,国务

院办公厅发布《推进运输结构调整三年行动方案(2018—2020 年)》,明确提出到 2020 年,全国铁路货运量比 2017 年增加 11 亿吨,水路货运量比 2017 年增加 5 亿吨,沿海港口大宗货物公路运输量比 2017 年减少 4.4 亿吨,标志着基于低碳发展目标的交通运输结构调整政策全面推广。经过 3 年左右的推进实施,运输结构调整取得一些效果。交通运输部发布的数据显示,2019 年,我国铁路货运量比 2017 年增长 7 亿吨;10 年来,水路货运量年均增长 9.5%,集装箱铁水联运量更是年均增长 30% 左右,集装箱铁水联运比例由 2016 年的 1.25% 增至 2019 年的 1.97%。但是,工作进度仍不及预期,也反映出交通运输结构调整是一项系统和复杂的工程,核心问题在于铁路货物运价的相对优势具有不确定性。根据我们的研究测算结果,大秦线路和包秦线路的铁路运费比公路运费低 8.04% 和 22.71%,朔沧线路和神天线路铁路的运费比公路运费高 21.01% 和 17.20%。因此,在没有形成市场化驱动机制的情况下,通过行政措施推动,公路转铁路的边际效果会逐步降低。未来,我们建议,加快铁路领域改革,释放铁路货运企业的积极性,形成面向市场的铁路货运价格机制。

2) 推广纯电动等新能源汽车是我国低碳交通发展显著成果之一。国家政策的大力支持和引导是我国新能源汽车推广应用快速发展的重要原因。从 2009 年我国新能源汽车产业起步至今,产业自身在探索中前进,国家政策也随着产业的发展不断调整,可分为 4 个阶段。第一阶段是 2009—2013 年,为新能源汽车的发展初期:我国新能源汽车发展起步,是技术、产品、用户、市场的积累期。2009 年 1 月,财政部、科技部联合启动“十城千辆节能与新能源汽车示范推广应用工程”,拉开我国新能源汽车产业发展的序幕。第二阶段是 2014—2015 年,为新能源汽车的高速发展期:国家出台系列支持政策,

表 5 中国交通运输碳排放影响因素弹性系数  
Table 5 Elastic coefficient of carbon emission factors in China's transportation

影响因素	具体指标	弹性系数/%
经济发展水平(交通运输总需求)	国内生产总值(GDP)	0.74
交通运输结构	铁路运输占比(RS)	-2.60
运输装备能效	乘用车燃料消耗值(VE)	2.01
运输组织水平(信息化水平)	百人电话拥有量(IT)	-0.68
基础设施密度	公路路网长度(RL)	0.17



给予高额的财政补贴,补贴范围涉及乘用车、商用车、专用车和充电桩等,制定并颁布一系列国家标准,严格控制产品的准入。第三阶段是2016—2018年,为新能源汽车的持续发展期:国家继续强调新能源汽车的战略地位,但政策支持方式开始转变,直接财政补贴退坡,呈现向配额方式转变的趋势,并开始着力完善新能源汽车配套充电设施网络。第四阶段是2019年至今,新能源产业化和市场化进程加速期:随着特斯拉中国工厂投入建设,比亚迪等国内新能源汽车厂商快速发展,我国构建完成新能源汽车全产业链的布局,为推广应用新能源汽车奠定坚实的基础。公安部发布的数据<sup>①</sup>显示,截至2020年6月,我国新能源汽车保有量达417万辆,销量占全球新能源汽车的55%,是全球新能源汽车保有量最多的国家。当前,我国新能源汽车推广取得实质性成效,为低碳交通发展做出重要贡献。未来,我们建议结合国情,进一步优化完善新能源汽车产业技术路线,确保新能源汽车推广应用优势的持续性和领先性。

3) 交通信息化智能化发展是行业提质增效的必由路径,同时由于效率提升,会协同产生减排效应。我国政府一直都在推进交通运输信息化发展,2016年4月,交通运输部印发《交通运输信息化“十三五”发展规划》,并于2018年开展新一代国家交通控制网及智慧公路试点工作,包括基础设施数字化、车路协同、北斗高精度定位综合应用和“互联网+”路网服务等内容,并选择延崇高速和京雄高速开展智慧公路建设,同时上海港和青岛港都建设运营自动化码头。在市场层面,菜鸟网络和滴滴出行等物流和出行互联网平台发展迅速,提高了全社会的运输组织效率,为公众提供了更加便捷的运输服务,有助于提高交通运输碳排放强度。2019年7月,交通运输部印发《数字交通发展规划纲要》,明确到2025年,交通运输基础设施和运载装备全要素、全周期的数字化升级迈出新步伐,数字化采集体系和网络化传输体系基本上形成。预计未来中国交通的智能化、信息化和数字化水平将全面提升,随着5G技术的应用推广,智慧数字交通产业将加速发展。当前,以“互联网+交通”为主要内容的交通信息化智能化进程在中国持续深化,数字智慧交通将成为未来交通发展的显著特征之一,有助于协

同推进交通运输迈向低碳发展时代。我们建议研究系统和全面的交通运输信息化的碳排放交易方法,建立支持协同减排措施的可持续激励机制。

4) 完善交通基础设施网络,诱导增量出行物流需求,促使碳排放有所增加。经过40多年的改革和发展,我国综合交通运输网络体系正在形成。截至2019年底,铁路营业里程达到13.9万公里,高速铁路里程突破3.5万公里,高铁里程超过世界高铁总里程的2/3,居世界第一。公路总里程达到501.25万公里,全国99.99%的乡镇和99.98%的建制村通公路,高速公路里程达14.96万公里,居世界首位。内河航道通航里程达12.73万公里,规模以上港口万吨级泊位达2520个。颁证民航运输机场达238个,全国取证通用机场达209个。基于高效的交通基础设施网络,2019年全社会客、货运输量分别达176.0亿人次和470.6亿吨。铁路旅客周转量和货运量居世界第一,高铁旅客周转量超过全球其他国家和地区的总和。客运服务水平持续提升,铁路和民航客运量年均增长率达到逾8%的水平。可见,日益完善的交通基础设施网络刺激了交通运输需求的上升,对碳排放增加具有促进作用。因此,完善综合交通运输网络体系,在为公众提供更加便捷和高效运输服务的基础上,更需要在运输结构、运输装备和运输组织上采取措施,促进交通运输实现高品质、低碳化的高质量发展格局。

## 参考文献

- [1] Guo M, Meng J. Exploring the driving factors of carbon dioxide emission from transport sector in Beijing-Tianjin-Hebei region. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 226: 692–705
- [2] Lv Qian, Liu Haibin, Yang Dongyang, et al. Effects of urbanization on freight transport carbon emissions in China: common characteristics and regional disparity. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 211: 481–489
- [3] Lim J, Kang M, Jung C. Effect of national-level spatial distribution of cities on national transport CO<sub>2</sub> emissions. *Environmental Impact Assessment Review*, 2019, 77: 162–173
- [4] Engo J. Decoupling analysis of CO<sub>2</sub> emissions from transport sector in Cameroon. *Sustainable Cities and Society*, 2019, 51: 101732

① 公安部政府信息公开. <https://app.mps.gov.cn/gdnps/pc/content.jsp?id=7647257&mtype=>

- [5] Solaymani S. CO<sub>2</sub> emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: the case of transport sector. *Energy*, 2019, 168: 989–1001
- [6] Huang Fei, Zhou Dequn, Wang Qunwei, et al. Decomposition and attribution analysis of the transport sector's carbon dioxide intensity change in China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2019, 119: 343–358
- [7] Li Yi, Du Qiang, Lu Xinran, et al. Relationship between the development and CO<sub>2</sub> emissions of transport sector in China. *Transportation Research Part D*, 2019, 74: 1–14
- [8] 喻洁, 达亚彬, 欧阳斌. 基于 LMDI 分解方法的中国交通运输行业碳排放变化分析. *中国公路学报*, 2015(10): 112–119
- [9] Andreoni V, Galmarini S. European CO<sub>2</sub> emission trends: a decomposition analysis for water and aviation transport sectors. *Energy*, 2012, 45(1): 595–602
- [10] 丁金学. 我国交通运输业碳排放及其减排潜力分析. *综合运输*, 2012(12): 20–26
- [11] Xu B, Lin B. Investigating the differences in CO<sub>2</sub> emissions in the transport sector across Chinese provinces: evidence from a quantile regression model. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 175: 109–122
- [12] Lo P L, Martini G, Porta F, et al. The determinants of CO<sub>2</sub> emissions of air transport passenger traffic: an analysis of Lombardy (Italy). *Transport Policy*, 2018, 91: 108–119
- [13] Lin B, Benjamin N I. Influencing factors on carbon emissions in China transport industry: a new evidence from quantile regression analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 150: 175–187
- [14] Talbi B. CO<sub>2</sub> emissions reduction in road transport sector in Tunisia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 69: 232–238
- [15] Xu B, Lin B. Differences in regional emissions in China's transport sector: determinants and reduction strategies. *Energy*, 2016, 95: 459–470
- [16] Alshehry A S, Belloumi M. Study of the environmental Kuznets curve for transport carbon dioxide emissions in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 75: 1339–1347
- [17] Xu B, Lin B. Factors affecting carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions in China's transport sector: a dynamic nonparametric additive regression model. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 101: 311–322
- [18] Saboori B, Sapri M, bin Baba M. Economic growth, energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions in OECD (Organization for Economic Co-operation and Development)'s transport sector: a fully modified bi-directional relationship approach. *Energy*, 2014, 66: 150–161
- [19] Lin B, Xie C. Reduction potential of CO<sub>2</sub> emissions in China's transport industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 689–700
- [20] Du Huibin, Chen Zhenni, Peng Binbin, et al. What drives CO<sub>2</sub> emissions from the transport sector? A linkage analysis. *Energy*, 2019, 175: 195–204
- [21] Mittal S, Dai Hancheng, Fujimori S, et al. Key factors influencing the global passenger transport dynamics using the AIM/transport model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 55: 373–388
- [22] Edelenbosch O Y, McCollum D L, van Vuuren D P, et al. Decomposing passenger transport futures: comparing results of global integrated assessment models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2017, 55: 281–293
- [23] Zhang Runsen, Long Yin, Wu Wenchao, et al. How do transport policies contribute to a low carbon city? An integrated assessment using an urban computable general equilibrium model. *Energy Procedia*, 2018, 152: 606–611
- [24] Selvakumaran S, Limmeechokchai B. Low carbon society scenario analysis of transport sector of an emerging economy — the AIM/Enduse modelling approach. *Energy Policy*, 2015, 81: 199–214
- [25] Johansen S. Likelihood-based Inference in cointegrated vector autoregressive models. Oxford: Oxford University Press, 1995

## 附录

## 总量层次模型数据

Data of the Total Volume Level Model

年份	TCE/万吨	GDP 不变价/亿元	RS/%	TCI
1995	11392.65	33642.90	42.07	28.46
1996	19570.65	36981.20	41.17	48.26
1997	19778.51	40397.00	40.07	46.38
1998	20019.65	43566.60	38.92	47.03
1999	20850.02	46904.50	38.04	45.89
2000	21938.84	50886.70	37.35	44.20
2001	22524.21	108639.20	36.95	42.24
2002	24078.69	118561.90	36.91	42.56
2003	27123.20	130463.20	37.47	45.55
2004	32271.91	143657.80	33.16	42.34
2005	36191.99	160027.00	31.02	41.38
2006	40018.88	211147.70	30.03	41.38
2007	43605.45	241195.80	28.66	39.62
2008	45203.05	264472.80	27.95	37.79
2009	47094.34	289329.90	25.54	35.76
2010	52259.04	320102.60	24.22	34.27
2011	57001.96	451480.10	23.24	33.33
2012	62809.97	486983.30	21.34	33.79
2013	67049.15	524803.10	22.50	37.19
2014	70032.14	563773.80	20.08	35.15
2015	74462.31	603470.90	19.06	38.77
2016	76976.29	736036.50	18.48	38.29
2017	81280.61	787170.40	19.44	38.22

说明: 数据来自中国统计年鉴, 中国能源统计年鉴, 国家统计局以及交通运输部。

## 强度层次模型数据

Data of Intensity Level Model

年份	TCI	VE/(L·(100km) <sup>-1</sup> )	IT/(部·百人 <sup>-1</sup> )	RL/(10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup> )
1998	47.03	9.07	10.53	127.85
1999	45.89	9.07	13.00	135.17
2000	44.20	9.07	19.10	167.98
2001	42.24	9.07	25.90	169.80
2002	42.56	9.11	33.60	176.52
2003	45.55	8.40	42.16	180.98
2004	42.34	8.40	50.03	187.07
2005	41.38	8.19	57.22	334.52
2006	41.38	7.95	63.40	345.70
2007	39.62	7.95	69.45	358.37
2008	37.79	7.85	74.29	373.02
2009	35.76	7.78	79.89	386.08
2010	34.27	7.83	86.41	400.82
2011	33.33	7.54	94.81	410.64
2012	33.79	7.38	103.10	423.75
2013	37.19	7.22	109.95	435.62
2014	35.15	7.12	112.26	446.39
2015	38.77	6.95	109.30	457.73
2016	38.29	6.83	110.55	469.63
2017	38.22	6.77	115.91	477.35

说明: 数据来自中国统计年鉴, 中国能源统计年鉴, 交通运输部, 工信与信息化部以及能源与交通创新中心。